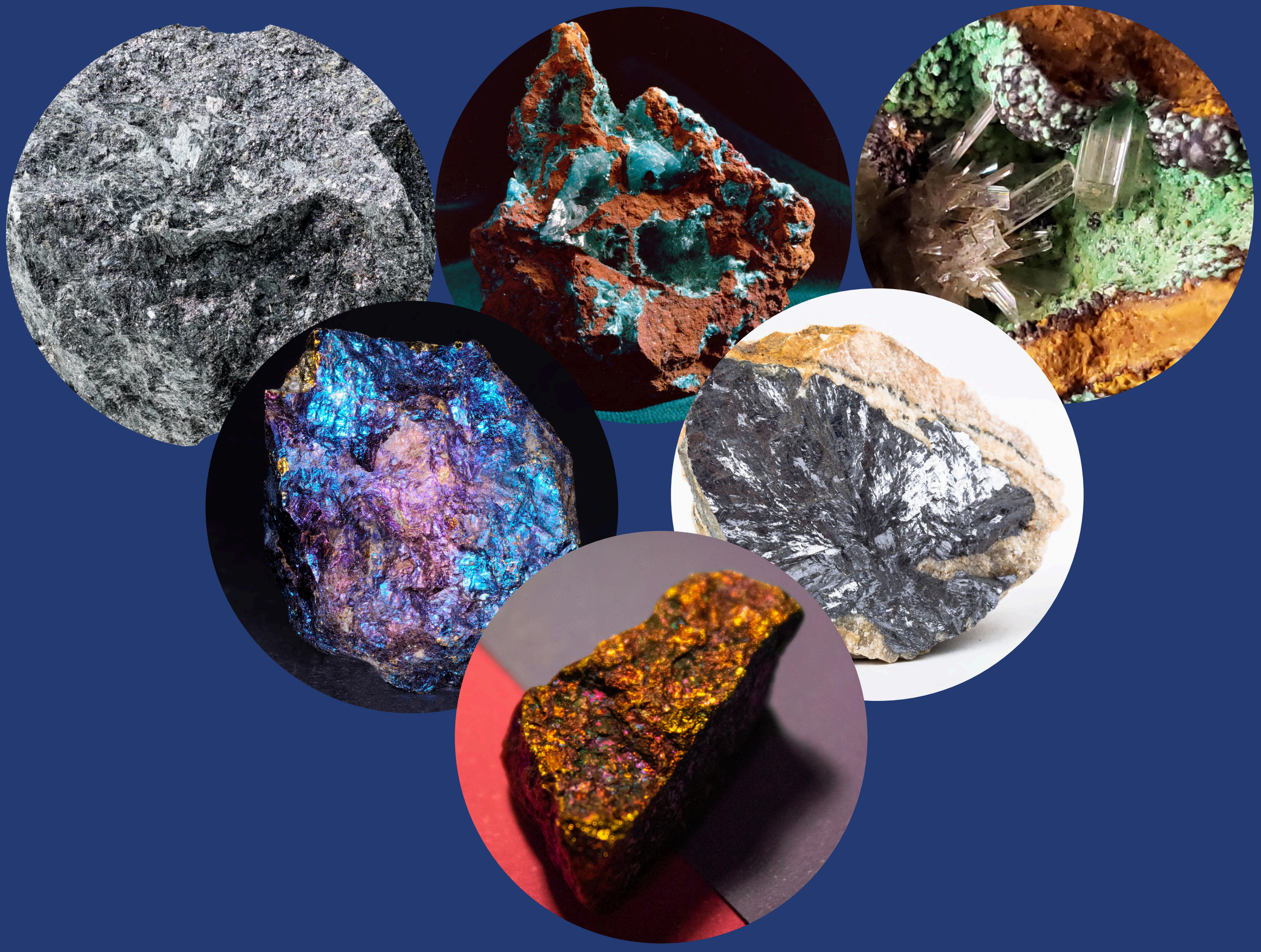
28-30 MAYIS 2025

METALİK MADENLER SEMPOZYUMU

METALLIC MINERALS SYMPOSIUM

Bildiriler Kitabı / Proceedings Book



EDİTÖRLER / EDITORS

Dr. Ali Can ÖZDEMİR

Dr. Esma KAHRAMAN

Dr. İlknur EROL

Mehmet YILMAZ

Bülent ZERENGÖK

TMMOB
Maden Mühendisleri Odası Adana Şubesi

UCTEA Chamber of Mining Engineers of Turkey Adana Branch

Çukurova Üniversitesi
Maden Mühendisliği Bölümü

Cukurova University Mining Engineering Department

METALİK MADENLER SEMPOZYUMU'2025
BİLDİRİLER KİTABI

METALLIC MINERALS SYMPOSIUM'2025
PROCEEDINGS BOOK

28-30 Mayıs / May 2025

Adana – Türkiye

Editörler / Editors

Dr. Ali Can ÖZDEMİR

Dr. Esma KAHRAMAN

Dr. İlknur EROL

Mehmet YILMAZ

Bülent ZERENGÖK

TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Adana Şubesi

Çukurova Üniversitesi
Maden Mühendisliği Bölümü

METALİK MADENLER SEMPOZYUMU'2025
BİLDİRİLER KİTABI

METALLIC MINERALS SYMPOSIUM'2025
PROCEEDINGS BOOK

28-30 Mayıs / May 2025
Adana – Türkiye

İnternet Sitesi / Website: https://metalikmadenlersempozyumu.org.tr/

Tüm Hakları Saklıdır ©2025
TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın yazılı izni olmaksızın bu kitap veya bu kitabın herhangi bir kısmı yayınlanamaz.

All rights reserved ©2025
No parts of this book may be reproduced in any forms any means, without written permission of The Chamber of Mining Engineers of Turkey.

Bildiriler e-kitap biçiminde yayınlanmıştır.
The proceedings are available in e-book format.

Editörler / Editors: Dr. Ali Can ÖZDEMİR, Dr. Esma KAHRAMAN, Dr. İlknur EROL, Mehmet YILMAZ, Bülent ZERENGÖK

ISBN: 978-605-01-1676-2

SUNUŞ

Değerli Bilim İnsanları, Araştırmacılar ve Sektör Temsilcileri,

TMMOB Maden Mühendisleri Odası Adana Şubesi ve Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliğinin ev sahipliğinde Çukurova Üniversitesi Mithat Özsan Amfisinde 28–30 Mayıs 2025 tarihleri arasında düzenlenen Metalik Madenler Sempozyumu, madencilik ve metalurji alanında faaliyet gösteren akademisyenleri, sektör profesyonellerini ve araştırmacıları bir araya getirerek bilgi ve deneyim paylaşımını amaçlamaktadır.

Günümüzde metalik madenler, sanayi üretiminin temel girdileri arasında yer almakta ve enerji dönüşümünden savunma sanayine kadar geniş bir yelpazede stratejik önem taşımaktadır.

Üç gün süren bu bilimsel etkinlikte sunulan sözlü bildiriler, ülkemizin çeşitli üniversite ve kurumlarından araştırmacılar tarafından hazırlanmış, sektöre yön verecek nitelikte güncel araştırma sonuçlarını içermektedir. Ayrıca, sektör temsilcileriyle akademinin bir araya geldiği özel oturumlar sayesinde bilimsel bilginin uygulamaya aktarımı da teşvik edilmiştir.

Bu bildiriler kitabı, sempozyum süresince paylaşılan değerli bilgilerin kalıcı bir kaynak haline getirilmesini amaçlamaktadır. Sempozyumun gerçekleşmesinde emeği geçen düzenleme kurulu üyelerine, bilim kuruluna, bildiri sunarak katkıda bulunan tüm araştırmacılara ve desteklerini esirgemeyen kurum ve kuruluşlara içtenlikle teşekkür ederiz.

Sempozyumun, ülkemizde madencilik ve metalurji alanındaki akademik ve teknolojik gelişmelere katkı sağlamasını temenni ederiz.

Saygılarımızla.

Dr. Mahmut ALTINER
Yürütme Kurulu Başkanı

Bülent ZERENGÖK
TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Adana Şube Başkanı

PREFACE

Dear Scientists, Researchers, and Industry Representatives,

The Metalic Minerals Symposium, held at the Mithat Özsan Hall of Çukurova University on May 28–30, 2025, was organized under the auspices of the Adana Branch of the Chamber of Mining Engineers (TMMOB) and the Department of Mining Engineering at Çukurova University. The symposium aimed to bring together academicians, industry professionals, and researchers working in the fields of mining and metallurgy to foster the exchange of knowledge and experience.

Today, metallic minerals constitute essential inputs for industrial production and hold strategic importance across a wide range of sectors, from energy transformation to defense industries.

During this three-day scientific event, oral presentations prepared by researchers from various universities and institutions in Türkiye conveyed up-to-date research findings with the potential to guide the sector. Furthermore, special sessions that brought together representatives from academia and industry promoted the transfer of scientific knowledge to practical applications.

This book of proceedings aims to serve as a lasting resource compiling the valuable knowledge shared throughout the symposium. We sincerely thank the organizing committee members, the scientific board, all researchers who contributed by presenting their work, and the institutions and organizations that provided their invaluable support.

We hope that the symposium contributes to the academic and technological advancement of the mining and metallurgy sectors in our country.

Respectfully.

Dr. Mahmut ALTINER
Chair of the Organizing Committee

Bülent ZERENGÖK
President, Adana Branch of the Chamber of Mining Engineers (UCTEA)

SEMPOZYUM YÜRÜTME KURULU

Başkan : Dr. Mahmut ALTINER

Başkan Yardımcısı : Mehmet YILMAZ

Sekreter : Dr. Ali Can ÖZDEMİR

Sekreter : Dr. Esma KAHRAMAN

Dr. Nil YAPICI

Dr. İlknur EROL

Dr. Abdulkadir ÜRÜNVEREN

Nihat Yusuf USLU

A.Meftun BÜKBÜZ

İzgi Murat AKAR

Umut ÖZGÜZEL

Sabahatdin SAKATOĞLU

Serdal ÖZBEK

İbrahim IŞIK

Esra CAN ÖZKUL

Sercan VARAK

Veyis SIR

Mustafa YILDIZELİ

Meriç ŞAHİN

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI YÖNETİM KURULU

Başkan : Ayhan YÜKSEL

II. Başkan : Bülent TOKA

Yazman : Veyis SIR

Sayman : Mehmet ZAMAN

Üyeler : Pelin KERTMEN

Alper ENTOK

Fatih TÜTÜNCÜ

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI ADANA ŞUBESİ YÖNETİM KURULU

Başkan : Bülent ZERENGÖK

II. Başkan : Davut YÜREK

Yazman : Levent ÇİL

Sayman : Berivan Naime SOMYÜREK

Üyeler : İbrahim IŞIK

Ali Meftun BÜKBÜZ

İzgi Murat AKAR

DESTEKLEYEN KURUM VE KURULUŞLAR

SERGİ FİRMALARI

BİLİMSEL KURUL

Jitendra Khatti	Rajasthan Technical University
N Sri Chandrahas	Deputy Manager, Mine Planning, GTS Limited
N.Rao Cheepurupalli	Aksum University
Shahab Hosseini	Tarbiat Modares University
Taiwo Blessing Olamide	Wipware Inc.
Yewuhalashet Fissha	National Institute of Technology
Abdulkadir Karadoğan	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Abdurrahman Tosun	Dokuz Eylül Üniversitesi
Abdulkadir Ürünveren	Çukurova Üniversitesi
Ahmet Dağ	Çukurova Üniversitesi
Ahmet Hakan Onur	Dokuz Eylül Üniversitesi
Ahmet Mahmut Kılıç	Çukurova Üniversitesi
Ali Can Özdemir	Çukurova Üniversitesi
Çağatay Pamukçu	Dokuz Eylül Üniversitesi
Doğan Karakuş	Dokuz Eylül Üniversitesi
Erhan Tercan	Hacettepe Üniversitesi
Esma Kahraman	Çukurova Üniversitesi
Hacı Deveci	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Hüseyin Vapur	Çukurova Üniversitesi
İlknur Erol	Çukurova Üniversitesi
M. Kemal Özfırat	Dokuz Eylül Üniversitesi
Mahmut Altıner	Çukurova Üniversitesi
Mehmet Çelik	Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
Mehmet Tanrıverdi	Dokuz Eylül Üniversitesi
Muzaffer Özoktay	Eurogold Kıymetli Metaller
Oktay Bayat	Çukurova Üniversitesi
Oktay Celep	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Osman Parlak	Çukurova Üniversitesi
Özen Kılıç	Çukurova Üniversitesi
Sait Kurşunoğlu	Batman Üniversitesi
Tuğba Deniz Tombal Kara	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
Türker Hüdaverdi	İstanbul Teknik Üniversitesi
Ülkü Kalaycı Şahinoğlu	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Vedat Deniz	Hitit Üniversitesi
Veysel Başer	Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
Zehra Çetinkaya	Çukurova Üniversitesi

DANIŞMA KURULU

Dr. Oktay BAYAT
Dr. Suphi URAL
Dr. Ahmet Mahmut KILIÇ
Dr. Özen KILIÇ
Dr. Ahmet DAĞ
Dr. Hüseyin VAPUR
Dr. Niyazi ARSLAN
Dr. A. Ekrem YÜCE
Dr. M. Özgür KESKİN
Dr. Mehmet TANRIVERDİ
Dr. Murat ERDEMOĞLU
Dr. Mustafa TOPALOĞLU
Dr. Raşit ALTINDAĞ
Dr. Sait KURŞUNOĞLU
Dr. Taki GÜLER
Dr. Vedat DENİZ
Dr. Ümit ÖZER
Dr. İhsan TOROĞLU
Dr. Bülent ERDEM
Dr. Muammer KAYA
Dr. Ahmet Hakan ONUR
Dr. Ersin Yener YAZICI
Dr. Hacı DEVECİ
Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER
Dr. Sair KAHRAMAN
Dr. Onur GÜVEN
Dr. Sait KİZGUT
Dr. Osman SİVRİKAYA
Dr. Murat Olgaç KANGAL
Dr. Şafak Gökhan ÖZKAN
Dr. Olgay YARALI
Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI
Dr. Öner Yusuf TORAMAN

Ahmet AYDIN
Ahmet KAYA
Ayhan BAHÇELİ
Cengiz YILMAZ
İbrahim Mete DOĞAN
Mehmet KILIÇ
Mustafa TOSUN
Osman AKBULUT
Özen AKBALIK
Recai CAN
Sabahattin ÖZTAŞ
Seyhan YILMAZ UYLAŞ
Ayhan YÜKSEL
Aykut AKDEMİR
Dr. Erdoğan KAYMAKÇI
Mesut ERKAN
Nuri ALPASLAN
Arif Akın SELÇUK
Cuma ÖZTÜRK
Cemal ÇETE
Taner TEKİN
Kerim ÖZTOY
Talat KAZAN
Mehmet Ali ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

SUNUŞ.....I

PREFACE.....II

YÜRÜTME KURULU.....III

YÖNETİM KURULU.....IV

DESTEKLEYEN KURULUŞLAR.....V

SERGİ FİRMALARI.....VI

BİLİMSEL KURUL.....VII

DANIŞMA KURULU.....VIII

İÇİNDEKİLER.....IX

Mevcut Lityum Potansiyeli ile Gelecek Senaryoları
(Future Scenarios of Lithium Based on Current Potential)

M. S. Çelik.....1

Alpin-Tipi Kromitit Yataklarının Kökeni ve Cevher Potansiyelini Etkileyen Jeolojik Faktörler
(Origin of Alpine-Type Chromitite Deposits and Geological Factors Affecting Their Ore Potential)

O. Parlak, C. Dönmez, E. Arslan.....27

Kısa Dönemli Planlamada Kestirim Hatalarının Ekonomik Etkisi
(Economic Impact of Estimation Errors in Short Term Planning)

A. E. Tercan.....63

Bazı Kritik Hammaddelerin Ultrasonik Destekli Flotasyonla Kazanım Çalışmaları
(Recovery Studies of Some Critical Raw Materials by Ultrasonically Assisted Flotation)

Ş. G. Özkan.....77

Bakır İçeriği Yüksek Altın Cevherleri: Sorunlar ve Seçenekler
(Copper-Rich Gold Ores: Problems and Options)

H. Deveci.....103

Açık ve Yeraltı Metal Maden İşletmelerinde Delme–Patlatma Uygulamaları
(Drilling and Blasting Practices in Open–Pit and Underground Metal Mining Operations)

A. M. Kılıç.....105

Yeraltı Patlatmalarında Bulk-Emülsiyon Uygulaması
(Bulk-Emulsion Application in Underground Blasting)

H. Bereket.....127

Niğde Bölgesinde Üretilen Metal Madenlerin Dünü, Bugünü ve Yarını
(Yesterday, Today and Tomorrow of Metal Mines Produced in Niğde Region)

M. S. Delibalta.....137

The Application of Roasting Pretreatment for Refractory Gold Ore Followed by Cyanide Leaching (Hassai Gold Mine)

A. I. I. Ibrahim, A. Abubaker, O. Babiker, A. Basheer, E. Elgak 153

Yeraltı Metal Madeni Patlatmalarında Patlatma Tasarımı Ve Parçalanmanın Değerlendirilmesi
(Evaluation of Blast Design and Fragmentation for Underground Metal-Mining Blasts)

T. Hüdaverdi, Y. Ağan 165

Ara Sondajların Cevher Modeline Etkisi
(The Effect of Intermediate Drilling on Ore Modeling)

C. Tunoğlu, R. Kuşoğlu, R. Baykan 179

Yeraltı Metalik Madenlerinde Akıllı Maden Teknolojilerinin Önemi Üzerine Bir İnceleme
(A Review on the Importance of Smart Mining Technologies in Underground Metallic Mines)

C. Akyürekli, A. Aytaç..... 197

Biyoreaktör Kullanarak Küre Bakır Cevherinin (Eti Bakır A.Ş., Kastamonu, Türkiye) Biyoliç İşleminin Araştırılması
(Investigation of Bioleaching Processing of Küre Copper Ore (Eti Bakir Co., Kastamonu, Türkiye) Using a Bioreactor)

Z. Çetinkaya 213

A Strategic Industrial Player in The Global Cobalt and Fertilizer Suplly Chain

M. Yıldırım, G. K. Demir, M. Gül, S. Söker..... 229

Nikel Hidrometalurjisinde Çevresel Etkiler ve Atik Yönetimi
(Environmental Impacts and Waste Management in Nickel Hydrometallurgy)

B. Kaymakoğlu, T. D. Tombal Kara..... 251

Batı Afrika Demir Cevheri Atıklarının Zenginleştirilmesine Yönelik Anahtar Teslim Tesis Tasarımı Ve Uygulaması
(Turnkey Plant Design and Implementation for The Beneficiation of West African Iron Ore Tailings)

T. F. Akyol, B. Nazarov, B. Köse, E. Samet 289

Kıymetli Minerallerden Nikel Cevherinin Zenginleştirilmesi
(Beneficiation of Nickel Ore From Precious Minerals)

R. Kocaman, B. Kocaman..... 309

Değerli Metal Madenciliğinde Sürdürülebilir Kimyasal Yönetim Sistemleri: Güncel Yaklaşımlar ve Uygulamalar
(Sustainable Chemical Management Systems in Precious Metal Mining: Current Approaches and Practices)

M. Osmanoğlu 335

Investigation of The Reagents Effect on the Chalcopyrite Flotation in Two Different Plant

A. Ceylan, G. Bulut..... 371

Metalik Madenlerin Jeomekanik Açıdan İncelenmesi
(Geomechanical Investigation of Metallic Mines)

K. Karaman, E. Şahinoğlu, Y. İskender, H. Kolaylı 393

Metalik Madenlerin Mineral Karakterizasyonu
(Mineral Characterisation of Metallic Mines)

E. Şahinoğlu, K. Karaman, Y. İskender, H. Kolaylı 407

Metalik Madenlere İlişkin Düzenlemeler ve Daha İyi Bir Maden Yargılaması
(Regulations on Metallic Minerals and a Better Mining Judiciary)

M. Topaloğlu..... 425

Yeraltı Metalik Maden Ocaklarında Tahkimat Uygulamaları, Demir-Bakır Ocağı Örneği
(Ground Support Applications in Underground Metallic Mines: A Case Study of an Iron-Copper Mine)

Y. Karaca, A. O. Adsız, T. Durna, C. Gül, Ö. Kılıç, A. M. Kılıç 443

Bir Yeraltı Maden İşletmesinin Galeri Patlatmalarında Elektronik Ateşleme Sistemi Kullanılarak İyileştirilmesi
(Improving an Underground Mine by Implementing the Electronic Blasting Systems at Development Blasts)

Ö. G. İlik 461

Fosil Yakıtlarda %80 Dışa Bağımlı Olan Türkiye'nin Yeşil Enerji Geleceği
(The Green Energy Future of Türkiye Which 80% Dependent on Fossil Fuels)

M. Köse..... 477

Afşin Elbistan Kömürlerinin Nadir Toprak Element Potansiyelinin İncelenmesi
(Investigation of Rare Earth Element Potential of Afşin Elbistan Coals)

A. Ürünveren, S. Ural..... 491

Redüktörler: Yenilikler, Verimlilik ve Maden Endüstrisinde Uygulamalar
(Gearboxes: Inovation, Efficiency and Applications for Mining Industry)

M. Şenyel..... 513

Boksit Dışı Kaynaklardan Alümina Kazanımı
(Extraction of Alumina from Non-Bauxite Sources)

M. K. Aydemir, R. Aydoğmuş, M. Turan, B. Alyosif, K. Şentürk, E. Mete, E. Porgalı Tüzer, T. S. Barry, M. F. Taşıtlı, S. Yumuşak, A. N. Yapıcı, G. Tumbuluoğlu, K. Demir, T. Kıyak, T. Uysal, M. D. Turan, S. Erdemoğlu, M. Birinci, H. Sis, M. Erdemoğlu..... 521

Metalik Maden Aramalarında Jeofizik Yöntemler ve Güncel Gelişmeler
(Geophysical Methods and Recent Developments in Metallic Mineral Exploration)

M. E. Candansayar..... 543

Jeofizik Yapay Uçlaşma Yönteminde Çelik Elektrot Kullanımı: Metalik Maden Sahası Örneği
(The Use of Steel Electrodes in Induced Polarization Method: An Example of Metallic Mine Deposit)

N. Y. Gündoğdu, İ. Demirci, M. E. Candansayar, C. Demirel, E. Pişkin..... 551

Dünyada ve Türkiyede Altın Madenciliği ile İlgili Önemli Davalar
(Important Cases Related to Gold Mining in the World and in Türkiye)

Ö. Günay 561

Sinkot (Artvin) Sahasının Jeolojisi, Cevherleşmesi ve Doğu Karadeniz Metalojenik Kuşağındaki Konumu
(Geology, Mineralization, and Position of the Sinkot (Artvin) Field in the Eastern Black Sea Metallogenic Belt)

Ü. Aydın, F. Pekdemir, S. Keskin, T. Öner, L. Çetiner, S. Saklar 573

Erenler (Artvin) Sahasının Jeolojisi, Cevherleşmesi ve Doğu Karadeniz Metalojenik Kuşağındaki Konumu
(Geology, Mineralization, and Position of the Erenler(Artvin) Field in the Eastern Black Sea Metallogenic Belt)

Ü. Aydın, A. Tulukçu, T. Öner, S. Keskin, F. Niğdeli, T. Aksoy, S. Saklar, R. Varlık..... 591

Kromit Aramalarında Kullanılan Parametreler
(Parameters Used in Chromite Search)

M. Özoktay 605

UMREK ve Metalik Madenler
(UMREK and Metallic Minerals)

A. H. Demirkan, A. İbuk 633

Yitim Zonu Üzerinde Oluşan Tavşanlı/Dağardı (Kütahya) Ofiyoliti İçindeki Kromit Cevherleşmelerine Bir Örnek
(An Example of Chromite Ore Deposits within the Tavşanlı/Dağardı (Kütahya) Ophiolite Formed Above a Subductıon Zone)

S. Keskin..... 659

Açık Ocak Madenciliği Filo Yönetiminde, Kamyon Sevkiyatı için Bilgisayarlı Görü ve Çok Amaçlı Optimizasyonun Entegrasyonu
(Integration of Computer Vision and Multi-Objective Optimization for Truck Dispatching in Open-Pit Mining Fleet Management)

K. Hasözdemir, M. Meral, M. M. Kahraman..... 687

Altın Madeni İşletmelerinde Gerçekleştirilen Rehabilitasyon Faaliyetlerinin Türmes Projesi Kapsamında İncelenmesi
(Investigation of Rehabilitation Activities Carried Out within in Gold Mine Operation the Scope of Türmes Project)

F. Pekdemir, B. G. Demir, Ö. Türkeli, S. Bostancı..... 709

Yeraltı Altın Madeninde Kombine Ateşleme Sistemi Kullanımı ile Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi
(Evaluation of The Results Obtained from the Use of a Combined Initiation System in an Underground Gold Mine)

K. Toprakçı Özdal, A. Rapokhin, F. Akgün 719

Madencilikte Yapay Zeka Uygulamaları
(Applications of Artificial Intelligence in Mİning)

H. O. Dönmez, H. Tunçdemir, Ö. A. Ergün 735

Metal Madenciliğinde Susuzlaştırma ve Madencilik Sonrası Aktiviteleri
(Metal Mining Dewatering and Post-Mining Activities)

M. İşcan, E. Cristobal, A. H. Demirkan 755

Maden Mühendisliğinin Geleciği
(The Future of Mining Engineering)

A. İbuk, H. Demirkan, E. kahraman 767

Ocak İçi Nakliye Yolu Enerji Optimizasyonu: Bir Açık Metal İşletmesi Uygulaması
(In-Pit Haulage Route Energy Optimization: An Open-Pit Metal Mine Operation Case Study)

D. Dündar, A. Konuk 779

Acid Mine Drainage in Metallic Mines

N. Yapıcı, H. Sonsun 807

Krom Endüstrisinin Gelecek Stratejileri
(Future Strategıes of the Chrome Industry)

B. Aksu, M. Özyurt, G. Ş. Çağlayan, S. Ünal, M. Boyraz 829

MEVCUT LİTYUM POTANSİYELİ İLE GELECEK SENARYOLARI

FUTURE SCENARIOS OF LITHIUM BASED ON CURRENT POTENTIAL

Mehmet Sabri Çelik
İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZ: Lityum, temiz enerjiye ve elektrikli araçlara (EV) geçişin sağlanmasında kilit rol oynayan şarj edilebilir pillerin vazgeçilmez bir bileşenidir. Enerji depolama çözümlerine yönelik artan talep ve dekarbonizasyon çabaları nedeniyle lityum, günümüzde büyük bir potansiyel sergilemektedir. Elektrikli araç kullanımının artması ve yenilenebilir enerji sistemlerinin büyük ölçekli pil depolama ihtiyacı nedeniyle katlanarak büyümesi nedeniyle lityuma olan talebin gelecekte artması beklenmektedir. 2030 yılına kadar küresel lityum talebi, 2020 seviyelerine kıyasla 6 misli artması tahmin edilmektedir. Lityum arzının bu talebi karşılayamaması durumunda, ciddi fiyat dalgalanmaları beklenmektedir. Avustralya, Şili ve Çin gibi büyük lityum üreticisi ülkelerin piyasaya hakim olması, tedarik zinciri güvenliği ve jeopolitik riskler konusunda endişelere neden olmaktadır. Yeni madencilik projeleri ve çıkarma teknolojileri geliştirilmekte olsa da bunlar çevresel, teknolojik ve yasal engellerle karşı karşıya kalması mümkündür. Özellikle tuzlu su kaynaklarından lityum çıkarılması, su kaynaklarının tükenmesi ve ekosistemlerin bozulması gibi önemli çevresel etkilere neden olmaktadır. Bu etkileri hafifletmek ve gelecekteki artan talebi karşılamak için sürdürülebilir madencilik uygulamaları, daha sıkı yasal düzenlemeler ve uzun vadeli madencilik yatırımları yapılması şarttır.

Katı hal pilleri veya sodyum-iyon veya lityum-kükürt gibi alternatif pil teknolojilerindeki yenilikler, lityuma olan bağımlılığı azaltabilir veya verimliliğini artırabilir. Bununla birlikte, lityum-iyon pillerinin kısa ve orta vadede etkili olmaya devam etmesi beklenmektedir. Orta ve uzun vadede kullanılmış bataryalardan lityumum geri dönüşümü, gelecekteki talebi karşılamak ve çevresel etkiyi azaltmak için sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Lityumun geleceği, küresel enerji geçişiyle doğrudan bağlantılıdır. Mevcut potansiyeli büyük olsa da, bu potansiyelin gerçekleştirilmesi tedarik zinciri sorunlarının çözülmesini, teknolojinin iyileştirilmesini ve sürdürülebilir ve etik uygulamaların sağlanmasını

gerektirecektir. Önümüzdeki on yıl, lityumun daha temiz ve daha elektrikli bir dünyadaki rolünü şekillendirmede belirleyici olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Lityum, Lityum Kaynakları, Arz-Talep Dengesi, Gelecek Senaryoları

ABSTRACT: *Lithium is an indispensable component of rechargeable batteries, playing a key role in the transition to clean energy and electric vehicles (EVs). Due to increasing demand for energy storage solutions and global decarbonization efforts, lithium currently presents significant potential. Lithium demand is expected to grow exponentially, driven by the widespread adoption of electric vehicles and the large-scale battery storage needs of renewable energy systems. By 2030, global lithium demand could increase about 6 times compared to 2020 levels, primarily due to rising EV numbers and grid storage needs. On the other hand, if lithium supply fails to meet this demand, severe price volatility may occur. The dominance of major lithium-producing countries like Australia, Chile, and China raises concerns over supply chain security and geopolitical risks. Although new mining projects and extraction technologies are being developed, they may face environmental, technological, and legal barriers.*

Innovations in alternative battery technologies, such as solid-state batteries, sodium-ion, or lithium-sulfur systems, could reduce dependency on lithium or improve its efficiency. However, lithium-ion batteries are expected to remain dominant in the short and medium term. Recycling lithium from used batteries is emerging to meet future demand and reduce environmental impact. Particularly, lithium extraction from brine sources can cause significant environmental effects, such as water depletion. Sustainable mining practices and stricter regulations will be crucial to lessen these impacts. The future of lithium requires a successful global energy transition, solving supply chain issues, improving technology, ensuring sustainable and ethical practices and long-term investment in mining and processing capacity to meet future rising demand. The coming decade will be instrumental in shaping lithium's role in a cleaner and more electrified world.

Keywords: *Lithium, Lithium Sources, Supply-Demand Balance, Future Scenarios*

1. GİRİŞ

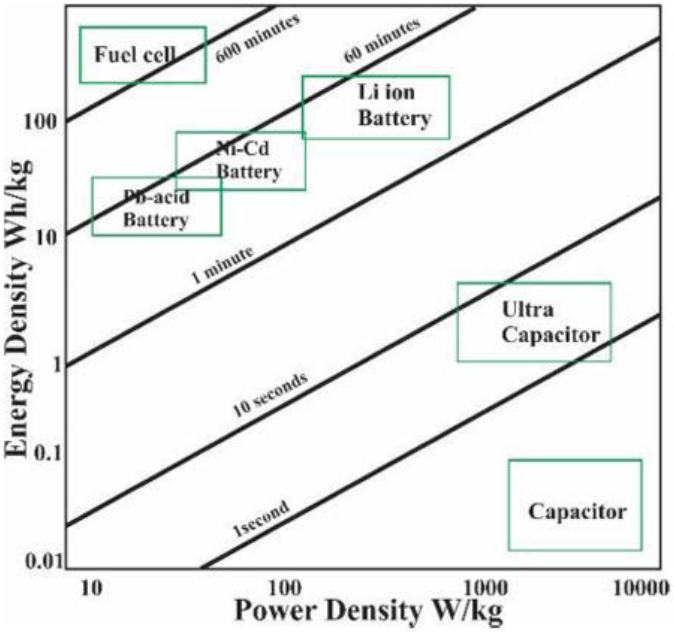
1.1. Lityumun Stratejik Önemi

Enerji geçiş elementleri (Li, Ni, Co, Fe, Cu) primer enerji sağlamada oynadıkları rolden dolayı gittikçe önem kazanmaktadırlar. Bunlar arasında lityum çok sayıda olağanüstü özelliklere; Oda sıcaklığında katı formunu muhafaza eden en düşük yoğunluk (20 ^{o}C'de 0.534 g/cm^{3}), en yüksek özgül ısı kapasiteli katı element (Oda sıcaklığında 25 ^{o}C'de 3.56 J/g/K), tüm alkali metaller içinde en küçük iyon yarıçapı (Atomic yarıçapı 1.33 Å ve atom kütlesi 6.94 g/mol), ve yüksek elektrokimyasal potansiyele sahip bir elementtir. Lityumun, karbonat, klorür veya hidroksit gibi başlıca bileşikleri yeşil ve düşük karbon gibi pek çok ileri teknoloji ve özellikle elektrikli araç bataryaları için önemli ekonomik ve çevresel sorunlara çözüm olarak gösterilmektedir. Lityumla ilgili sorunlar ve avantajlar diğer nadir metaller gibi genellikle kritik metaller kapsamında değerlendirilmektedir (Christmann vd., 2015). Lityum, Şekil 1'de görüldüğü gibi, mevcut enerji depolama cihazları arasında yüksek enerji ve yüksek enerji yoğunluğu bakımından elektrikli taşıtlar, yenilenebilir enerji depolama ve elektronik cihazlarda potansiyel bir konum sergilemektedir (Kesler, 2012).

Lityum-iyon bataryaları (LIB) deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilerek kullanılabilen elektrokimyasal hücrelerdir. Başlangıçta mobil elektronik cihazlar için geliştirilen LIB'ler, bugün artık elektrikli araçlar, tıbbi cihazlar, akıllı saatler, dronlar, uydular dahil günlük hayatımızın bir parçası haline gelmiştir. Özellikle önümüzdeki 10 yılda karbon emisyonlarını azaltacak ve 2050 yılına kadar da küresel ısınmayı kontrol altına almayı hedefleyen lityum esaslı çözümler tartışılmaktadır (Grey ve Hall, 2020). Mevcut LIB'ler kısa-süreli depolama ve mikro-grid uygulamaları için uygundur. Birçok malzeme termodinamik stabilite

sınırları dışında çalıştırılmasına rağmen, günümüz LIB'lerinin genellikle ömürleri ay veya yıl ve pek azlarının da on yıl ölçeğinde görülmektedir. Konvansiyonel LIB'lerin performansını bütünsel bir yaklaşımla daha yüksek enerji yoğunluklu aynı zamanda güvenli ve makul bir batarya ömrüne çıkarılması hedeflenmektedir.

Lityumun stratejik önemi sadece teknolojik dönüşümle sınırlı olmayıp aynı zamanda enerji bağımsızlığı, yeşil dönüşüm ve jeopolitik güç dengelerinde önemli bir güç olarak kullanılacağı öngörülmektedir.

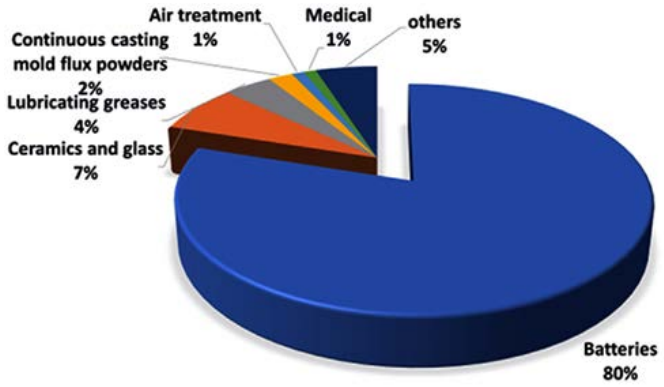


Şekil 1. Bazı cihazların enerji depolama kapasitesi (Kesler vd., 2012).

1.2. Lityumun Güncel Kullanım Alanları

2024 yılı itibarıyla, küresel lityum talebinin yaklaşık %87'i batarya üretimi (Elektrikli taşıt bataryaları, Yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji depolama, Akıllı telefon, dizüstü bilgisayar bataryaları); seramik ve cam %4; yarı-katı yağlayıcılar %2; hava arıtma %1 (higroskopik lityum karbonat *endüstriyel AC ve nem arındırıcı* sistemler için); sürekli döküm kalıp tozları %1 (bağlayıcı %8-14 soda, %4-7 lityum karbonat); ilaç (psikiyatride

kullanımı*)* %1; %4 diğer endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmektedir. Şekil 2'de 2023 için gösterilen USGS küresel lityum tüketim rakamlarında bataryanın payı %80 iken, bu pay 2015'de %32, 2018'de %46, 2021'de %67 ve 2024'de ise %87'yi bulmuştur. Aynı paylar seramik ve cam için %27'den %4'e düşmüştür (USGS, 2018, 2023 ve 2024).



Şekil 2. USGS 2023 verileri esas alınarak oluşturulan küresel lityumun kullanım alanlarını gösteren grafik (Balaram vd., 2024).

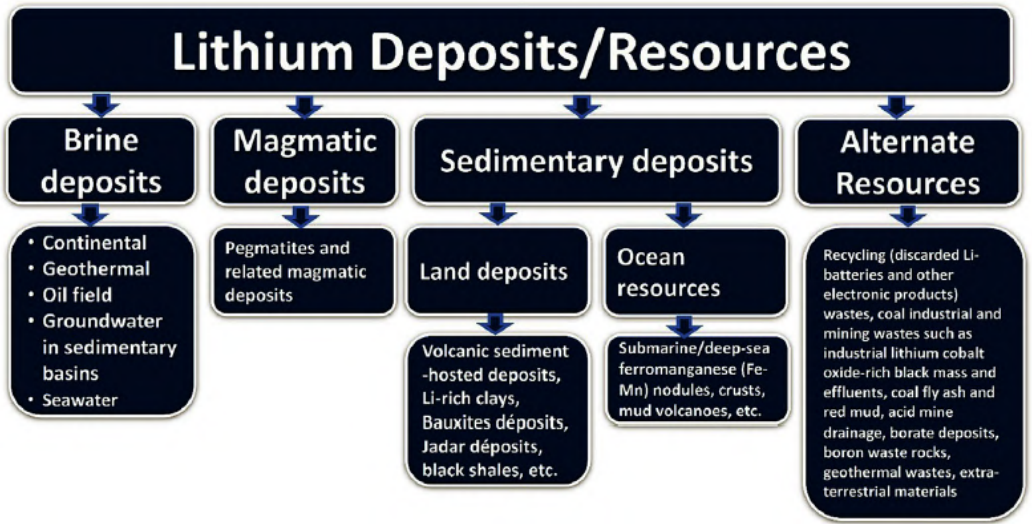
Çeşitli batarya tiplerinde kullanılan lityum miktarları Çizelge 1'de görüldüğü üzere 0.1 g - 60 kg aralığında değişmektedir (Balaram vd., 2024).

Çizelge 1. Çeşitli lityum bataryaları ve depolama sistemlerinde kullanılan yaklaşık lityum miktarları (Balaram vd., 2024).

Ürün	**Lityum miktarı**
Şarjlı AA pil	0.1 g
Cep telefonu	3 g
iPad	20-30 g
Laptop	~30 g
Tipik EV batarya	~8 kg
Hibrit Otomobil	0.8-2.0 kg
Tipik güç depolama sistemi	10 kg
Tesla EV	~50 kg
Ortalama EV	10-63 kg

1.3. Küresel Lityum Rezervleri ve Üretimi

Lityum halihazırda üç tip maden yatağından üretilmektedir (i) Kurak veya yarı kurak iklimlerde görülen tuzlu su kaynakları, (ii) Felsik (feldispat ve kuvars minerallerince zengin olan magmatik kayaçlar) intrüzyonlarına bağlı granitik pegmatitler, ve (iii) Tersiyer volkanik killer dahil çökelme tipi yataklar (Stephenson, 2023). Bunun dışında kırmızı çamur, bor yatakları, jeotermal atıklar, kömür artıkları ve uçucu kül, asit-maden drenajı, ve elektronik atıklar gibi alternatif Li kaynakları sayılabilir. Pegmatit ve tuzlu su tipi yataklar küresel lityum kaynaklarının sırasıyla %37.4 ve %62.6'sını teşkil etmektedir (Balaram vd., 2024). Şekil 3 küresel bazı önemli lityum kaynaklarının sınıflandırılmasını göstermektedir.



Şekil 3. Lityum yatakları/kaynakları'nın sınıflandırılması (Balaram vd., 2023).

Çizelge 2'den de görüldüğü üzere tuzlu su yatakları 200-1400 ppm aralığında Li içermektedir. Lityum tuz yatakları (%3.5'dan fazla tuz içeren) tuzun buharlaşması ile tuzlalardaki <0.2 wt.% lityum içren NaCl, KCl ve bor gibi lityum-taşıyan minerallerle kapalı bir sedimanter havzada 200–1400 ppm'e kadar yükselebilmektedir. Kıtasal tuz yataklarına örnek olarak lityum üçgeni olarak anılan Arjantin, Şili ve Bolivya'da Li içerikleri 7000 ppm'e

kadar çıkabilmektedir. Yine Kuzey Amerika'nın en eski tuz yatağı Nevada, USA'da bulunan Silver Peak yatağı 2022 yılına kadar küresel lityum talebinin %12'sini karşılıyordu (Parker vd., 2022).

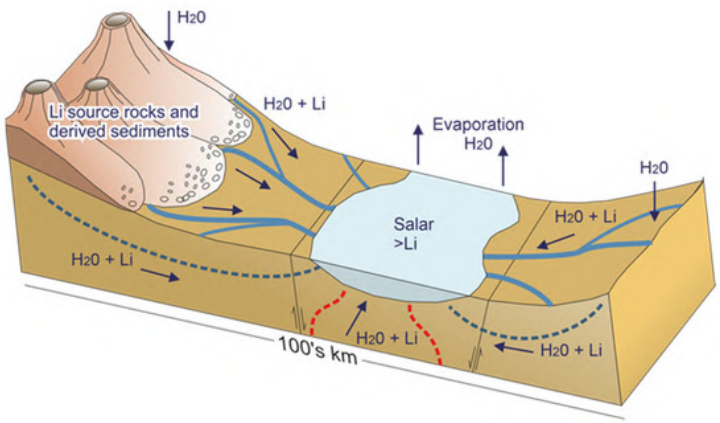
Jeotermal tuz yatakları küresel lityum kaynağının %3'ünü temsil etmektedir. Genellikle yüksek sıcaklık hidrotermal suların dolaştığı alanlar lityum, bor ve potasyum bakımından zenginleşirler. Jeotermal sularda lityum konsantrasyonunu kontrol eden en önemli faktör paleo-deniz suyu ve lityum içeren kayaçların karışması sonucunda oluşmaktadır (Şekil 3). Jeotermal kaynaklardan Lityum üretimi maliyet avantajı nedeniyle gittikçe önem kazanmaktadır.

Çizelge 2. Çeşitli kayaç, cevher su ve diğer jeolojik materyallerde lityum konsantrasyon aralıkları (Balaram vd., 2023).

Jeolojik materyal tipi	**Konsantrasyon, ppm**
Üst kıta kabuğu	35±11
Kıta kabuğu	17
Magmatik kayaçlar	29
Sedimanter kayaçlar	53–60
Hidrotermal sular	8
Okyanus sedimanları (manganez nodülleri)	139
Lityum maden cevheri (%20 spodümen)	10,000–20,000 Li_2O
Tuzlu sular	200–1400
Deniz suyu	0.1–0.2
Jeotermal sular	77-99

Li içeren 17 jeotermal tuz kaynağının ABD tüketiminin %4-8 ihtiyacını karşılayabileceği rapor edilmiştir (Toba vd., 2021).

Şist (shale) gibi petrol kaynaklı kayaçlar, petrol ve gaz avantajlarına ilave olarak, halihazırda potansiyel bir lityum kaynağı (80–300 ppm) olarak şist rezervuarlarından üretilen sular içinde bulunmaktadır (Lee vd., 2024). Bu derin petrol rezervuarlarındaki lityum içeriği küresel lityum kaynağının %3'ünü oluşturmaktadır.



Şekil 3. Yüzey ve yeraltı sularının lityumu kaynak alanlardan tuzlu bölgeye akışını ve lityumun çökelme ile zenginleştiği (Mavi çizgiler) ve hidrotermal kaynak akışını (Kırmızı çizgiler) gösteren diyagram (Rossi vd., 2022).

Avustralya, USA, Kanada ve Kongo gibi büyük çaplı lityum barındıran ülkeler pegmatit ve ilgili magmatik yataklarına ev sahipliği yapmaktadır. Pegmatitler mineralce zengin magmanın yer kabuğuna doğru uygun sıcaklık ve basınç şartları altında sokulması ile oluşurlar. Bu göç yolculuğunda Li ve Mg birlikte hareket ederler. Buna göre lityum içeren spodümen, petalit ve lepidolit ve diğer lityum taşıyan mika mineralleri oluşur (London, 2018). İki tip magmatik pegmatit yatakları oluşur: (i) LCT pegmatitleri (Li, Cs, Ta, Rb, Be, Sn, vb., ve (ii) Spodümen, petalit ve lepidolit gibi diğer Li, Cs ve Ta bakımından kuvvetli zenginleşme sergileyen magmatik ve metasomatic kayaçlara bağlı pegmatitler. Örneğin, 1983'de geliştirilen Avustralya'daki Greenbush pegmatit yatakları 2021 yılındaki sert kayaçların 40%'ını sağlamıştır. Bu aşırı bozuşmuş kompleks yatak Sn, Ta, Li ve kaolin-taşıyan pegmatitler ve yüzey alüvyal malzemelerden (Sykes ve Schodde, 2019) oluşmaktadır.

Yıllarca tuzlu su ve pegmatit yatakları küresel çapta iki önemli lityum kaynağı idi. Son yıllarda, geniş rezervlerinden dolayı üçüncü bir kategori olarak kıta veya kıyı havzalarda oluşan sedimanter volkanik kil-tipi lityum yatakları daha çok ilgi görmeye başlamıştır. Tuzlu göllerden ve sert

kayaçlardan üretilen lityumun küresel ihtiyacı karşılamayacağı ve sedimanter ve diğer tip lityum yataklarının alternatif olarak geliştirilerek diğer değerli metallerle birlikte kazanılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu tip yataklara örnek olarak gösterilen Sırbistandaki Jadar yatağı bilinen küresel lityum kaynaklarının %8'ini oluşturmaktadır (Stefanovic vd., 2023). Tipik bir kil yatağında Li-Mg bakımından zengin hektorit tipi smektit Sedimenter (kil tipi) yataklar üç şekilde bulunur: (i) Hektorit-tipi yataklar, (ii) karışık illit–smektit yatakları ve (iii) Jadarit tipi. Bu yataklardaki riyolit lavları veya riyolitik tüflerin hidrotermal aktiviteleri sonucu lityum konsantrasyonları artarak genellikle 250-500 ppm seviyesine çıkabilmektedir. Meksika'daki Sonora sedimanter kil yatakları 4.5 milyon ton lityum karbonat eşdeğerine sahiptir.

Peru'daki Macusani volkanik sahasında lityum içerikleri yer yer 2.000-4,000 ppm'e ulaşmaktadır. Rio Tinto'nun sahip olduğu Sırbistandaki Jadar lityum-bor yatağı 200 milyon ton rezervi ile dünyanın sayılı lityum madenlerinden sayılmaktadır. Bu sedimanter havzada dolomit, kalsit, K-feldspat, albit, rutil, ilmenit, pirit ve ince boyutlu muskovit bor madenine eşlik etmektedir (Sykes ve Schodde, 2019). Lityum cevheri, jadarit ($LiNaB_3SiO_7(OH)$) formunda olup küresel rezervlerin yaklaşık %10'unu temsil etmektedir.

Boksit yatakları da alüminyumun yanı sıra ikincil element olarak lityumca zengin olup (%0.3 Li_2O) illit ve and kaolinit içinde bulunmaktadır. Çin'deki Xinmin bauxit yatağı 5.9 milyon ton lityum içermektedir. Benzer şekilde lityum ve bor (Yaklaşık %0.17 lityum karbonat) Kaliforniya'daki Mojave çölü bor yatağında birlikte bulunmaktadır. Helvacı vd. (2004) genellikle Türkiye bor havzalarındaki kil minerallerine bağlı bor yataklarını incelemiştir.

Çeşitli kömür hazırlama artıkları ve uçucu/dip kül santral artıkları da ekonomik boyutlarda lityum içerikleri barındırmaktadır. Illinois bitümlü kömür artıkları ve yanma ürünlerinde 185 ppm'e varan lityum ölçülmüştür (Xie vd., 2021). Lityum içeren pek çok benzer kaynaklar ayrıntılı olarak çalışılmaktadır. Konu ile ilgi Balaram vd. (2024) makalesi güncel bilgileri içermektedir.

Beyaz petrol adı verilen lityum modern enerji sektörü için hayati bir öneme haizdir. Petrol ve dizel araçlara getirilen emisyon kısıtlamaları elektrikli araçların kullanımını yaygınlaştırması beklenmektedir. Örneğin, Birleşik Krallık 2030 yılından itibaren yeni dizel ve benzinli araçların satışını yasaklamıştır; Benzer uygulama 2035 itibariyle tüm AB ülkelerinde uygulanacaktır.

Lityumun dünyadaki düzensiz dağılımı ve kaynaklarına olan talep tedarik zincirinde ciddi ekonomik ve politik sorunları beraberinde getirdiği için her ülke kendi lityum madenlerinden lityum üretmek için ciddi bir gayret içine girmiştir. Bu nedenle, son yıllarda lityum endüstrisi lityumun yenilenebilir enerji sistemlerine geçişinde ve batarya-kalite lityum üretiminde yeni hedef pikler seçmiştir. Afrika'da Tanzanya, Gana, Zimbabve, Mali ve Kongo gibi ülkeler çeşitli cevherlerden Li arama ve ekstraksiyonuna yönelmişlerdir. Yerel proses geliştirmek için Zimbabve ham lityum ihracatını yasaklamıştır. Tanzanya ise halihazırda elektrikli araç sektörüne lityum tedariki için proses geliştirmeye çalışmaktadır. Asya'da Çin hem yerelde hem de uluslararası arenada lityum kaynaklarını geliştirmede tartışmasız lider konumundadır.

Hindistan bu rekabette bilinen kısıtlı kaynaklarını geliştirmeye çalışmaktadır. Kore büyük miktarda yüksek cevher-kalite lityum cevherine (Ort. %3 Li) sahiptir (Park vd., 2022). Avustralya'daki Greenbush pegmatit madeni mükemmel üretimi ile ülkenin lityum sektörüne ciddi bir katkı

sunmaktadır. Aynı derecede büyük rezervi ile Kongo'daki Manono–Kitolo yatağı dikkat çekmektedir (Kesler vd., 2012). Sırbistan'daki aksiliklere rağmen, Rio Tinto'nun lityum madeni Finlandiya, Portekiz, Çek Cumhuriyeti, Avusturya ve Almanya gibi AB ülkelerinin lityum ve diğer batarya metallerinin tedarikinde güven vermektedir. Birleşik krallıktaki jeotermal kaynaklar Doğrudan Lityum Ekstraksiyonu (DLE) için önemli bir fırsat sunmaktadır. Güney Amerikada Arjantin, Şili ve Bolivya üçlüsü yaklaşık %55 rezervleri ile dünyanın en büyük lityum yataklarına sahip olduklarından, Çin, Hindistan, Rusya, ABD ve Kanada'daki tüm kamu veya özel küresel lityum üretici firmaları bu kaynaklarla yarışmaktadır (Lopez, 2023). ABD sert kaya, kil ve tuzlu su gibi çok çeşitli yataklara sahip olduğu için yakın bir gelecekte lityum pazarında küresel bir aktör olması beklenmektedir. Mevcut durumda, Kuzey Amerika'da Meksika ve ABD özel firmalar ile işbirliği yaparak lityum kaynaklarını ve batarya pazarlarını büyütmeye çalışmaktadır. Özetle Lityumun geleceğin güç mücadelesinde sıcak bir ürün olacağı tahmin edilmektedir (Parker vd., 2022).

Çizelge 2. Dünya lityum maden üretimi ve rezervleri (U.S. Geological Survey, 2024).

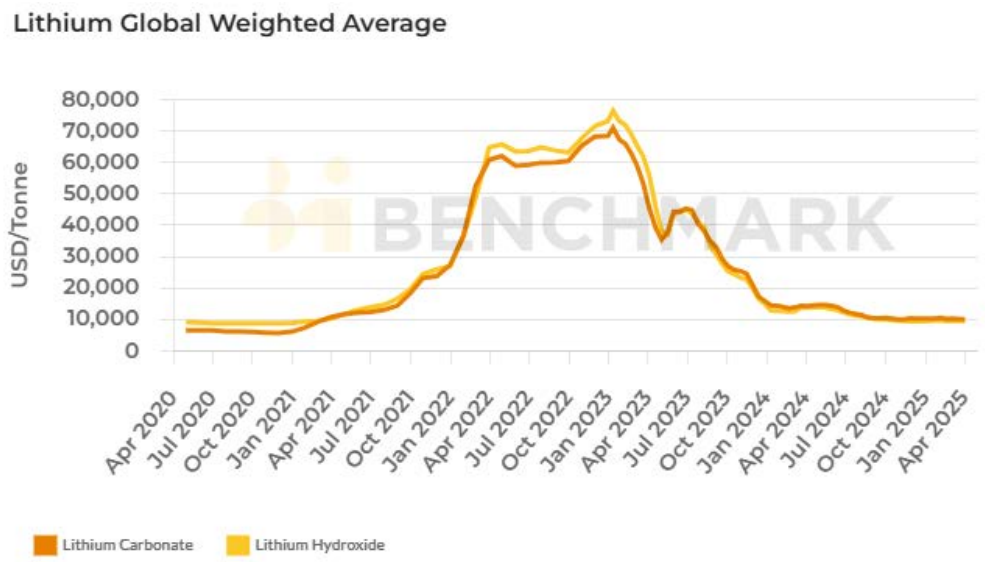
Ülkeler	**Maden Üretimi, Bin ton**	**Rezervler, Bin ton**
Avustralya	86	6200
Şili	44	9300
Çin	33	3000
Arjantin	9.6	3600
Brezilya	4.9	390
Zimbabve	3.4	310
Kanada	0.52	930
Portekiz	0.38	60
USA	Verilmemiş	1100
Diğer Ülkeler	-	2800
Toplam	180	28000

2. ARZ-TALEP DENGESİ VE FİYAT TAHMİNLERİ

Lityum pazarı artan üretim ve zayıf talepten dolayı ciddi bir fiyat düşüşü ile karşı karşıyadır. Mart 2025 itibariyle, lityum karbonat fiyatlar Kuzey Asya CIF 10 US$/kg'ın %4.5 altına yani 9.55 US$/kg inmiştir. Bu Şubat 2021'den beri en düşük seviyeyi temsil etmektedir. Analistlere göre pazarı dengelemek için üretimde kısıntı beklenmektedir. Lityumda görülen fiyat düşüşünün ana nedeni Şili'deki kuvvetli üretim ve noel tatili sonrası Çin'de azalan talep olarak gösterilmektedir. Ayrıca Mali ve Arjantin'deki yeni projeler küresel tedariki tetiklemekte ve aşağı doğru fiyat baskısı yaratmaktadır. Mevcut fiyat düşüşüne katkı sunan faktörler; (i) Üretim fazlalığı, (ii) Pazar dinamikleri ve (iii) Politika değişiklikleri şeklinde özetlenebilir.

Lityum üretimi hızlı bir şekilde artmaktadır, nitekim, Şili'nin lityum ihracatı Ocak 2025'de %22.8 oranında artmış olup bu artışın sürekli olacağı öngörülmektedir. Mali'nin yeni lityum madenleri Bougouni and Goulamina, lityum üretim çıktısını 2025'de 40.528 ton lityum karbonate eşdeğeri (LCE) arttıracağı ve bu da küresel tedarikin %2.7'sine karşı gelmektedir. Yine Arjantin'li Ganfeng Lithium Group'un Mariana tuzlu su projesine başladığı ve ilave 17.420 ton/yıl LCE sunacağı beklenmektedir. Arjantin, şu anda lityum üçgeninin en güçlü üreticisi konumundadır (https://www.benchmarkminerals.com/lithium-prices). Benchmark Mineral Intelligence verilerine göre küresel ağırlıklı ortalama küresel fiyatlar düşmektedir (Şekil 4). Lityum Karbonat (Li_2CO_3) en fazla üretilen bileşik olup ağırlıklı olarak batarya imalatında kullanılmaktadır. Lityum Hidroksit (LiOH) üretimi yüksek-nikel bataryalarında yüksek enerji yoğunluğu sağladığı için artmaktadır. Lityum Metal üretimi uzay uygulamaları gibi alanlarda kullanıldığı için göreceli olarak düşük seviyede kalmaktadır.

Çin ve ABD, elektrikli araçlar (EVs) ve yapay zeka (AI) gibi ileri teknolojilerde kendi-yeterlilikleri sağlanana kadar yerel kritik minerallerin yarışında arama/üretim faaliyetlerine ciddi finansman aktarmaya karar verdiler. Mesela Trump yönetimi yerel madenciliğin ulusal güvenlik meselesi olduğu bağlamında yeni kritik mineral projelerinin destelenmesi için 2025 yılında 700 milyon US$ ayırmıştır. 2024'de ABD'nin kritik mineral tedariki lityum için %5, nikel için %8, kobalt için %1 ve pulsu grafit için %0 seviyesinde idi. Çin de sadece lityum araması için 2025 de yaklaşık 90 milyon US$ bütçe ayırmıştır. Ayrıca ABD'nin gümrük tarifelerine karşılık galyum, germanyum, antimon, grafit ve tungsten gibi stratejik minerallere ihracat yasağı koymuştur. Çin'in grafit, manganez ve nadir toprak elementlerindeki tedarik üstünlüğü, ABD'nin Grönland ve Ukrayna gibi ülkelerin maden kaynakları üzerine çökmesine neden olmuştur. Bu baskı aynı zamanda lityum gibi minerallerin talepten fazla üretimine ve fiyatların düşmesine ama aynı zamanda batı standartlarında maliyetlerin yükselmesine yol açmıştır.



Şekil 4. Lityum karbonat tarihsel fiyat değişimleri S&P Global (2024) Kaynak: Benchmark Mineral Intelligence (https://www.benchmarkminerals.com/lithium)

Benzer durum 2024'yılında nikel pazarında yaşanmıştır. ABD'nin bir zamanlar elektrikli araç batarya tedarikçisi olan Avustralya nikel endüstrisi, Çinin Endonezya'da işlettiği nikel madenlerini genişletmesiyle 2023'den beri devam eden nikel fiyatlarındaki keskin düşüşten dolayı nikel madenlerinin işletimine ara vermek zorunda kalmıştır. Benzer durum kobalt pazarında da yaşanmıştır. Batıdaki maden kapanmalarına ilave olarak batıda açılan madenlerin çevresel maliyetlerin Çin ile yarışmayı imkansız kılmaktadır.

Özellikle yoğun kullanıldığı formu ile lityum karbonat lityum bataryalarının üretiminde en önemli bileşendir. Lityum karbonata olan olağanüstü talep ve sınırlı tedarikten dolayı fiyatlar 11 Ocak 2023'de tarihsel rekor olan 70.96 US$/kg fiyatına yükselmiştir. Ancak 2024 itibariyle yeni lityum karbonat üretim projelerinin devreye girmesi ile fiyatlar normale dönmüştür. Ayrıca, elektrikli araç satışlarındaki geçici büyüme de pazarın stabilize olmasına katkıda bulunmuştur. Şekil 4'de lityum karbonat fiyatlarındaki oynaklık pazardaki tedarik sıkıntıları ve talep dalgalanmalarını sergilemektedir.

2024'teki ekonomik zorluklar, enflasyon baskıları ve değişen sübvansiyon politikaları da dahil olmak üzere, elektrikli araç satışlarının büyümesini yavaşlatmıştır. Bu zorluklara rağmen, ulaşımın elektrifikasyonu özellikle lityum-iyon piller için lityuma olan güçlü talebi sürdürmeye devam edeceği öngörülmektedir. Küresel talep, hükümet teşvikleri, küresel karbonsuzlaştırma hedefleri ve Avrupa ile Çin gibi kilit pazarlarda genişleyen şarj altyapısı sayesinde dayanıklılığını korumaktadır. Bazı bölgelerde sübvansiyonların azaltılması lityum talebini geçici olarak soğutsa da bu etkilerin yerel kalması ve küresel piyasa görünümünü önemli ölçüde etkilememesi beklenmektedir. Ülkeler ve endüstriler iddialı net sıfır

hedeflerine doğru ilerledikçe, lityumun uzun vadeli görünümünün güçlü kalması ve nitelikli bir büyüme göstermesi öngörülmektedir.

Arz tarafında ise, 2024 yılında lityum piyasasında Çinli ve Çin dışı operasyonlarda üretim kesintileri dahil olmak üzere Çin'de rafineri üretiminin azalması, Avustralya'daki Pilbara Minerals ve MinRes gibi şirketlerin işlettiği projelerde gecikmeler yaşanması, sermaye harcamalarındaki kesintiler, şirketlerin projeleri ertelemesi veya iptal etmesiyle arz genişlemesini de bir miktar yavaşlatmıştır. Bu durum, Çin'in lityum hakimiyetini sürdürmesi nedeniyle Batı'nın pazar payını kaybetme riski doğurmaktadır.

Tüm bu zorluklara rağmen, özellikle Güney Amerika'daki Lityum Üçgeni'nde bazı üretim artışları devam ettiğinden dolayı genel yavaşlama kısmen dengelenmiştir. Bu gelişmeler, elektrikli araçların benimsenmesi ve enerji depolama ihtiyaçlarıyla yönlendirilen uzun vadeli talebi karşılama ile arz fazlasını yönetme arasındaki hassas dengeyi gözler önüne sermektedir.

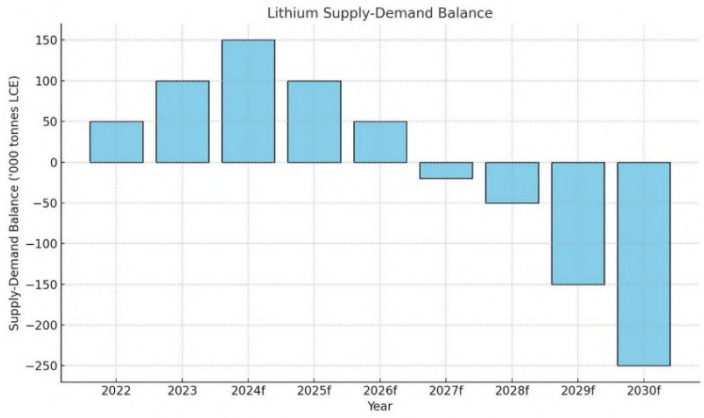
Sabit talep ile kısıtlı arz arasındaki etkileşim, 2024 yılında lityum piyasasının dengelenmesine yardımcı olmuştur. Ancak fiyatlar, jeopolitik belirsizlikler, değişen politikalar ve batarya geri dönüşüm teknolojilerinin artan rolü nedeniyle baskı altında kalmaya devam etmiştir. Bu durum artan talebi karşılamak ve gelecekteki fiyat dalgalanmalarını azaltmak için arzın genişletilmesinin önemini vurgulamaktadır.

GLJ'nin 2025'ten 2030 dönemi için geliştirdiği tahmin modeli, lityum arz ve talebini değerlendirmek için ileri istatistiksel tekniklerden yararlanmaktadır. Bu model, gelecekteki fiyat senaryolarına makul öngörüler sunmak için; (i) Küresel elektrikli araç (EV) satışları, (ii) Lityum üretim seviyeleri ve enerji trendleri gibi kritik piyasa göstergelerini kullanmıştır (Şekil 5).

(i) Elektrikli araç satışları, lityuma yönelik birincil talep unsurunu oluşturmaktadır ve EV pazarındaki üstel büyümenin devam etmesi beklenmektedir. Model, geçmiş satış verilerini ve geleceğe yönelik projeksiyonları dikkate alarak, EV'deki artışın lityum fiyat trendlerini nasıl etkilediğini değerlendirmektedir.

(ii) Lityumun kullanılabilir formlara dönüştürülmesi ve rafine edilmesi, fiyatların belirlenmesinde kilit rol oynamaktadır. Model, küresel düzeydeki geçmiş üretim verilerini dikkate alarak lityum madenciliği ve çıkarımındaki eğilimleri izleyerek geçmiş üretim seviyeleri ile kapasite genişlemelerinin gelecekteki fiyat dinamiklerini nasıl şekillendireceğini değerlendirmektedir.

(ii) Doğal gaz fiyatları gibi enerji piyasası eğilimleri, üretim maliyetleri üzerindeki önemli etkileri nedeniyle analizde yer almaktadır. Enerji maliyetleri, lityumun çıkarılması ve işlenmesinde kritik rol oynadığından, bu fiyatlardaki dalgalanmalar genel piyasa dinamiklerini etkilemektedir.



Şekil 5. 2024 Fastmarket verileri ile arz-talep dinamiklerine dayanarak hazırlanan 2025–2030 Lityum Piyasa eğilimleri (https://www.gljpc.com/gljs-lithium-price-forecast).

Modelden Elde Edilen Temel Bulgular

- Model, küresel EV satışları, lityum üretim seviyeleri ve piyasa dinamiklerinin, lityum fiyat eğilimlerini belirlemede önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur.

- Model, küresel elektrikli araç satışlarında net bir artış eğilimi tespit etmiş ve bu büyümenin 2025–2030 döneminde de devam etmesi öngörülmektedir.
- Sektör tahminleri, lityum piyasasının 2026 sonu veya 2027 başında arz açığıyla karşı karşıya kalabileceğini göstermektedir. Bu durum, EV'ler, sabit enerji depolama sistemleri ve diğer uygulamalardan kaynaklanan hızla artan talebi karşılamak için lityum üretiminin ölçeklendirilmesinde yaşanan zorlukları yansıtmaktadır.

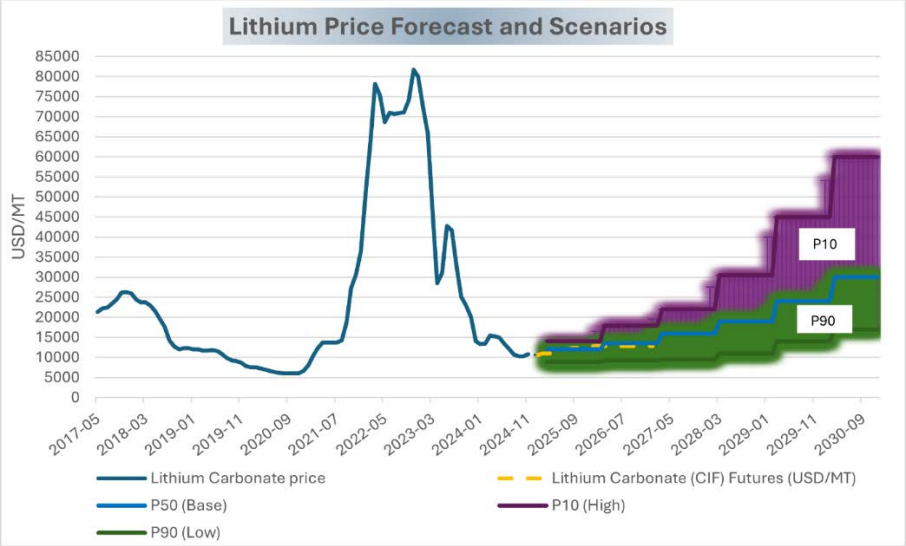
Batarya geri dönüşüm teknolojilerindeki gelişmeler ve bunun fiyatlara yansıması bu modelde dikkate alınmamıştır. Muhtemelen 2025-2030 gibi kısa vadeli bir projeksiyonda geri dönüşümün katkısının belirgin olmadığı bulunmuştur. Nitekim yapılan kısa bir değerlendirmede geri dönüşüm teknolojilerinin olgunlaşmasının ve mevcut fiyatlarla rekabetinin 2030 yılını bulacağı anlaşılmaktadır.

Önümüzdeki yıllarda lityum fiyatlarındaki potansiyel eğilimler farklı piyasa şartlarında tahmini üç ayrı senaryo üzerinden sunulmaktadır (Şekil 6):

- Yüksek Senaryo (P10): Elektrikli araç talebinde büyük bir artış ve ciddi arz sıkıntıları yaşanması durumunda önemli fiyat artışlarını yansıtmakta,
- Temel Senaryo (P50): EV talebinin istikrarlı şekilde devam ettiği ve arzın kademeli olarak arttığı, yüksek ama dengeli fiyatların sürdüğü senaryo, ve
- Düşük Senaryo (P90): EV talebinde yavaşlama ve arzda ılımlı artışın yaşandığı senaryo olmak üzere üç senaryo öngörülmektedir.

Lityum piyasası, elektrikli araçlardaki büyüme, gelişmiş enerji depolama sistemlerinin yaygınlaşması ve temiz enerji teknolojilerinin daha geniş kapsamda devreye alınması gibi öncelikli gelişmelerin kalbinde yer almaktadır. Belirsizlikler devam etse de modelin sürekli olarak

güncellenmesi, temel piyasa dinamiklerinin izlenmesi ve uygun düzeltmelerin yapılması önerilmektedir.

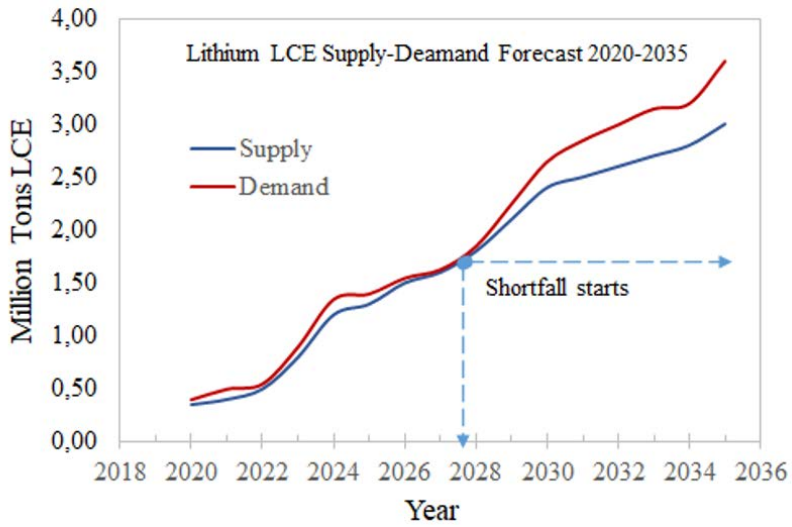


Şekil 6. Lityumun gelecek fiyat tahmin senaryoları https://www.gljpc.com/gljs-lithium-price-forecast

Çin'de lityum fiyatlarının Aralık 2022'de ton başına 81.38 dolara fırlaması daha az lityum gerektiren lityum demir fosfat (LFP) bataryalara geçiş çalışmalarını hızlandırmış ve Tianqi Lityum ve IGO Ltd. gibi şirketler, zayıf piyasa koşulları nedeniyle lityum hidroksit rafineri genişletme planlarını durdurmuştur. Kuzey Amerika'nın lityum tedarik zinciri netleşmediği için piyasa üzerindeki baskı artmaktadır. 2022'de çıkan "ABD Enflasyonu Düşürme Yasası (IRA)", Kanada ve diğer müttefik ülkelerden gelen lityum için vergi indirimleri sağlamaktaydı. Ancak Trump yönetimi lityum gibi Kanada'dan yapılan enerji ihracatına %10 gümrük vergisi koyması lityum ithalatını daha pahalı hale getirerek sektöre yatırımları sınırlayabilir. Şu anda, ABD'nin lityum talebinin sadece %44.7'si yerli üretimle, Kanada kaynakları da dahil edildiğinde %76.4'ü karşılanabiliyor. Olası politika değişiklikleri, Kuzey Amerika'daki lityum fiyatlarında ani değişikliklere neden olabilir.

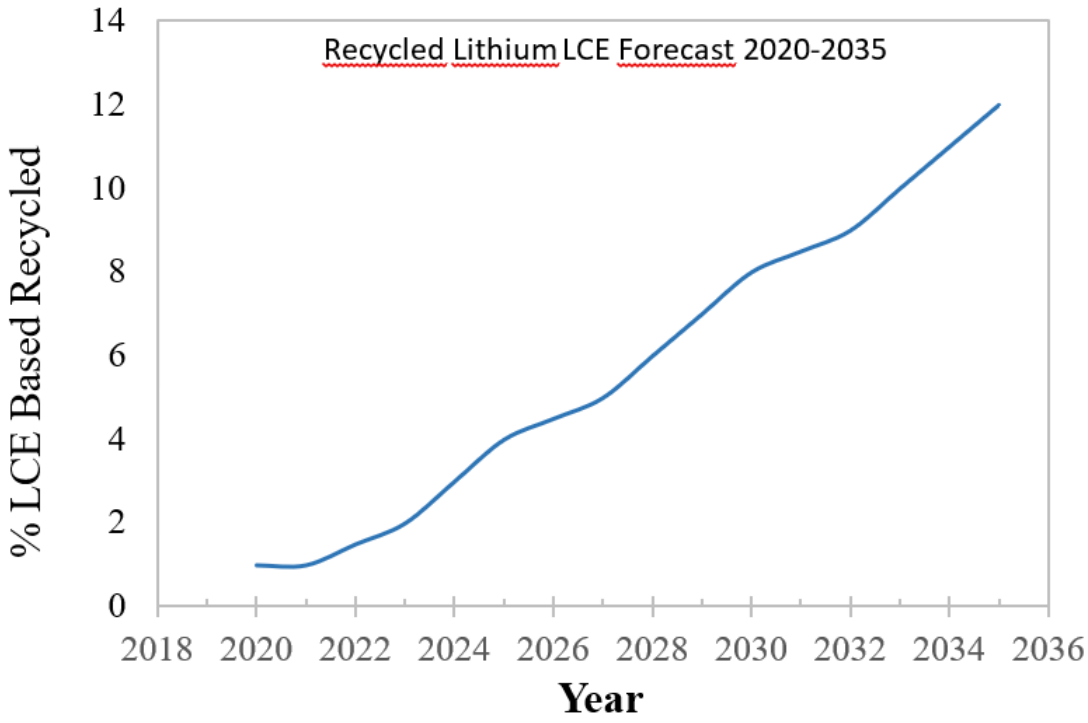
Lityum fiyatlarındaki düşüş, batarya üretim maliyetleri üzerinde belirgin bir etki yaratmış ve hibrit ve bataryalı elektrikli araçlarda fiyatlar gerilemiştir. Beklenenden yavaş ilerleyen EV tercihi, azalan devlet teşvikleri ve ekonomik belirsizlikler nedeniyle lityum talebini zayıflatmıştır. Otomobil üreticileri üretim tahminlerini revize etmekte, bu da batarya hammaddesi alımlarında dalgalanmalara neden olmaktadır.

2024 itibarıyla, küresel lityum üretimi yaklaşık 240.000 metrik ton lityum içeriğine ulaşarak önceki yıllara göre önemli bir artış kaydetmiştir (https://www.statista.com/statistics/606684/world-production-of-lithium). Bu rakam, çıkarılan toplam lityum içeriğini ifade etmektedir ve endüstri raporlarında standartlaştırma amacıyla genellikle Lityum Karbonat Eşdeğeri (LCE) olarak yaklaşık 1.3 Milyon ton LCE'ye (1 ton LCE ≈ 0.188 ton lityum metal) denk gelmektedir. 1.3 Milyon ton LCE'nin %55'i (~705.000 t LCE) lityum karbonat), %35'i (~610,000 ton LCE) lityum hidroksit, %2'si (~26,000 ton LCE) lityum metali ve %8'i diğerleri (~30,000 ton LCE) paylaşılmaktadır.



Şekil 7. 2020-2035 yıllarına çeşitli kaynaklardan (International Energy Agency (IEA), Benchmark Mineral Intelligence, Fastmarkets, Statista) alınan verilere dayanılarak hazırlanan tahmini Lityum Karbonat Eşdeğeri (LCE) arz-talep diyagramı (https://www.statista.com/statistics/606684/world-production-of-lithium)

Kullanılmış bataryalardan lityumun geri kazanılması hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemlidir. Geri dönüşüm süreci; söküm, ayrıştırma, kimyasal çözelti ile çözündürme ve yeniden kristallendirme gibi adımları içerir. Bu sayede %80'in üzerinde lityum metalinin geri kazanımı mümkündür. 2024 itibarıyla geri dönüştürülmüş lityum, küresel lityum arzının LCE cinsinden çok küçük bir kısmını yaklaşık %4'nü oluşturduğunu göstermektedir. Bu payın önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde artması beklenmektedir. Tahminler, 2035 yılına kadar geri dönüştürülmüş lityumun yıllık 400.000 metrik ton LCE arzı sağlayabileceğini (yaklaşık %12) ve bu sayede yeni çıkarılan lityuma olan bağımlılığının önemli ölçüde azalabileceğini göstermektedir (https://autorecyclingworld.com/?s=battery+recycling).



Şekil 8. 2020-2035 yılları için çeşitli kaynaklardan (Redwood Materials, The International Energy Agency (IEA), Benchmark Mineral Intelligence, Fastmarkets, Bloomberg NEF) toplanan verilerle hazırlanan geri dönüştürülen lityumun toplam Lityum Karbonat Eşdeğeri (LC) üretimine tahmini katkısı (https://autorecyclingworld.com/global-battery-recycling-volumes-to-rise-sharply-after-2030-new-data-from-ces).

Geri dönüştürülmüş lityum şu anda toplam arz içinde küçük bir rol oynasa da, geri dönüşüm teknolojilerindeki gelişmeler ve kullanım ömrü sona ermiş pillerin daha fazla toplanması, bu katkının artmasını sağlayacaktır. Bu dönüşüm, sürdürülebilir ve döngüsel bir lityum ekonomisi oluşturmak açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 8, yıllara göre tahmini geri dönüşüm yüzdelerini vermektedir (% Geri Dönüştürülen Lityum = LCE Geri Dönüştürülen Lityum / LCE Üretilen Toplam Lityum (LC)×100).

Lityum Piyasasını Etkileyen Temel Eğilimler şu şekilde sıralanabilir:

1. Artan Talep*:* Elektrikli araç (EV) pazarının hızlı büyümesi, Yenilenebilir enerji depolama çözümlerinin artan kullanımı, tüketici elektroniği ve nesnelerin interneti (IoT) cihazlarının yaygınlaşması şeklinde gelişirse talebin arzı aşması durumunda lityum fiyatlarında artış görülebilir. Bunu dengelemek için sert kaya ve tuzlu su kaynakları gibi yeni lityum rezervlerinin keşfi ve yatırımlarında artış, zorlandığı durumlarda ise jeotermal tuzlu sular veya deniz suyu gibi geleneksel olmayan kaynaklardan lityum çıkarımı geliştirilebilir.

2. Arz Kısıtlamaları ve Jeopolitik Riskler: Lityum üretiminin Avustralya, Şili, Çin ve Arjantin gibi az sayıda ülkede yoğunlaşması, lityum madenciliğine karşı çevresel ve sosyal tepkiler, jeopolitik gerilimlerin tedarik zincirlerini etkileme potansiyeli sıralanabilir. Bu durumda Ülkeler ittifaklar kurarak veya yerel kaynak geliştirmeye yönelerek lityumu güvence altına almak isteyebilir. Arz darboğazları maliyetleri artırabilir ve EV yayılımını yavaşlatabilir. Lityum-iyon pillerin geri dönüşümü, ikincil bir lityum kaynağı olarak önem kazanabilir. Afrika, Avrupa ve Kuzey Amerika gibi bölgelerde lityum üretimine yatırım yapılarak tedarik zincirlerinin çeşitlendirilmesi, yerel madencilik ve rafinajı teşvik eden hükümet politikaları jeopolitik ve bölgesel risklere karşı daha az hassasiyet ve lityum fiyatlarında istikrar sağlanabilir.

3. Teknolojik gelişmelerin Lityuma Bağımlılığı Azaltması: Sodyum-iyon, katı hal veya magnezyum-iyon gibi lityum alternatiflerine yönelik araştırmalar sonucunda daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayan ve lityum kullanımını azaltan batarya teknolojileri geliştirilebilir. Bu durumda lityum-iyon pillerle rekabet edebilecek yeni batarya alternatifleri geliştirilerek uzun vadede lityuma olan talep durağanlaşabilir veya azalabilir.

4. Döngüsel ekonomi ve geri dönüşüm: Sürdürülebilir batarya üretimi ve bertarafı için düzenleyici baskılar lityum geri dönüşüm teknolojilerinin ekonomik olarak daha uygulanabilir hale gelmesi yol açabilir. Bu durumda lityum arzının önemli bir kısmı geri dönüştürülmüş pillerden sağlanarak çevresel etkiler ve madencilikle ilgili riskler azalabilir bu da ham madde çıkarımına olan bağımlılığı azaltarak tedarik zincirini dengeleyebilir.

5. Piyasa dalgalanmaları**:** EV benimseme oranlarındaki değişiklikler, enerji politikaları ve küresel ekonomik koşullar ve aşırı üretim veya yetersiz üretim kaynaklı madencilikte dalgalanmalar**,** lityum fiyatlarında yüksek dalgalanmalara, EV üreticileri ve batarya üreticileri için belirsizlikler ortaya çıkar ve riskleri yönetmek için uzun vadeli sözleşmeler ve koruma stratejileri gerekebilir.

6. Çevresel ve sosyal baskılar lityum madenciliğinde su kullanımı ve kirlilik konusundaki çevresel endişeler madencilik sahalarının yakınındaki topluluklardan gelen sosyal direniş, daha temiz ve sürdürülebilir çıkarım yöntemleri içeren lityum madenciliği üretim maliyetlerini artabilir

3. SONUÇLAR

Gelecek talep tahmini yapılırken, elektrikli araç (EV), enerji depolama sistemleri (ESS) ve EV satışları, batarya teknolojisi tercihleri, politik teşvikler ve geri dönüşüm kapasitesi elektronik sektörlerindeki büyüme

dikkate alınmaktadır. Nihai değerler; gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir.

İyimser senaryoya göre lityum arz zincirinin çeşitlendirilmesi ve ölçeklerinin büyütülmesi, teknolojik verimlerin iyileştirilmesi ve geri dönüşümün makul seviyelere çıkartılmasının sürdürülebilir bir büyümeye yol açacağı ve fiyatların stabil hale getireceğini öngörmektedir.

Kötümser senaryoya göre, arzın kısıtlanması, çevresel baskılar ve alternatif önerilerin yavaş ilerlemesi yüksek maliyetlere ve engelli bir teknolojik iyileşmeye yol açacaktır.

En muhtemeli ise, talebin inovasyon ve geri dönüşümü zorladığı fakat arz/tedarik zincirinin kesintiye uğramadan ve çevresel endişelere yol açmadan sorunsuz ilerlediği bir senaryodur.

Eskişehir-Kırka artık killeri lityum rezervleriyle Ülkemizin bilinen stratejik bir lityum kaynağıdır. Yerli batarya üretimi ve teknoloji yatırımlarla bu potansiyel desteklenmelidir. Tesis geri dönüşüm sıvısından Etimaden'in kurduğu pilot tesis 10 ton/yıl üretim yaparken, yeni başlatılan bir ihalede bu kapasite 550 t/y lityum karbonat üretimi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Balaram, V., Santosh, M., Satyanarayanan, M., Srinivas, N., & Gupta, H., 2024. Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. Geoscience Frontiers, 15, 101868.

Chandrasekharam, D., Şener, M. F., Recepoğlu, Y. K., Isık, T., Demir, M. M., & Baba, A., 2024. Lithium: An energy transition element, its role in the future energy demand and carbon emissions mitigation strategy. Geothermics, 119, 102959.

Christmann, P., Gloaguen, E., Labbe, J-F., Melleton, J., & Piantone, P., 2015. Global Lithium. Book on "Resources and Sustainability Issues, Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries, and Recycling", ch. 1, Edited by Chagnes, A., Świątowska, J., Elsevier.

Grey, C. P., & Hall, D. S., 2020. Prospects for lithium-ion batteries and beyond-a 2030 vision. Nat. Commun., 11, 1–4.

Helvaci, C., Mordogan, H., Colak, W., & Gundogan, I., 2004. Presence and distribution of lithium in borate deposits and some recent lake waters of West-Central Turkey. Int. Geol. Rev., 46, 177–190. https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.2.177.

https://www.benchmarkminerals.com/lithium

https://www.gljpc.com/gljs-lithium-price-forecast.

Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., & Wallington, T. J., 2012. Global lithium resources: relative importance of pegmatite, brine and other deposits. Ore Geol. Rev., 48, 55–69.

Lee, K. J., You, J., Gao, Y., & Terlier, T., 2024. Release, transport, and accumulation of lithium in shale brines. Fuel, 356, 129629. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129629.

London, D., 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. Ore Geol. Rev., 101, 349–383. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.020.

Lopez, M. D. S., 2023. Geopolitics of the Li-ion battery value chain and the Lithium Triangle in South America. Lat. Am. Policy, 14, 22–45. https://doi.org/10.1111/lamp.12285.

Park, S., McNulty, T. P., & Ewing, R. C., 2022. Critical metal resources in Democratic People's Republic of Korea. Int. Geol. Review, 65(17), 2717–2737. https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2151049.

Parker, S. S., Franklin, B. S., Williams, A., Cohen, B. S., Clifford, M. J., & Rohde, M. M., 2022. Potential lithium extraction in the United States: Environmental, economic, and policy implications. The Nature Conservancy.

Rossi, C., Bateson, L., Bayaraa, M., Butcher, A., Ford, J., & Hughes, A., 2022. Framework for remote sensing and modelling of lithium-brine deposit formation. Remote Sens., 14, 1383. https://doi.org/10.3390/rs14061383.

Stefanovic, N., Danilovic Hristic, N., & Petric, J., 2023. Spatial planning, environmental activism, and politics-Case study of the Jadar Project for lithium exploitation in Serbia. Sustainability, 15, 1736. https://doi.org/10.3390/su15021736.

Stephenson, L., 2023. Tectonic related lithium deposits another major region found North East Tanzania. Natural Resourc., 14, 161–191. https://doi.org/10.4236/nr.2023.149012.

Sykes, J. P., & Schodde, R., 2019. A global overview of the geology and economics of lithium production. Presentation, 1–65. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18537.42088.

Toba, A. L., Nguyen, R. T., Cole, C., Neupane, G., & Paranthaman, M. P., 2021. U.S. lithium resources from geothermal and extraction feasibility. Resources, Conservation and Recycling, 169, 105514. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105514.

Xie, P., Hower, J. C., Nechaev, V. P., Ju, D., & Liu, X., 2021. Lithium and redox-sensitive (Ge, U, Mo, V) element mineralization in the Pennsylvanian coals from the Huangtupo coalfield, Shanxi, northern China: With emphasis on the interaction of infiltrating seawater and exfiltrating groundwater. Fuel, 300, 120948. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120948.

U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2018. USGS: Reston, VA, USA.

U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2023. USGS: Reston, VA, USA.

U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2024. USGS: Reston, VA, USA.

ALPİN-TİPİ KROMİTİT YATAKLARININ KÖKENİ VE CEVHER POTANSİYELİNİ ETKİLEYEN JEOLOJİK FAKTÖRLER

ORIGIN OF ALPINE-TYPE CHROMITITE DEPOSITS AND GEOLOGICAL FACTORS AFFECTING THEIR ORE POTENTIAL

Osman Parlak
Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Sarıçam, Adana

Cahit Dönmez
MTA Genel Müdürlüğü, Maden Etüt Dairesi Başkanlığı, 06800 Çankaya, Ankara

Evren Arslan
Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG), 06560 Beştepe, Ankara

ÖZ: Ülkemizde krom madenciliği 1800'lü yılların ortasından beri kamu ve özel sektöre bağlı çeşitli kuruluşlar eliyle yürütülmektedir. Krom cevheri başlıca metalurji, kimya, refrakter ve döküm sanayinde yoğun bir şekilde kullanılmakta olup stratejik olarak oldukça önemlidir. Krom yatakları başlıca Alp-Himalaya kuşağı boyunca birçok alanda gözlenirken, ülkemizde ofiyolitlerle ilişkili Alpin tipi yataklar önemli rezervler sunmaktadır. Kromit yataklarının içinde bulunduğu peridotit genel adıyla bilinen ultrabazik kayaçlar Türkiye'de geniş alanlar kaplamaktadırlar. Ultrabazik kayaçlar, Neotetis okyanusal basenlerinin kapanması süreçlerinde okyanus tabanından kıta kenarlarına aktarılan allokton kütleler olarak, Türkiye'de Alp orojenez kuşağının önemli bir bileşenini oluşturan ofiyolit topluluğu ile birliktelik sunmaktadırlar.

Kromit madenciliği ülkemizde ve dünyada geleneksel olarak mostra bazında yüzlekler veren krom zuhurlarının haritalanması, sondajlar yardımıyla üçüncü boyutunun ortaya konması, rezervlerinin hesaplanması ve işletilmesi ile günümüze kadar süregelmiştir. Ancak birçok bölgede bilinen rezervlerin işletilip tüketilmesiyle özellikle gömülü rezervlerin ortaya konması bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Bilimsel çalışmalar, (a) ekonomik boyuttaki kromititlerin harzburjitik manto tektonitleri (peridotit) ile bazaltik ergiyiklerin etkileşimi sonucu oluştuğunu,

(b) özellikle podiform kromitit kütlelerinin boyutlarının yan kayaç harzburjitlerin tüketilme derecesi ile yakından ilgili olduğunu ve (c) bu yatakların manto-kabuk sınırına yakın alanlarda yoğunlaştığını göstermektedir.

Günümüzde, gömülü yatakların aranmasında geleneksel yöntemlerin yanı sıra ileri bilimsel yaklaşımların da kullanılması bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü geleneksel yöntemlerle yapılan arama çalışmalarında hem keşif başarı oranları azalmış hem de arama maliyetleri önemli bütçeler gerektirir olmuştur. Bu nedenle, bilimsel yaklaşım ile ülke ekonomisine kazandırılacak her kuruşun aynı zamanda toplumsal AR-GE (Araştırma-Geliştirme) kültürümüzü de geliştireceği unutulmamalıdır.

Bu çalışma kapsamında literatürde halihazırda kabul gören Alpin-tip kromitit oluşumlarına ilişkin bilgiler tüm yönleri ile sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kromit, Podiform Kromitit, Peridotit, Ofiyolit, Alpin-Tipi

ABSTRACT: *In our country, chrome mining has been carried out by various public and private sector organizations since the mid-1800s. Chrome ore is used intensively in metallurgy, chemistry, refractory and casting industries and is strategically very important. While chrome deposits are observed in many areas mainly along the Alpine-Himalayan belt, Alpine type deposits associated with ophiolites in our country offer significant reserves. Ultrabasic rocks, known as peridotites, in which chromite deposits are located, cover large areas in Türkiye. Ultrabasic rocks, as allochthonous units emplaced from the ocean floor to the continental margins during the closure processes of Neotethyan oceanic basins, are together with the ophiolite assemblages, which constitute an important component of the Alpine orogeny belt in Türkiye.*

Chromite mining in our country and worldwide has traditionally been carried out by mapping chromite occurrences that provide surface exposures based on outcrops, determining their third dimension with the help of drilling, calculating reserves, and exploiting them up to the present day. However, with the extraction and depletion of known reserves in many regions, the need to identify especially buried reserves has become a necessity. Scientific studies indicate that (a) economically significant chromitites form as a result of the interaction between harzburgitic mantle tectonites (peridotite) and basaltic melts, (b) particularly, the size of podiform chromitites is closely related to the degree of depletion of the host harzburgite rocks, and (c) these deposits tend to concentrate close to the mantle-crust boundary.

Today, in addition to traditional methods, advanced scientific approaches are also required in the exploration for buried deposits. Because in the exploration work conducted with traditional methods, both the success rates of discovery have decreased and the exploration costs have required significant budgets. It should not be forgotten that every penny gained for the national economy through a scientific approach will also contribute to the development of our societal R&D (Research and Development) culture.

Within the scope of this study, information on Alpine-type chromitite genesis currently accepted in the literature will be presented in all aspects.

Keywords: *Chromite, Podiform Chromitite, Peridotite, Ophiolite, Alpine-Type*

1. OKYANUSAL LİTOSFER – OFİYOLİT

Orojenik kuşakların en önemli bileşenlerinden birisi olan ofiyolitlerin okyanusal kabuk ve üst manto peridotitlerinin kalıntıları olarak değerlendirilmesi plaka tektoniğindeki gelişmelerle paralellik sunmaktadır (Gass, 1968; Dewey ve Bird, 1970; Moores, 1970; Coleman, 1971; Moores ve Vine, 1971). Ofiyolitler üzerine yapılan ilk çalışmalar, bu kaya topluluğunun okyanus ortası sırtlarda oluştuğu yönündeydi (Gass, 1968; Moores ve Vine, 1971; Coleman, 1971). Ancak daha sonra özellikle jeokimyasal verilere dayalı çalışmalarda okyanus içi yitim zonu üzerinde (Suprasubduction zone-SSZ) oluştukları ileri sürülmüş ve Güneybatı Pasifik bölgesindeki güncel yayönü (forearc) ortamlara benzerlikleri vurgulanmıştır (Casey ve Dewey, 1984; Hawkins vd., 1984; Leich, 1984; Pearce vd., 1984; Stern ve Bloomer, 1992).

Ofiyolitik birimlerin detaylı bir şekilde çalışılması birçok konuyu aydınlatmada oldukça önemlidir. Bunlardan başlıcaları;

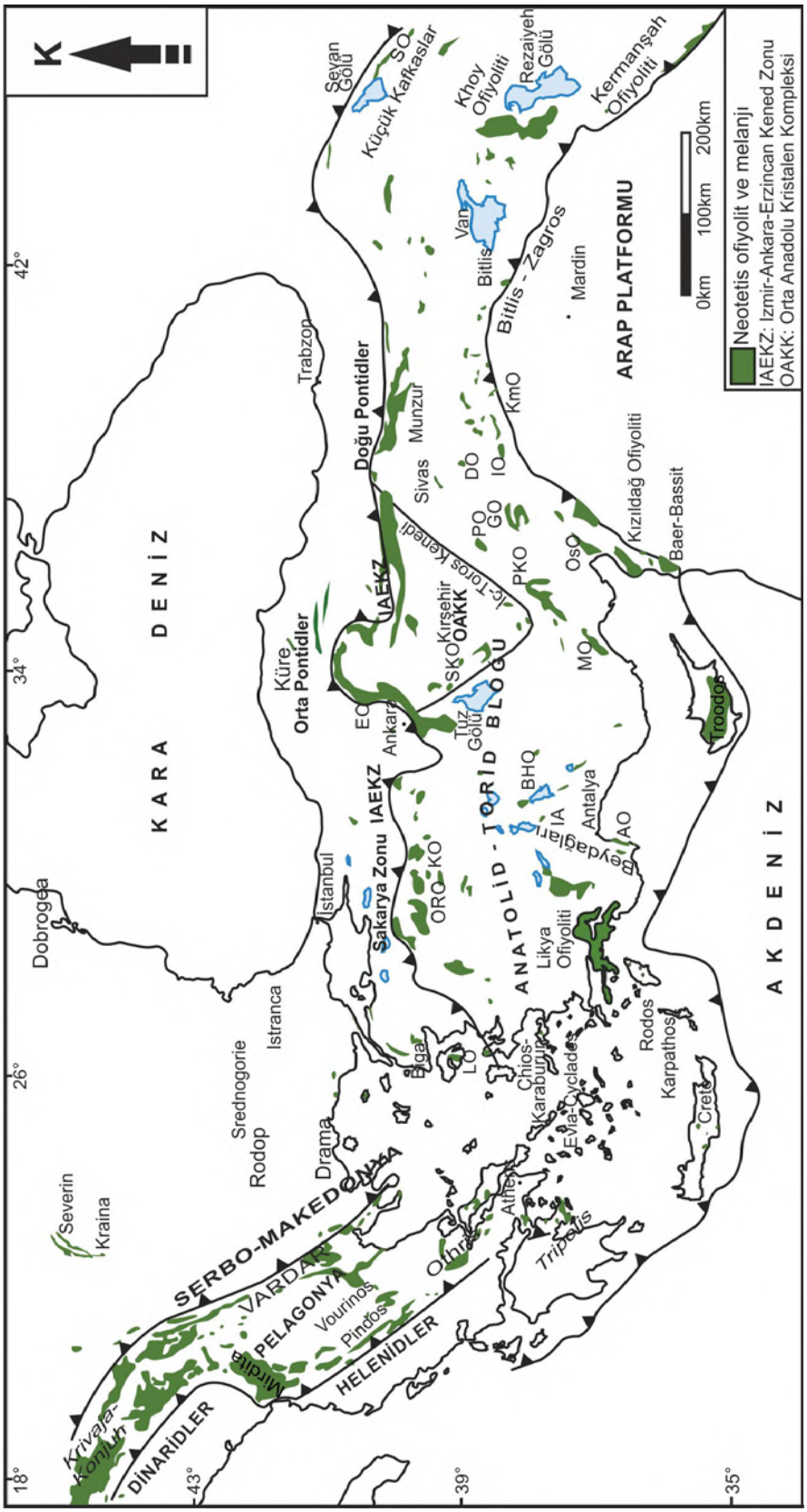
- Eski okyanusal basenlerin açılma-kapanma izlerini (Wilson döngüsü) taşımaları,

- Kenet zonları veya orojenik kuşakların evrimini anlamada önemli olmaları,
- Deniz tabanı yayılmasının izlerinin kayıtlarını taşımaları,
- Paleocoğrafik modellerin oluşturulmasındaki önemi,
- Okyanusal litosferin kıta kenarına yerleşimi sırasında gelişen metamorfizmanın izlerini (amfibolit, eklojit, mavişist, granülit) içermesi,
- Farklı jeodinamik ortamları tanımlamada (MORB, yayönü, yay gerisi, yay vb.) kullanılabilmesi,
- Okyanus kabuğu ve üst manto peridotitleri hakkında (~15 km) bilgiler sunması,
- Melanj oluşumu açısından önemli bilgiler barındırması, ve
- Ekonomik (kromit, manyezit, asbest, altın, nikel, masif sülfit yatakları vb.) maden yatakları içermesi şeklinde sıralanabilir.

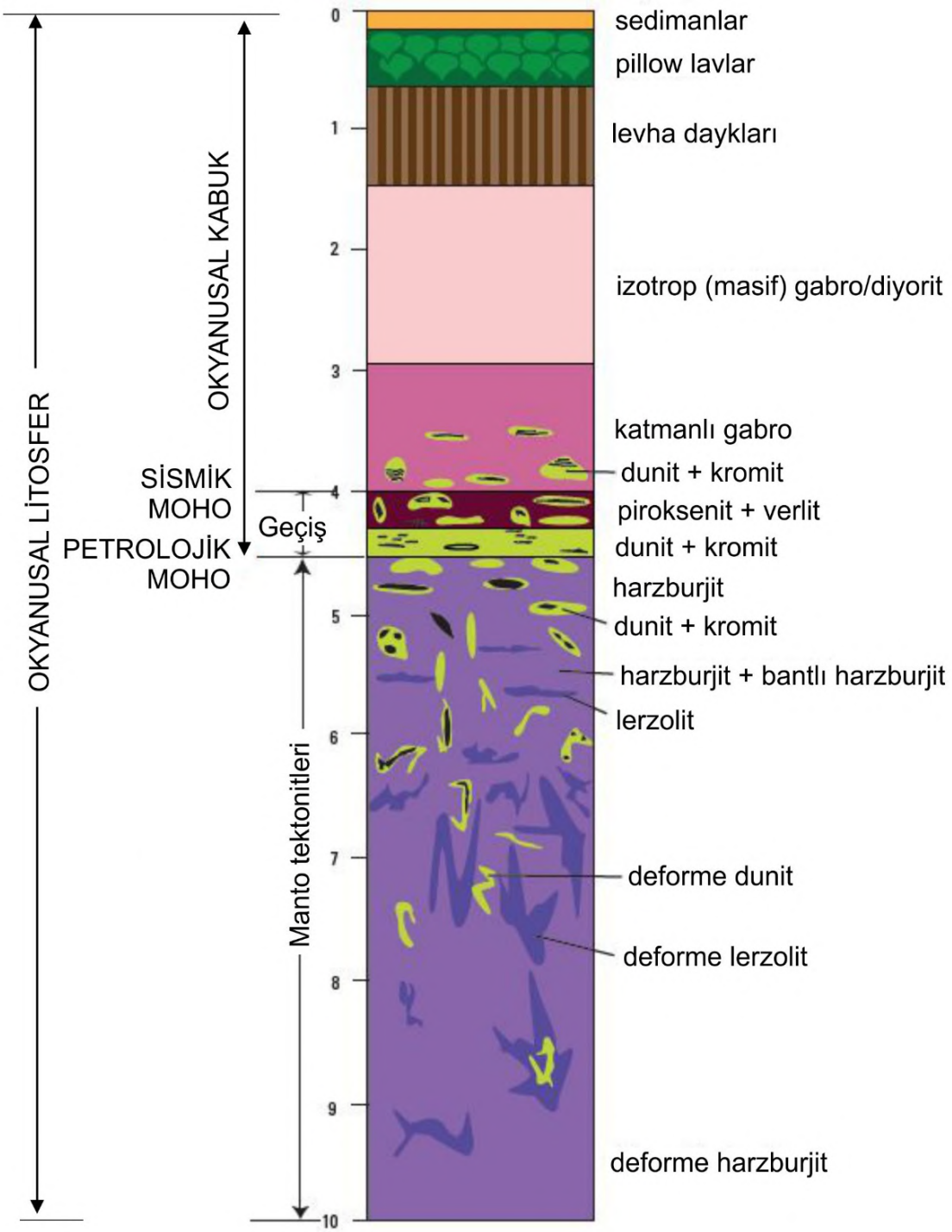
Orojenik kuşaklarda gözlenen ofiyolitik bir istif tabandan tavana doğru şu birimleri içermektedir: manto tektonitleri, ultramafik-mafik kümülatlar, izotrop gabro, levha dayk kompleksi, plajiyogranit sokulumları, volkanikler ve arakatkılı sedimanlar (Şekil 1). Podiform kromititler iyi korunmuş yüzlekler sunan Oman veya Guleman (Türkiye) gibi ofiyolitlerde (Augé, 1987; Uysal vd., 2018) sıklıkla kalın dunitik zon içeren MOHO geçiş bölgesinde ve manto peridotitleri (tektonitler) bölümünün en üst kesiminde ilk 1-1.5 km derinliklerde gözlenmektedirler (Şekil 2). Yüksek tenörlü masif cevherleşme içeren yataklar genel olarak manto tektonitleri içerisinde, düşük tenörlü saçınımlı bantlı cevherler ise MOHO geçiş zonu boyunca veya kümülatların tabanında gözlenirler (Şekil 2).

Doğu Akdeniz bölgesinde Alp-Himalaya orojenik kuşağında yer alan Mesozoyik yaşlı Neotetis ofiyolitleri, batıda Dinaridler, Albanidler ve Hellenidlerin Orta-Geç Jura dönemine ait ofiyolitleri ile temsil edilmektedir (Şekil 1). Batıda gözlenen Orta-Geç Jura yaşlı ofiyolitler, okyanus ortası sırtı (MOR) ile okyanus içi yitim zonu üzeri (SSZ) arasında geçişli bir tektonik ortamda oluşmuştur (Bebien vd., 1998; Bortolotti vd., 2002; Robertson, 2002, Robertson ve Shallo, 2000; Hoeck vd., 2002; Dilek ve Flower, 2003; Saccani vd., 2004; Dilek vd., 2005, 2008; Tremblay vd., 2009). Doğuda Türkiye, Troodos, Baer-Bassit (Suriye), Hoy, Kermanşah, Neyriz (İran) ve Oman bölgelerinde gözlenen ofiyolitler ise hem Jura hem de Geç Kretase yaşları sunmaktadır (Şekil 1). Bu ofiyolitler çoğunlukla okyanus içi yitim zonu üstünde (SSZ) oluşmuşlardır (Hebert ve Laurent, 1990; Lytwyn ve Casey, 1993; Floyd vd., 2000; Parlak vd., 1996, 2000, 2004, 2009, 2013, 2019; Al-Riyami and Robertson, 2002; Robertson vd., 2006, 2007, 2012; Flower ve Dilek, 2003; Dilek ve Thy, 2009; Dilek ve Furnes, 2009; Topuz vd., 2013; Çelik vd., 2011; Bağcı vd., 2005, 2006, 2008; Bağcı ve Parlak, 2009). Bu bölgelerde MORB karakterli ofiyolit parçaları ancak melanjlarda gözlenebilmektedir.

Türkiye'de yer alan Neotetis ofiyolitleri, genel olarak doğu-batı doğrultulu kenet kuşakları boyunca yer almaktadırlar. Bu tektonik zonlar kıtasal bloklar, metamorfik çekirdek kompleksleri ve sedimanter havzalarla birbirinden ayrılmıştır (Şengör ve Yılmaz, 1981; Robertson ve Dixon, 1984; Robertson, 2002, 2006; Okay ve Tüysüz, 1999; Okay, 2008).



Şekil 1. Neotetis ofiyolitlerinin dağılımı. Kısaltmalar: IA: Isparta Büklümü, LO: Lesvos Ofiyoliti, AO: Antalya Ofiyoliti, BHO: Beyşehir-Hoyran Ofiyoliti, ORO: Orhaneli Ofiyoliti, KO: Kınık Ofiyoliti, EO: Eldivan Ofiyoliti, MO: Mersin Ofiyoliti, PKO: Pozantı-Karsantı Ofiyoliti; OsO: Osmaniye Ofiyoliti, GO: Göksun (Kahramanmaraş) Ofiyoliti, PO: Pınarbaşı Ofiyoliti, IO: Ispendere Ofiyoliti, DO: Divriği Ofiyoliti, KmO: Kömürhan Ofiyoliti, SO: Sevan Ofiyoliti, SKO: Sarıkaraman Ofiyoliti (Dilek & Flower, 2003; Çelik vd.2011).



Şekil 2. Bir ofiyolit dizisinin litolojileri ve podiform kromitin (siyah kabarcıklar) dağılımını gösteren genelleştirilmiş stratigrafik sütunu (Dickey, 1975; Laurent ve Kacira, 1987; Leblanc, 1987 ve Mosier vd., 2012'den alınmıştır).

Kenet kuşakları boyunca ofiyolitler, ofiyolitik melanjlar ve ofiyolitlerle ilişkili metamorfik kayaçlar yoğun bir şekilde yüzeylemeler sunmaktadırlar (Okay, 1986, 1989; Parlak vd., 1995, 2009; Önen ve Hall, 2000; Robertson vd., 2009; Pourteau vd., 2010; Okay ve Whitney, 2010; Dilek ve Furnes, 2011). Bu kenet kuşakları başlıca İzmir Ankara-Erzincan kenedi, Bitlis-Zagros kenedi, İç Torid kenedi şeklinde gözlenmektedir (Şekil 1). Ofiyolitik birimler Geç Kretase döneminde, okyanusal yay-hendek sistemlerinin kıta kenarlarıyla çarpışmaları sonucunda yerleşmişlerdir (Parlak vd., 1996, 2009, 2013, 2019; Robertson, 2002, 2004, 2006, 2007; Flower ve Dilek, 2003; Dilek vd., 2007; Dilek ve Thy, 2009; Dilek ve Furnes, 2009; Okay ve Şahintürk, 1997; Okay vd., 2006; Okay, 1989).

2. KROMİT & KROMİTİT

Kromit, başlıca krom içeren mineral olup, kromun tek doğal kaynağıdır ve bu nedenle metalurji, refrakter üretimi ve alaşım imalatı gibi sanayi alanlarında büyük öneme sahiptir (González-Jiménez vd., 2014; Ullah vd., 2020; Yang vd., 2021). Kromit veya krom-spinel, podiform kromititlerin ana mineralidir ve kromitit oluşumunu anlamamız için temel oluşturmaktadır. Genel formülü $(Mg, Fe^{+2})(Cr, Al, Fe^{+3})_2O_4$ olup bunun yanı sıra Ti, Mn, Co, Zn, Ni, Ga (Gahlan ve Arai, 2007) dahil olmak üzere birçok eser elementi de içermektedir. Bu özelliği ile kromit minerali önemli bir petrojenetik gösterge olarak kullanılabilmektedir (Irvine, 1967).

Kromititi bir kayaç olarak düşündüğümüzde; peridotit-kromitit serisi kayaçlarda hacimsel olarak > %20 kromit içeren kayaca kromitit adı verilmelidir. Eğer kayaç içerisindeki kromit içeriği %5-%20 arasında ise, bu durumda kayaç kromitçe zengin dunit olarak adlandırılabilir (Arai ve Miura,

2016). Kromite eşlik eden silikat minerali esas olarak olivin olup, nadiren plajiyoklas ve piroksen de gözlenmektedir.

Kromititlerin oluşumu için başlıca iki ana oluşum ortamı genel kabul görmüştür. Bunlar; kıtasal kabuk içerisinde gelişim gösteren tabakalı (stratiform) kromititler ve okyanusal litosfer mantosunda yer alan podiform kromititlerdir (Thayer, 1964; Zhou vd., 1994; Arai, 2021). Stratiform kromititler, dünya krom kaynaklarının çoğunu barındırmakta ve genellikle tabakalı intruzyonlar içinde ultramafik ve mafik kayaçlarla birliktelik sunmakta olup Arkeen yaşlı duraylı kratonik bölgelerde geniş yanal uzanımlara sahip sürekli tabakalar şeklinde bulunmaktadırlar. Örnek olarak Güney Afrika'daki Bushveld kompleksi, Zimbabve'deki Great Dyke ve ABD'deki Stillwater Kompleksleri verilebilir (Jenkins ve Mungall, 2018; Langa vd., 2021; Latypov vd., 2024). Podiform kromititler ise genellikle düzensiz, mercek veya yumru şeklinde oluşan, bezelye büyüklüğünden yüzlerce metreye kadar değişen, etrafında ince bir dunit zarfı bulunan oluşumlar olup peridotitler içinde yer almaktadır. Bu tipler genellikle Fanerozoyik orojenik kuşaklarda görülmekte olup Kazakistan'da Kempirsai, Türkiye'de Guleman, Filipinler'de Zambales, Umman'da Semail, Yeni Kaledonya'da Tiébaghi ve Çin'de Luobusa ofiyolitleri podiform kromititlerin yoğun olarak gözlendikleri bölgelere örnek olarak verilebilir (Uysal vd., 2018; Hu vd., 2022; Bo vd., 2023; Zhang vd., 2024; Cai vd., 2025). Bu iki kromitit tipi farklı tektonik ortamlarda oluşmuş olup bunlar; kıtasal levha içi ortam ve okyanus içi yitim zonu ortamıdır (Mathez ve Mey, 2005; Arai, 2021). Her ne kadar stratiform ve podiform kromititlerin oluşum mekanizmaları uzun yıllardır araştırılmış olsa da hâlâ bazı tartışmalar mevcuttur. Stratiform kromititlerin genel olarak kıtasal kabuk içerisinde bulunan bir magma odasında magmanın fraksiyonel kristallenmesi ile oluştuğu kabul edilmekle birlikte, kromitçe-doygun magmaların kökeninin

oldukça karmaşık ve çeşitli olabileceği araştırıcılar tarafından ileri sürülmektedir (magma karışımı, yan kayaçların asimilasyonu, magma üzerindeki basıncın hızla düşmesi vb.) (Yudovskaya ve Kinnaird, 2010; Veksler vd., 2015; Latypov vd., 2024). Podiform kromititlerin ise, manto peridotitleri ile bazik magmanın tepkimesi sonucunda okyanusal manto ve okyanusal kabuk geçiş bölgesi (MOHO) veya bu zonun hemen altında oluştuğu kabul edilmektedir (Zhou vd., 2014; Arai ve Miura, 2016).

Mafik-ultramafik magmaların kristalleşme ürünleri olarak, podiform kromititler, manto ergimesi, eriyik-kayaç etkileşimi ve sonrasındaki magmatik diferansiyasyon süreçleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadırlar (Pagé ve Barnes, 2009; Arai ve Miura, 2016). Dünyada oldukça yoğun bir şekilde kromititler üzerine araştırmalar yapılmasına rağmen, podiform kromititlerin oluşum mekanizmaları hâlâ tartışma konusudur, dolayısıyla daha fazla araştırma yapılmasını gerekli kılmaktadır (Rollinson ve Adetunji, 2013; Arai, 2021; Chen vd., 2021). Mantonun yüksek derecede kısmi ergimeye uğraması, magma karışımı ve eriyik-kayaç etkileşimi gibi mekanizmalar, kromititlerin oluşumu için araştırıcılar tarafından önerilmiştir (Zhou vd., 2014; Arai ve Miura, 2016). Kromititler ve bunlarla ilişkili peridotitlerde ultra-yüksek basınç (UHP) minerallerinin (elmas, koesit vb.) keşfi, podiform kromititlerin oluşum modellerini daha da karmaşık hale getirmekte ve cevap bekleyen yeni soruların ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Yang vd., 2007, 2021; Das vd., 2017; Lian vd., 2017). Bu durum, geleneksel teorileri sorgulamakta ve oluşum ortamlarının potansiyel karmaşıklığı ile birlikte tektonik ve magmatik süreçlerin önemini vurgulamaktadır (Arai, 2013; Zhou vd., 2014; Griffin vd., 2016).

Kromititlerin jeokimyası (kromititleri oluşturan minerallerin kimyasal bileşimi ve kromititlerin tüm kayaç platin grubu element (PGE) içerikleri) esas olarak, bunların oluşum ortamları ve bu sürece dahil olan ergiyiklerin

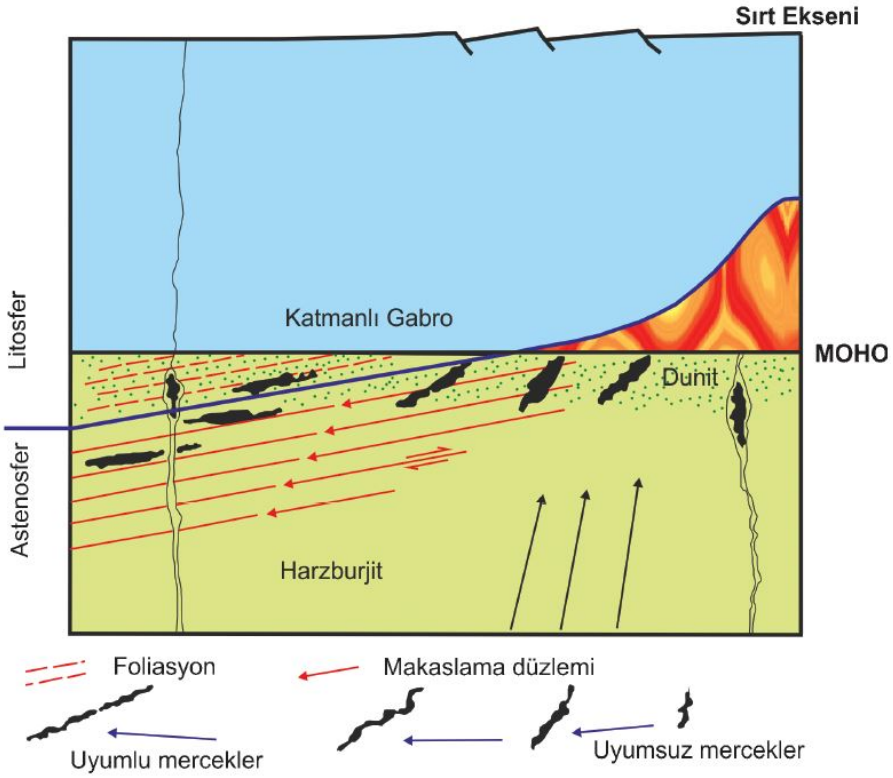
bileşimleri tarafından kontrol edilmektedir (Kamenetsky vd., 2001; Pagé ve Barnes, 2009). Platin grubu elementleri, kromititlerin oluşumunda etkin olan manto süreçlerinin fiziko-kimyasal koşullarını (sülfür doygunluğu, oksijen fugasitesi) anlamada değerli bir petrojenetik araç olarak kullanılmaktadır (Örneğin; Ahmed ve Arai, 2002; Jannessary vd., 2012; Dönmez vd., 2013; Günay ve Çolakoğlu, 2016; Su vd., 2020, 2023). Bunun yanı sıra, kromititlerde kapanım olarak gözlenen silikat, baz metal sülfidler (BMS) ve platin grubu mineralleri (PGM) gibi minerallerin varlığı, kromititlerin kristalleşmesi sırasındaki basınç, sıcaklık ve derinlik hakkında ilave petrojenetik bilgiler sunabilmektedir (Melcher vd., 1997; Borisova vd., 2012). Kromitlerin iz element içerikleri de (Sc, Ti, V, Mn, Co, Ni, Zn ve Ga) kromititlerin oluştuğu jeotektonik ortamları ayırt etmede etkili olduğu ortaya konmuştur (Pagé ve Barnes, 2009; Bo vd., 2023).

3. KROMİT OLUŞUMU

3.1. Peridotit-ergiyik etkileşimi

Bazı araştırıcılar podiform kromititi manto peridotiti içindeki bir magma kanalını (konduit) dolduran bir tür kümülat kayaç oluşumları olarak yorumlamışlardır (Lago vd., 1982; Cassard vd., 1983). Araştırıcılar podiform kromitit oluşumlarının başlangıçta yan kayaç peridotitin astenosferik deformasyon ile oluşan foliasyonlu iç yapısını keser (diskordan) vaziyette olduğunu ileri sürmüşlerdir (Şekil 3). Peridotit iç yapısı ile uyumlu olan bazı kromititlerin ise deformasyon özellikleri gösterdikleri belirtilmektedir (Nicolas, 1989). Kromititlerin dayk şeklinde geliştiklerini ileri süren hipotezin en önemli dayanağı; kromitit nodülü ve onu çevreleyen dunit çeperi içerisindeki spinel kristalleri ile yan kayaç harzburgitteki spinel

kristallerinin Ti içeriğinin oldukça farklılık sunmasıdır (Arai ve Yurimoto, 1994).



Şekil 3. Deniz tabanı yayılması sırasında sırt ekseni altında üst manto koşullarında kanallar (konduit) içerisinde kromitit oluşumu ve deformasyonu (Lago vd., 1982; Stowe, 1994).

Manto peridotitleri içerisinde konumlanan kromitit-dunit çifti, manto-ergiyik etkileşiminin bir ürünü olabilir (Şekil 4; Ergiyik-A) (Arai, 1992; Arai ve Yurimoto, 1994; Zhou vd., 1994). Eğer bu şekilde bir gelişim söz konusu ise, podiform kromititin etrafındaki dunit zarfı ornatma kökenlidir (replasive) (Arai, 1992; Zhou vd., 1994; Arai ve Yurimoto, 1994). Yani ergiyik kayaç etkileşimi sıradında manto peridotitleri içerisinde öncelikle ortopiroksen minerallerinin seçimli ergimesi nedeniyle olivince zengin bir zon gelişmiştir. Podiform kromititleri oluşturan krom spinelin yoğunlaşması, Irvine (1975, 1977) tarafından tabakalı kromitit oluşumu için önerilen kayaç-ergiyik etkileşimi ile ilişkili bir eriyik karışımına benzerlik sunmaktadır. Manto-ergiyik etkileşimi ile, peridotit içerisindeki ortopiroksen

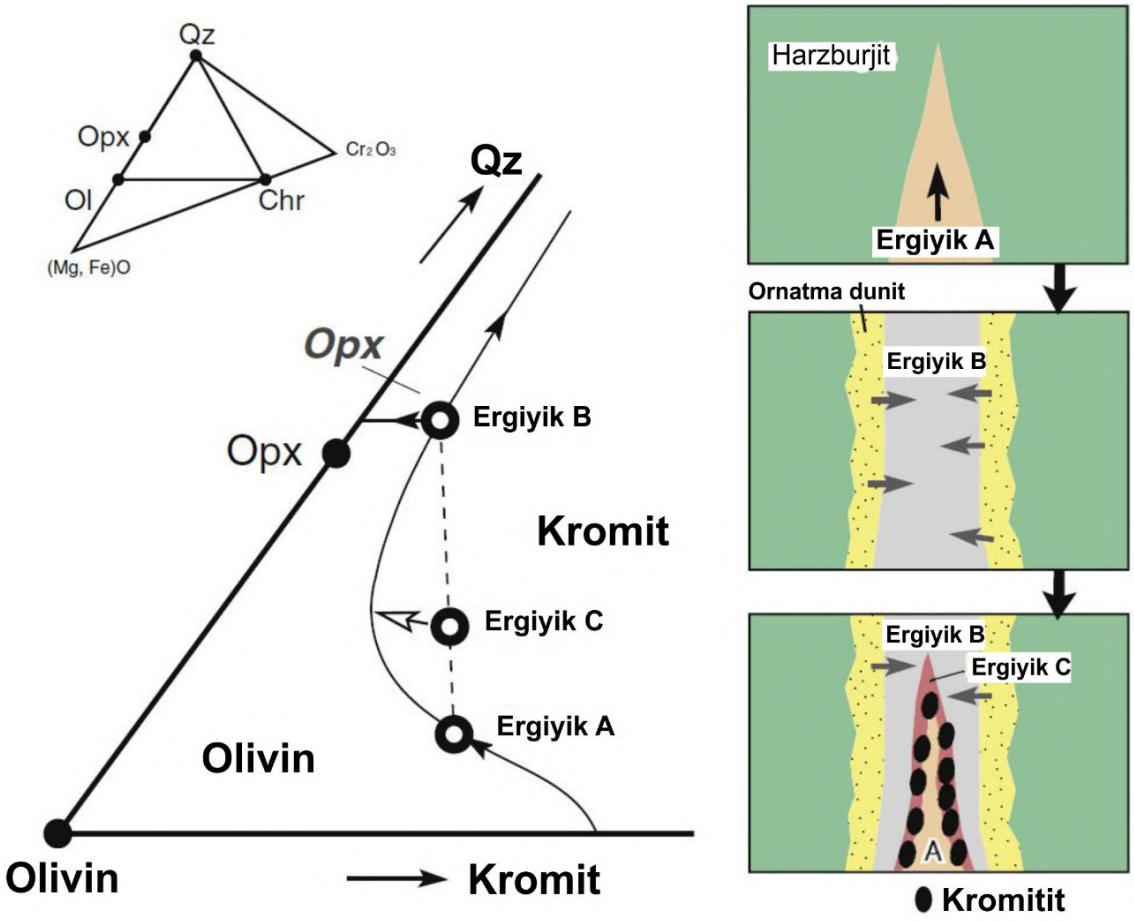
minerallerinin seçimli çözünmesi ve olivin minerallerinin kristalleşmesiyle ortamda Si ve Cr açısından zenginleşmiş ikincil bir eriyik oluşur (Ergiyik-B) (Arai ve Yurimoto, 1994). Bunun nedeni, manto ortopirokseninin Si açısından zengin olması ve sıradan magnezyumca (Mg) zengin magmalara kıyasla çok daha yüksek Cr# (Cr/Cr+Al) değerlerine sahip olmasıdır. Si ve Cr açısından zengin ikincil ergiyikle, sonradan gelen ve krom-spinel'ce doygun olan ilksel ergiyik (Ergiyik-A) karıştığında, bu karışım krom-spinel-aşırı doygun hale gelebilir ve krom-spinel çökelmesine yol açabilir (Ergiyik-C) (Arai ve Yurimoto, 1994; Zhou vd., 1994).

Matveev ve Ballhaus (2002), kromit mineralinin kristallenmesinde sulu magmaların önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. İleri sürülen bu görüş kromitit yataklarında gözlenen kromitler içerisinde yaygın olarak bulunan sulu mineral kapanımlarıyla da tutarlılık sunmaktadır (Johan vd., 1983). Farklı magma tiplerinde oldukça değişken oranlarda su içerikleri gözlenmektedir.

- Ada yayı toleyitlerinde %2.0–6.0 H_2O (Plank vd., 2013; Ballhaus vd., 2015),
- Boninitlerde %1.0–2.9 H_2O ve
- MORB benzeri lavlarda %0.12–0.51 H_2O (Sobolev ve Chaussidon, 1996) bulunmaktadır.

Su açısından fakir bazaltik bir ergiyik olivin ve kromit ile doygunluğa ulaşmış olabilir, ancak aynı sıcaklıktaki ergiyik H_2O açısından daha zengin ise yalnızca kromit ile doygunlaşmış olacaktır. Okyanus içi dalma batma ortamlarında oluşan magmalar okyanus sedimanlarının içerdiği ve dalma batma ortamında taşıdığı su nedeniyle akışkan açısından zengindir. Bu nedenle, podiform kromitit en kolay şekilde okyanus içi dalma zonlarının üzerinde oluşan sulu bazik veya boninitik ergiyiklerde oluşur (Su vd., 2020).

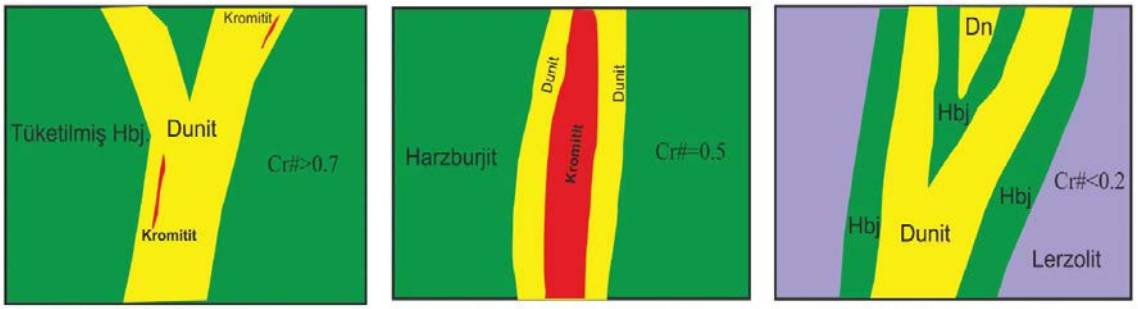
Manto veya manto-kabuk geçiş derinliklerinde, podiform kromititlerin ofiyolitlerde yaygın olarak bulunduğu yerlerde, kristalleşen magmalarda sulu mineraller (amfibol vb.) nadirdir, bu nedenle mevcut olan her su kromitin kristalleşmesini destekler. Yüksek çözelti/kayaç oranları, kromitin yoğunlaşarak kromitit oluşturmasını kolaylaştırarak olivinin kristalleşmesini baskılamıştır (Su vd., 2020).



Şekil 4. Olivin-Kuvars-Kromit faz diyagramında; manto peridotiti (harzburjit) içerisinde podiform kromitit oluşumu için önerilen petrolojik model (Arai ve Yurimoto, 1994; Arai ve Miura, 2015, 2016). Mantodan türetilen olivin ve kromitce doygun ergiyik (A), harzburgitin ortopirokseniyle reaksiyona girerek Si açısından zengin ergiyik (B) ve dunit oluşturmaktadır. Si açısından zengin ergiyik (B), mantodan türetilen ilksel ergiyikle (A) tekrar karışarak krom-spinel açısından aşırı doymuş bir ergiyik (C) üretmiş ve bu da kromitleri kristallendirerek kromititleri oluşturmuştur (Ol: olivin; Opx: ortopiroksen; Chr: kromit; Qz: kuvars).

3.2. Podiform kromitit oluşumunda yan kayacın cevher boyutuna etkisi

Podiform kromititleri çoğunlukla harzburjitlerde, özellikle de harzburjit içerisindeki kromit kristallerinin Cr# (Cr/Cr+Al) değerlerinin 0.4 – 0.6 (Arai, 1997; Arai ve Abe, 1995) olduğu, orta derecede tüketilmiş harzburjitlerde görmekteyiz (Şekil 5). Lerzolitik peridotitlerde kromitit zenginleşmeleri neredeyse bulunmamakta veya varsa da çok küçük boyutlardadır (Arai ve Abe, 1995; Morishita vd., 2006; Payot vd., 2014). Oldukça tüketilmiş harzburjitlerde, yani kayaç içerisindeki kromitin yüksek Cr# (Cr/Cr+Al) > 0.6 değerine sahip olduğu peridotitlerde ise kromitit boyutlarının çok küçük olduğu görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Peridotit yan kayacının tüketilme derecesi ile kromitit yataklarının büyüklüğü arasındaki ilişkiyi gösteren şematik kesitler (Arai, 1997).

Görüldüğü üzere, kayaç-ergiyik etkileşim sisteminin Cr# (veya Cr/Al) değeri podiform kromititin boyutunu belirlemede oldukça önemlidir. Eğer magmanın Cr# değeri düşükse, olivin-kromit (spinel) kotektik (birlikte kristallenme) magma ile yan kayaç ortopirokseninin parçalanmasından kaynaklanan silika açısından zengin bir magma arasındaki karışım, kromit (spinel) ile sadece hafifçe (veya hiç) aşırı doymuş karışık bir magmanın üretilmesine yol açar (Arai ve Abe, 1995). Örneğin, peridotite ait ortopiroksenin Cr# değerinin düşük olduğu bir lerzolit-magma sistemi,

kromitit oluşumu için elverişsizdir (Şekil 5c). Öte yandan, oldukça tüketilmiş bir magma sisteminde, yan kayaç peridotitlerindeki ortopiroksenlerde de Cr# değeri yüksektir ve karışmış magma yüksek derecede kromit açısından aşırı doygunluk gösterebilir. Ancak, yan kayaç harzburjit ortopirokseninden sağlanan Cr ve Al miktarı, bu tür tüketilmiş harzburjitlerdeki ortopiroksen bileşimi ve miktarı nedeniyle düşüktür, bu da sistemin büyük ölçekli kromitit üretimi için uygun olmadığını gösterir (Şekil 5a).

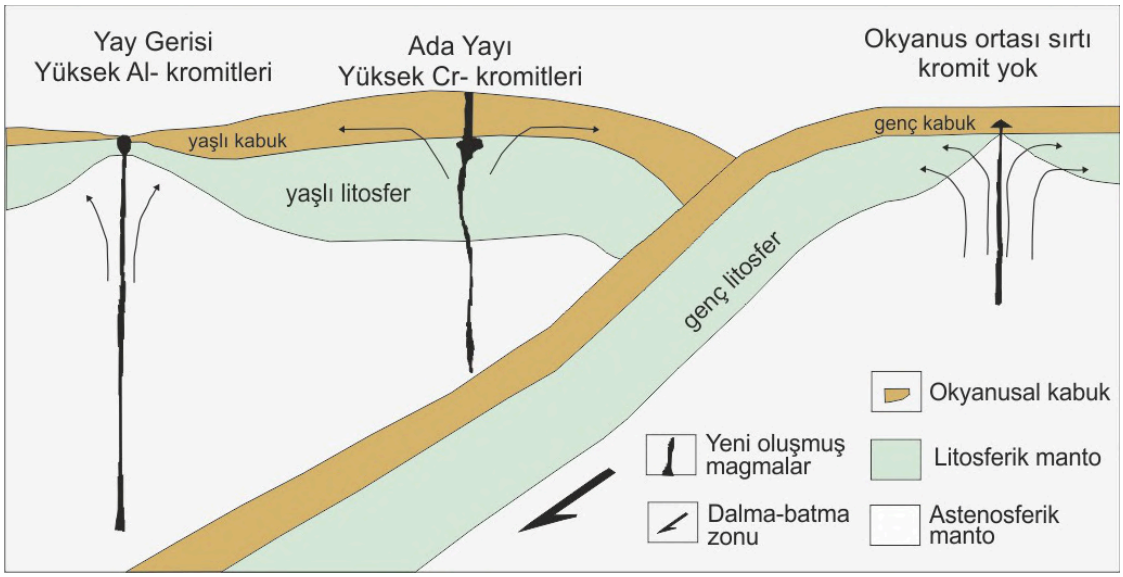
Bu durumlar dikkate alındığında, hem yeterince yüksek Cr# değeri hem de kromitin çökelmesi için yüksek (Cr+Al) miktarları sağlayan magma-orta derecede tüketilmiş harzburjit sistemini işaret etmekte olup kromitit zenginleşmesi için en uygun olanıdır (Şekil 5b). Başka bir deyişle, az miktarda klinopiroksen ve ortalama Cr# değeri (~0,5) olan kromiti barındıran orta derecede tüketilmiş harzburjitik peridotitler, büyük boyutta kromitit yatakları için en uygun yan kayacı temsil etmektedir (Arai, 1997).

3.3. Podiform kromititlerin jeodinamik ortamı

Kromit bileşimine dayalı olarak, podiform kromitit yatakları, genel olarak Yüksek-Cr ve Yüksek-Al'lu türler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bununla birlikte, Türkiye'de Guleman (Uysal vd., 2018), Kızıldağ (Chen vd., 2019) ve Pozantı-Karsantı (Liu vd., 2019) ofiyolitlerinde Cr# değeri orta düzeyde olan bazı kromititlere de rastlanmıştır. Yüksek-Cr'lu kromitler Cr# [= 100* Cr / (Cr + Al)] > 60 olan kromit yatakları olarak değerlendirilmekte ve genellikle boninitik magmalar ile refrakter manto peridotiti arasındaki etkileşimlerle okyanus içi yitim zonu (SSZ) ortamında oluştuğu şeklinde yorumlanmaktadır (Rollinson ve Adetunji, 2013; Zhou vd., 2014). Yüksek-Al'lu kromitler Cr# [= 100* Cr / (Cr + Al)] < 60 ise, daha yaygın olarak okyanus ortası sırtı (MOR) benzeri bir ortamdan gelen toleyitik ergimeler ile

ilişkilendirilmektedir (Arai ve Miura, 2015; Zhou vd., 2014). Bununla birlikte, son yıllarda Yüksek-Al'lu kromititler üzerine yapılan çalışmalarda kromit kristalleri içerisinde gözlenen silikat inklüzyonlarının (amfibol, mika vb.) varlığı ile su açısından zengin, yani okyanus ortası sırtı bazalt (MORB) magmasına benzemeyen bir magmadan itibaren türedikleri sonucuna vararak, okyanus içi yitim sürecinin başlangıç aşamasında oluştuklarını ileri süren çalışmalar da bulunmaktadır (Rollinson ve Adetunji, 2013; Rui vd., 2022; Bo vd., 2023; Zhang vd., 2024).

Zhou ve Robinson (1997) podiform kromititlerin oluşumunun ve kimyasal bileşimlerinin başlıca iki jeodinamik ortamla ilişkilendirilebileceğini öne sürmektedir. Bu ortamlar; okyanus içi ada yayları ve yeni gelişen yay-ardı basenleridir. Aynı yazarlar, olgunlaşmış okyanus ortası sırtı (MOR) yayılma merkezlerinde podiform kromitit oluşumunun beklenmeyeceğini belirtmişlerdir (Şekil 6).



Şekil 6. Kromitit yataklarının oluşumunu gösterir jeodinamik ortamlar (Zhou ve Robinson, 1997)

Okyanusal ada yaylarının altında, yüksek miktarda uçucu madde girişi dalan levhadan üzerindeki manto kaması bölgesine gelmekte ve bu da

yüksek dereceli kısmi ergimelere ve yüksek-Cr içerikli kromititlerin oluşumuna yol açmaktadır. Bu ortamlarda, kabuğun hemen altındaki eski litosferik manto, derinlerde halihazırda tüketilmiş harzburjitlerin ergimesiyle oluşan büyük hacimlerdeki ergiyikler tarafından istila edilirler (Zhou ve Robinson, 1997). Oluşan bazaltik magmaların yükselmesi sırasında eski litosferik manto ile etkileşime girmesi sonucunda kromitit ve onları çevreleyen dunit mercekleri oluşturur. Yitim zonu üzerindeki yayılma devam ettikçe, eski litosferik manto incelir ve her iki tarafa doğru yayılarak uzaklaşır. Ancak, bu ortamlarda eriyik bileşimleri, kaynak kayacın daha da tüketilmesi ile, zamanla değişebileceğinden (toleyitik magmadan boninitlere doğru değişim), eriyik-kayaç tepkimesiyle mercek şeklindeki kromititler hâlâ oluşabilir (Robinson vd., 1983; Crawford vd., 1989). Bu tür ergiyikler, kaynak kayaçlarından ayrılıp mantoda yukarı doğru hareket ettiklerinde, içinden geçtikleri yan kayaçlarla artık denge hâlinde olmadıklarından onlarla tepkimeye girerler.

Okyanus içi yitim zonlarında yeni oluşmakta olan yay-gerisi basenler gibi yayılma merkezlerinde, ergiyikler benzer şekilde yitim zonlarının üzerindeki manto kamalarında oluşacaktır. Ancak, sözü edilen manto kamasına daha az uçucu madde eklenecek ve kısmi ergime derecesi daha düşük olacaktır (Zhou ve Robinson, 1997). Daha düşük dereceli kısmi ergime, yüksek-Al kromititlerin kristalleştiği magmaları üretecektir (Zhou ve Robinson, 1994). Kısmi ergimeyle oluşan ergiyikler, yay-gerisi yayılma sırasında incelen mevcut litosferik mantoya doğru yükselir. Bu ergiyikler, üst astenosferik ve litosferik mantodan geçerken çevresindeki kayaçlarla tepkimeye girerek yüksek-Al kromititleri kristallendirecektir Ancak bu ergiyikler, ada yaylarının altındaki eski litosferik manto kayaçlarıyla oldukları gibi fazla miktarda bileşimsel dengesizlik sunmamaları nedeniyle daha az kimyasal tepkime gerçekleştireceklerdir. Bu ortamda oluşan kalıntı

peridotitler, orta derecede tüketilmiş lerzolitler ve klinopiroksen içeren harzburjitlerden oluşacaktır (Zhou ve Robinson, 1997).

Aynı ofiyolit kompeksinde yüksek-Cr kromititleri ve yüksek-Al kromititleri birarada gözlenebilmektedir. Bunun sebebi olarak okyanusal litosferin evrimi esnasında, farklı zamanlarda farklı kaynaklara (Melcher vd., 1997; Zhou ve Robinson, 1997; Uysal vd., 2009; Xu vd., 2020), yay bölgesinde ilk olarak Cr bakımından zengin olan ergiyiklerin ilerleyen bir şekilde fraksiyonlanmasına (Graham vd., 1996), MOHO geçiş zonu altında sığ ve derin zonlarda eş zamanlı oluşan süreçlere (Rollinson, 2008; Dönmez vd, 2013) ve yay-gerisi havzasının açılması esnasında farklı manto kaynaklarından meydana gelen ayrı ergiyik intrüzyonlarının zamansal ve mekansal çeşitliliği (González-Jiménez vd., 2011) önerilmiştir.

Okyanus ortası sırtların (MOR) altında, önceden var olan litosferik manto incelir ve yayılma sırasında uzaklaştırılır (Şekil 6). Okyanus ortası sırtı bazalt magmaların bileşimleri ise zaman içinde dikkat çekici şekilde sabit kalır. Bu nedenle, derinlerde kısmi ergime ile oluşan magmalar, geçtikleri çevre kayaçlarla bileşimsel olarak farklı olmadıkları için göreceli olarak dengelenmiş olurlar ve çok az tepkime gerçekleştirirler. Magma bileşimi ergiyik-kayaç tepkimesiyle belirgin ölçüde değişmediği için, büyük kromitit kütleleri oluşamaz (Zhou ve Robinson, 1997).

4. KROMİTİT ARAMACILIĞINDA BİLİMSEL YAKLAŞIM

4.1. Yüksek-Cr ve Yüksek-Al içeren kromitlerin stratigrafisi

Kromitit cevherleşmeleri ofiyolitik istifte bulundukları stratigrafik seviyelere göre değişik fiziksel ve kimyasal özellikler sunmaktadır. Ana ergiyiğin karakteri ve mantonun stratigrafisinin, krom spinellerin kimyasal bileşimlerinde belirgin bir etkisinin bulunduğu bazı araştırmalarda ortaya

konmuştur (Rammlmair vd., 1987; Leblanc ve Nicolas, 1992; Rollinson, 2008; González-Jiménez vd., 2011; Zaccarini vd., 2011). Yüksek-Cr'lu kromitler ve Yüksek-Al'lu kromitler aynı jeodinamik ortamda görülebilmektedir (Leblanc ve Nicolas, 1992; Zhou ve Bai, 1992; Melcher vd., 1997; Kocks vd., 2007; Rollinson, 2008; Uysal vd., 2009; Zaccarini vd., 2011; Dönmez vd., 2014). Ancak, yüksek-Cr kromititleri mantonun derin kesiminde yer alırken, yüksek-Al kromitler ise stratigrafik olarak daha üst seviyelerde yer almaktadır (Zaccarini vd., 2011).

4.2. Melanj

Okyanus içi yitim süreçleri ile okyanusal litosfer tektonik hareketlerle kıta kenarları üzerine yerleşerek ofiyolitleri oluştururlar. Bu yerleşim sırasında üzerleyen levhada oluşan ofiyolitin tabanında; dalan levhanın en üst kesimindeki sedimanter ve magmatik kökenli kayaçlar ile kıta kenarındaki sedimanların da içinde olduğu karmaşık (kaotik) yapılı melanj birimi kıta kenarına yerleşir. Melanj içerisine ofiyolite ait serpantinize manto peridotitlerine ait bloklar da aktarılmaktadır. Peridotit blokları içerisinde daha önce oluşan kromitit damarları maruz kaldıkları tektonizma nedeniyle sık sık faylarla kesilir ve devamlılık sunmazlar. Bu durum hem arama hem de üretim çalışmalarını zorlaştırır. Bu nedenle melanj içerisindeki peridotit bloklarında kromitit aramacılığı risklidir.

4.3. Manto Peridotitleri

Kromitit aramacılığında öncelikle ofiyolitik istifin iyi analiz edilmesi ve manto peridotitlerinin istifteki yerinin iyi anlaşılması gerekir. manto peridotitleri genellikle harzburjit ve az oranda lerzolitin geniş alanlarda yayılım göstermesiyle karakterize edilir. Bu tip manto peridotitleri melanjlar içerisinde blok halinde gözlenen eşleniklerinden farklıdır ve devamlılıkları

daha fazladır. Bu birimlerde gözlenen kromitit cevherleşmeleri, kayaç-eriyik etkileşimi sonucu gelişmekte olup, özellikle yüksek tenörlü kromit cevherlerinin araştırılması açısından potansiyel sunan alanlar olarak değerlendirilebilirler. Ülkemizde Guleman (Elazığ) Soridağı bölgesi cevherleşmeleri bu tür cevherleşmelerin en iyi örneğidir. Ofiyolitin bu kesminde yüksek tenörlü ve yüksek Cr kromititleri yaygın olarak görülür. Ancak yanal ve düşey devamlılıkları kümülatlarda gözlenen cevherleşmelere göre daha sınırlı olabilir.

4.4. Ultramafik kümülatlar

Ofiyolitik istifte manto tektonitleri üzerinde geçiş zonu da içerisine alan ultramafik kümülatlar içerisinde bulunan kromititler, manto kesimine kıyasla daha geniş alanlarda yayılım gösteren dunit istifleri içerisinde yoğunlaşmaktadır. Bu dunitler ve bunların içinde yer alan kromititler bantlı-dissemine yapı sunmaktadırlar. Söz konusu kromititler bu özellikleri nedeniyle düşük tenörlüdürler. Ancak, doğrultu ve eğim boyu devamlarında gösterdikleri süreklilik ile önemli rezerv potansiyeline sahiptirler. Dolayısıyla cevher zenginleştirme tesislerinde yüksek tenörlü kromitit konsantreleri elde edilerek pazarlanabilir ürün üretilebilir. Düşük tenörlü olmakla beraber, daha düzenli olmaları ve büyük rezerv sunmaları nedeniyle sürdürülebilir olarak işletme ve tesis yatırımları için ideal alanlardır. Guleman (Elazığ) - Kef bölgesi cevherleşmeleri geçiş zonuna ve Aladağ (Adana) - Kızılyüksek ve çevresi ultramafik kümülatlar içerisinde gözlenen cevherleşmelere iyi örnekler olarak verilebilir.

4.5. Kimyasal Değerlendirme

Alpin tipi podiform kromititlerin bazaltik ergiyik-yan kayaç (peridotit) etkileşimi sonucunda oluşarak, çevresinde dunit zarfı oluşturduğu

yukarıdaki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır. Özellikle manto kesiminde kromit aramacılığı yapılırken sahanın detay jeoloji haritası yapılarak dunitik zonların konumu ve boyutları öncelikle belirlenmesi ve aramaların bu alanlarda planlanması gerekmektedir.

Kalın bir dunit zonu her zaman büyük kromitit rezervlerine evsahipliği yapmayabilir. Az miktarda klinopiroksen ve ortaç Cr# değerine (~0,5) sahip harzburjitik yan kayaçların gözlendiği peridotitler kromitit cevherleşmeleri için elverişli alanlar oluşturmaktadır (Arai ve Muira, 2016). Bazı durumlarda uygun ortamalarda Cr ve Al elementlerince zenginleşmiş ergiyik oluştuğu ortamdan taşınarak farklı ortamda da kristallenebilir (Ahmed ve Habtoor, 2015). Şöyle ki; Şekil 4'te anlatıldığı üzere mantonun kısmi ergimesi ile oluşan olivin ve kromitçe doygun bir ergiyiğin (Ergiyik-A) yan kayaçtaki (harzburjit) ortopiroksen ile reaksiyon yapması sonucu silisce zengin hibrid bir ikincil magma (Ergiyik-B) ve dunit kılıfı oluşmaktadır. Silisce zengin ergiyik (Ergiyik-B) daha sonra mantonun kısmi ergimesi ile gelen yeni bir ergiyik ile karıştığında kromitçe doygun bir ergiyik (Ergiyik- C) oluşur ve bu ergiyikten itibaren kromit kristalleri çökeltilerek kromititleri oluştururlar.

Bazı durumlarda, asılı halde kromit kristallerini bünyesinde barındıran "Ergiyik B" başka alanlara veya bölgelere hareket ederek geride kısır/kıraç dunitleri bırakabileceğini belirtmişlerdir (Arai ve Ahmed, 2018). İkincil magmanın (Ergiyik-B) askıda kalan kromit kristallerini alarak başka bir alana veya bölgeye taşıması ve burada daha sonra ortama gelecek olan bir bazik ergiyik (Ergiyik- A) ile karışarak podiform kromititleri çökeltmesi söz konusudur (Arai ve Ahmed, 2018). Bu nedenle sadece yan kayaç harzburjitlerin değil, dunitik zonların spinellerinin de mineral kimyası sonuçları hedef alan belirlemede önemli olabilmektedir.

5. ÇIKARIMLAR

- Kromit aramacılığında ofiyolitlerin karakterleri (MORB, SSZ) tektono-stratigrafisi ve iç yapısının anlaşılması oldukça önemlidir.
- Kromitit, hacimsel olarak > %20 kromit minerali içeren kayaçtır.
- Manto peridotitleri içerisinde gözlenen kromitit-dunit çifti, yan kayaç (manto)-bazaltik ergiyik etkileşiminin bir ürünüdür.
- Ekonomik öneme sahip kromitit yatakları sıklıkla kalın dunitik zonlar içeren MOHO geçiş bölgesinde ve manto peridotitleri (tektonitler) bölümünün en üst kesiminde ilk 1-1.5 km derinliklerde konumlanmaktadır.
- Podiform kromitit yatakları, genel olarak Yüksek-Cr ve Yüksek-Al'lu türler olarak ikiye ayrılmaktadır.
- Yüksek-Cr'lu (Cr# > 60) kromitit yatakları boninitik magmalar ile refrakter manto peridotiti arasındaki etkileşimlerle okyanus içi yitim zonu (SSZ) ortamında oluşmaktadır.
- Yüksek-Al'lu (Cr# < 60) kromitler ise, daha yaygın olarak okyanus ortası sırtı (MOR) veya yay-gerisi ortamda toleyitik magmalar ile az tüketilmiş manto peridotiti arasındaki etkileşimlerle ilişkilendirilmektedir.
- Yüksek-Al'lu kromitlerdeki silikat kapanımları (amfibol, mika vb.), bunların okyanus içi yitim sürecinin başlangıç aşaması ile ilişkilendirilmesini desteklemektedir
- Magmatik ergiyiklerden kromit mineralinin kristallenmesinde suyun (H_2O) önemli bir etkisi bulunmaktadır.
- Orta derecede tüketilmiş harzburjit kayacı (Cr# ~0.5) büyük ölçekli kromitit yataklarının oluşumu için uygun bir yan kayaçtır.

KAYNAKLAR

Ahmed, A. H., & Habtoor, A., 2015. Heterogeneously Depleted Precambrian Lithosphere Deduced from Mantle Peridotites and Associated Chromitite Deposits of Al'ays Ophiolite, Northwestern Arabian Shield, Saudi Arabia. Ore Geology Reviews, 67, 279296.

Ahmed, A., & Arai, S., 2002. Unexpectedly high-PGE chromitite from the deeper mantle section of the northern Oman ophiolite and its tectonic implications. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143, 263–278.

Alriyami, K., & Robertson, A. H. F., 2002. Mesozoic sedimentary and magmatic evolution of the Arabian continental margin, northern Syria: evidence from the Baer-Bassit Melange. Geological Magazine, 139, 395–420.

Arai, S., & Ahmed, A. H., 2018. Secular Change Of Chromite Concentration Processes From The Archean To The Phanerozoic. In Processes And Ore Deposits Of Ultramafic-Mafic Magmas Through Space And Time, Elsevier, 139-157.

Arai, S., & Abe, N., 1995. Reaction of orthopyroxene in peridotite xenoliths with alkali basalt melt and its implication for genesis of alpine-type chromitite. American Mineralogist, 80, 1041-1047.

Arai, S., & Miura, M., 2015. Podiform chromitites do form beneath mid-ocean ridges. Lithos, 232, 143–149.

Arai, S., & Miura, M., 2016. Formation and modification of chromitites in the mantle. Lithos, 264, 277–295.

Arai, S., & Yurimoto, H., 1994. Podiform chromitites of the TariMisakaultramafic complex, Southwestern Japan, as mantle-melt interaction products. Economic Geology, 89, 1279-1288.

Arai, S., 1992. Petrology of peridotites as a tool of insight into mantle processes: a review. Journal of Mineralogy Petrology and Economic Geology, 87, 351-363.

Arai, S., 1997. Origin of podif orm chromitites. Journal of Asian Earth Sciences, 15, 303-310.

Arai, S., 2013. Conversion of low-pressure chromitites to ultrahigh-pressure chromitites by deep recycling: A good inference. Earth and Planetary Science Letters, 379, 81–87.

Arai, S., 2021. Genetic Link between Podiform Chromitites in the Mantle and Stratiform Chromitites in the Crust: A Hypothesis. Minerals, 11(2), 209.

Augé, T., 1987. Chromite deposits in the northern Oman ophiolite: mineralogical constraints. Mineralium Deposita, 22, 1–10.

Bağcı, U., & Parlak, O., 2009. Petrology of the Tekirova (Antalya) ophiolite (Southern Turkey): evidence for diverse magma generations and their tectonic implications during Neotethyan-subduction. International Journal of Earth Sciences, 98, 387-405.

Bağcı, U., Parlak, O., & Höck, V., 2005. Whole rock and mineral chemistry of cumulates from the Kızıldağ (Hatay) ophiolite (Turkey): clues for multiple magma generation during crustal accretion in the Southern Neotethyan Ocean. Mineralogical Magazine, 69, 53–76.

Bağcı, U., Parlak, O., & Höck, V., 2006. Geochemical character and tectonic environment of ultramafic to mafic cumulate rocks from the Tekirova (Antalya) ophiolite (southern Turkey). Geological Journal, 41(2), 193–219.

Bağcı, U., Parlak, O., & Höck, V., 2008. Geochemistry and tectonic environment of diverse magma generations forming the crustal units of the Kızıldağ (Hatay) ophiolite southern Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 17, 43–71.

Ballhaus, C., Fonseca, R. I. O. C., Kirchenbaur, M., & Zirner, A., 2015. Spheroidal textures in igneous rocks—Textural consequences of H2O saturation in basaltic melts. Geochimica et Cosmochimica Acta, 167, 241-252.

Bébien, J., Shallo, M., Manika, K., & Gega, D., 1998. The Shebenik Massif (Albania): a link between MOR- and SSZ-type ophiolites. Ofioliti, 23, 7–15.

Bo, R., Dilek, Y., Nasir, S., Wu, W., Cai, P., Lu, Y., Lian, D., & Yang, J., 2023. Mineral and whole-rock geochemistry of high-Al podiform chromitites in the Fizh Massif of the Cretaceous Oman ophiolite: origin of hydrous N-MORB melts in a nascent forearc setting. Journal of the Geological Society, 180(6), jgs2023–047.

Borisova, A. Y., Ceuleneer, G., Kamenetsky, V. S., Arai, S., B´ejina, F., Abily, B., Bindeman, I. N., Polv´e, M., De Parseval, P., Aigouy, T., & Pokrovski, G. S., 2012. A New View on the Petrogenesis of the Oman Ophiolite Chromitites from Microanalyses of Chromite-hosted Inclusions. Journal of Petrology, 53(12), 2411–2440.

Bortolotti, V., Marroni, M., Pandolfi, L., Principi, G., & Saccani, E., 2002. Interaction between mid-ocean ridge and subduction magmatism in Albanian ophiolites. Journal of Geology, 110, 561–576.

Cai, P. J., Lian, D. Y., Aitchison, J. C., Cluzel, D., Zhou, R. J., Rui, H. C., Bo, R. Z., Ma, H. T., Yang, J. S., & Masoud, A. E., 2025. Geochemical constraints on subduction-related mantle metasomatism of the Tiebaghi ophiolitic lherzolite in New Caledonia. Lithos, 496–497, 107948.

Casey, J. F., & Dewey, J. F., 1984. Initiation of subduction zones, in Gass, I. G., Lippard, S. J., and Shelton, A. W., eds., Ophiolites and Oceanic Lithosphere: Geological Society London Special Publication, 13 269–290.

Cassard, D., Nicolas, A., Rabinovitch, M., Moutte, J., Leblanc, M., & Prinzhofer, A., 1983. Structural classification of chromite pods in southern New Caledonia. Economic Geology, 76, 805-831.

Chen, C., Su, B. X., Xiao, Y., Pang, K. N., Robinson, P. T., Uysal, İ., Lin, W., Qin, K. Z., Avcı, E., & Kapsiotis, A., 2019. Intermediate chromitite in Kızılda˘g ophiolites (SE Turkey) formed during subduction initiation in Neo-Tethys. Ore Geology Reviews, 104, 88–100.

Chen, C., Wang, C. Y., Tan, W., & Yao, Z. S., 2021. Origin of chromite nodules in podiform chromitite from the Kızıldağ ophiolite, southern Turkey. Ore Geology Reviews, 139, 104443.

Coleman, R. G., 1971. Plate tectonic emplacement of upper mantle peridotites along continental edges. Journal of Geophysical Research, 76, 1212-1222.

Çelik, Ö. F., Marzoli, A., Marschik, R., Chiaradia, M., Neubauer, F., & Öz, I., 2011. Early–Middle Jurassic intra-oceanic subduction in the İzmir-Ankara-Erzincan Ocean, Northern Turkey. Tectonophysics, 509(1–2), 120–134.

Das, S., Basu, A. R., & Mukherjee, B. K., 2017. In situ peridotitic diamond in Indus ophiolite sourced from hydrocarbon fluids in the mantle transition zone. Geology, 45, 755–758.

Dewey, J. F., & Bird, J. M., 1970. Mountain belts and the new global tectonics. Journal of Geophysical Research, 75, 2625-2647.

Dickey, J. S., Jr., 1975. A hypothesis of origin for podiform chromite deposits: Geochimica et Cosmochimica Acta, 39, 1061–1074.

Dilek, Y., & Flower, M. F. J., 2003. Arc-trench rollback and forearc accretion: 2. A model template for ophiolites in Albania, Cyprus, and Oman. Geological Society of London Special Publication, 218, 43–68.

Dilek, Y., & Furnes, H., 2009. Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems. Lithos, 113(1–2), 1–20.

Dilek, Y., & Furnes, H., 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. Geological Society of America Bulletin, 123(3–4), 387–411.

Dilek, Y., & Thy, P., 2009. Island arc tholeiite to boninitic melt evolution of the Cretaceous Kizildag (Turkey) ophiolite: model for multi-stage early arc-forearc magmatism in Tethyan subduction factories. Lithos, 113(1–2), 68–87.

Dilek, Y., Furnes, H., & Shallo, M., 2007. Suprasubduction zone ophiolite formation along the periphery of Mesozoic Gondwana. Gondwana Researc, 11, 453–475.

Dilek, Y., Furnes, H., & Shallo, M., 2008. Geochemistry of the Jurassic Mirdita Ophiolite (Albania) and the MORB to SSZ evolution of a marginal basin oceanic crust. Lithos, 100, 174–209.

Dilek, Y., Shallo, M., & Furnes, H., 2005. Rift-drift, seafloor spreading and subduction tectonics of Albanian ophiolites. International Geology Review, 46, 147–176.

Dönmez, C., Keskin, S., Günay, K., Çolakoğlu, A. O., Çiftçi, Y., Uysal, İ., Türkel, A., & Yıldırım, N., 2014. Chromite and PGE geochemistry of the Elekdağ Ophiolite (Kastamonu-Northern Turkey): Implications for deep magmatic processes in a supra-subduction zone setting. Ore Geology Reviews, 57, 216-228

Flower, M. F. J., & Dilek, Y., 2003. Arc-trench rollback and forearc accretion: 1.A collosion-induced mantle flow model for Tethyan ophiolites. In: Dilek Y, Robinson PT (eds) Ophiolites in earth history, vol 218. Geological Society of London Special Publication, 21–41.

Floyd, P. A., Winchester, J. A., Seston, R., Kryza, R., & Crowley, Q. G., 2000. Review of geochemical variation in Lower Palaeozoic metabasites from the NE Bohemian Massif: intracratonic rifting and plume-ridge interaction. In: Franke W, Haak V, Oncken O, Tanner D (eds) Orogenic processes: quantification and modelling in the Variscan Belt, vol 179. Geological Society special publication, Geological Society, London, 155–174.

Gahlan, H. A., & Arai, S., 2007. Genesis of peculiarly zoned Co, Zn and Mn-rich chromian spinel in serpentinite of Bou-Azzer ophiolite, anti-Atlas, Morocco. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 102, 69–85.

Gass, I. G., 1968. Is the Troodos massif of Cyprus a fragment of Mesozoic ocean floor? Nature, 221, 926-930.

González-Jiménez, J. M., Proenza, J. A., Gervilla, F., Melgarejo, J. C., Blanco-Moreno, J. A., Ruiz- Sánchez, R., & Griffin, W. L., 2011. High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tánamo district, Mayarí-Cristal ophiolitic massif (eastern Cuba): constraints on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum group elements. Lithos, 125, 101-121.

Gonzalez-Jimenez, J. M., Griffin, W. L., Proenza, J. A., Gervilla, F., O'Reilly, S.Y., Akbulut, M., Pearson, N. J., & Arai, S., 2014. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part II. The Crystallization of Chromitites. Lithos, 189, 140–158.

Graham, I. T., Franklin, B. J., & Marshall, B., 1996. Chemistry and mineralogy of podiform chromitite deposits, southern NSW, Australia: a guide to their origin and evolution. Mineralology and Petrology. 37, 129-150.

Griffin, W. L., Afonso, J. C., Belousova, E. A., Gain, S. E., Gong, X. H., Gonzalez-Jimenez, J. M., Howell, D., Huang, J. X., McGowan, N., Pearson, N. J., Satsukawa, T., Shi, R., Williams, P., Xiong, Q., Yang, J. S., Zhang, M., & O'Reilly, S. Y., 2016. Mantle Recycling: Transition Zone Metamorphism of Tibetan Ophiolitic Peridotites and its Tectonic Implications. Journal of Petrology, 57(4), 655–684.

Günay, K., & Çolakoğlu, A. R., 2016. Spinel compositions of mantle-hosted chromitite from the Eastern Anatolian ophiolite body, Turkey: Implications for deep and shallow magmatic processes. Ore Geology Reviews, 73(1): 29-41.

Hawkins, J. W., Bloomer, S. H., Evans, C. A., & Melchior, J. T., 1984. Evolution of intra-oceanic arc-trench systems. Tectonophysics, 102, 175–205.

Hébert, R., & Laurent, R., 1990. Mineral chemistry of the plutonic section of the Troodos ophiolite: new constraints for genesis of arc-related ophiolites. In: Malpas J, Moores E, Panayiotou A, Xenophontos C (eds) Proceedings of Troodos ophiolite symposium, geological survey, Cyprus, 149–163.

Höck, V., Koller, F., Meisel, T., Onuzi, K., & Kneringer, E., 2002. The Jurassic South Albanian ophiolites: MOR- vs SSZ-type ophiolites. Lithos, 65, 143–164.

Hu, W., Zhou, M., Yudovskaya, M. A., Vikentyev, I. V., Malpas, J., & Zhang, P., 2022. Trace elements in chromite as indicators of the origin of the giant podiform chromite deposit at Kempirsai, Kazakhstan. Economic Geology, 117(7), 1629–1655.

Irvine, T. N., 1967. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part 2. Petrologic applications. Canadian Journal of Earth Sciences, 4, 71–103.

Irvine, T. N., 1975. Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other lyered intrusions-II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores. Geochimica Cosmochimica Acta, 39, 991-1021.

Irvine, T. N., 1977. Origin of chromite layers in the Muskox intrusion and other intrusions: a new interpretation. Geology, 5, 273-277.

Jannessary, M. R., Melcher, F., Lodziak, J., & Meisel, T. C., 2012. Review of platinum-group element distribution and mineralogy in chromitite ores from southern Iran. Ore Geology Reviews, 48, 278–305.

Jenkins, M. C., & Mungall, J. E., 2018. Genesis of the Peridotite Zone, Stillwater Complex, Montana, USA. Journal of Petrology, 59(11), 2157–2189.

Johan, Z., Dunlop, H., Le Bel, L., Robert, J. L., & Volfinger, M., 1983. Origin of chromite deposits in ophiolitic complexes: evidence for a volatile- and sodium-rich reducing fluid phase. Fortschritte der Mineralogie, 61, 105–107.

Kamenetsky, V. S., Crawford, A. J., & Meffre, S., 2001. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. Journal of Petrology, 42(4), 655–671.

Kocks, H., Melcher, F., Meisel, T., & Burgath, K. P., 2007. Diverse Contributing Sources to Chromitite Petrogenesis in The Shebenik Ophiolitic Complex, Albania: Evidence From New Pge and Os-Isotope Data. Mineralogy and Petrology, 91,139-170.

Lago, B. L., Rabinowicz, M., & Nicolas, A., 1982. Podiform chromite ore bodies: a genetic model. Journal of Petrology, 23, 103-125.

Langa, M. M., Jugo, P. J., Leybourne, M. I., Grobler, D. F., Adetunji, J., & Skogby, H., 2021. Chromite chemistry of a massive chromitite seam in the northern limb of the Bushveld Igneous Complex, South Africa: correlation with the UG-2 in the eastern and western limbs and evidence of variable assimilation of footwall rocks. Mineralium Deposita, 56, 31–44.

Latypov, R. M., Namur, O., Bai, Y., Barnes, S. J., Chistyakova, S., Holness, M. B., Iacono-Marziano, G., Kruger, W. A. J., O'Driscoll, B., Smith, W. D., Virtanen, V. J., Wang, C. Y., Xing, C. M., & Charlier, B., 2024. Layered intrusions: Fundamentals, novel observations and concepts, and controversial issues. Earth-Science Reviews, 249, 104653.

Laurent, R., & Kacira, N., 1987. Chromite deposits in the Appalachian ophiolites, in Stowe, C.W., ed., Evolution of chromium ore fields: New York, Van Nostrand Reinhold Company, 169–193.

Leblanc, M., 1987. Chromite in oceanic arc environments—New Caledonia, in Stowe, C.W., ed., Evolution of chromium ore fields: New York, Van Nostrand Reinhold Company, 265–296.

Leblanc, M., & Nicolas, A., 1992. Ophiolitic Chromitites. International Geology Review, 1992, 34(7), 653-686.

Leitch, E. C., 1984. Island arc elements and arc related ophiolites. Tectonophysics, 106, 177–203.

Lian, D., Yang, J., Liu, F., Wu, W., Zhang, L., Zhao, H., & Huang, J., 2017. Geochemistry and tectonic significance of the Gongzhu peridotites in the northern branch of the western Yarlung Zangbo ophiolitic belt, western Tibet. Mineralogy and Petrology, 111(5), 729–746.

Liu, X., Su, B. X., Xiao, Y., Chen, C., Uysal, ˙I., Jing, J. J., Zhang, P. F., Chu, Y., Lin, W., & Sakyi, P. A., 2019. Initial subduction of Neo-Tethyan ocean: geochemical record in chromite and mineral inclusions in the Pozantı-Karsantı ophiolites, southern Turkey. Ore Geology Reviews, 110, 102926.

Lytwyn, J. N., & Casey, J. F., 1993. The geochemistry and petrogenesis of volcanics and sheeted dikes from the Hatay (Kızıldağ) ophiolite, southern Turkey: possible formation with the Troodos ophiolite, Cyprus, along fore-arc spreading centers. Tectonophysics, 232, 237–272.

Mathez, E. A., & Mey, J. L., 2005. Character of the UG2 chromitite and host rocks and petrogenesis of its pegmatoidal footwall, northeastern Bushveld Complex. Economic Geology, 100(8), 1617–1630.

Matveev, S., & Ballhaus, C., 2002. Role of water in the origin of podiform chromitite deposits. Earth and Planetary Science Letters, 203, 235–243.

Melcher, F., Grum, W., Simon, G., Thalhammer, T. V., & Stumpfl, E. F., 1997. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite. Journal of Petrology, 38(10), 1419–1458.

Moores, E. M., & Vine, F. J., 1971. Troodos massif, Cyprus, and other ophiolites as oceanic crust: evaluation and implications, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 268, 443-466.

Moores, E. M., 1970. Ultramafics and orogeny, with models of the U.S. Cordillera and the Tethys. Nature, 228, 837-842.

Morishita, T., Andal, E. S., Arai, S., & Ishida, Y., 2006. Podiform chromitites in lherzolite–dominant mantle section of the Isabela ophiolite, Philippines. Island Arc, 15, 80–101.

Mosier, D. L., Singer, D. A., Moring, B. C., & Gallowey, J. P., 2012. Podiform Chromite Deposits—Database and Grade and Tonnage Models. Unated States Geological Survey, Scientific Investigation Report 2012-5157, 1-45.

Nicolas, A., 1989. Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

Okay, A. İ., & Şahintürk, Ö., 1997. Geology of the Eastern Pontides. In: Robinson AG (ed) Regional and petroleum geology of the Black sea and surrounding region, vol 68. AAPG, 291–311.

Okay, A. İ., & Tüysüz, O., 1999. Tethyan sutures of northern Turkey. In: Durand B et al (eds) The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine Orogen, vol 156. Geological Society of London, 475–515.

Okay, A. İ., & Whitney, D. L., 2010. Blueschists, ophiolites and suture zones in northwest Turkey. In: Field trip guide book of Pre-Congress Excursion 1-3.10.2010, Tectonic Crossroads: evolving Orogens of Eurasia-Africa-Arabia, Geological Society of America, Ankara, 4–8 October 2010.

Okay, A. İ., 1989. Alpine-Himalayan blueschists. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 17, 55–87.

Okay, A. İ., 1986. High pressure/low temperature metamorphic rocks of Turkey. In: Evans BW, Brown EH (eds) Blueschists and eclogites, vol 164. GSA Memoir, 333–348.

Okay, A. İ., 2008. Geology of Turkey: a synopsis. Anschnitt, 21, 19–42.

Okay, A. İ., Tüysüz, O., Satır, M., Özkan-Altıner, S., Altıner, D., Sherlock, S., & Eren, R. H., 2006. Cretaceous and Triassic subduction-accretion, HP/LT metamorphism and continental growth in the central Pontides, Turkey. Geological Society of America Bulletin, 118, 1247–1269.

Önen, A. P., & Hall, R., 2000. Sub-ophiolite metamorphic rocks from NW Anatolia, Turkey. Journal of Metamorphic Geology, 18, 483–495.

Page, P., & Barnes, S. J., 2009. Using Trace Elements in Chromites to Constrain the Origin of Podiform Chromitites in the Thetford Mines Ophiolite, Quebec, Canada. Economic Geology, 104(7), 997–1018.

Parlak, O., Çolakoğlu, A., Dönmez, C., Sayak, H., Yıldırım, N., Türkel, A., & Odabaşı, İ., 2013. Geochemistry and tectonic significance of ophiolites along the İzmir–Ankara–Erzincan Suture Zone in northeastern Anatolia. Geological Society London Special Publication, 372, 75–105.

Parlak, O., Delaloye, M., & Bingöl, E., 1995. Origin of subophiolitic metamorphic rocks beneath the Mersin ophiolite, southern Turkey. Ofioliti, 20(2), 97–110.

Parlak, O., Delaloye, M., & Bingöl, E., 1996. Mineral chemistry of ultramafic and mafic cumulates as an indicator of the arc–related origin of the Mersín ophiolite (southern Turkey). Geologische Rundschau, 85, 647–661.

Parlak, O., Dunkl, I., Karaoğlan, F., Kusky, T., Zhang, C., Wang, L., Köpke, J., Billor, Z., Hames, W. E., Şimşek, E., Şimşek, G., Şimşek, T., & Öztürk, S. E., 2019. Rapid cooling history of a Neotethyan ophiolite: Evidence for contemporaneous subduction initiation and metamorphic sole formation. Geological Society of America Bulletin, 131, 2011-2038.

Parlak, O., Höck, V., & Delaloye, M., 2000. Supra-subduction zone origin of the Pozantı-Karsantı ophiolite (Southern Turkey) deduced from whole rock and mineral chemistry of the gabbroic cumulates. In: Bozkurt E, Winchester JA, Piper J (eds) Tectonics and magmatism in Turkey and its surroundings, Geological Society special publications, vol 173. Geological Society, London, 219–234.

Parlak, O., Höck, V., Kozlu, H., & Delaloye, M., 2004. Oceanic crust generation in an island arc tectonic setting, SE Anatolian Orogenic Belt (Turkey). Geological Magazine, 141, 583–603.

Parlak, O., Rızaoğlu, T., Bağcı, U., Karaoğlan, F., & Höck, V., 2009. Tectonic significance of the geochemistry and petrology of ophiolites in southeast Anatolia, Turkey. Tectonophysics, 473(1–2), 173–187.

Payot, B. D., Arai, S., Dick, H. J. B., Abe, N., & Ichiyama, Y., 2014. Podiform chromitite formation in a low-Cr/high-Al system: an example from the Southwest Indian Ridge (SWIR). Mineralogy and Petrology, 108, 533–549.

Pearce, J. A., Lippard, S. S., & Roberts, S., 1984. Characteristics and tectonic significance of suprasubduction zone ophiolites, in Kokelaar, B.P., and Howells, M.F., eds., Marginal Basin Geology: Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins: Geological Society London Special Publication, 16, 77–94.

Plank, T., Kelley, K. A., Zimmer, M. M., Hauri, E. H., & Wallace, P. J., 2013. Why do mafic arc magmas contain ~4 wt% water on average? Earth and Planetary Science Letters, 364, 168–179.

Pourteau, A., Candan, O., & Oberhanslı, R., 2010. High-pressure metasediments in central Turkey: constraints on the Neotethyan closure history. Tectonics, 29, TC5004.

Rammlmair, D., Raschka, H., & Steiner L., 1987. Systematics of Chromitite Occurrences in Central Palawan. Philippines Mineralium Deposita, 22(3):190-197.

Robertson, A. H. F., & Dixon, J. E., 1984. Introduction: aspects of the geological evolution of the Eastern Mediterranean. In: Robertson AHF, Dixon JE (eds) The geological evolution of the Eastern Mediterranean, vol 17. Geological Society of London Special Publication, 1–74.

Robertson, A. H. F., & Shallo, M., 2000. Mesozoic-Tertiary tectonic evolution of Albania in its regional Eastern Mediterranean context. Tectonophysics, 316(2–4), 197–254.

Robertson, A. H. F., 2002. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. Lithos, 65, 1–67.

Robertson, A. H. F., 2004. Development of concepts concerning the genesis and emplacement of Tethyan ophiolites in the Eastern Mediterranean and Oman regions. Earth Science Reviews, 66, 331–387.

Robertson, A. H. F., 2006. Contrasting modes of ophiolite emplacement in the Eastern Mediterranean region. Geological Society of London Memoirs, 32, 235–261.

Robertson, A. H. F., 2007. Overview of tectonic settings related to the rifting and opening of Mesozoic ocean basins in the Eastern Tethys: Oman, Himalayas and Eastern Mediterranean regions. In: Karner G, Manatschal G, Pinheiro LM (eds) Imaging, mapping and modelling continental lithosphere extension and breakup, Geological Society Special Publications, vol 282, 325–389.

Robertson, A. H. F., Parlak, O., & Ustaomer, T., 2009. Melange genesis and ophiolite emplacement related to subduction of the northern margin of the Tauride–Anatolide continent, central and western Turkey. In: Van Hinsbergen DJJ, Edwards MA, Govers R (eds) Collision and collapse at the Africa–Arabia–Eurasia subduction zone, Geological Society Special Publications, vol 311, 9–66.

Robertson, A. H. F., Parlak, O., & Ustaomer, T., 2013. Overview of the Palaeozoic–Neogene evolution of Neotethys in the Eastern Mediterranean region (southern Turkey), Cyprus, Syria. Petroleum Geoscience, 18, 381-404.

Robertson, A. H. F., Parlak, O., Rızaoğlu, T., Ünlügenç, U. C., İnan, N., Taslı, K., & Ustaömer, T., 2007. Tectonic evolution of the South Tethyan Ocean: evidence from the Eastern Taurus Mountains (Elazığ region, SE Turkey). In: Ries AC, Butler RWH, Graham RH (eds)

Deformation of the continental crust, vol 272. The Legacy of Mike Coward, Geological Society special publications, 231–270.

Robertson, A. H. F., Ustaömer, T., Parlak, O., Ünlügenç, U. C., Taslı, K., & İnan, N., 2006. The Berit transect of the Tauride thrust belt, Turkey: Late Cretaceous-Early Cenozoic accretionary/collisional processes related to closure of the Southern Neotethys. Asian Journal of Earth Sciences, 27(1),108–145.

Rollinson, P., 2008. The Geochemistry of Mantle Chromitites from The Northern Part of The Oman Ophiolite: inferred Parental Melt Compositions. Contributions to Mineralogy and Petrology, 156: 273–288.

Rollinson, H., & Adetunji, J., 2013. Mantle podiform chromitites do not form beneath midocean ridges: A case study from the Moho transition zone of the Oman ophiolite. Lithos, 177, 314–327.

Rollinson, P., 2008. The geochemistry ofmantle chromitites from the northern part of the Oman ophiolite: inferred parental melt compositions. Contributions to Mineralogy and Petrology, 156, 273-288.

Rui, H. C., Yang, J. S., Zheng, J. P., Lian, D. Y., Wu, W. W., & Marino, Y. V., 2022. Ti-poor high-Al chromitites of the Moa-Baracoa ophiolitic massif (eastern Cuba) formed in a nascent forearc mantle. Ore Geology Reviews, 144, 104847.

Saccani, E., Seghedi, N., & Nicolae, İ., 2004. Evidence of rift magmatism from preliminary petrological data on lower Triassic Mafic Rocks from the north Dobrogea Orogen (Romania). Ofioliti, 29(2), 231–241.

Sobolev, A. V., & Chaussidon, M., 1996. H_2O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: implications for H_2O storage and recycling in the mantle. Earth and Planetary Science Letters, 137, 45–55.

Stern, R. J., & Bloomer, S. H., 1992. Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California: Geological Society of America Bulletin, 104, 1621–1636.

Stowe, C. W., 1994. Compositions and Tectonic Settings of Chromite Deposits through Time: Economic Geology, 89, 528-546.

Su, B. X., Pan, Q. Q., Xiao, Y., Jing, J. J., Robinson, P. T., Uysal, I., Liu, X., & Liu, J. G., 2023. Mantle peridotites of ophiolites rarely preserve reliable records of paleo-oceanic lithospheric mantle. Earth-Science Reviews, 244, 104544.

Su, B. X., Robinson, P. T., Chen, C., Xiao, Y., Melcher, F., Bai, Y., Gu, X. Y., Uysal, I., & Lenaz, D., 2020. The occurrence, origin, and fate of water in chro-mitites in ophiolites. American Mineralogist, 105, 894–903.

Şengör, A. M. C., & Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. Tectonophysics, 75, 181–241.

Thayer, T. P., 1964. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guelman-Soridag District, Turkey. Economic Geology, 59, 1497–1524.

Topuz, G., Göçmengil, G., Rolland, Y., Çelik, Ö. F., Zack, T., & Schmitt, A. K., 2013. Jurassic accretionary complex and ophiolite from northeast Turkey: no evidence for the Cimmerian continental ribbon. Geology, 41(2), 255–258.

Tremblay, A., Meshi, A., & Bédard, J. H., 2009. Oceanic core complexes and ancient oceanic lithosphere: insights from Iapetan and Tethyan ophiolites (Canada and Albania). Tectonophysics, 473(1–2), 36–52.

Ullah, Z., Li, J., Robinson, P. T., Wu, W., Khan, A., Dac, N. X., & Adam, M. M. A., 2020. Mineralogy and geochemistry of peridotites and chromitites in the Jijal Complex ophiolite along the Main Mantle Thrust (MMT or Indus Suture Zone) North Pakistan. Lithos, 366–367, 105566.

Uysal, İ., Tarkian, M., Sadıklar, B., Zaccarini, F., Meisel, T., Garuti, G., & Heidrich, S., 2009. Petrology of Al- and Cr-Rich Ophiolitic Chromitites From The Muğla, Sw Turkey: Implications From Composition of Chromite, Solid inclusions of Platinum-Group Mineral, Silicate, and Base-Metal Mineral, and Os-Isotope Geochemistry. Contributions to Mineralogy and Petrology, 158(5), 659-674.

Uysal, İ., Kapsiotis, A., Akmaz, R. M., Saka, S., & Seitz, H. M., 2018. The Guleman ophiolitic chromitites (SE Turkey) and their link to a compositionally evolving mantle source during subduction initiation. Ore Geology Reviews, 93, 98–113.

Uysal, İ., Tarkian, M., Sadıklar, B., Zaccarini, F., Meisel, T., Garuti, G., & Heidrich, S., 2009. Petrology of Al- and Cr-rich ophiolitic chromitites from the Muğla, SW Turkey: implications from composition of chromite, solid inclusions of platinum-group mineral, silicate, and base-metal mineral, and Os-isotope geochemistry. Contributions to Mineralogy and Petrology, 158, 659-674.

Veksler, I. V., Reid, D. L., Dulski, P., Keiding, J. K., Schannor, M., Hecht, L., & Trumbull, R. B., 2015. Electrochemical Processes in a Crystal Mush: Cyclic Units in the Upper Critical Zone of the Bushveld Complex, South Africa. Journal of Petrology, 56(6), 1229–1250.

Xu, Y., Chen, S., Parlak, O., Arai, S., Dönmez, C., & Hong, J., 2020. Discovery of extremely high-Al podiform chromitites from the Lycian (Marmaris) ophiolite, SW Turkey: Implications for chromitite genesis. Ore Geology Reviews, 127,103817

Yang, J. S., Dobrzhinetskaya, L., Bai, W. J., Fand, Q. S., Robinson, P. T., Zhang, J., & Green, H. W., 2007. Diamond and coesite-bearing chromitites from the Luobusa Ophiolite, Tibet. Geology, 35, 875–878.

Yang, J. S., Wu, W. W., Lian, D. Y., & Rui, H. C., 2021. Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites. Nature Reviews. Earth and Environments, 2(3), 198–212.

Yudovskaya, M. A., & Kinnaird, J. A., 2010. Chromite in the Platreef (Bushveld Complex, South Africa): occurrence and evolution of its chemical composition. Mineralium Deposita, 45, 369–391.

Zaccarini, F., Garuti, G., Proenza, J. A., Campos, L., Thalhammer, O. A. R., Aiglsperger, T., & Lewis, J., 2011. Chromite and Platinum-Group-Elements Mineralization in The Santa Elena Ophiolitic Ultramafic Nappe (Costa Rica): Geodynamic Implications. Geologica Acta, 9(3-4), 407-423.

Zhang, P. F., Zhou, M. F., Robinson, P. T., Malpas, J., Yumul Jr., G. P., Wang, C. Y., & Li, J., 2024. Diversities of chromite mineralization induced by chemo-thermal evolution of the mantle during subduction initiation. Nature Communications, 15, 9385.

Zhou, M. F., & Bai, W. J., 1992. Chromite Deposits in China and Their Origin. Mineralium Deposita, 27, 192-199.

Zhou, M. F., & Robinson, P. T., 1997. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits. Economic Geology, 92 (2), 259-262

Zhou, M. F., Robinson, P. T., & Bai, W. J., 1994. Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle. Mineralium Deposita, 29, 98–101.

Zhou, M. F., Robinson, P. T., Su, B. X., Gao, J. F., Li, J. W., Yang, J. S., & Malpas, J., 2014. Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: the role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments. Gondwana Research, 26, 262–283.

KISA DÖNEMLİ PLANLAMADA KESTİRİM HATALARININ EKONOMİK ETKİSİ

ECONOMIC IMPACT OF ESTIMATION ERRORS IN SHORT TERM PLANNING

A. Erhan Tercan
Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZ: Bu çalışma, kısa dönemli maden planlamasında tenör kestirim hatalarının ekonomik etkilerini incelemektedir. Tenör kestirimi, maden bloklarının sınıflandırılmasında belirleyici bir faktör olup, bu süreçte yapılan hatalar ekonomik kayıplara neden olabilir. Çalışmada farklı kestirim yöntemlerinin (krigleme, uzaklığın karesinin tersi ile ağırlıklandırma ve en yakın nokta yöntemi) kestirim doğruluğu ve ekonomik kayıplar üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Simüle edilen bir maden sahasında yapılan uygulama, krigleme yönteminin diğerlerine kıyasla daha doğru sınıflandırma sağladığını ve ekonomik kayıpları en aza indirdiğini göstermiştir. Yanlış sınıflandırmaların yol açtığı parasal kayıplar fonksiyonel analizlerle hesaplanmış ve kestirim yöntemlerinin ekonomik verimlilik açısından farklı sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeoistatistik, Simulasyon, Sınıflandırma

ABSTRACT: *This study examines the economic effects of grade estimation errors in short-term mine planning. Grade estimation is a decisive factor in the classification of mining blocks, and mistakes made in this process can result in economic losses. In this study, the effects of different estimation methods (kriging, inverse distance weighting and nearest neighbor method) on estimation accuracy and economic losses are evaluated. Practice in a simulated mining field has shown that kriging provides more accurate classification and minimizes economic losses compared to others. Monetary losses caused by misclassifications were calculated by functional analyses and it was determined that estimation methods produced different results in terms of economic efficiency.*

Keywords: *Geostatistics, Simulation, Classification*

1. GİRİŞ

Tenör kestirimi, Maden Kaynak/Rezerv kestiriminin önemli bir evresini oluşturur. Bu evrede blokların ortalama tenörleri çeşitli yöntemler kullanılarak kestirilir. Ancak bu kestirimler eksik veri, çeşitli yaklaşım ve varsayımlar altında yapıldığı için az ya da çok hata içerir. Yapılan bu hatanın büyüklüğü Maden Kaynak/Rezerv sınıflaması yanında proje ekonomisini etkileyip parasal kayıplara yol açabilir.

Bu incelemenin temel amacı kestirim hatalarının ekonomik bir etkisinin olup olmadığını ortaya koymaktır. Bunun için kestirilen tenör değerlerini blokların ekonomik değerlerine dönüştürmek gerekir. Bu tür dönüşümler maden projelendirmenin çeşitli aşamalarında yapılır. Örneğin uzun dönemli planlamada ocağın nihai sınırlarını belirlerken blokların ekonomik değerleri hesaplanır ve daha sonra bunlar nihai optimum ocak sınırının belirlenmesinde kullanılır. Tenörlerin ekonomik değerlere dönüştürüldüğü diğer bir uygulama tenör kontrolü işlemidir. Bu işlem, kısa dönemli planlama sırasında yapılır ve maden üretim blokları en basit haliyle cevher ve pasa bloğu şeklinde sınıflara ayrılır. Daha sonra belirlenen kazı sınırlarına göre bloklar proses tesisine, pasa ya da cevher stok sahasına gönderilir.

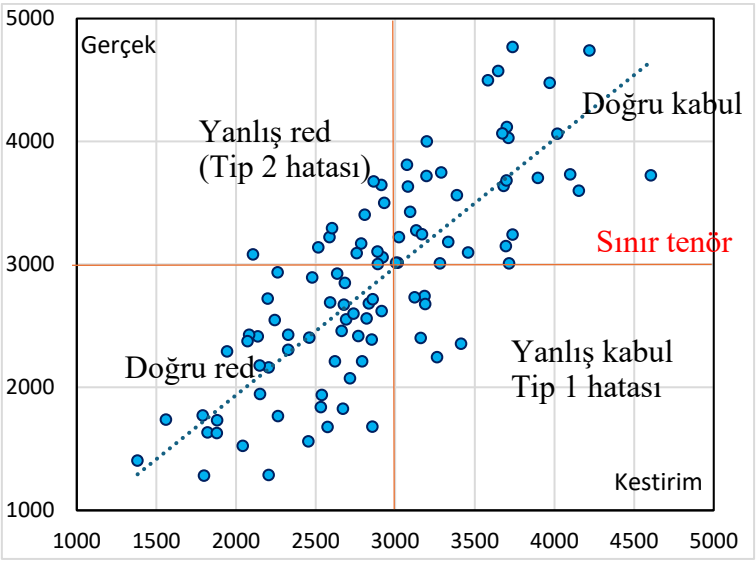
Bu bildiride kestirim hatalarının ekonomik etkisi kısa dönemli planlama sürecinde ele alınacaktır.

2. YÖNTEM

Uygulamada tenör kontrol süreci patlatma ya da tenör kontrol deliklerinden veri üretimi, bu verilere dayanarak cevher / pasa sınırlarının belirlenmesi ve malzemenin bu sınırlara göre proses tesisine, cevher ya da pasa stok sahasına

gönderilmesini içerir. Bu çalışmanın kapsamı tam bir tenör kontrol süreci olmayıp, maden üretim bloklarının cevher ya da pasa bloğu şeklinde sınıflandırılmasıyla sınırlıdır. Tenör kontrolü literatürde bir çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Glacken (1997), Deutsch vd. (2000), Verly (2005) ve Dimitrakopoulos ve Godoy (2014) bunlar arasında sayılabilir.

Blokların sınıflandırılması, blok tenörlerini ekonomik sınır tenörle karşılaştırarak yapılır. Blok tenörü sınır tenörden yüksekse cevher bloğu, düşükse pasa bloğu olarak sınıflandırılır. Uygulamada bloğun gerçek tenörü bilinmez ve sınıflandırma, kestirilen tenör değerine göre yapılır. Kestirimler yansız yani hata içermiyorsa cevher blokları cevher, pasa blokları da pasa olarak doğru bir şekilde belirlenir. Kestirim değerleri az ya da çok hata içerdiğinde gerçekte cevher olan bir blok pasa, pasa olan bir blok ise cevher bloğu şeklinde sınıflandırılabilir. Bunun tipik bir örneği Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Cevher / pasa ayırımı kararlarına ilişkin senaryolar

Şekil 1'de tek bir sınır değer dikkate alınarak basit bir tenör kontrol örneğinin sonuçları gösterilmiştir. Sınır tenör, blokların sadece cevher ve pasa bloğu şeklinde ayrımına izin vermektedir. Bu durum, kestirilecek

lokasyonda dört farklı senaryonun oluşmasına neden olur: 1) kestirim ve gerçek değerlerin sınır tenörden yüksek olduğu doğru kabul senaryosu, 2) hem kestirim hem de gerçek değerlerin sınır tenörden düşük olduğu doğru red senaryosu, 3) kestirim değerinin sınır tenörün üstünde ancak gerçek değerin altında olduğu hatalı kabul senaryosu, ve 4) kestirim değerinin sınır tenörün altında ancak gerçek değerin üstünde olduğu hatalı red senaryosu. İstatistikte hatalı kabul, tip 1 hatası, hatalı red ise tip 2 hatası şeklinde adlandırılır. Doğru kabul, kazanç ya da pozitif nakit akışı üretirken yanlış red ve yanlış kabul senaryolarında zarar sözkonusudur. Her iki hatalı kararda (yanlış red ve yanlış kabul) ortaya çıkacak zararlar aynı değildir. Doğru red senaryosu ise ne kazanç ne de zarar üretir (Vasylchuk, 2016).

2.1. Parasal Kayıp Fonksiyonu

Sınıflandırma hatalarına eşlik eden parasal kayıp, gerçek ancak bilinmeyen tenör değerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Isaaks (1990), parasal kaybı bloğun potansiyel ve kazanılan değeri arasındaki fark şeklinde tanımlamaktadır:

Parasal kayıp (KA)= potansiyel değer (PD) – kazanılan değer (KD) (1)

Eşitlik 1'de potansiyel değer, bloğun gerçek parasal değerini, kazanılan değer ise gerçekleşen değerini göstermektedir. Maden üretim bloğunun cevher bloğu olduğunu varsayalım. Bu blok, kestirim değerine göre cevher bloğu olarak sınıflandırıldıysa parasal bir kayıp oluşmaz. Bu durumda KA = 0 dır. Blok, pasa olarak yanlış sınıflandırıldıysa ortaya çıkacak parasal kayıp

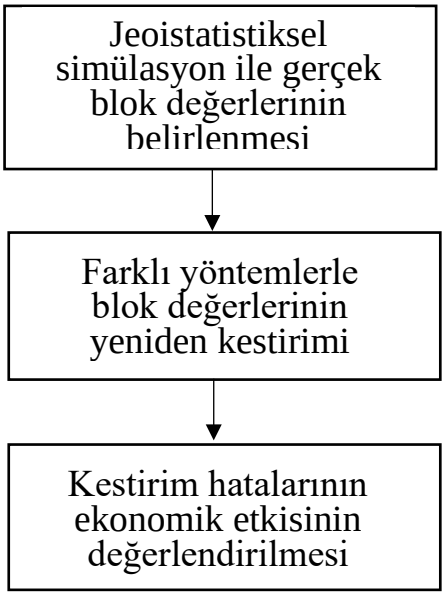
KA = (PD= p×r×z-c) – (KD=0) (2)

ile hesaplanır (Çoşkun, 1997). Eşitlik 2'de p: cevherin satış fiyatı, r: kazanım verimi, z: tenör ve c: proses maliyetini göstermektedir. Maden üretim bloğu gerçekte pasa bloğu ise ve blok, pasa bloğu olarak doğru bir şekilde sınıflandırıldıysa parasal bir kayıp oluşmayacaktır (KA=0). Bununla birlikte gerçekte pasa olan blok, cevher bloğu şeklinde yanlış sınıflandırıldıysa oluşacak parasal kayıp Eşitlik 3 ile hesaplanır (Çoşkun, 1997).

$$KA = (PD=0) – (KD=p×r×z-c) \quad (3)$$

3. SİMÜLE EDİLMİŞ BİR MADEN SAHASINDA UYGULAMA

Kestirim hatalarının ekonomik etkisini değerlendirmek amacıyla bir simülasyon deneyi tasarlanmıştır. Bu amaçla izlenen işlem adımları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Simulasyon deneyinde dikkate alınan işlem adımları

İlk adım, jeoistatistiksel simulasyonla gerçek blok değerlerinin üretimi, ikinci adım ise farklı kestirim yöntemleri ile blok ortalamalarının kestirimini içermektedir. Krigleme (kriging), uzaklığın tersi ile

ağırlıklandırma ve en yakın nokta ile kestirim dikkate alınan yöntemlerdir. Kestirim hatalarının ekonomik etkisinin değerlendirilmesi son adımı oluşturmaktadır.

3.1. Varsayımlar

Ele alınan problem, madenden proses tesisine sabit kalitede cevher beslemesi problemidir. Madenin her gün tesise 1260-ton malzeme vermeyi taahhüt ettiği varsayılmaktadır. Maden, bu nedenle ocağın bir seviyesini 100 gün cevher beslemek amacıyla hazırlamıştır. Hazırlık planı, 30m × 30m boyutlarındaki bloklardan 1m kalınlığında cevher üretmeyi ve bunu tesise vermeyi içermektedir. Cevher yoğunluğu 1.4 t/m^3 tür. Paçal yapma bir opsiyon değildir. Bloklar, istenilen sırada üretilebilir.

Tesis, madenden 2500 birim üstünde tenöre (T) sahip cevheri almakta, 2000-2500 birim aralığındaki malzemeye ceza uygulamakta, 2000 birim altındaki malzemeye ise hiç bir ödeme yapmamaktadır.

T < 2000 ise	Gelir=0
2000 < T < 2500 ise	Gelir=Satış fiyatı* Üretim miktarı*(T/2500)
T > 2500 ise	Gelir=Satış fiyatı* Üretim miktarı

Cevherin satış fiyatı 40 $/ton dur. Maden, blokların kestirilen tenörüne dayanarak tesise cevher vermeyi planlamakta ve tesise verilecek cevherden elde edeceği geliri önceden bilmek istemektedir.

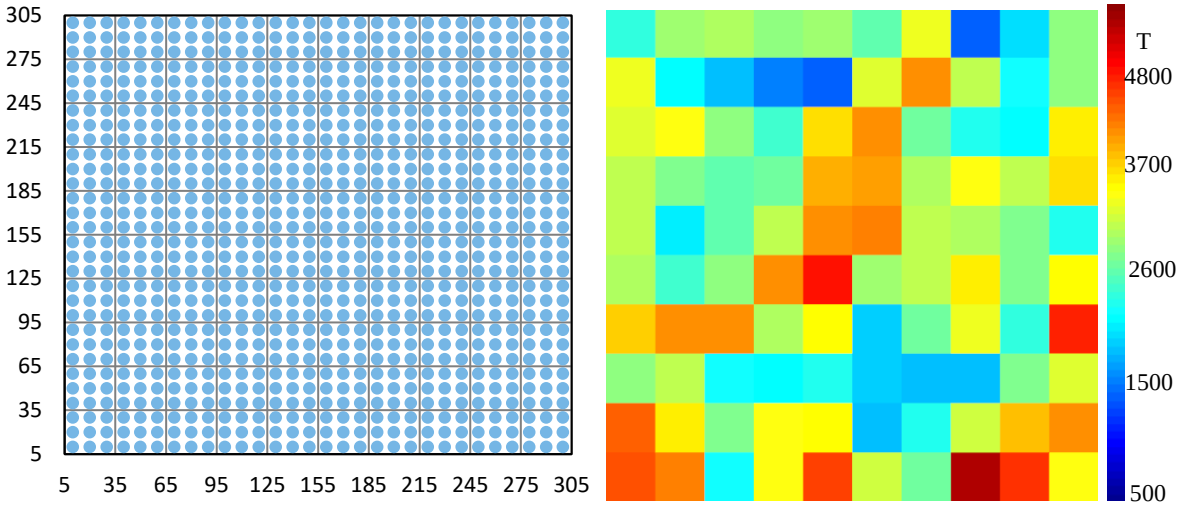
3.2. Blok Tenörlerinin Jeoistatistiksel Simulasyon ile Üretilmesi

Ardışık Normal Benzetim (ANB) yöntemi ile her bir bloğun 9 noktasında benzetim değerleri üretilmiş ve daha sonra bunların ortalaması alınarak gerçek blok değerleri elde edilmiştir. Şekil 3, nokta benzetimlerin yapıldığı

lokasyonları ve elde edilen ortalama tenör değerlerinin konumsal dağılımını göstermektedir.

3.3. Blok Ortalamalarının Kestirimi

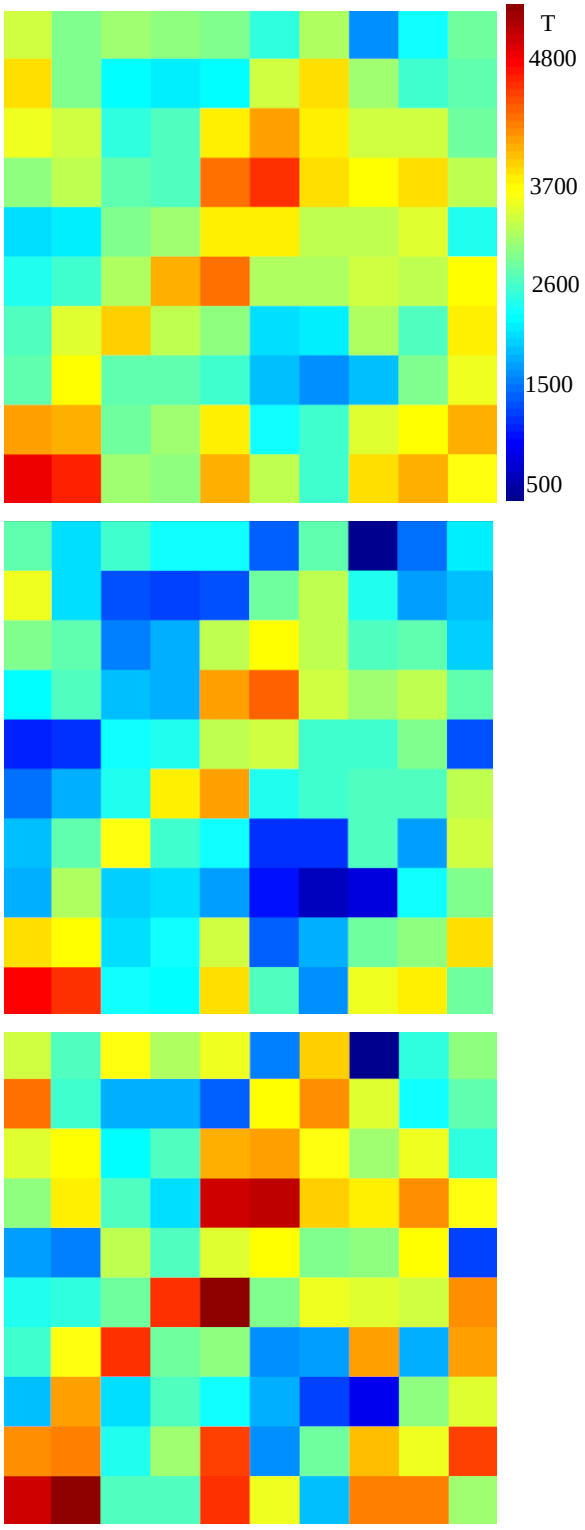
Maden, her bir bloğun ortalama tenörünü kestirmek amacıyla blok orta noktalarından numuneler almış ve bunları analiz etmiştir. Bu değerler kullanılarak her bir bloğun ortalama tenör değeri krigleme (KRG), uzaklığın karesinin tersi ile ağırlıklandırma (UTA2) ve en yakın nokta (EYN) yöntemi ile kestirilmiştir.



Şekil 3. Jeoistatistiksel benzetim değerlerinin üretildiği noktalar (soldaki şekil), simule edilmiş ortalama AID'in konumsal dağılımı (sağdaki şekil)

KRG, verilerin variogram analizi ile uzaklığa bağlı değişimin modellenmesine ve yapılacak hata varyansının enküçüklenmesine dayanır. UTA2 ise bir verinin diğeri üzerindeki etkisinin uzaklığın tersi ile orantılı olduğunu varsayar. Kestirimde kullanılacak veriler arasındaki uzaklığı dikkate almaz. EYN yöntemi ise kestirilecek noktaya en yakın noktanın değerini kestirim değeri olarak alır. Her üç yöntemde yansızdır. Diğer bir ifade ile verilere atanacak ağırlıkların toplamı bire eşittir. Her üç yöntem için aynı kestirim planı (örnek tarama uzaklığı, bu uzaklık içinde en küçük ve en

büyük örnek sayısı) dikkate alınmıştır. Şekil 4, üç yöntemle elde edilen blok kestirimlerin konumsal dağılımını göstermektedir.



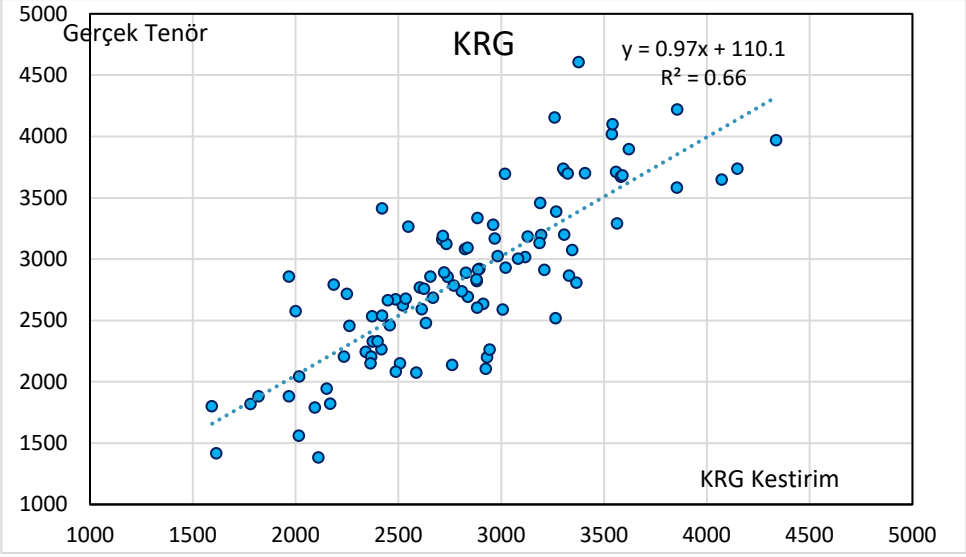
Şekil 4. Blok kestirimlerin konumsal dağılımı. KRG (üst), UTA2 (orta) ve EYN (alt). Üstte verilen lejand her üç grafik içinde geçerlidir.

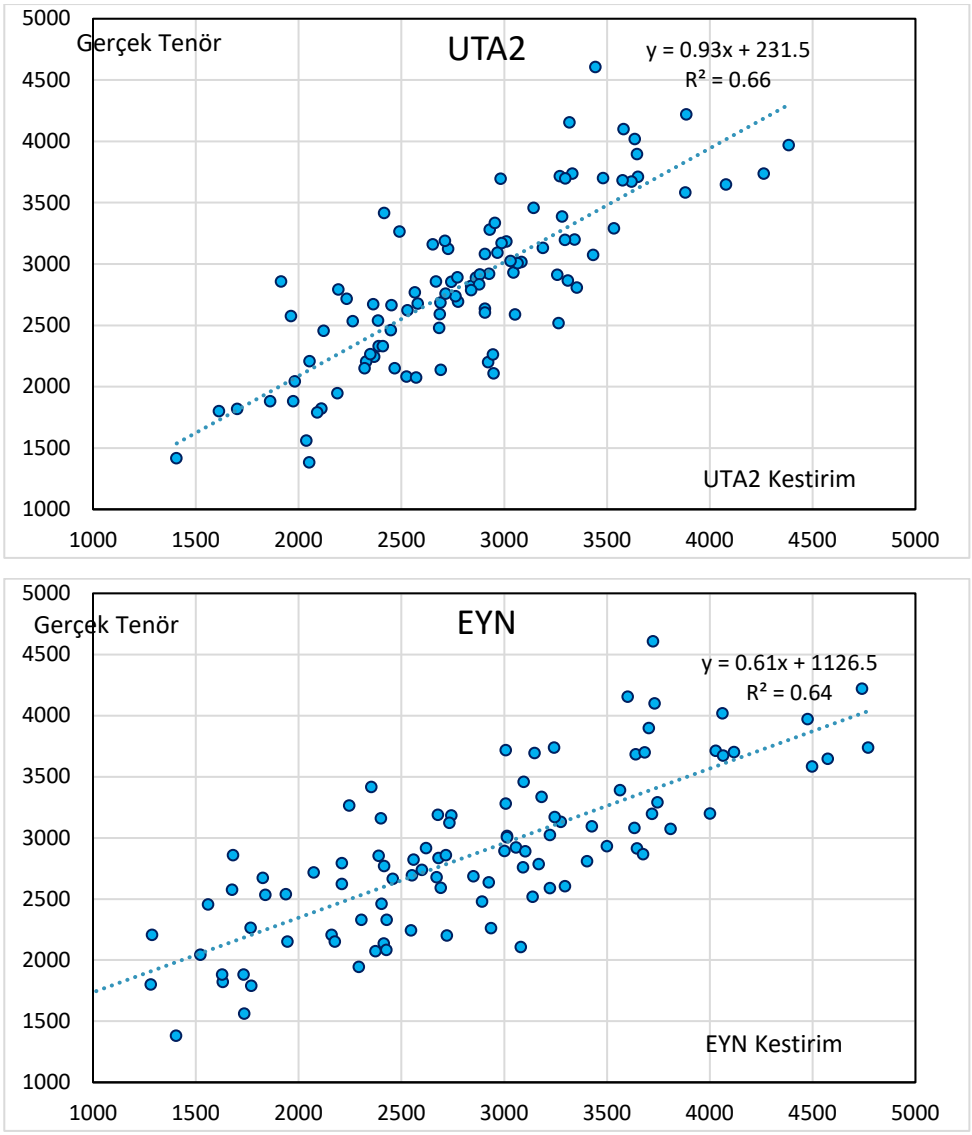
Gerçek blok değerleri (Şekil 3) ile görsel bir karşılaştırma, KRG yönteminin gerçek değerlere daha yakın sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Bu gözlemi teyit etmek amacıyla her yöntem için mutlak kestirim hatalarının ortalaması hesaplanmış ve Çizelge 1'de verilmiştir. KRG en az mutlak hataya yol açarken EYN kötü bir performans sergilemektedir.

Çizelge 1. Mutlak kestirim hatalarının ortalaması

Kestirim yöntemi	KRG	INV2	EYN
Hata ortalaması	294	295	428

Kestirilen blok değerlerine karşı gerçek blok değerlerin saçılma grafikleri çizilmiş ve Şekil 5'de gösterilmiştir. KRG ve UTA2 yöntemlerinden elde edilen kestirimler, gerçek değerlerin varyansını aynı oranda açıklamaktadır. Ancak KRG yöntemi 1'e daha yakın eğim (0.97) değeri verdiği için UTA2'ye göre daha yansız kestirim değerleri ürettiği söylenebilir. EYN yöntemi, KRG ve UTA2'ye göre kötü bir performans sergilemiştir.





Şekil 5. Kestim değerlerine karşı gerçek blok değerlerinin saçılım diyagramları. KRG (üst), UTA2 (orta) ve EYN (alt)

3.4. Yanılma Matrisleri

Sınıflandırma problemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan yanılma matrisleri her üç yöntem için hesaplanmış ve Çizelge 2'de gösterilmiştir. Yanılma matrislerinde T < 2000 birim olan malzeme pasa (P), 2000 birim < T < 2500 birim malzeme kirli cevher (KK) ve T > 2500 birim olan malzeme ise temiz cevher (TK) olarak isimlendirilmiştir. Buna göre gerçekte 72 adet temiz cevher bloğundan 63 adeti KRG ile doğru bir şekilde sınıflandırılmıştır. UTA2 ile doğru sınıflandırılan blok sayısı 61, EYT ile 58

dir. Bunun yanında gerçekte temiz cevher olarak sınıflandırılması gereken bloklar içinde KRG ile 8 adet, UTA2 ile 9 adet ve EYN ile yine 9 adet blok, kirli cevher olarak yanlış bir şekilde sınıflandırılmıştır. Benzer şeklide KRG ile 1 adet, UTA2 ile 2 adet ve EYT ile 5 adet blok yanlış bir şekilde pasa bloğu olarak sınıflandırılmıştır. Çizelge 2, KRG yönteminin diğer yöntemlere göre blokları gerçeğe daha yakın bir şekilde sınıflandırdığını, yanlış sınıflandırılan blok sayısının nispeten az olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2. Üretim bloklarının sınıflandırılmasına ilişkin yanılma matrisleri

KRG

	Kestirilen	TK(1)	KK(2)	P(3)
Gerçek	Ger\Kes	70	24	6
TK	72	63	8	1
KK	18	7	11	0
P	10	0	5	5

UTA2

	Kestirilen	TK	KK	P
Gerçek	Ger\Kes	68	24	8
TK	72	61	9	2
KK	18	7	10	1
P	10	0	5	5

EYN

	Kestirilen	TK	KK	P
Gerçek	Ger\Kes	63	18	19
TK	72	58	9	5
KK	18	5	8	5
P	10	0	1	9

(1)TK: Temiz cevher (T > 2500 birim)

(2) KK: Kirli cevher (2000 birim < T < 2500 birim)

(3) P: Pasa (T < 2000 birim)

Sınıflandırma açısından EYN yönteminin en kötü performans sergileyen yöntem olduğu görülmektedir. Yöntemlerin sınıflandırma performanslarını değerlendirmek amacıyla her bir sınıf için doğruluk ölçütleri hesaplanmış ve Çizelge 3'de gösterilmiştir. Sınıflandırmada iyi performans sergileyen yöntemlerin 1'e yakın doğruluk değerleri üretmesi beklenir. Çizelge 3, KRG yönteminin TK ve KK bloklarını sınıflandırmada daha iyi performans sergilediğini, UTA2 yönteminin P bloklarını sınıflandırmada daha iyi çalıştığını göstermektedir.

Çizelge 3. Her bir sınıf için doğruluk değerleri

	KRG	UTA2	EYN
TK	0.84	0.82	0.81
KK	0.80	0.78	0.80
P	0.90	0.92	0.89

Blokları yanlış sınıflandırmanın ekonomik etkisini belirlemek amacıyla her yöntem için Çizelge 4'de verilen fonksiyonlara göre kayıp değerler hesaplanmış ve Çizelge 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. Her bir sınıfa ilişkin kayıp fonksiyonları

	Kestirimler		
Gerçek	TK	KK	P
TK	0	$(1-R^{*})\times S^{**}$	$(1)\times S$
KK	$(R-1)\times S$	0	$R\times S$
P	$-1\times S$	$-R\times S$	0

* R=Kestirilen T/2500, ** S= Yoğunluk × blok hacmi × satış fiyatı

Çizelge 5. Kayıp fonksiyonların değerleri

Yöntem	KRG	UTA2	EYN
Fonksiyon değeri	-176400	-125496	337176

Fonksiyonlar Eşitlik 1'de verilen tanım dikkate alınarak geliştirilmiştir. Çizelge 5'deki değerlerin negatif çıkmasının nedeni kazanç fonksiyonlarının hesaplanması sırasında proses maliyetlerinin dikkate alınmamasıdır. Kayıp fonksiyonunu en küçükleyen yöntem tercih edilen yöntemdir. Buna göre KRG yöntemi diğerlerine göre daha az kayba yol açmakta, en çok kaybın EYN ile üretildiği görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, kısa dönemli maden planlamasında kullanılan kestirim yöntemlerinin ekonomik sonuçlarını değerlendirmiş ve krigleme yönteminin en düşük parasal kayıpla en doğru sonucu verdiğini ortaya koymuştur. Yanlış sınıflandırılan bloklar, maden projelerinin ekonomik performansını doğrudan etkileyerek gelir kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle, kestirim hatalarını en aza indiren ve daha güvenilir sonuçlar sağlayan yöntemlerin tercih edilmesi gerekir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı maden sahalarındaki uygulamalarla yöntemlerin başarısını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilir.

KAYNAKLAR

Çoşkun, B., 1997. Risk Quantified Ore Control. M.Sc. Thesis, Colorado School of Mines.

Deutsch, C., Magri, E. & Norrena, K., 2000. Optimal grade control using geostatistics and economics: methodology and examples. SME Trans., 308, 43–52.

Dimitrakopoulos, R., & Godoy, M., 2014. Grade control based on economic ore/waste classification functions and stochastic simulations: examples, comparisons and applications. Mining Technology, 123, 2, 90-106.

Isaaks, E. H., 1991. The application of Monte Carlo Methods to the Analysis of Spatially Correlated Data. Ph.D. Dissertation, Stanford University.

Glacken, I. M, 1997. Change of support and use of economic parameters for block selection, in Geostatistics Wollongong ’96, (eds. E. Y. Baafi and N. A. Schofield). 2, 811–821, Dordrecht, Netherlands, Kluwer.

Vasylchuk, Y. V., 2016. Integrated System for Improved Grade Control in Open Pit Mines. M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.

Verly, G., 2005. Grade control classification of ore and waste: a critical review of estimation and simulation based procedures. Math. Geol., 37, (5), 451–476.

BAZI KRİTİK HAMMADDELERİN ULTRASONİK DESTEKLİ FLOTASYONLA KAZANIM ÇALIŞMALARI

RECOVERY STUDIES OF SOME CRITICAL RAW MATERIALS BY ULTRASONICALLY ASSISTED FLOTATION

Şafak Gökhan Özkan
Türk-Alman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Robotlar ve Akıllı Sistemler Anabilim Dalı, 34820, Beykoz, İstanbul

ÖZ: Çevrenin korunması, temiz enerji teknolojileri, güneş panelleri, rüzgar türbinleri, elektrikli araçlar, bataryalar ve enerji tasarruflu aydınlatmada yeri doldurulamaz olan kritik hammaddelerin madenciliği ve teknolojisinin geliştirilmesi ile yakından ilişkilidir. Bu araştırma ince ve çok ince tane boyutundaki kritik hammaddelerin, cevherlerin ve artıkların/atıkların flotasyon yoluyla kazanılması, oksitlenmiş/paslanmış mineral yüzeylerinin ultrasonik enerji kullanılarak, proses öncesinde, esnasında ve sonrasında temizlenmesi, kullanılan reaktiflerin etkinliğinin ve malzeme yüzeylerinin hidrofobisitesinin artırılması ve böylece ürün kalitesinin ve proses verimliliğinin geliştirilmesi ile ilgili özet bilgiler verilmesini amaçlamaktadır. Ayrıca, bu bildiride özellikle koklaşabilir taş kömürü, grafit ve kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların pirolizle ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan siyah kütle gibi bazı kritik hammaddelerin flotasyonla geri kazanımında ultrasonik enerji kullanımının olası etkileri, pratik gözlemler ve deneysel sonuçlarla birlikte özetlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kritik Hammaddeler, Stratejik Mineraller, Cevher Hazırlama, Flotasyon, Ultrasonik Etkiler

ABSTRACT: *Environmental protection is closely linked to the mining and technological development of critical raw materials, which are irreplaceable in clean energy technologies, solar panels, wind turbines, electric vehicles, batteries and energy-efficient lighting. This investigation aims to present a brief information on recovery of fine and ultra fine particles from critical raw materials, ores and tailings/residues/wastes by flotation, cleaning oxidized/rusted mineral surfaces before, during and after the process using ultrasonic energy, increasing the effectiveness of the reagents used and the hydrophobicity of the material surfaces and thus improving product quality and process efficiency. In addition, this paper summarizes the possible effects of ultrasonic energy use on the flotation recovery of some critical raw*

materials, especially coking coal, graphite and black mass samples remaining after pyrolysis separation of end-of-life batteries, together with practical observations and experimental results.

Keywords: *Critical Raw Materials, Strategic Minerals, Mineral Processing, Flotation, Ultrasonic Effects*

1. INTRODUCTION

1.1. Critical Raw Materials

The list of critical raw materials (CRM), regularly updated by the European Union (EU) in early 2020s, covers a wide range of elements, metals, minerals and non-energy raw materials linked to all industries at all supply chain stages, such as lithium, cobalt, borates, titanium, bauxite, strontium, given the developments related to the increase in energy and battery storage demand. Table 1 shows the categorization of these materials in detail.

Table 1. The categorization of the critical raw materials (EU, 2023)

Industrial and construction minerals	Aggregates, baryte, bentonite, borates, diatomite, feldspar, fluorspar, gypsum, kaolin clay, limestone, magnesite, natural **graphite**, perlite, phosphate rock, phosphorus, potash, silica sand, sulphur, talc
Iron and ferro-alloy metals	Chromium, cobalt, manganese, molybdenum, nickel, niobium, tantalum, titanium, titanium metal, tungsten, vanadium
Precious metals	Gold, silver, and Platinum Group Metals (iridium, palladium, platinum, rhodium, ruthenium)
Rare earths	Heavy rare earths-HREE (dysprosium, erbium, europium, gadolinium, holmium, lutetium, terbium, thulium, ytterbium, yttrium), light rare earths-LREE (cerium, lanthanum, neodymium, praseodymium and samarium) and scandium
Other non-ferrous metals	Aluminium/bauxite, antimony, arsenic, beryllium, bismuth, cadmium, copper, gallium, germanium, gold, hafnium, indium, lead, lithium, magnesium, rhenium, selenium, silicon metal, silver, strontium, tellurium, tin, zinc, zirconium
Bio and other materials	Natural cork, natural rubber, natural teak wood, sapele wood, **coking coal**, hydrogen, helium, roundwood, neon, krpton, xenon

Critical metals are materials whose availability is essential for high-technology, green and defence applications, but vulnerable to politically or economically driven fluctuations in supply. At present, this designation applies particularly to the rare-earth elements (REE), tantalum (Ta), niobium (Nb), lithium (Li), molybdenum (Mo) and indium (In).

The ever-increasing quality of life and development in the modern world is dependent on the production efficiency and technology of many critical raw materials. For example, a smartphone can contain up to 50 different types of metals, which contribute to its small size, lightness and functionality. Environmental issues, especially clean technologies, solar panels, wind turbines, electric vehicles and energy-efficient lighting, are also closely linked to the mining and technology development of irreplaceable critical raw materials. Typically, there are three factors that are taken into account when deciding on whether a material is critical or not, and also the degree of criticality to be given to that material. These are economic importance, supply risk and environmental implications. A confusing distinction especially as CRM means different things to different groups, different industries, different nations at different times and is liable to change at a moment's notice. Something that is strategic may also be critical, something that is critical may also be strategic. There are some statements or opinions that say there is no difference. It is possible to regard commodities that are important and necessary as strategic but not critical unless they meet certain thresholds in terms of supply risk as well as economic importance. This will be dependent on where / who is talking. For example: PGE could be regarded as strategic with respect to fuel cells and hydrogen. They would not be CRM in South Africa but would be CRM in Europe / Rest of the World. Probably more of a political decision enabling the use of certain

legislation once a particular mineral is defined as “critical” or “strategic” (Kinnaird and Nex, 2024).

Figure 1 shows the World map together with sources of EU CRMs incorporating a “Level of Governance” parameter.

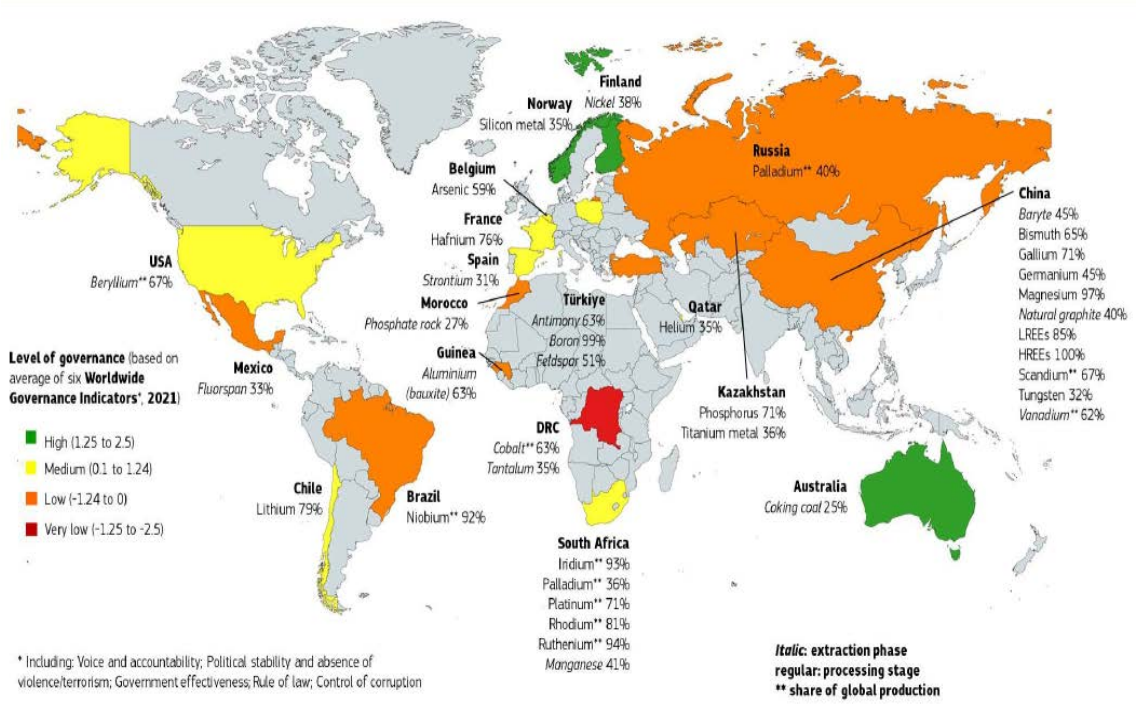


Figure 1. Sources of EU CRMs incorporating a “Level of Governance” parameter (European Union, 2023)

1.2. Importance of Tailings&Wastes and Novel Recovery Approaches

As well known, conventional mining and processing methods consume very high amounts of energy and water, which significantly increases the production and operating costs of the concentrates obtained and also causes environmental problems. Innovative recovery methods, on the other hand follow detailed mineralogical, physical and chemical characterization, sufficient liberation to avoid unnecessary fragmentation, and also very little water consumption and water recovery steps, starting from the mine with the

target of zero tailing, residue and/or waste, including product-oriented automation and quality control steps.

Today, the demand for technologies that provide renewable energy and increase energy efficiency is expected to increase further with the worldwide movement towards low-carbon economies. It is certain that many of these technologies will benefit from concentrates obtained from the direct mining and recovery of critical raw materials and, in time, from products obtained from the recycling of plant residues that process these raw materials. Therefore, the most important opportunity for today's mining and mineral processing is to find the opportunity to meet the demand for critical metals, especially through the recycling of residues and wastes (Lottermoser, 2010). Mining and mineral processing plant wastes may have different structures than those originating from raw ores. Of course, before any metal value can be recovered from the wastes, a very detailed mineralogical characterization is absolutely necessary. Although the mining and mineral processing processes applied for these types of materials are largely similar, a different and modern technology needs to be designed for the liberation, separation and enrichment of critical metals (Hudson-Edwards et al. 2011). Possible innovative technologies to be applied to liberate and recover critical metals from mining and mineral processing plant residues include the creation of free surfaces by stirred grinding and the removal of the hydrophilic part of this very fine particles by flotation. Depending on the particle size, separation can be achieved using semi-reverse cyclones and hybrid classification technologies. Separation of minerals from gangue can be achieved by fluidized bed reactors and flotation of coarse and fine particles, respectively. Gravity concentration methods using counter-flow fluidized bed separators can also be preferred to separate valuable minerals from gangue (Whitworth et al. 2022).

Mine and mineral processing tailings do not have sufficient liberation and the particle size distribution can vary depending on the ore type. For example, the average particle size of the waste produced during mining operations varies from sand (0.0625–2 mm) to rocks (>256 mm), while tailings contain much finer particle size and significant concentrations of components (Vriens et al., 2020). Mine tailings have very different crystal structures and textures (Piatak, 2018). Furthermore, long-term exposure to air and water leads to significant oxidation of mineral surfaces, making them less suitable for flotation recovery. To overcome these challenges, innovative mineral processing technologies, such as application of microwave, ultrasound, some other energies, etc. for critical metal recovery need to be developed and adapted for all types of mining and mineral processing tailings and wastes.

1.3. Froth Flotation and Ultrasonic Treatment

Froth flotation, which emphasizes the surface properties of different minerals in the ore to separate them from each other, is considered one of the most preferred mineral processing methods. It is a highly versatile method for physically separating particles based on differences in the ability of air bubbles to selectively adhere to specific mineral surfaces in a mineral/water slurry. Particles can either be naturally hydrophobic, or the hydrophobicity can be induced by chemical treatments. The particles with attached air bubbles are then carried to the surface and removed, while the particles that remain completely wetted stay in the liquid phase. Froth flotation can be adapted to a broad range of mineral separations, as it is possible to use chemical treatments to selectively alter mineral surfaces so that they have the necessary properties for the separation. The chemistry of the pulp in the cell is used to control the particles' surface properties, to render them more

or less amenable to attach to air bubbles. This is usually achieved through the addition of reagents or via control of pulp pH and electrochemical potential (Eh), (Sygusch and Rudolph, 2021). Flotation is a physical-chemical ore enrichment method where solid, liquid and gas phases coexist by utilizing the interface properties of minerals and separating valuable and worthless minerals. In flotation, the target mineral/minerals in the ore are made hydrophobic (water-repellent) with various chemicals. Other minerals are mostly hydrophilic (water-loving). Thus, a surface difference is created between the valuable and worthless minerals that make up the ore. In order to perform the separation, an environment is used in which air is distributed in the form of bubbles in the pulp. Hydrophobic minerals stick to the air bubbles and rise to the foam region and overflow, forming the concentrate, while hydrophilic minerals remain in the pulp (Yiğit and Özkan, 2007).

Conventional flotation operates within a very narrow particle size range between 10 and 200 microns. Flotation efficiencies of very fine and very coarse mineral particles drop sharply outside the optimum particle size range. This situation is shown in Figure 2, the relationship between particle size and recovery efficiency in some flotation plants and the elephant curve (Kohmuench et al. 2018).

On the recovery of fine and ultra fine particles from ores and tailings/wastes by flotation, the cleaning of oxidized/rusted mineral surfaces by using ultrasonic energy before, during and after the process, ensuring the effectiveness of the reagents used, facilitating the hydrophobicity of the particle surfaces and thus increasing the product quality and recovery efficiency have been investigated by various researchers in recent years (Özkan, 2017; 2012; Özkan and Kuyumcu, 2006; 2007). It has been stated that different stages of the flotation process, especially those where ultrasonic energy is applied, can be positively affected in some cases by

mechanical vibrations, sound waves and the joint effect of these two physical behaviours. Some ultrasonic process applications in flotation show that acoustic environments have positive effects on yields. While most of the past studies focused on the effect of ultrasound before flotation, such as emulsification of flotation reagents and removal of minerals from adsorbed reagent layers, recent studies have investigated the effects of ultrasonic treatment during and/or after flotation (Gungoren et al. 2024; 2020; 2019). In general, the effectiveness of ultrasonic vibrations depends on the natural structure of the minerals and the method of ultrasound application. Ultrasonic treatment is currently considered an important process to improve flotation. This effect occurs with cavitation and is accompanied by an increase in the pressure and temperature of the medium. In addition to increasing the effects of the chemicals used, the uniform spreading of these reagents in the flotation medium also supports this effect.

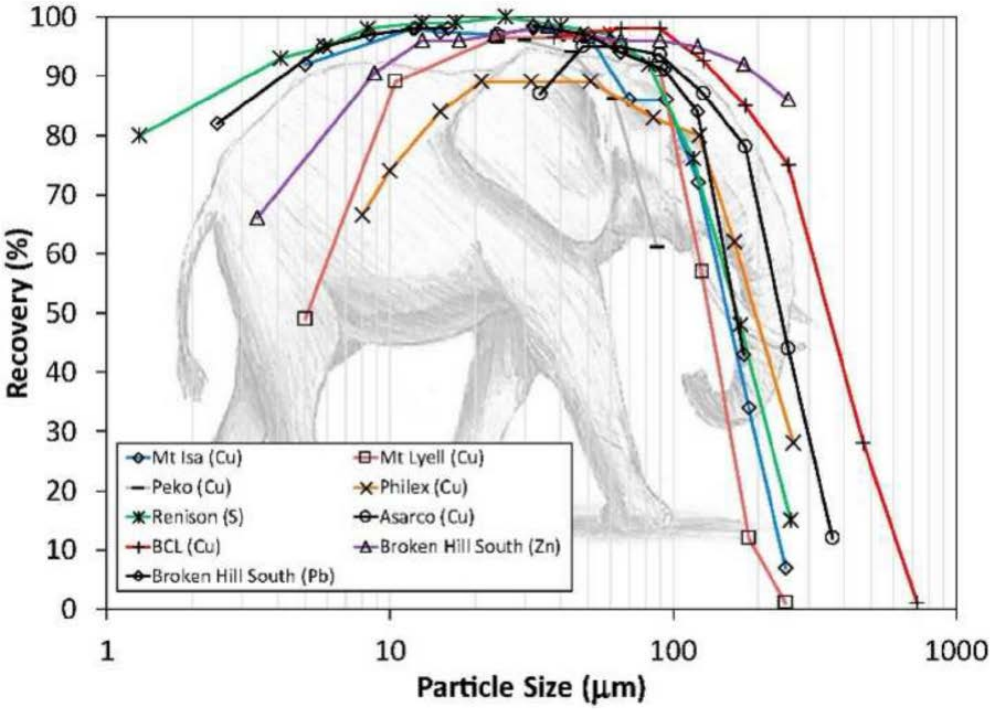


Figure 2. The elephant curve (relation between particle size and flotation recovery) (Kohmuench et al. 2018)

Zhang et al. (2024) stated that ultrasonic treatment has been widely used in the mineral flotation process due to its advantages in terms of operational simplicity, no secondary pollutant formation, and safety. The authors reported that the effect of ultrasonic treatment on mineral flotation and shown excellent flotation performance and stated that the ultrasonic mechanisms are classified into three types: the transient cavitation effect, stable cavitation effect, and acoustic radiation force effect. The effect of the main ultrasonic parameters, including ultrasonic power and ultrasonic frequency, on mineral flotation are discussed. In their review, they highlighted the uses of the application of ultrasonic treatment in minerals (such as the cleaning effect, ultrasonic corrosion, and desulfuration), flotation agents (such as dispersion and emulsification and change in properties and microstructure of pharmaceutical solution), and slurry (such formation of microbubbles and coalescence). Their findings demonstrated that the application of the ultrasonic effect yields diverse impacts on flotation, thereby enabling the regulation of flotation behaviour through various treatment methods to enhance flotation indices and achieve the desired objectives.

In order for hydrophobic particles to be successfully captured by bubbles, particles and bubbles must first be close enough, that is, particles and bubbles must collide effectively, which is usually determined by the hydrodynamics of the flow field where particles and bubbles are located. Secondly, the hydration film between the hydrophobic particles and the bubbles becomes thin and breaks, and a three-phase contact periphery begins to form and reaches a stable state, that is, the particles adhere to the surface of the bubbles and form particle–bubble aggregates (Safari and Deglon, 2020). Finally, when the external force exerted on the particles is greater than the force between the particles and the bubbles, the particles will break away

from the surfaces of the bubbles. When the external force is less than the force between the particles and the bubbles, the particles will be successfully recovered by flotation (Gautam and Jameson, 2019). It is worth noting that the particle–bubble adhesion process is relatively complex. As the particles approach the bubbles, a hydration layer forms between the water dipoles and between the water molecules and the particle surfaces. Due to the extrusion of bubbles, the hydration layer becomes thinner. An energy barrier forms as the hydration layer thins, and only when the energy barrier is crossed will the hydration layer break. In order to induce collision contact between particles and bubbles, an external environment is needed to perform the task of rapidly breaking the hydration layer. Subsequently, particles and bubbles begin to come together spontaneously, and as the contact surface gradually increases, particles adhere stably to the surfaces of the bubbles (Yoon et al. 2016). When the bubbles begin to come close to the surfaces of different hydrophobic particles, the energy changes.

The size range of the mineral in the flotation process must be about 20–150 μm to achieve a satisfactory flotation effect. Generally, the optimum flotation size range is affected by factors such as flotation unit type (Mesa and Brito-Parada, 2016), bubble size, froth stability/thickness (Bournival et al. 2017), particle size (Han et al. 2023; Safari et al. 2020), reagent, turbulence intensity, etc. In this technique, components such as particles, oil droplets, contaminants, etc. are separated from the mixture based on their hydrophilic or hydrophobic surface properties.

In general, ultrasonic treatment involves the use of acoustic energy to treat solutions, suspensions, and solid materials in liquids (Suslick et al. 1990). In terms of mineral flotation, ultrasonic treatment under appropriate conditions can improve flotation efficiency. A large number of studies have shown that under the action of strong cavitation and fluidization, the

incorporation of ultrasonic treatment can significantly improve the process efficiency with a shorter treatment time, lower energy consumption, and lower reagent consumption (Mason, 2016). Most of the mechanical effects of ultrasonic treatment contribute to emulsification, cleaning, dispersion, and fragmentation. The adsorption of the flotation collector and the floatability of minerals can be changed through the cleaning and cracking effect of ultrasonic treatment on a mineral surface (Feng and Aldrich, 2007).

The application of ultrasonic treatment in coal processing has been a hot research field for decades. The principle of ultrasonic technology applied to flotation is mainly based on the cavitation effect and acoustic radiation effect of liquid in ultrasonic treatment. In the process of acoustic cavitation, ultrasonic activation destroys the attractive forces of molecules in the solution, so the aqueous medium undergoes alternating cycles of thinning and compression under the influence of ultrasonic vibration, as shown in Figure 3 (Barma, 2019).

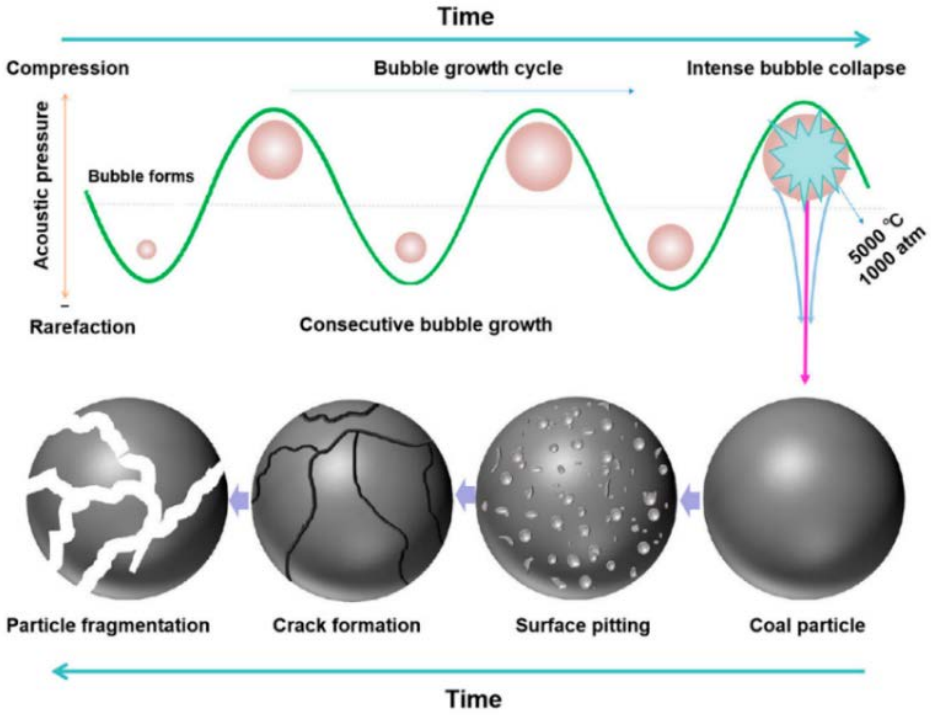


Figure 3. Ultrasonic mechanism of coal processing (Barma, 2019)

When the energy of the sound field reaches the cavitation threshold, the cavitation bubbles will close and collapse (Chen et al. 2020). Ultrasonic cavitation can cause basic effects such as a thermal effect, mechanical effect, and chemical effect. In another study (Zhang et al. 2024), it was stated that the possible effects of ultrasound flotation mainly include the transient cavitation effect, stable cavitation effect, and acoustic radiative force effect. Cavitation and acoustic radiative force are two common effects present in water during ultrasonic treatment, as shown in Figure 4.

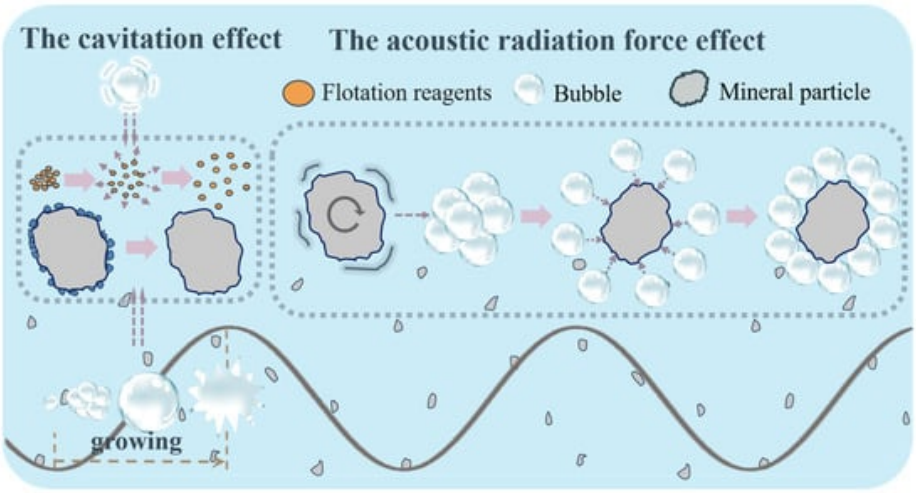


Figure 4. Schematic diagram of cavitation effect and acoustic radiation effect (Zhang et al, 2024)

Transient cavitation requires high sound intensity (greater than 10 W/cm^2) to trigger and undergo a rapid growth and violent collapse process, resulting in the formation of so-called hot spots: local high temperatures and pressures. It has a strong impact and peeling effect on the impurities on the mineral surface and can dissolve some components on the mineral surface. Stable cavitation occurs at low sound intensity, and the bubbles produce stable small-amplitude pulsations, improving the collision efficiency with fine particles, helping to remove soluble impurities from the mineral surface, and dispersing and emulsifying the flotation agent (Zhang et al. 2024).

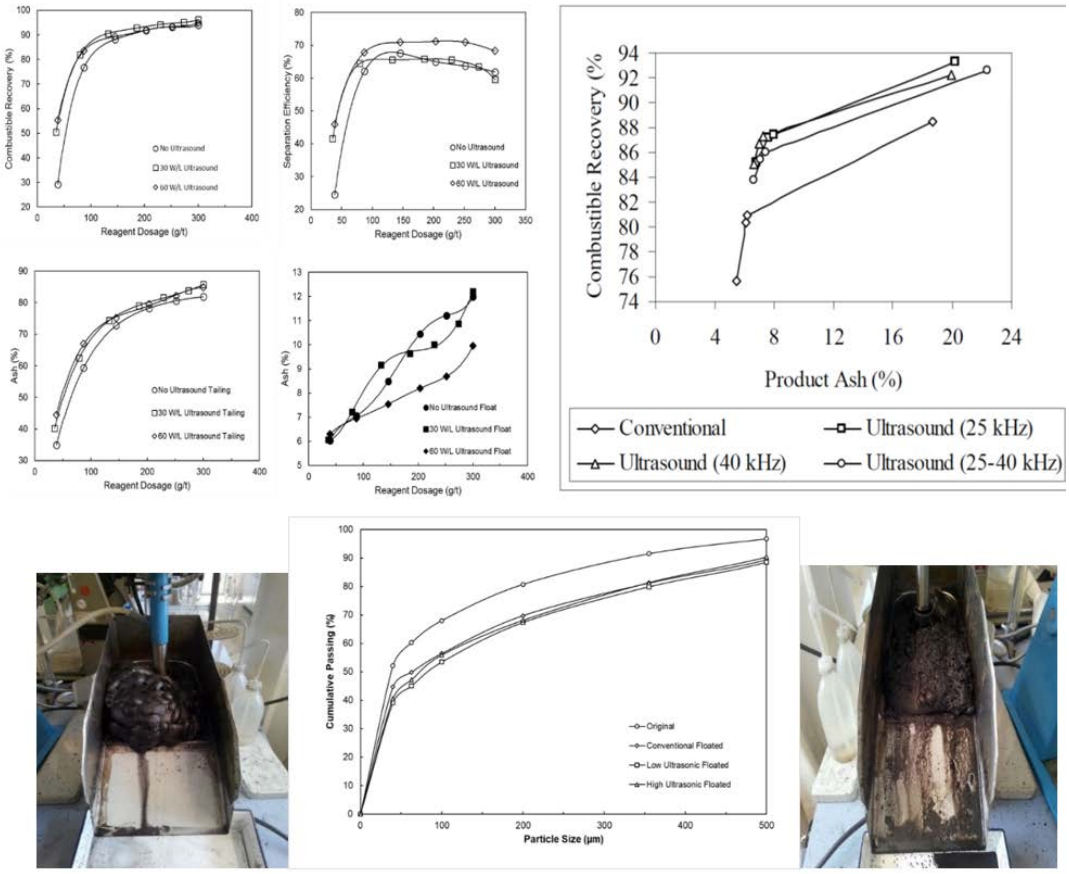
2. EXPERIMENTAL STUDIES

2.1. Coking Coal Flotation

It was determined that the ultrasonic process applied simultaneously with a newly designed sub-aeration type flotation machine, cell and a combined equipment consisting of an ultrasonic cleaning bath operating at different powers at a single frequency, greatly reduced the optimum reagent dosage from 150 g/t to 80 g/t due to physical surface cleaning and thus provided full contact between the collector-frother and coal particles. Considering that the combustable recovery for coking coal under conventional flotation conditions currently applied to the Bottrop coal mine in Germany is approximately 60-65%, it has been demonstrated that with the newly designed equipment, a combustable recovery of over 90% and a separation efficiency of over 70% can be achieved with the optimum reagent dosage. Although it was determined that the quality of the floated coal was not greatly affected by the use of ultrasound, the remaining part of the residue did not contain coal particles and it was concluded that the simultaneous use of ultrasound positively affected the recovery of very finely sized coking coal. Figure 5 shows the effects of ultrasound applied in the flotation of very finely sized coking coal on product quality, combustible recovery, separation efficiency and particle size distribution.

It was also observed that the particle size distribution was definitely affected by the simultaneous ultrasonic treatment, and it was reported that the numerical average particle size value (d_{50}) was around 40 microns, while this value increased to around 60 microns during conventional flotation and to 70 and 80 microns after low and high power ultrasonic treatment, respectively. These results were interpreted as the positive effects of the simultaneous ultrasonic treatment were mainly due to the physical cleaning

of the clays that formed very fine ash from the coal surfaces due to cavitation forces. It was also interestingly noted that although it was expected that ultrasound could cause particle size reduction with increasing power levels, the application of simultaneous ultrasonic treatment and increasing the power density from 30 W/L to 60 W/L could cause agglomeration of coal particles in the froths (Özkan, 2017).



Froth structure without ultrasound Froth structure with ultrasound

Figure 5. Effects of ultrasound on froth flotation of a coking coal (Özkan, 2017)

2.2. Spent Battery Materials (Graphite and Blackmass) Flotation

Li Ion Batteries (LiBs) with the unique features of excellent energy density, high charging efficiency, and reasonable cycle performance, are widely applied in electronic devices including electrical vehicles, laptops, mobile

phones, power banks, watches, and lawnmowers etc. Sharp development of advanced technologies has led to a massive increase in using LiBs and consequently resulted in an increasing amount of spent LiBs reaching end-of-life. Since these batteries contain precious metals such as Li, Co, Cu, Mn, and Ni, their recyclability and recoverability of these metallic elements are extremely crucial from economic and environmental perspectives (Nazari et al. 2024).

The spent LiBs are composed of the anode, cathode, electrolyte, separator, and shell (Table 2). Cathodes are mainly composed of aluminum foil and cathode materials, i.e. $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$, and $LiFePO_4$, as well as other lithium metal oxides while anode contains copper foil and graphite. Cathodes containing high-value metal materials are the most attractive components of the spent LiBs. Therefore, it is a significant process for disposal of spent LiBs from the viewpoint of recourse recycling and environmental protection. In the context of LiBs recycling, froth flotation can be used to separate valuable cathode materials (such as LCO, NMC, NCMA, and LMO) from other cathode materials, as well as to separate graphite from other anode materials.

In a recent study (Vanderbruggen et al. 2022) froth flotation has been proposed to treat the fine fraction of black mass (<100 microns) as a method to separate anodic graphite particles from cathodic lithium metal oxides (LMOs). So far, pyrolysis has been considered as an effective treatment to remove organic binders in the black mass in preparation for flotation separation. In their work, the flotation performance of a pyrolyzed black mass obtained from an industrial recycling plant was improved by adding a pre-treatment step consisting of mechanical attrition with and without kerosene addition. The LMO recovery in the underflow product increased from 70% to 85% and the graphite recovery remained similar, around 86%

recovery in the overflow product. To understand the flotation behaviour, the spent black mass from pyrolyzed LIBs was compared to a model black mass, comprising fully liberated LMOs and graphite particles.

Table 2. Material recovery and resource conservation through froth flotation in LiBs recycling (Nazari et al. 2024)

Component	Materials	Froth flotation	Significance
Cathode	Lithium cobalt oxide (LCO), lithium nickel-manganese-cobalt oxide (NMC), lithium iron phosphate (LFP), lithium nickel-cobalt-aluminum oxide (NCMA), lithium manganese oxide (LMO) [Active material and polymer binder, which are loaded on an aluminum foil, Active material includes lithium transition metal oxides ($LiCoO_2$, $LiNiO_2$, $LiMn_2O_4$, $LiNi_xCo_yMn_zO_2$ (LNCM)), phosphates, silicates, borates and sulfates]	Can be used to separate valuable metals such as cobalt, nickel, and lithium from other cathode materials	Valuable cathode materials can be recovered and reused, reducing the need for mining and processing new materials, and conserving resources.
Anode	Graphite, silicon [Active material and polymer binder, which are coated on a copper foil, Graphite is basically used as the anode material for commercial LiBs, while the binder is typically polyvinylidene fluoride (PVDF)]	Can be used to Separate graphite from other anode materials	Graphite can be recovered and reused, reducing the need for mining and processing new materials, and conserving resources.
Electrolyte	Lithium salt dissolved in a Solvent [Organic solutions, such as lithium hexafluorophosphate ($LiPF_6$), diethyl carbonate (DEC), ethylene carbonate (EC), dimethyl carbonate (DMC), and methyl ethyl carbonate (EMC)]	Can be used to separate the electrolyte from other battery components	The electrolyte can be treated and reused, reducing the need for disposing of waste electrolyte, and protecting the environment.
Separator	Polymer film	Can be used to separate the separator from other battery components	The separator can be recycled into new products, such as plastic bags and films, reducing waste and conserving resources.

Vanderbruggen et al. (2022) and Salces et al. (2022) previously described that a mixture of spent LIBs from portable electronic devices such as laptops and power tools with $Li[Ni_{1-x-y}Mn_xCo_y]\ O_2$ (NMC) as cathode active material was vacuum pyrolyzed (500°C–600°C) and crushed. The resulting black mass was sieved to separate the differently sized fractions. The fraction below 100 μm was used as a flotation feed. The sieved particles were dispersed in tap water with a solid ratio of 50% (wt/wt) and subjected to a 10 min stirring at 16,000 rpm using an Ultra Turrax high shear mixer (IKA, dispersing tool: S25N-25F). This pretreatment, referred to attrition, refreshes the particle surfaces by removing part of the residual binder and increases the wetting and dispersion of the particles in the slurry.

For the current experimental work, natural spheroidized graphite from ProGraphite GmbH (Product No. 1112–1) and the NMC type black mass, $LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$ (NMC-111) from MSE supplies (Product No. PO0126) were used as representative feed samples. The present froth flotation tests were conducted using OUTOTEC GTK mechanically agitated laboratory flotation machine with a 2 L capacity, an impeller speed of 1200 rpm, and an airflow rate of 3.5-4 L/min. The collector for graphite was Ekofol+Diesel mixture at a concentration of 100 g/t, conditioned for 2 min, as the frother was methyl isobutyl carbinol (MIBC) supplied by Alfa Aesar (99%, Product No. A13435 at a concentration of 100 g/t, conditioned for 2 min. For the NMC type black mass flotation, the collector was preferred as the Escaid™ 110 from ExxonMobil (Hydrocarbon fluid, Product No. 20171206) at a concentration of 350 g/t, while increasing MIBC dosage to 150 g/t as a frother.

Within the light of those recent studies related to graphite and blackmass flotation, the initial investigations in this paper included froth flotation tests on pure graphite and NMC type blackmass samples with and

without ultrasonic treatment. Table 3 and Figure 6 show the experimental flotation conditions, main parameters&remarks against numerical data&carbon recovery curves in cumulative flotation time for comparison.

Table 3. Graphite flotation results

Parameters

Cell, L	2	Reagents	MIBC	Ekofol + diesel
Airflowrate, L/min	3,5	dosage, gpt	100	100
Rotor speed, rpm	1200	volume, microL	18,6	19
Scraping frequency	6 s with 4 s delay	conditioning time	2	2

Date 25.Şub.24
Feed, g 102

Time, s	Samples	Mass, g	Mass recovery, %	Cumulative recovery, %
30	CR1	56,4	56,1%	56,1%
60	CR2	14,2	14,1%	70,2%
120	CR3	13,7	13,6%	83,8%
240	CR4	7,5	7,5%	91,3%
360	CR5	6,4	6,4%	97,6%
	Tails	2,4	2,4%	
		100,6		

Remark:
1. **Practice test**. At the beginning the 2L cell was filled with water. Air was added in the to see the air bubbles. Then MIBC (18.6x2 microL) was added to see the changes in bubble size. The air was close then graphite (1000 g) was directly added to the cell. The slurry was mixed for 2 minutes.
2. Collector (Ekofol + diesel -no emulsion) was added and condition for 3 minutes.
3. Air as was added. **Then collection was done manually as the position of the USonic probe wasn't finalized yet**. The collection was ineffective as the froth on the back section of the cell wasn't easy to scrape.

Date 25.Şub.24
Feed, g 150
Ultrasound as pretreatment

Time, s	Samples	Mass, g	Mass recovery, %	Cumulative recovery, %
30	CR1	73,5	49,6%	49,6%
60	CR2	43	29,0%	78,6%
120	CR3	14,3	9,6%	88,3%
180	CR4	7,5	5,1%	93,3%
480	CR5	7,5	5,1%	98,4%
	Tails	2,4	1,6%	
		148,2		

Remark:
1. Typical order of the flotation was done. Graphite was weighed directly inside the cell. 12500 mL water was added and stirred for 2 minutes. 100 mL emulsion of ekofol+diesel was added and conditioned for 3 minutes. MIBC as added and conditioned for 2 minutes. Air was added and the froth was allowed to build for 30 s. The automatic scrapper was used. 6 concentrates were collected, finally. The mass of CR5 and CR6 were added together.
2. Ultrasound was added during the addition of the collector, for 2 minutes, power between 40-50%.

Date 27.Şub.24
Feed, g 150
No ultrasound

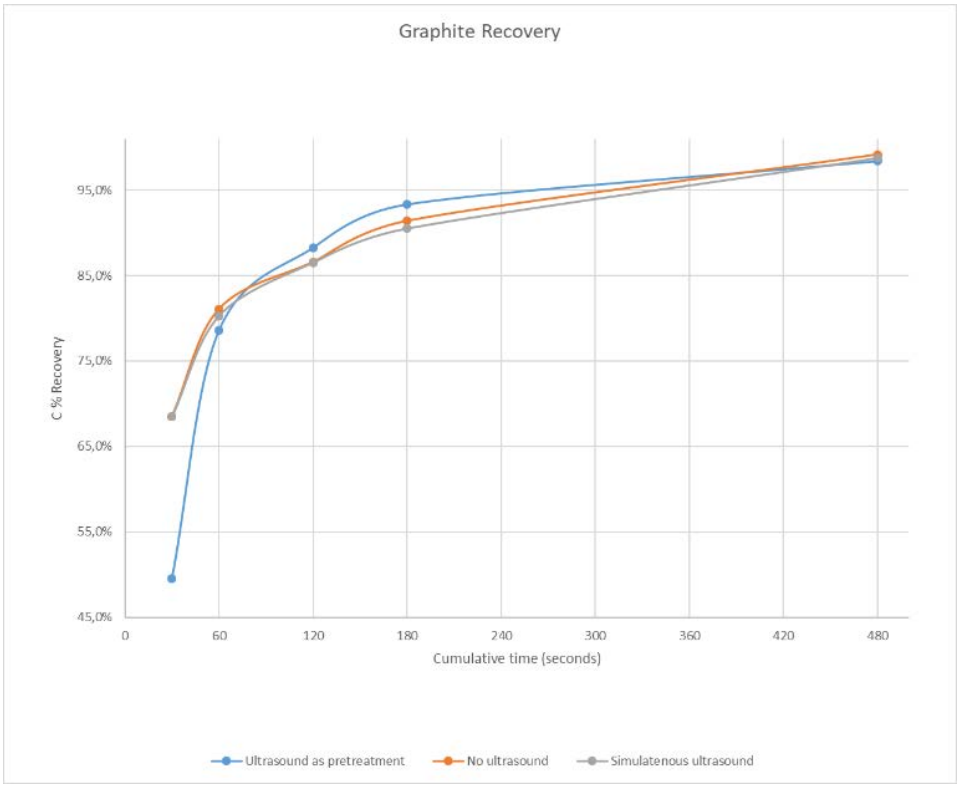
Time, s	Samples	Mass, g	Mass recovery, %	Cumulative recovery, %
30	CR1	102,5	68,5%	68,5%
60	CR2	18,8	12,6%	81,1%
120	CR3	8,2	5,5%	86,6%
180	CR4	7,20	4,8%	91,4%
480	CR5	11,6	7,8%	99,1%
	Tails	1,3	0,9%	
		149,6		

Remark:
1. No pretreatment was done.
2. In this, addition of top up water was more sytematic: i.e., CR1- no water added, CR2 - 300 mL, CR3 - 200 mL, CR4- 100 mL and CR5-100 mL. In this matter, the pulp level is more or less uniform the test US03 and US04.
3. pH, mV, temp start: 5.84, -3 mV, 19.3°C
4. pH, mV, temp end: 7.70, -103 mV, 19.2°C

Date 27.Şub.24
Feed, g 150
Simulatenous ultrasound

Time, s	Samples	Mass, g	Mass recovery, %	
30	CR1	103,2	68,5%	68,5%
60	CR2	17,8	11,8%	80,3%
120	CR3	9,4	6,2%	86,5%
180	CR4	6,00	4,0%	90,5%
480	CR5	12,4	8,2%	98,7%
	Tails	1,9	1,3%	
		150,7		

Remark:
1. Ultrasonic treatment after starting from addition of collector until end of flotation test (total of 13 mins)
2. In this, addition of top up water was more sytematic: i.e., CR1- no water added, CR2 - 300 mL, CR3 - 200 mL, CR4- 100 mL and CR5-100 mL. In this matter, the pulp level is more or less uniform the test US03 and US04.
3. pH, mV, temp start: 5.83, -3 mV, 19.3°C
4. pH, mV, temp end: 7.79, -108 mV, 23.1°C



Conventional Ultrasonically treated

Figure 6. Comparison of flotation results of conventional and ultrasonically treated graphite samples

As seen from Figure 6, the results showed that ultrasound as a pre-treatment or a simultaneous application produced very slight positive differences against conventional flotation. However, there are some interesting froth structure changes, when ultrasound was applied**.**

Further froth flotation experiments with and without ultrasound, similar approaches were performed for the NMC type blackmass samples of which particle size distribution is given in Figure 7.

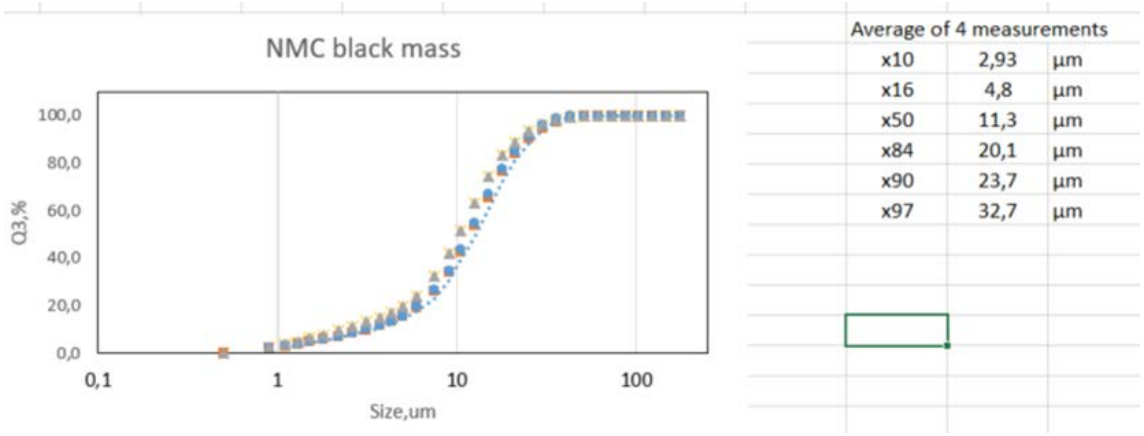


Figure 7. Particle size distribution og the NMC type black mass samples

In Figure 8, comparison of recovery graphs for the flotation of blackmass sample is seen as carbon contents against cumulative times.

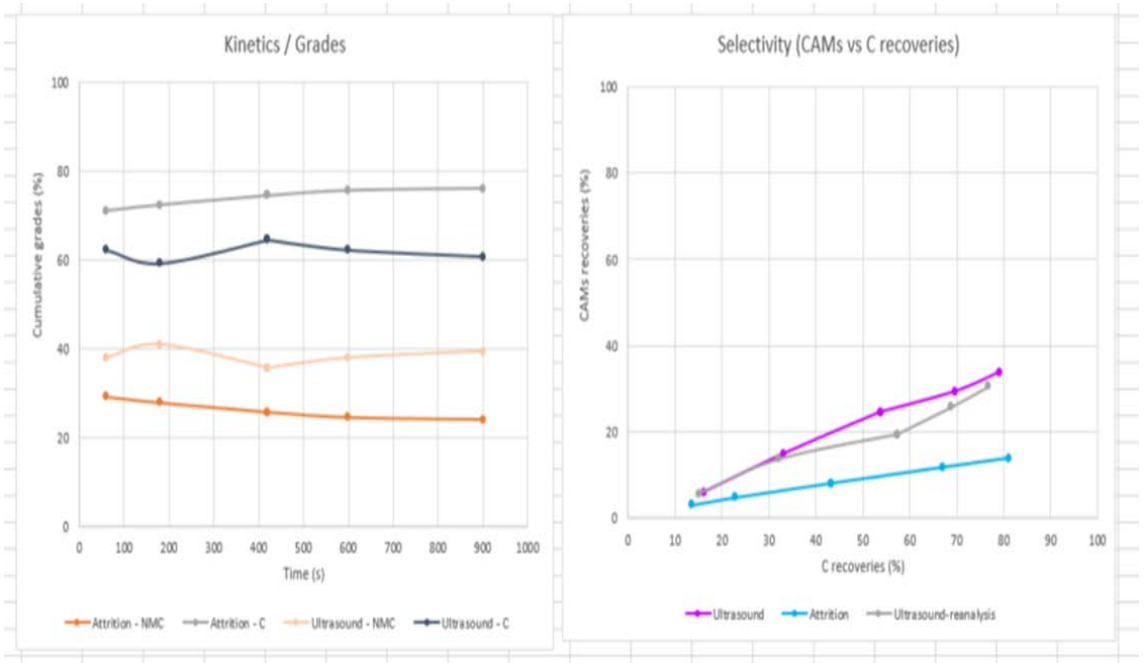


Figure 8. Comparison of flotation results of the NMC type blackmass samples

Figure 8 shows that ultrasound assistance initially produced slightly negative effects for blackmass flotation and unsatisfactory carbon recoveries when compared with conventional mechanical attrition under current conditions, although froth structure was similar to graphite flotation.

3. CONCLUSION

This paper outlines practical observations, outcomes and benefits for basic froth flotation research, especially use of ultrasound before and/or during the process for enhanced recovery of some of the critical raw materials, such as coking coal, graphite and spent blackmass.

According to previous knowledge and present experimental results, conditioning and aeration, therefore total flotation times are certainly shortened. The froth or air bubble sizes are uniformly distributed inside the flotation cell and tend to become finer during ultrasonic flotation tests. Reagent consumption drastically decreases by use of ultrasound due to surface cleaning of solid particles which may be due to thorough contact between collector-frother and mineral particles (Özkan, 2017).

As a result of the current research studies which are still continuing for various other samples, following effect mechanism (Figure 9) can be suggested for explanation when ultrasound is applied before and during froth flotation process for recovery of fine and ultrafine sized minerals, tailings or wastes.

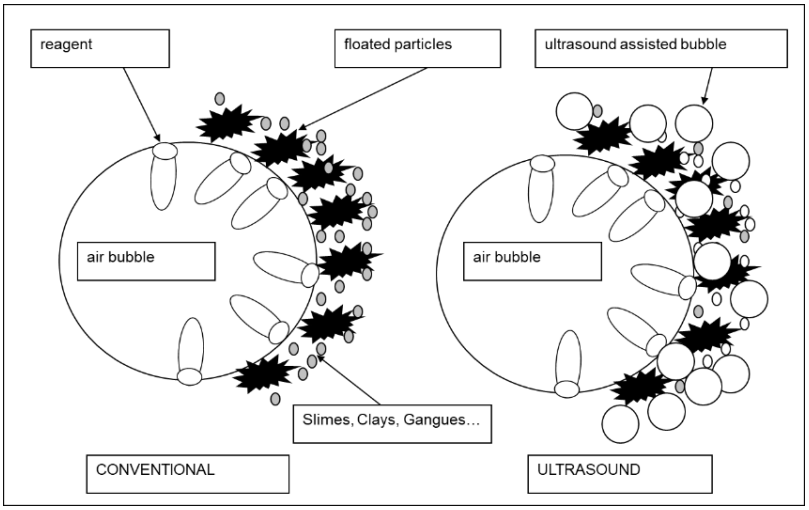


Figure 9. Suggested effect mechanism of ultrasonically assisted froth flotation (Özkan, 2012; 2017)

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Tübitak-Bideb 2219 Postdoctoral fellowship program. I would like to thank the authorities of the Tübitak and the Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology (HIF)-HZDR, especially Dr. Martin Rudolph and other colleagues in the FWGP research group.

REFERENCES

Ahmed, N., & Jameson, G. J., 1985. The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles. Int. J. Miner. Process. 14(3), 195–215.

Barma, S. D., 2019, Ultrasonic-assisted coal beneficiation: A review. Ultrason. Sonochem. 50, 15–35.

Barma, S. D., Tej, S. S. P., Ramya, B., & Sathish, R., 2019. Ultrasound-promoter pretreatment for enhancing the yield and combustible matter recovery of high-ash oxidized coal flotation. Energ. Fuel, 33, 8165–8175.

Bournival, G., Ata, S., & Jameson, G. J., 2017. Bubble and froth stabilizing agents in froth flotation. Min. Proc. Ext. Met. Rev. 38, 366–387.

Chen, Y., Truong, V. N. T., Bu, X., & Xie, G., 2020. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. Ultrason. Sonochem. 60, 104739.

European Union, 2023. Study on the Critical Raw Materials for the EU, 152 p. ISBN 978-92-68-0414-2.

Feng, D., & Aldrich, C., 2007. Effect of preconditioning on the flotation of coal. Chem. Eng. Commun. 192, 972–983.

Filippov, L. O., Royer, J. J., & Filippova, I. V., 2017. Improvement of ore recovery efficiency in a flotation column cell using ultra-sonic enhanced bubbles. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 879, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.

Filippov, L. O., Filippova, I. V., Barres, O., Lyubimova, T. P., & Fattalov, O. O., 2021. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment. Miner. Eng., 171, 107092.

Forbes, L., 2024. Flotation fudamentals and practice, Seminar presentation, JKRMC, The University of Queensland, Brisbane.

Gautam, S., & Jameson, G. J., 2019. The detachment of particles from bubbles at various locations in a turbulent flotation cell. Miner. Eng.132, 316–325.

Gontijo, C. D. F., Fornasiero, D., & Ralston, J., 2007. The limits of fine and coarse particle flotation. Can. J. Chem. Eng. 85 (5), 739–747.

Gungoren, C., Özkan, S. G., & Ozdemir, O., 2024. Use of Ultrasound in Physical and Chemical Mineral Processing Operations. In Advances in Minerals Research (pp. 25-54). Cham: Springer Nature Switzerland.

Gungoren, C., Baktarhan, Y., Demir, I., & Özkan, S. G., 2020. Enhancement of galena-potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 30, 1102–1110.

Gungoren, C., Ozdemir, O., Wang, X., Özkan, S. G., & Miller, J. D., 2019. Effect of ultrasound on bubble-particle interaction in quartz-amine flotation system. Ultrason. Sonochem., 52, 446–454.

Han, J., Li, Y., & Chen, P., 2023. A study of bubble size/shape evolution in microbubble countercurrent contacting flotation colum. Asia-Pac. J. Chem. Eng. 18, 2865.

Hassani, F., Noaparast, M., & Tonkaboni, S. Z. S., 2019. A study on the effect of ultrasound irradiation as pretreatment method on flotation of sedimentary phosphate rock with carbonate-silicate gangue. Iran. J. Sci. Technol. Trans. A Sci., 43, 2787–2798.

Hudson-Edwards, K. A., Jamieson, H. E., & Lottermoser, B. G., 2011. Mine wastes: past, present, future. Elements 7, 375–380.

Jameson, G. J., 2010. New directions in flotation machine design. Miner. Eng., 23(11), 835–841.

Kinnaird, J., & Nex, P., 2024. Critical raw materials, a global perspective. The 19th Freiberg Short Course in Economical Geology. 9-13 Dec. Freiberg

Kohmuench, J. N., Mankosa, M. J., Thanasekaran, H., & Hobert, A., 2018. Improving coarse particle flotation using the HydroFloat™ (raising the trunk of the elephant curve). Miner. Eng. 121, 137–145.

Lottermoser, B. G., 2010. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, third ed. Springer, Berlin, Heidelberg.

Mason, T. J., 2016. Ultrasonic cleaning: An historical perspective. Ultrason. Sonochem. 29, 519–523.

Mesa, D., & Brito-Parada, P. R., 2019. Scale-up in froth flotation: A state-of-the-art review. Sep. Purif. Technol. 210, 950–962.

Miettinen, T., Ralston, J., & Fornasiero, D., 2010. The limits of fine particle flotation. Miner. Eng. 23 (5), 420–437.

Nazari, S., Vakylabad, A. B., Asgari, K., Li, J., Khoshdast, H., He, Y., & Hassanzadeh, A., 2024. Bubbles to batteries: A review of froth flotation for sustainably recycling spent lithium-ion batteries. Journal of Energy Storage, 84, 110702.

Ng, W. S., Connal, L. A., Forbes, E., Mohanarangam, K., & Franks, G. V., 2017. In situ investigation of aggregate sizes formed using thermo-responsive polymers: effect of temperature and shear. J. Colloid Interface Sci. 494 (Suppl. C), 139–152.

Özkan, S. G., 2017. Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation. Minerals, 177.

Özkan, S. G., 2012. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. Fuel, 93, 576–580.

Özkan, G., & Kuyumcu, H. Z., 2007. Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation. Ultrason. Sonochem., 14, 639–645.

Özkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z., 2006. Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. Int. J. Miner Process., 81, 201–203.

Piatak, N. M., 2018. Chapter 19 – environmental characteristics and utilization potential of metallurgical slag. In: De Vivo, B., Belkin, H.E., Lima, A. (Eds.), Environmental Geochemistry, second ed. Elsevier, pp. 487–519.

Polat, M., Polat, H., & Chander, S., 2003. Physical and chemical interactions in coal flotation. International Journal of Mineral Processing, 72(1-4), 199-213.

Safari, M., & Deglon, D., 2020. Evaluation of an attachment–detachment kinetic model for flotation. Minerals,10, 978.

Salces, A. M., Bremerstein, I., Rudolph, M., & Vanderbruggen, A., 2022. Joint recovery of graphite and lithium metal oxides from spent lithium-ion batteries using froth flotation and investigation on process water re-use. Minerals Engineering, 184, 107670.

Suslick, K. S., Doktycz, S. J., & Flint, E. B., 1990. On the origin of sonoluminescence and sonochemistry. Ultrasonics, 28, 280–290.

Sutherland, K. L., 1948. Physical chemistry of flotation. XI. Kinetics of the flotation process. J. Phys. Colloid Chem. 52 (2), 394–425.

Sygusch, J., & Rudolph, M., 2021. A contribution to wettability and wetting characterisation of ultrafine particles with varying shape and degree of hydrophobization. Applied Surface Science, 566, 150725.

Vanderbruggen, A., Hayagan, N., Bachmann, K., Ferreira, A., Werner, D., Horn, D., Peuker, U., Serna-Guerrero, R., & Rudolph, M., 2022, Lithium-ion battery recycling─ influence of recycling processes on component liberation and flotation separation efficiency. ACS ES&T Engineering, 2(11), 2130-2141.

Vanderbruggen, A., Salces, A., Ferreira, A., Rudolph, M., & Serna-Guerrero, R., 2022. Improving separation efficiency in end-of-life lithium-ion batteries flotation using attrition pre-treatment. Minerals, 12(1), 72.

Vanderbruggen, A., Sygusch, J., Rudolph, M., & Serna-Guerrero, R., 2021. A contribution to understanding the flotation behavior of lithium metal oxides and spheroidized graphite for lithium-ion battery recycling. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 626, 127111.

Whitworth, A. J., Forbes, E., Verster, I., Jokovic, V., Awatey, B., & Parbhakar-Fox, A., 2022. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. Cleaner Engineering and Technology, 100451.

Yang, A., & Wang, L., 2024. A fundamental study of flotation separation of mineral particles using ultrasound-induced bubbles. Minerals Engineering, 207, 108573.

Yigit, E., & Özkan, S. G., 2007. Flotasyon Yontemi ve Uygulamalari (Flotation method and applications), 170 p., Istanbul Universitesi Muhendislik Fakultesi Yayini, Istanbul Universitesi Basimevi, ISBN 978-975-404-784-4.

Yoon, R., Soni, G., Huang, K., Park, S., & Pan, L., 2016. Development of a turbulent flotation model from first principles and its validation. Int. J. Miner. Process. 156, 43-51.

Zhang, H., Du, M., Hu, H., Zhang, H., & Song, N., 2024. A Review of Ultrasonic Treatment in Mineral Flotation: Mechanism and Recent Development. Molecules, 29(9), 1984.

Zhang, H., Hou, X., Xu, S., Li, Z., Yu, H., & Shen, X., 2013. Enhanced desulfurizing flotation of coal using sonoelectrochemical method. Ultrason. Sonochem., 20, 1176–1181.

Zhang, H. X., Bai, H. J., Dong, X. S., & Wang, Z. Z., 2012. Enhanced desulfurizing flotation of different size fractions of high sulfur coal using sonoelectrochemical method. Fuel Process Technol., 97, 9–14.

Zhang, W., 2016. The effects of frothers and particles on the characteristics of pulp and froth properties in flotation—a critical review. J. Miner. Mater. Char. Eng. 4, 251–269.

Zhang, X., Cheng, H., Xu, K., Ding, D., Wang, X., Wang, B., & Ma, Z., 2024. Ultrasonic Enhancement for Mineral Flotation: Technology, Device, and Engineering Applications. Minerals, 14(10), 986.

BAKIR İÇERİĞİ YÜKSEK ALTIN CEVHERLERİ: SORUNLAR VE SEÇENEKLER

COPPER-RICH GOLD ORES: PROBLEMS AND OPTIONS

Hacı Deveci
Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Müh. Bölümü, Cevher-Kömür Hazırlama ve Değerlendirme ABD, Hydromet BP&M Araştırma Grubu, 61080, Trabzon

ÖZ: Cevherlerden altın/gümüş kazanımında kullanılan en yaygın yöntem siyanür liçi yöntemidir. Ancak, siyanür liçi seçimli bir yöntem değildir. Cevherde bulunan bazı metalik mineraller de siyanür liçi koşullarında çözünerek, altın kazanımında teknik ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Özellikle oksitli ve sülfürlü bakır minerallerinin çoğunun siyanür ortamında çözünürlüğü yüksektir. Bu nedenle bakır içeriği yüksek altın cevherlerinin siyanür liçinde ve liç sonrası saflaştırma ve metal kazanımı işlemlerinde önemli zorluklarla karşılaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamda ilk bölümde bakır minerallerinin altın kazanım süreçlerine, siyanürlü atıkların yönetimine ve nihai ürünün saflığına olumsuz etkileri bilimsel ve teknik açıdan detaylıca irdelenmiştir. İkinci bölümde ise bakır içeriği yüksek altın cevherlerinin değerlendirilmesine yönelik ön hazırlık, liç, saflaştırma, metal kazanımı ve siyanürlü atıkların yönetimi aşamaları için var olan uygulamalar ve olası çözümler/seçenekler sunulmuştur. Bu uygulama ve seçenekler arasında flotasyon veya ön liç işlemleri ile bakırın uzaklaştırılması, yoğun siyanür liçi, siyanüre dışında kullanılabilecek seçimli reaktif sistemleri ile altının yüksek verimle liçi, yüklü liç çözeltilerinden altının seçimli olarak kazanımı ve liç atıklarından siyanürün geri kazanımı gibi tümleşik hidrometalurjik süreçler bulunmaktadır. Sonuç olarak, bakır içeriği yüksek altın cevherlerinin ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesi için kapsamlı bir yaklaşım ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi gerekir. Bu bildiri ile sektördeki araştırmacılar, mühendisler ve işletmeciler için bakır kaynaklı bu zorlukların üstesinden gelmeye yönelik bir yol haritası sunulması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Altın, Bakır İçeriği Yüksek Altın Cevherleri, Bakır, Siyanür Liçi, Adsorpsiyon, Siyanür Geri Kazanımı

ABSTRACT: *Cyanide leaching represents the most prevalent leaching process employed for the recovery of gold and silver from their respective*

ores. However, the non-selective nature of cyanide leaching leads to the dissolution of certain other minerals present in the ore, thereby engendering technical and economic challenges in gold extraction. In particular, the high solubility of numerous oxide and sulphide copper minerals in cyanide media poses significant difficulties in the cyanide leaching of copper-rich gold ores and downstream processing stages. In the first part, this presentation provides a detailed scientific and technical analysis of the adverse impacts of copper minerals on gold recovery processes, the management of cyanide-bearing waste, and the purity of the final product. The second part presents existing practices and potential solutions/options for the beneficiation of high-copper content gold ores, encompassing the stages of pre-treatment, leaching, purification, metal recovery, and the management of cyanide-bearing waste. These practices and options include the removal of copper via flotation or pre-leaching processes, intensive cyanide leaching, the high-efficiency leaching of gold using selective non-cyanide reagent systems, the selective recovery of gold from pregnant leach solutions, and integrated hydrometallurgical processes such as the recovery of cyanide from leach tailings. In conclusion, the necessity of a comprehensive approach and the development of innovative technologies for the economically and environmentally sustainable valorisation of high-copper content gold ores is emphasised. This paper aims to provide a roadmap for researchers, engineers, and operators within the sector to overcome these copper-related challenges.

Keywords: *Gold, Copper-Gold Ores, Copper, Cyanide Leaching, Adsorption, Cyanide Recovery*

AÇIK VE YERALTI METAL MADEN İŞLETMELERİNDE DELME–PATLATMA UYGULAMALARI

DRILLING AND BLASTING PRACTICES IN OPEN–PIT AND UNDERGROUND METAL MINING OPERATIONS

Ahmet Mahmut Kılıç
Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

ÖZ: Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamaları büyük bir öneme sahiptir. Üretimin en önemli aşamalarından bir tanesi de delme–patlatma aşamasıdır. Delme–patlatma aşamasında uygulanan yöntemin verimli bir şekilde seçilmesi ve uygulanması çok önemli olmaktadır. Bu bağlamda delme–patlatmada etkili olan patlatma parametrelerinin etkin seçilmesi, uygulanması ve uygulama sırasında doğru işlerin yapılması ilerleyen süreçteki üretimi ve metal maden işletmesinin ekonomik verimliliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle metal maden işletmelerinde delme–patlatma yöntemlerinin tüm etkili parametreler dikkate alınarak tasarlanması ve doğru bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Bütün bunların yanı sıra delme–patlatma uygulamaları yapılırken karşımıza çıkan kaya yapısı, patlatma yüzeylerinin süreksizlik aralığı, kayacın dayanım değerleri vb. gibi kontrol edilemeyen parametreler ile patlatma tasarım parametreleri ile özgül şarj değerleri sürekli kontrol edilmelidir. Bu veriler ışığında gerekli durumlarda işletme şartlarına da dikkat edilerek değişiklikler yapılmalıdır. Bu bildiri kapsamında, açık ve yeraltı maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamaları ile ilgili bilgiler verilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Açık ve Yeraltı Metal Madeni, Delme–Patlatma, Patlatma Tasarım Parametreleri, Özgül Şarj Değerleri

ABSTRACT: *Drilling and blasting operations hold significant importance in open–pit and underground metal mining. The drilling and blasting stage constitutes one of the most critical phases of production. The efficient selection and proper implementation of drilling and blasting methods are crucial during this stage. In this context, the effective determination of blasting parameters, their accurate application, and the execution of correct procedures during implementation can directly impact subsequent production stages and the economic efficiency of metal mining operations. Therefore, drilling and blasting methods in metal mines must be designed*

and executed correctly by considering all influential parameters. In addition, during drilling and blasting operations, uncontrollable parameters–such as rock mass structure, discontinuity spacing of blasting surfaces, and strength properties of the rock–must be continuously monitored alongside blasting design parameters and specific charge values. Based on these data, necessary adjustments should be made while adhering to operational conditions when required. This paper provides information and assessments regarding drilling and blasting applications in open–pit and underground mining operations.

Keywords: *Open–Pit and Underground Metal Mining, Drilling and Blasting, Blast Design Parameters, Specific Charge Values*

1. GİRİŞ

Madencilik sektörü, küresel GSYİH'nin yaklaşık %3'ünü oluşturur ve 30 milyondan fazla kişiye istihdam sağlar (World Bank, 2022). Demir, bakır, alüminyum ve nadir toprak elementleri (NTE), otomotivden rüzgâr türbinlerine kadar endüstriyel üretimin omurgasını oluşturur. Örneğin, bir elektrikli araç bataryası 8 kg lityum, 35 kg nikel ve 14 kg kobalt gerektirir (IEA, 2023). Dünyada ve Türkiye'de metal maden işletmeciliği, endüstriyel toplumun temelini oluşturur. Metaller, inşaat, enerji, elektronik, savunma ve yeşil teknolojiler gibi kritik sektörlerde vazgeçilmez bir role sahip olup, günümüzde özellikle küresel ekonomik büyüme, teknolojik ilerleme ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri, metal kaynaklarının stratejik önemini artırmaktadır. Çabuk, doğru, verimli bir şekilde üretilmeleri büyük bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda metal üretiminde önemli aşamalardan bir tanesi olan delme–patlatma yöntemlerin doğru seçimi ve uygulanması bir zorunluluktur.

Madencilik, endüstriyel gelişimin temelini oluşturan ve hammadde arzını sağlayan stratejik bir sektördür. Ancak, cevher çıkarımının ilk

aşamasında karşılaşılan sert kaya kütlelerinin parçalanması, mekanik yöntemlerle çözülemeyen teknik zorluklar içerir. Bu noktada *kontrollü patlatma teknikleri*, hem ekonomik hem de operasyonel açıdan vazgeçilmez bir rol üstlenir.

İnsan, çevre koşulları ve mühendislik yapılarında herhangi bir problem teşkil etmeyen delme–patlatma uygulamalarında patlatma verimi ve maliyet gibi konular üzerine yapılan analizler, özgül şarjın temel iki değiştirge tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Bunlar, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen değiştirgeler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Kontrol edilemeyen temel değiştirge bilindiği gibi kaya malzemesi ve kütlesinin jeolojik ve jeoteknik özellikleridir. Kontrol edilebilen değiştirge ise kaya kütlesine uygun delme ve patlatma yönteminin belirlenmesidir. Uygun delme–patlatma yöntemin belirlenmesinde öncelikle patlatmanın amacı, uygulama alanı çevre şartları ve ilgili kaya, kütlesinin jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin sağlıklı bir şekilde ortaya konması gerekmektedir (Olofsson, 1990; Chakraborty vd., 2004).

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme ve patlatma, madencilik operasyonlarının temelini oluşturan kritik bir süreçtir. Bu yöntem, kayaların kontrollü bir şekilde parçalanmasını sağlayarak cevher çıkarma verimliliğini, güvenliği ve ekonomik sürdürülebilirliği optimize eder.

Delme–patlatmada, delme işlemi, patlayıcıların yerleştirileceği deliklerin açılmasını içerir. Deliklerin derinliği, çapı ve düzeni, patlamanın etkinliğini doğrudan etkiler. Patlatma aşamasında ise doğru patlayıcı seçimi, zamanlama ve enerji kontrolü önemli. Bu parametrelerin optimizasyonu, istenen parça boyutunu sağlar ve aşırı patlamayı önler.

Açık ve yeraltı metal madeni işletmeciliğinde en önemli üretim aşamalarından bir tanesi de, günümüzde üretim yöntemi olarak ta kabul gören delme–patlatma uygulamalarıdır.

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde, kaya ve cevherin kazılabilirliğinin zor, zaman alıcı ve maliyetli olması sebebiyle delme–patlatma yöntemiyle gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bütün bunların yanı sıra açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma, madencilik operasyonlarının temelini oluşturan kritik bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntem ile kayaların kontrollü bir şekilde parçalanmasını sağlanarak cevher çıkarma verimliliği, güvenliği ve ekonomik sürdürülebilirliği artmaktadır.

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamalarının doğru ve amaca uygun bir şekilde yapılması ile;

- Madenlerdeki sert kaya ve cevher yatakları, mekanik ekipmanlarla (kazıcılar, delici makineler) doğrudan kazılamayacak kadar dayanıklıdır. Patlatma, bu kayaları ekonomik ve verimli şekilde parçalayarak işlenebilir boyutlara getirir.
- Patlatma, büyük ölçekli kaya kütlelerini hızla parçalayarak üretim sürecini hızlandırır. Mekanik yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetle daha fazla malzeme çıkarılmasını sağlar.
- Büyük Ölçekli Parçalama: Delme ve patlatma, mekanik kazı yöntemlerine kıyasla daha geniş alanlarda ve sert kaya formasyonlarında hızlı parçalama sağlar. Örneğin, tek bir patlatma ile binlerce ton kayaç işlenebilir.
- Doğru delik dizilimi ve patlayıcı şarjı, cevher zonlarının aşırı parçalanmasını önleyerek değerli mineral kaybını %15–20 oranında azaltabilir.

- Patlatma sonrası elde edilen homojen boyuttaki parçalar, kırıcıların ve taşıma sistemlerinin verimini artırır.
- Patlatma, mekanik kazıya göre daha az enerji ve ekipman bakım maliyeti gerektirir. Örneğin, bir ekskavatörün saatlik maliyeti 200–500 USD iken, patlatma için bu maliyet ton başına 0.5–2 USD aralığında kalır.
- Kontrollü patlatma, atık kaya/cevher ayrımını kolaylaştırarak işleme tesislerine giden malzeme kalitesini artırır.

Bütün bunların yanı sıra, açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamalarında, kontrol edilemeyen parametrelerin bilimsel ve tecrübeye dayalı olarak belirlenmesi, kontrol edilebilir patlatma parametrelerinin bilimsel, uygulamayı yapan teknik personelin bilgi birikimi ve tecrübesi ile belirlenmesi de son derece önemlidir.

Bu bildiri kapsamında, öncellikli olarak, açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatmanı gerekliliği vurgulanmış, bilgiler verilmiş ve genel değerlendirmeler yapılmıştır.

2. AÇIK VE YERALTI METAL MADEN İŞLEMELERDE DELME–PATLATMA

2.1. Açık Metal Maden İşletmelerinde Delme–Patlatma

Açık metal işletme madenciliği, yüzeye yakın cevher yataklarının ekonomik ve hızlı şekilde işlenmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu süreçte patlatma, kaya kütlelerinin parçalanması ve malzeme taşınabilir boyuta getirilmesi için kritik rol oynar. Mekanik mukavemeti, dayanımı ve sertliği yüksek kaya tabakalarının etkin şekilde parçalanması için delme–patlatma yönteminin uygulanması zorunludur.

Açık metal maden işletmelerinde, homojen ve çok miktarda (milyonlarca m^3) dekapaj malzemesi elde edilmesi ve bu kaya yığınının iyi parçalanıp kolay kazılabilecek şekilde ötelenmesi istenir.

Açık metal maden işletmelerinde patlatma uygulamalarında patlatma veriminde etkili olan değişkenler, kontrol edilemeyen, sahanın yapısal özelliklerinden olan, kaya kütlesinin jeolojik ve mekanik özellikleri ile kontrol edilebilen değişkenler, gecikme başına kullanılan patlayıcı madde miktarı, birim hacimde kayacın patlaması için kullanılan patlayıcı madde miktarı (özgül şarj), gecikme zamanı, ateşleme yönü, delik çapı, delik eğimi, delikler arası uzak, dilim kalınlığı, tırnak payı ve patlayıcı madde türleridir.

Patlatma faaliyetleri sırasında delik delme düzeneği; sahadaki ön çalışmalar, topografya ve patlatma sonrası gevşetilmesi parçalanması ve yerinden sökülmesi istenen miktarı dikkate alınarak 1, 2, 3, 4 ve 5 sıralı ve şeş–beş şeklinde yapılması planlanmaktadır.

Açık metal maden işletmelerinde uygulanan basamak patlatmaları için literatürde farklı eşitlikler mevcuttur (Hagan, 1974), Langefors ve Kihlstrom, 1979, Tamrock, 1984, Konya ve Walter, 1990, Olofsson 1997. Bu eşitliklerin çoğu, tasarım hesaplamalarına delik çapı seçimi ile başlar. Genel parametreler, delik çapı (d), delikler arası mesafe (s), şarj (q) ve sıkılma uzunluğu (h_0). Bu parametreler, kaya tipi, işletme koşulları ve hedeflenen kırılma şekline göre ayarlanır. Başlangıçta kullanılan formüller, daha sonra yapılan patlatmaların sonuçlarına göre revize edilerek en uygun tasarım elde edilir.

Açık metal maden işletmeleri patlatmalarında en önemli iki parametre özgül şarj ve dilim kalınlığının belirlenmesidir. Bu parametrelerin uygun değerleri belirlendikten sonra diğer parametreler bunlara bağlı olarak hesaplanabilmekte ve tasarım tamamlanabilmektedir.

Patlatma tasarımında, şev duraylılık (stabilite) analizinin izin verdiği basamak yüksekliği ve delik çapının seçimi ile başlanır, azami yük mesafesi saptandıktan sonra ile diğer parametrelerin hesabı ile devam edilir. Uygulamadan edinilen tecrübeler basamak yüksekliği (K), yük mesafesi (B) ve delik çapı (d) arasında önemli ve hayati oransal ilişkiler bulunduğunu ortaya koymuştur.

Bunlar; "B=25–40 d (yük mesafesi) delik çapı "d" en az "22 Katı", en çok "45 Katı" olmalıdır. İnç birimi cinsinden delik çapı "d" biliniyorsa, yük mesafesi B m cinsinden delik çapı kadar alınır (B, m=d (inç). Yük mesafesi B basamak yüksekliği K'nin 5'te biri ile 2,5'ta biri arasında değişmelidir (B=K/2,5–K/5).

Olofsson esasen Langefors ve Kihlström yaklaşımını kullanmış olup, onların vermiş olduğu temel, ancak biraz karmaşık formülü kolay kullanılır ve basit üç ayrı formül haline getirmiştir. Bu basit formülleri, madende kullanılmak üzere seçilen patlayıcı cinsine ve kudretine (enerjisine) göre bir çarpım katsayısı ile seçilen delik çapında o patlayıcının dolum (şarj) yoğunluğunun (l_b, kg/m) karekökünün çarpımı şeklinde ifade etmiştir.

Azami yük (delik–ayna) mesafesi (B_{maks}) hesabında;

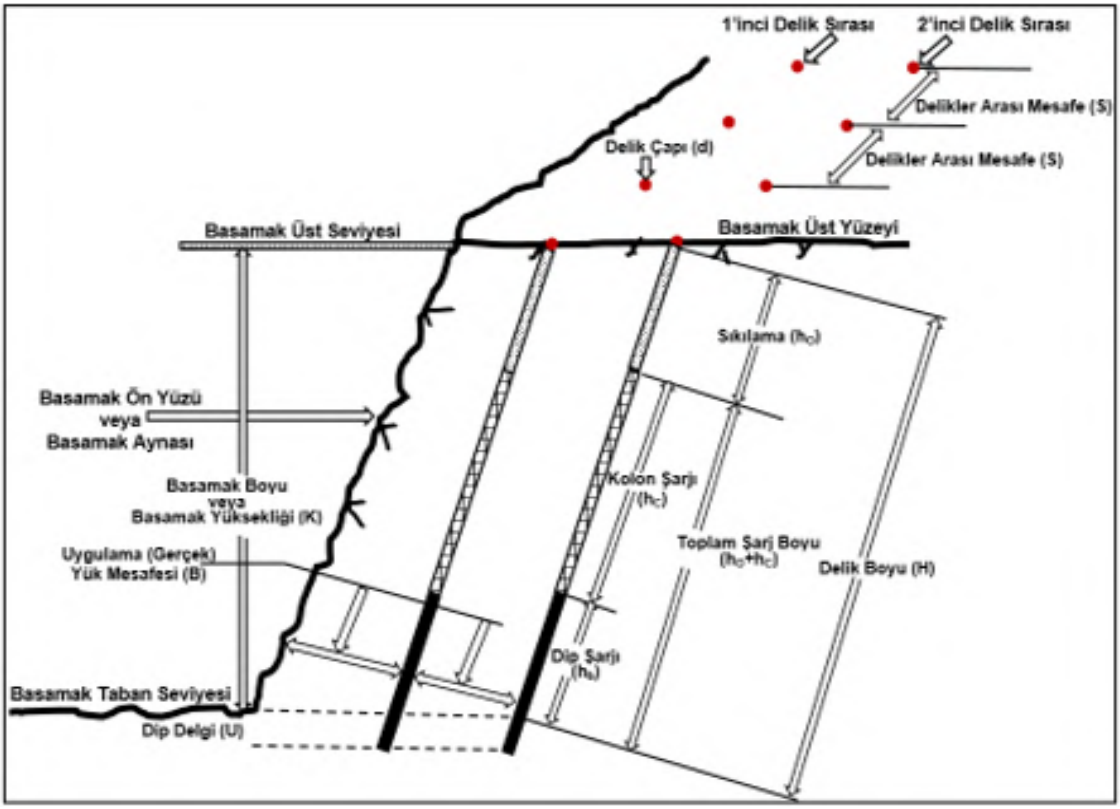
$B_{maks}=1,47\times\sqrt{l_b}$ Dynamex M için,

$B_{maks}=1,45\times\sqrt{l_b}$ Emulite 150 için ve

$B_{maks}=1,36\times\sqrt{l_b}$ AN–FO için kullanılır.

Patlatma tasarımında kullanılacak olan parametreler Şekil 1'de verildiği şekildedir. Şekil 1'de; K= Basamak boyu veya basamak yüksekliği; U= Delik boyu veya delik yüksekliği; h_o= Sıkılama boyu veya sıkılama yüksekliği; h_c= Kolon şarj boyu veya kolon şarj yüksekliği; h_b= Dip şarj boyu

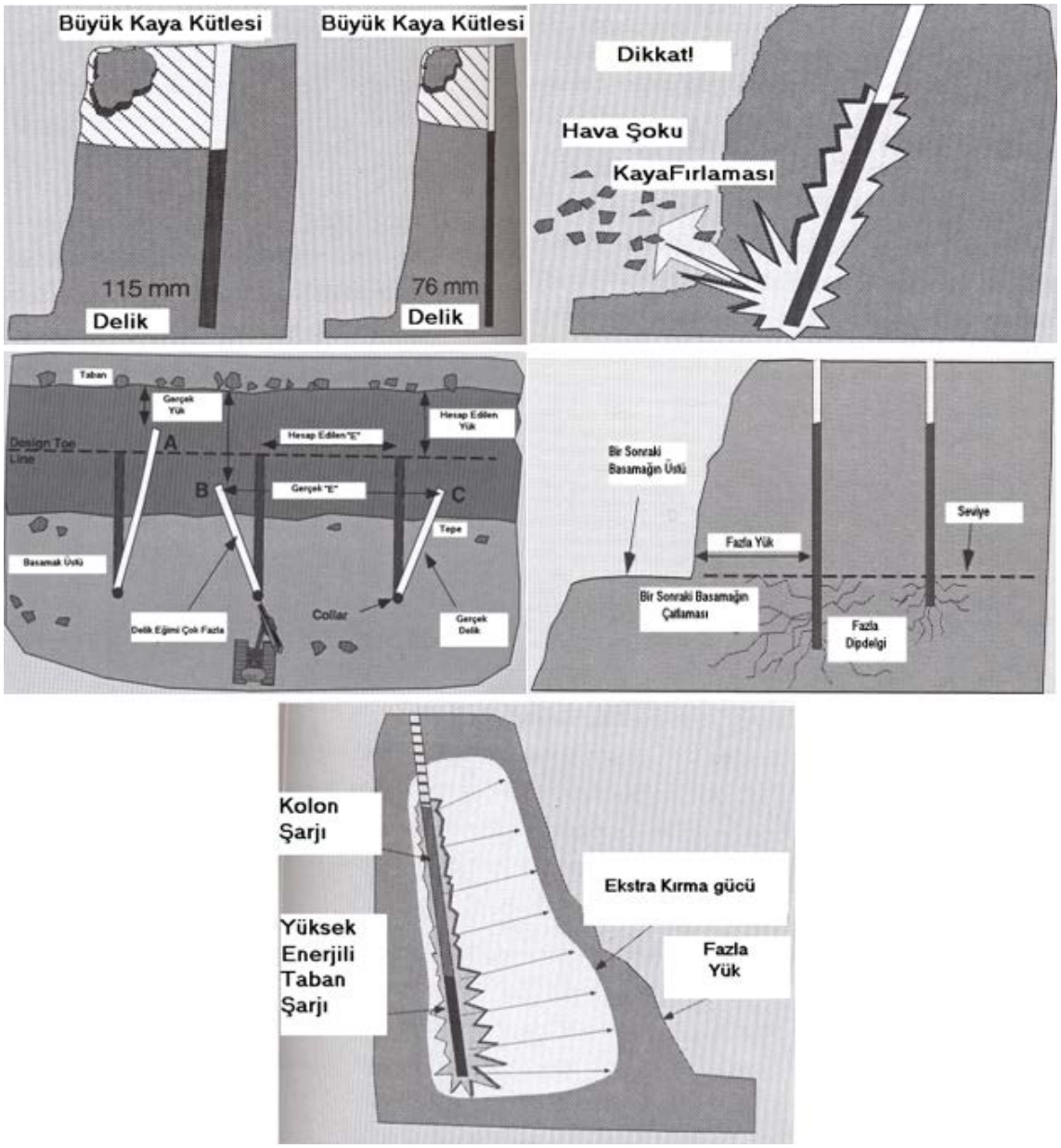
veya dip şarj yüksekliği; d= Delik çapı; B_{maks}: Azami yük mesafesi (tasarım yükü); B= Uygulama (gerçek) yük mesafesi; S= Delikler arası mesafe ve U= Dip delgi olarak ifade edilir.



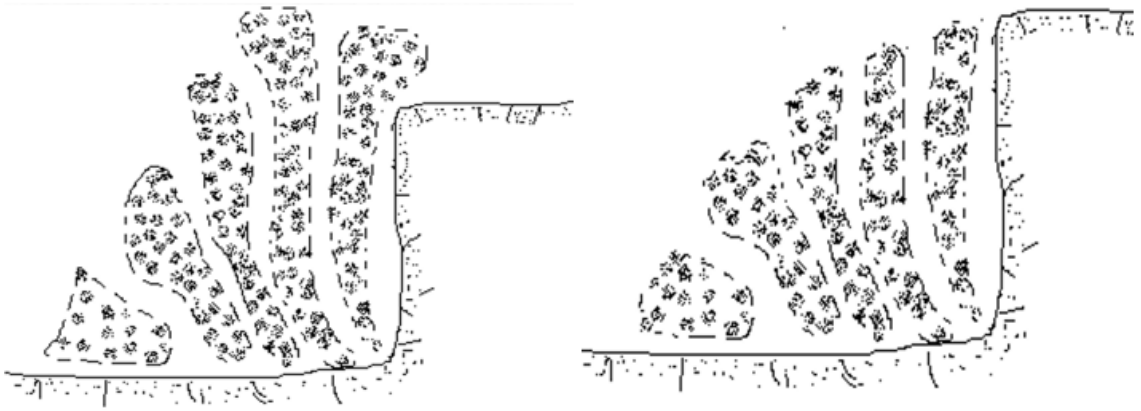
Şekil 1. Patlatma tasarımında kullanılan parametreler

Her işletmede iş makinelerine göre patlatma delik paterni belirlenir. Dolayısıyla büyük hacimlerde kazı yapabilmek için, atım gruplarının (delik sayısı artırılarak) büyütülmesi gerekir. Kayayı daha iyi parçalamak için ise, delikleri daha sık delmek, her deliğe daha fazla patlayıcı madde koymak gibi tedbirler gerekebilir. İyi bir patlatma ile hem kontrollü bir patlatma yapmak hem de istenen düzeyde parçalanması ve amaçlanan miktarda atım kütlesinin kazıya hazırlanması hedeflenmektedir. Bu yüzden patlayıcı ve ateşleyici cinslerinin, patlatma prensiplerinin, tasarım yöntemlerinin bilinmesi ve patlatmaya etki eden birçok parametrenin en uygun şekilde bağdaştırılması gerekir. Böylece en emniyetli ve en ucuz patlatma gerçekleşecektir.

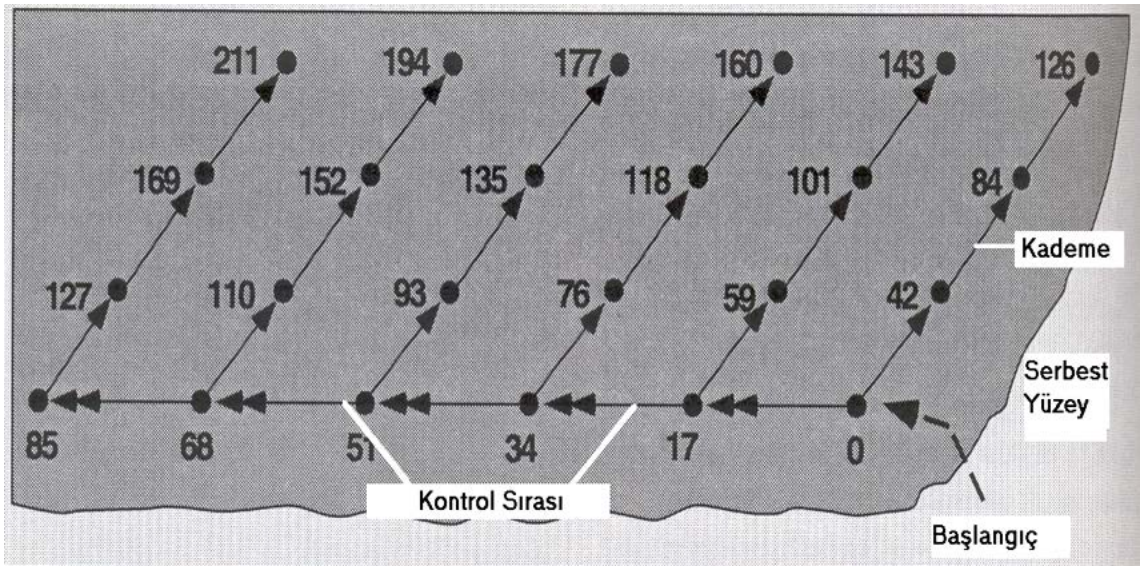
Açık metal maden işletmelerinde patlatma tasarım parametrelerine ihtiyaca bağlı olarak kontrol edilemeyen ve kontrol edilebilen değişkenlere göre karar verilir. Patlatma da iyi sonuç alabilmek için, kayaç özellikleri, patlayıcı madde özellikleri ve patlatma düzeni çok önemlidir. Patlatma uygulamalarında patlatma elemanları ile ilgili bazı durumlar Şekil 2'de, gecikme aralıkları ile ilgili örnekler Şekil 3'de verildiği şekildedir.



Şekil 2. Metal açık işletmelerinde patlatma elemanlarıyla ilgili bazı görünümler



Gecikme Aralığı Kötü Ayarlanmış Gecikme Aralığı İyi Ayarlanmış
Atım Örnekleri



Patlatmada ateşleme uygulama örneği

Şekil 3. Gecikme aralığı kötü ve iyi ayarlanmış patlama ile patlatmada ateşleme uygulama örneği

2.2. Yeraltı Metal Maden İşletmelerinde Delme–Patlatma

Yeraltı metal maden işletmeleri patlatmaları, madencilik endüstrisinde cevher çıkarımının temelini oluşturan kritik bir süreçtir. Bu teknik, kayaların kontrollü bir şekilde parçalanarak mineral veya metal içeren kütlelerin erişilebilir hale getirilmesini sağlar.

Ülkemizde yapılan metal madenciliğinde, cevherleşmenin orta-dik eğimli ve dar damarlı olmasından kaynaklı olarak üretim yöntemi, genellikle

kazı dolgu ve/veya taban/tavan arınlı ara katlı kazı şeklinde uygulanmaktadır (Şimşir, 2015).

Yeraltı patlatılması ile açık işletme patlatmaları arasında ana fark; açık patlatmalarının iki veya daha çok serbest yüzeye doğru yapılırken, yeraltı patlatmanın tek serbest yüzeye doğru yapılıyor olmasıdır. Bu nedenle, yeraltı patlatmalarında tek serbest yüzey ve kısıtlı alan yüzünden daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Patlatma iyi tasarlanmalı, delik düzeni aynada işaretlenmeli, delikler tam istenen yerde ve en az sapma yapacak şekilde delinmelidir.

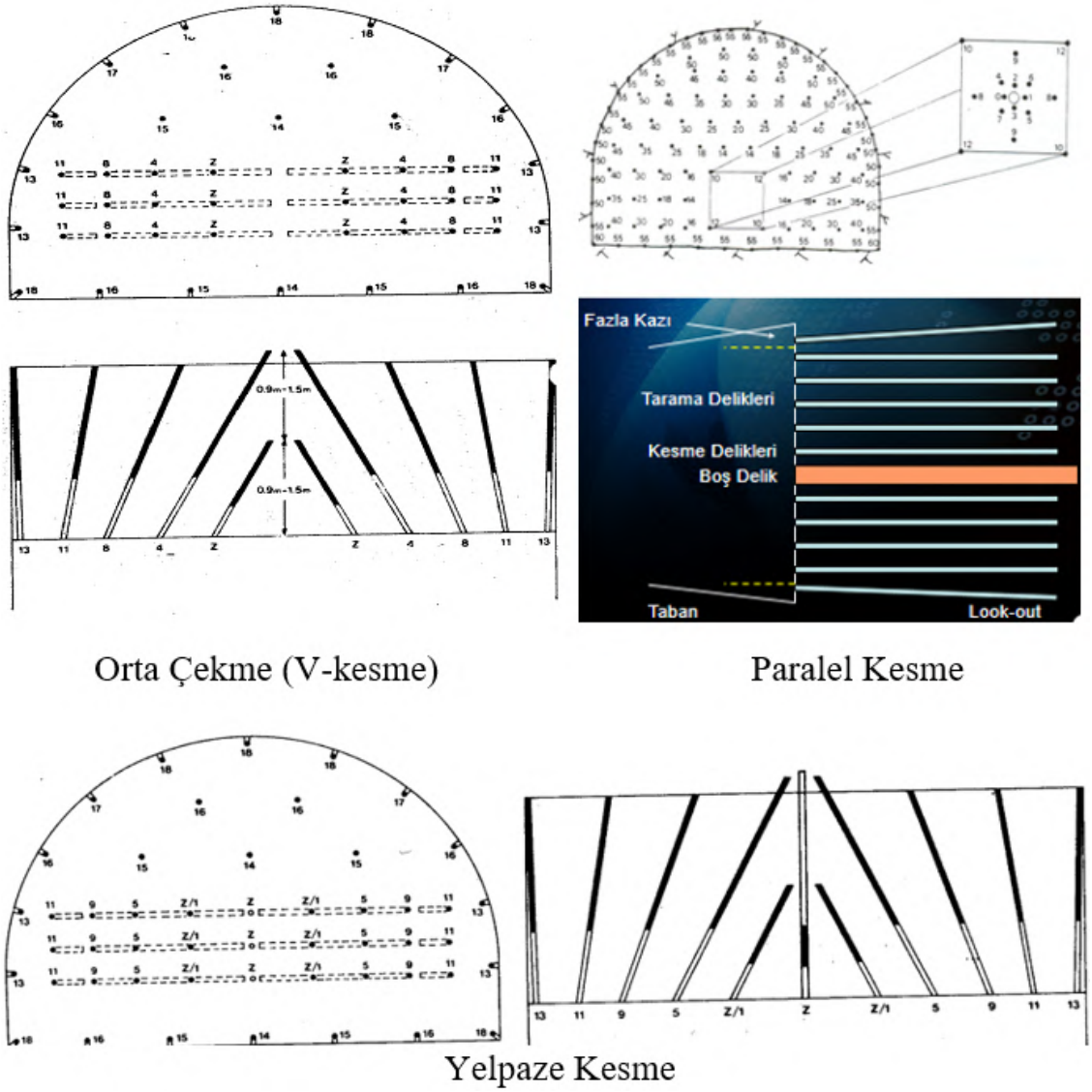
Yeraltı metal madeninde, patlatmaların dar kesitte ve tek serbest yüzeye doğru yapılması nedeniyle kuvvetli ve suya dayanıklı patlayıcılar kullanılır. Açık işletme patlatmalarına oranla dar ve kısıtlı alan, açık işletme patlatmalarına oranla birim kayaya daha fazla delik ve patlayıcı ile yeraltı kesiti daraldıkça birim kayaya daha fazla delik ve patlayıcı ihtiyacı doğmaktadır.

Yeraltı metal madeni patlatmalarında, şarj dağılımı, aynada kesme deliklerinin olduğu bölgede artmakta çevreye doğru genişledikçe, tarama deliklerinde azalmaktadır. Bu nedenle küçük kesitli tünel kazılarında uygulanan özgül şarj, büyük kesitli tünel kazılarınkinden yüksek olmalıdır.

Yeraltı metal madenciliğinde patlatma işlemlerinde, cevher aynalarında, pasa aynalarında ve katlar arası göçertme patlatmaları olmak üzere üç ana guruba ayrılmaktadır.

Yeraltı metal madenciliğinde birçok işletmede delik grubu ateşlemesinde delik içi elektriksiz kapsül ve infilak iletim aracı olarak infilaklı fitil kullanılmaktadır. İnfilaklı fitil, düşük maliyetli olup aynı zamanda yıllar boyu kullanımın verdiği güven ve kullanıcı alışkanlığı sebepleriyle öne çıkarken, elektriksiz kapsüller ise sabit gecikmeler ile kullanım kolaylığı sunmaktadır (Rapokhin ve Akgün, 2023).

Teknik, ekonomik ve emniyet açısından iyi ve güvenilir bir patlatma tasarımı üzerinde etkili olan pek çok parametre söz konusudur. Bu parametrelerden önemli olanları aşağıda verilmektedir. Tasarım sırasında seçilmesi ya da karar verilmesi gereken başlıca unsurlar şunlardır; Kaya birimlerinin malzeme ve kütle özellikleri, patlayıcı seçimi, özgül şarj, delik boyu, çapı ve adedi ile attım boyudur. Yeraltı patlatma yöntemleri üç gruba ayrılmakta olup bu yöntemler; orta çekme (V-kesme), paralel kesme ve yelpaze kesmedir (Şekil 4).



Şekil 4. Yeraltı metal madenlerinde uygulanan patlatma yöntemleri

Yeraltı metal madenlerinde patlatma faaliyetlerinde en yaygın olarak uygulanan yöntemler orta çekme (V-kesme) ve paralel kesme yöntemleridir. Her iki yöntemin birbirine göre avantajları ve dezavantajları vardır.

- ✓ Paralel delik yönteminde delikleri oturtmak zor ve dikkat isteyen bir iştir.
- ✓ Toplam delik delme ve patlayıcı miktarı olarak paralel delik daha maliyetlidir (ilerleme başına). Ayrıca büyük çaplı boş delik delmek maliyetli ve zaman alıcı bir iştir.
- ✓ Orta çekmede delikleri açılı delme zorunluluğu delik delme kapasitesini olumsuz etkiler. Bu nedenle delici ekipmanın manevra zamanı artar.
- ✓ Orta çekmede tünel genişliği verebileceğimiz açıyı sınırlar.
- ✓ Paralel delikte ise çekmenin uzunluğu kayacın fiziksel özellikleri ve şarjlanmış deliklerin boş deliğe doğru patlayarak serbest yüzey oluşturabilme yeteneğiyle sınırlıdır.

Bu uygulamaların yanı sıra, yeraltı metal maden işletmelerinde özel patlatma uygulamaları ön kesme, son kesme ve alt yarı patlatmaları da bulunmaktadır.

Şarj dağılımı, aynada kesme deliklerinin olduğu bölgede artmakta çevreye doğru genişledikçe, tarama deliklerinde azalmaktadır. Bu nedenle küçük kesitli tünel kazılarında uygulanan özgül şarj, büyük kesitli tünel kazılarınkinden yüksek olmalıdır.

Yeraltı metal madenlerinde patlatma faaliyetlerinde, sıkılama, patlatma deliğinin serbest yüzeye sınır olan kısmının patlayıcı olmayan bir madde ile tıkanarak, patlayıcıdan elde edilen enerjinin, tıkama başarısına bağlı olarak, daha yüksek verimlilik oranıyla, kayacın kırılmasına yönlendirilmesi işlemidir. İyi sıkılamanın en önemli faydası kayacın daha iyi kırılmasıdır. Ancak iyi sıkılama, aynı zamanda daha iyi öteleme de sağlar. Dolayısıyla, yükleme ve taşıma daha kolay ve ekonomik olarak yapılabilir

(Cevizci, 2010). Sıkılama, patlatma faaliyetlerinde patlayıcı gazları mümkün olduğu kadar tutar. Yeraltı maden ocaklarında sıkılama, hava şokunu, sıcak patlayıcı gazları ve toz konsantrasyonunu azaltır, daha iyi parça boyut dağılımı sağlar (Kopp, 1987).

3. AÇIK VE YERALTI METAL MADEN İŞLEMELERDE DELME–PATLATMANIN ÖNEMİ

Planlı delme–patlatma tasarımları, patlatmadan sonra parça boyutunu ve yığın şeklini kontrol eder, büyük blok oluşumunu azaltarak, düzgün bir yüzey oluşumunu sağlar ve kaya kazısının güvenliğini artırır.

Patlatma uygulamaları sırasında, uygun patlatma tasarım parametrelerinin belirlenmesi patlatma verimliliği açısından önemlidir. İyi ve verimli bir patlatma tasarımı için patlatma yapılacak olan alanının jeolojisi, süreksizlik sistemleri, kaya yapısı, mekanik mukavemeti ve dayanımı, fiziksel ve mekanik özellikleri vb. bilinmesi ve buna patlayıcı madde seçimi, delik geometrisi ve patlatma sisteminin belirlenmesi gereklidir.

Patlatma, madencilikte sıklıkla kullanılan kayaç kazı ve üretim yöntemidir. Patlatma kaynaklı parçalanmanın tespiti maden ocaklarının çalışma verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Uygun parçalanmanın elde edilmesi yükleme, taşıma ve kırma faaliyetlerinde verimlilik artışı sağlayacaktır. Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde kazı çalışmalarını yapmak için patlayıcı madde ve ateşleme sistemlerine olan gereksinim kaçınılmazdır. Çok geniş bir yelpazede kullanım alanı olan patlayıcı maddeler, yeri doldurulamayan bir kaynaktır.

Dünyada gelişen teknoloji ile birlikte madencilik sektöründe de önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Bu ilerlemelerle birlikte sıkça kullanılan

delme patlatma işleri de büyük önem arz etmektedir. Delme patlatma işlemlerinden doğan maliyet girdileri oldukça yüksektir. Patlatma sonrası oluşan yığın nakliye, kırma, öğütme gibi ek işlemler gerektirmektedir. Bu ek giderleri azaltmak patlatma sonrası oluşan yığın boyutunun istenilen aralıkta olması ile mümkündür. Bu yüzden patlatma tasarım parametrelerinin iyi belirlenmesi ve istenilen parça boyut dağılımını vermesi gerekmektedir.

Başarılı madencilik operasyonları için doğru patlatma tasarımları vazgeçilmezdir. Uygun olmayan veya yanlış patlatma tasarımları, maden güvenliği ve ekonomisi üzerinde olumsuz etkiler yaratır. Kontrolsüz delme–patlatma işlemleri, yerüstünde yapılan kazı çalışmalarında şev duraylılığını (stabilitesini) tehdit edebilir, hava şoku, taş fırlaması ve titreşim sorununa neden olabilir. İstenmeyen tane boyutu, blok alma, tırnak–topuk kalması gibi problemler yakıt tüketimi, ekstra kırıcı kullanımı, tesis işletme giderleri gibi ocak maliyetlerini artırır ve işletme ekonomisini olumsuz etkiler.

Patlatma operasyonları, kayaların yönetilebilir boyutlarda parçalanması için patlayıcıların kontrollü kullanımına dayanır. Etkili parçalanma, kırma ve öğütme gibi sonraki aşamalardaki maliyetleri azaltarak kaynak çıkarımı için hayati önem taşır. Bu süreç, patlayıcıların kimyasal enerjisinin kayayı kıran mekanik enerjiye dönüştürülmesini içerir.

Patlama anında, patlayıcılar hızla enerji açığa çıkararak süpersonik bir şok dalgası (2.000–8.000 m/s) oluşturur. Bu dalga, delik çevresinde yüksek basınçlı bir bölge (1–30 GPa) yaratır ve kayanın dinamik basınç dayanımını aşan gerilimler uygulayarak delik yakınında ezilmiş bir bölge oluşturur.

Şok dalgası yayıldıkça zayıflar ve elastik gerilim dalgalarına dönüşür. Bu dalgalar serbest yüzeylerden (kaya yüzeyleri veya komşu delikler) yansıyarak çekme dalgalarına dönüşür. Kayalar çekme dayanımı açısından basınç dayanımından 10–20 kat daha zayıf olduğundan, çekme kırılması baskındır ve radyal çatlaklar oluşturur.

Serbest yüzeylerde yansıyan çekme dalgaları, çekme kırılması nedeniyle yüzey katmanlarının soyulmasına (spalling) yol açar. Bu süreç, kaya tabakaları veya önceden var olan eklemler arasındaki empedans farklılıklarıyla şiddetlenir.

Parçalanmayı etkileyen en önemli üç parametre, kaya özellikleri, patlayıcı madde özellikleri ve patlatma tasarım parametreleridir. Bu üç parametrenin çok iyi bir şekilde belirlenmesi, analiz edilmesi ve tecrübeli teknik personel tarafından sahada uygulanması çok önemlidir.

Patlatma sonucunda ekonomik verilere ulaşmak için planlamanın doğru yapılması gerekir. Bazı uygulamalar yapılıp, sonuçlar değerlendirilir. Elde edilen bu sonuçlara göre gerekiyorsa bazı parametrelerde değişiklikler yapılarak, en iyi sonuç elde edilmeye çalışılır (Alpaydın, 2015).

Patlatma sonuçları değerlendirilirken; parçalanma, yığın geometrisi, geri çatlak oluşumu ve fazla kırılma ve çevresel etkenler (titreşim, hava şoku, taş savrulması vb.) göz önüne alınmalıdır. Parametrelerden bir tanesi olan parçalanma, patlatma mühendisliğinin en önemli kavramlarından birisidir. Madencilikte boyut küçültme, patlatma ile başlar ve kırma, öğütme devreleri ile devam eder. Kırma ve öğütme tesisinin verimliliği yığın boyut dağılımı ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca yükleme ve taşıma işlerinin verimliliği de parçalanmaya bağlıdır (Esen vd., 2000).

Patlatmaların ekonomik ve işin amacına uygun yapılması, sadece işin delme–patlatma aşamalarını etkilemez. Verimli patlatma kırma, öğütme, zenginleştirme, enerji ve yakıt sarfiyatı gibi çalışmalara da etkisi vardır. Yani özetle bizim delme–patlatma işlemlerini verimli, ekonomik ve amacına uygun şekilde yapmamız, bütün çalışmalarımızı olumlu yönde etkileyecektir.

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamaları için; işin planlanması, kayaç ve cevher dayanımı ve yapısı,

formasyon ve arazi durumu, süreksizlik, incelenmesi, uygulanması planlanan delik geometrisinin her patlatma öncesi kontrol edilebilir ve kontrol edilemez faktörlere bağlı olarak değerlendirilmesi, delme sisteminin belirlenmesi, patlayıcı madde ve ateşleme sistemi seçimi, gecikme aralıklarının belirlenmesi, patlatma öncesi kontrollerin yapılması, patlatmanın yapılması ve atım sonrası kontroller ve pasa (yığın) kontrolü vb. çalışmalar çok önemlidir. Bu işlemlerin yapılması sırasında başarılı olmanın en önemli yolu; tam planlama, iyi bilgi sahibi olma ve deneyimdir (Alpaydın, 2015).

4. AÇIK VE YERALTI METAL MADEN İŞLEMELERDE DELME–PATLATMA UYGULAMALARINDAKİ EKSİKLİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde madencilik faaliyetlerinde delme–patlatma işlemleri, cevher kazanımı ve işletme verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak bu süreç, yüksek riskler barındırması nedeniyle uzmanlık ve deneyim gerektirir.

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamalarında verimliliği arttırmak için uygulama şartları ve ihtiyaçlar tam olarak anlaşılmalıdır. Bunu gerçekleştirebilmek için kullanılan patlayıcının temel özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Patlayıcı maddenin yanlış seçimi veya kullanımı, patlatmanın kısmen ya da tamamen başarısızlıkla sonuçlanmasına yol açacaktır.

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamalarında verimli, ekonomik ve amaca uygun bir patlatma yapabilmek için dikkat edilmesi gereken önemli faktörler bulunmaktadır. Bunlar;

- ✓ Yeraltı metal maden işletmelerinde delme-patlatma operasyonlarında görev alan personelin teknik yeterlilik ve eğitim düzeyi yetersizliği, yüksek maliyetli ekipmanların verimsiz kullanımına yol açmaktadır. Bu sorunu aşmak için operatörler ve patlatma ekiplerine yönelik sistematik bir yaklaşımla tasarlanmış kuramsal ve uygulamalı eğitim programları geliştirilmelidir.
- ✓ Patlatma operasyonlarında planlı ve düzenli bir süreç izlenmelidir. Bu kapsamda belirlenen patlatma parametreleri, her bir atım sonrasında detaylı şekilde analiz edilerek en ideal sonuçlar elde edilinceye kadar çalışmalar tekrarlanmalıdır. Kaya parçalanma verimliliğini etkileyen faktörlerden her denemede yalnızca biri değiştirilerek kontrollü bir optimizasyon sağlanmalıdır. Bu yaklaşımın başarıya ulaşması için alanında uzmanlık sahibi ve eğitimli personelin görevlendirilmesi şarttır.
- ✓ Patlayıcı madde ve ateşleme sistemlerinin seçimi, proje hedefleriyle uyumlu parametreler temelinde gerçekleştirilmelidir. Delik geometrisi ve kayaç mekaniği analizleri, suya dayanıklı patlayıcıların operasyonel maliyet optimizasyonunda kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. elektriksiz ateşleme sistemlerinin, hem güvenlik protokollerini sağlamada hem de toplam sahip olma maliyetini minimize etmede öncelikli tercih olarak değerlendirilmelidir.
- ✓ Delme parametrelerinin optimizasyonunda proje hedeflerine uygun çap ve geometri seçimi kritik önem taşır. Ekipman tercihi sürecinde subjektif algılar yerine teknik gereklilikler ve operasyonel amaçlar belirleyici olmalıdır. Delik geometrisi tasarımı, patlatma sonrası oluşacak malzeme yığınının taşıma, kırma veya depolama gibi kullanım senaryoları dikkate alınarak yapılmalıdır.
- ✓ Patlayıcı maddelerle çalışanların faaliyetlerinin tüm evrelerinde titizlikle uygulanması gereken denetim süreçlerinin önemi bir kez daha altı

çizilmelidir. Özellikle rutin kontrollerde fark edilen en küçük bir ihmal veya hata, hem insan hayatını tehdit eden risklerin hem de önemli maddi zararların engellenmesinde belirleyici rol oynayabileceği göz ardı edilmemelidir.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bildiri kapsamında, açık ve yeraltı maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamaları ile ilgili bilgiler verilmiş ve değerlendirmeler yapılmış olup şu sonuçlar elde edilmiştir:

Madencilik sektörü, küresel GSYİH'nin yaklaşık %3'ünü oluşturur ve 30 milyondan fazla kişiye istihdam sağlar (World Bank, 2022). Demir, bakır, alüminyum ve nadir toprak elementleri (NTE), otomotivden rüzgâr türbinlerine kadar endüstriyel üretimin omurgasını oluşturur. Üretimleri büyük bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda verimli, ekonomik, doğru ve amacına uygun bir delme-patlatma uygulama yapılması son derece önemlidir.

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamaları için; işin planlanması, kayaç ve cevher dayanımı ve yapısı, formasyon ve arazi durumu, süreksizlik, incelenmesi, uygulanması planlanan delik geometrisinin her patlatma öncesi kontrol edilebilir ve kontrol edilemez faktörlere bağlı olarak değerlendirilmesi gereklidir.

Açık metal maden işletmeleri patlatmalarında en önemli iki parametre özgül şarj ve dilim kalınlığının belirlenmesidir. Bu parametrelerin uygun değerleri belirlendikten sonra diğer parametreler bunlara bağlı olarak hesaplanabilmekte ve tasarım tamamlanabilmektedir.

Patlatma sonuçları değerlendirilirken; parçalanma, yığın geometrisi, geri çatlak oluşumu ve fazla kırılma ve çevresel etkenler (titreşim, hava şoku, taş savrulması vb.) göz önüne alınmalıdır.

Açık ve yeraltı metal maden işletmelerinde delme–patlatma uygulamalarında, kontrol edilemeyen parametrelerin bilimsel ve tecrübeye dayalı olarak belirlenmesi, kontrol edilebilir patlatma parametrelerinin bilimsel, uygulamayı yapan teknik personelin bilgi birikimi ve tecrübesi ile belirlenmesi de son derece önemlidir.

KAYNAKLAR

Alpaydın, E., 2015. Patlatma Ekonomisi, 8. Delme–Patlatma Sempozyumu/8th Drilling–Blasting Symposium 19–20 Kasım/November 2015/İstanbul, 278-286.

Cevizci, H., 2010. Açık Ocak Patlatmalarında Sıkılama Parametresinin Patlatma Verimliliğine Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, s. 98, Isparta

Chakraborty, A. K., Raina, A. K., Ramulu, M., Choudhury, P. B., Haldar, A., Sahu, P., & Bandopadhyay, C., 2004. Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations, Engineering Geology, 73, 105–116.

Esen, S., Bilgin, H. A. V., & Bobo, T., 2000. Patlayıcının Parçalanmaya Etkisi, 4. Delme ve Patlatma Sempozyum Bildiriler Kitabı, Anakara, 63-72.

Hagan, T. N., 1975. The Influence of Stemming Practice on Blast Efficiency.

IEA, 2023. Global EV Outlook 2023.

Konya, C. J., & Walter, E. J., 1990. Surface Blast Design, Prentice Hall, New Jersey.

Kopp, J. W., 1987. Stemming Ejection and Burden Movements of Small Borehole Blasts, Bureau of Mines Report of Investigations 9080, p. 15.

Langefors, U., & Kihlström, B., 1963. Rock Blasting: Effects of Charge Geometry.

Olofsson, S. O., 1990. Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Second Edition, pp. 304.

Olofsson, S., 1997. Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Sweden, pp. 13–18, 59–66, 96–107.

Rapokhin, A., & Akgün, F., 2023. Blastweb Merkezi Elektronik Ateşleme Sistemi İle Emniyet ve Verimliliğin İyileştirilmesi. The 5th International Underground Excavations Symposium İstanbul, 691-700.

Şimşir, F., 2015. Yer Altı Madencilik Yöntemleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No: 337, 1. Baskı, İzmir.

Pukkila, J., 1984. Handbook on Surface Drilling and Blasting, PainoFactirit Filland, pp. 310.

World Bank, 2022. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.

YERALTI PATLATMALARINDA BULK-EMÜLSİYON UYGULAMASI

BULK-EMULSION APPLICATION IN UNDERGROUND BLASTING

Harun Bereket
Nobel Explosives Patlayici Maddeler San. ve Tic. A.Ş., Ankara.

ÖZ: Bulk-Emüsiyon, hidrolik veya elektrikli bir pompa yardımıyla deliğe şarj edilmektedir. Uygulama sırasında daha az insan gücü ve daha az zaman harcanarak yüksek patlatma verimliliği elde edilir. Buna ek olarak, daha yüksek patlama hızı nedeniyle daha iyi bir parçalanma performansı elde etmek mümkün olmuştur. Bu çalışma, Bulk-Emülsiyon patlayıcıların kullanıldığı bir yeraltı madenindeki vaka çalışmalarından elde edilen sonuçları ele almaktadır. Patlatma sonrası parçalanma için kartuşlu patlayıcı ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Bulk-emülsiyon ürünü ile patlatmadan sonra parçalanmanın çok daha iyi olduğu, kesitinin düzgün bir şekilde kesildiği, ilerlemenin tam olduğu, kapsül sayısının ve özgül şarjın %15 azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Patlatma, Bulk-Emülsiyon Patlayıcı, Parçalanma

ABSTRACT: *Bulk-emulsion is charged into the hole by means of a hydraulic or electric pump. During the application, high blasting efficiency is achieved with less manpower and less time. In addition, it was possible to achieve better fragmentation performance due to the higher explosion velocity. This study deals with the results obtained from case studies in an underground mine where Bulk-emulsion explosives were used. A comparison was made with cartridge explosives for fragmentation after blasting. It was observed that fragmentation after blasting was much better with the Bulk-emulsion product, the cross-section was cut properly, the progress was complete, the number of capsules and the specific charge were reduced by 15%.*

Keywords: *Blasting, Bulk Emulsion Explosive, Fragmentation*

1. GİRİŞ

Delme ve patlatma, madencilik üretim sürecinin temel adımlarıdır. Patlatmanın verimliliği taşıma, yükleme, kırma ve öğütme gibi birçok operasyonu etkilediği için üretim maliyetlerini doğrudan etkiler (Manzoor vd., 2022; Nikkhah vd., 2022; Özdemir, 2021; Kahraman ve Kılıç, 2020; Faramarzi vd., 2013; Bahrami vd., 2011; Kılıç vd., 2009). Hem açık ocak hem de yeraltı maden işletmeciliğinin genel karlılığını en üst düzeye çıkarmak ve optimum üretkenlik için patlatma sonuçlarını değerlendirmek çok önemlidir. Patlatmanın hem kontrol edilebilir hem de kontrol edilemez parametrelerini analiz ederek, verimli patlatma sağlayan ve istenen parçacık boyutu dağılımını elde eden optimum bir patlatma tasarımı geliştirilebilir (Hüdaverdi vd., 2011).

Ülkemizde yeraltı işletme yöntemiyle faaliyet gösteren inşaat ve maden işletmelerinin tamamına yakınında kartuşlu patlayıcılar kullanılarak üretim işlemleri gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda hızla yükselen patlayıcı hammadde fiyatları yüzünden üreticiler maliyetleri azaltabilmek için yeni uygulamalar arayışına girmişlerdir. Kartuşlu patlayıcılara alternatif olarak Bulk-Emülsiyon ürünü kullanılmaktadır.

Bulk emülsiyon patlayıcılar hidrolik veya elektrikli bir pompa ile delik içerisine şarj edilmektedir. Hidrolik pompalar yeraltında kullanılan araçların üzerine kolaylıkla monte edilebilir ve hidrolik sistemlerine bağlanarak kolay kullanım olanağı sağlamaktadır. Bulk emülsiyon patlayıcılar pompa üzerinde bulunan özel bir hortum yardımıyla delik içerisine şarj edilmektedir. Hortumun ucunda bulunan noozle aparat Bulk- emülsiyon patlayıcının delik çeperlerine homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Delik içerisi boşluk kalmadan tamamen dolduğu için kartuşlu patlayıcılarda görülen temas etmeme problemi Bulk Emülsiyon şarjı sırasında ortadan

kalkmaktadır. Bulk Emülsiyon patlayıcılar kartuşlu patlayıcılara oranla daha yüksek detonasyon hızı (VOD)'na sahiptirler.

2. BULK-EMÜLSİYON (POMPALANABİLİR) PATLAYICILAR

Bulk-Emülsiyon patlayıcılarda emülsiyonlaştırma ve karıştırma işlemi emülsiyon istasyonunda veya karıştırma/yükleme kamyonunda gerçekleştirilebilir. Tipik bir bulk-emülsiyon teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Şekil 1'de pompalama istasyonu ve pompadan patlayıcı şarjının nasıl olduğu görülmektedir. Patlayıcı istasyonda hazırlandığı zaman, patlayıcı kamyonu patlayıcılar için basit bir taşıma ve yükleme ünitesi görevi görür. Alternatif olarak, kamyon bir karıştırma ve yükleme ünitesi olarak kullanılabilir. İkinci durumda ise patlayıcının hazırlanması iş yerinde gerçekleşmektedir ve çeşitli karışımların hassas miktarlarıyla sürekli patlatma deliğine şarjlanmasına olanak tanımaktadır. Bu sistem patlayıcıların ekonomik olarak üretilmesini sağlar. Şarjlama işlemi doğrudan ve toplu emülsiyon şarjı 200 kg/dakikaya kadar hızlarda kolayca pompalanabilir. Bir diğer avantajı ise su içeren deliklere bile pompalanabilmesidir. Bulk-Emülsiyon zorlu koşullar altında bile aylarca özellikleri değişmeden kalabilir (Satıcı Ö., 2006).

Çizelge 1. Bulk-Emülsiyon teknik özellikleri

Yoğunluğu	1,10 - 1.20 (g/cm³) (İdeal)
Kritik delik çapı Ø	40 mm
Patlama hızı	6180 km/s
CO_2 Salımı	165 (Kg/t) (Duman Class 1)
Bağıl etkin enerji (Relative Effective Energy)	
Bağıl ağırlık kuvveti	(%) 96
Bağıl Yığın kuvveti	(%) 148

Şekil 1. Pompalama istasyonu ve pompadan patlayıcı şarjı

2.1. Bulk-Emülsiyon Patlayıcıların Avantajları

Bulk-Emülsiyon patlayıcıların patlatmanın etkinliği, verimliliği, patlatma faliyetlerindeki lojistik hizmetler ve patlatma güvenliği açısından pekçok avantaja sahip olup, aşağıda alt başlıklarda bu avantajlar belirtilmiştir.

2.1.1. Patlatma üzerinde etkili özellikleri

- Daha yüksek yüksek detonasyon hızından dolayı patern genişleterek daha az delgi delinmektedir.
- İlerleme hızında artış sağlamaktadır.

- Daha iyi parçalanma ve daha gevşek pasa yığını sağladığından yükleme kolaylığına sebep olmaktadır.
- Yan kayaca ve/veya tavana daha az şarjlama ile enerji kontrolü sağlayarak nihai yapıları korumaktadır.

2.1.2. Patlatma verimliliği üzerindeki etkili özellikleri

- Daha hızlı şarj edilebildiği için üretim patlatma şarj süresi azalacaktır
- İlerleme atımları hem daha verimli hem daha kısa sürede olacaktır
- İnsan gücü ile patlayıcı taşıma işi sonlanmıştır.

2.1.3. Patlatmada lojistik hizmetler üzerindeki etkili özellikleri

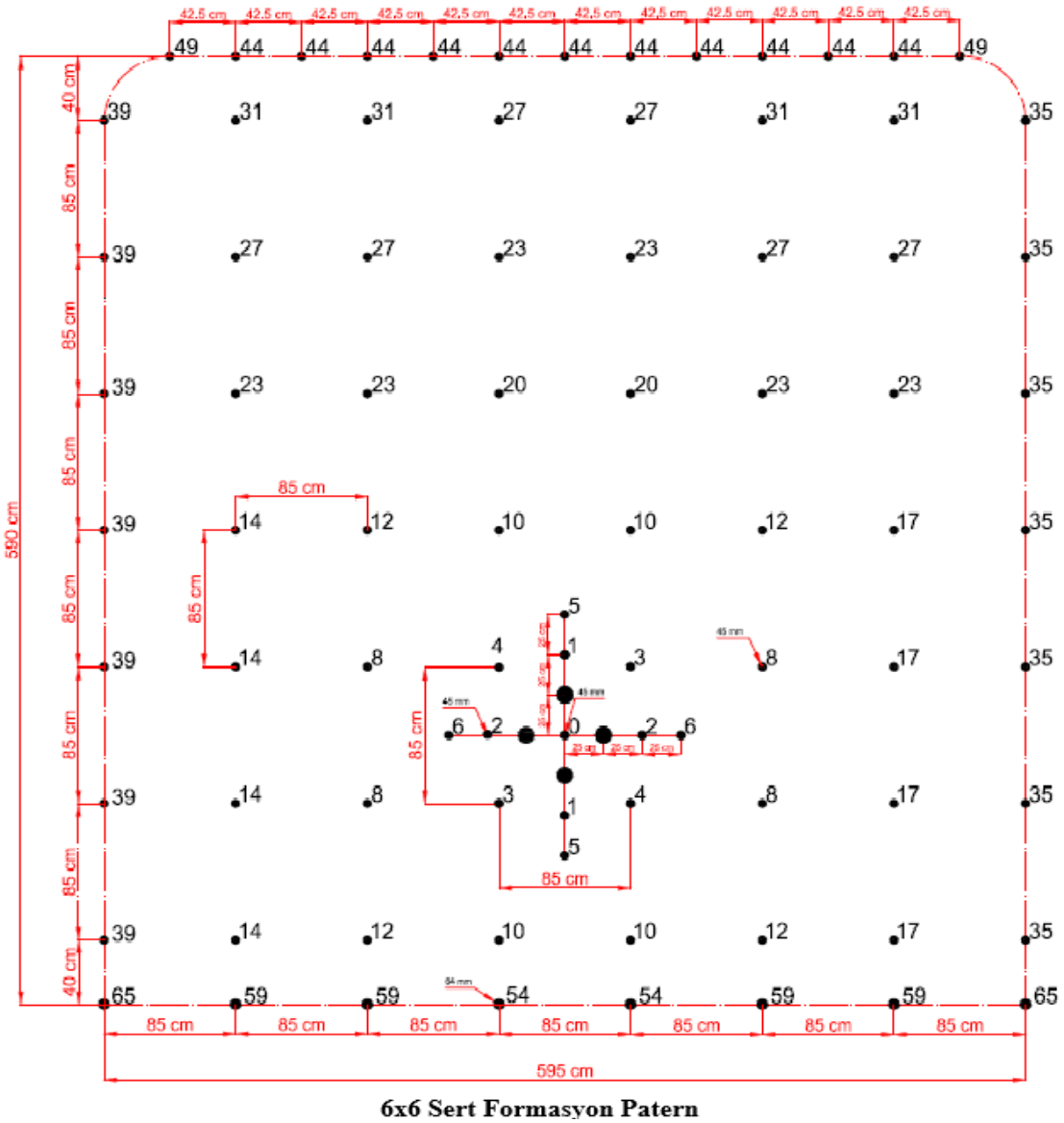
- Depolama giderleri ve gereksinimlerinin azalmasına sebep olmaktadır.
- İş döngüsü daha hızlı bir şekilde tamamlanmaktadır.
- Patlayıcı ambalajlarının imhasına gerek kalmamaktadır.

2.1.4. Patlatmada güvenlik üzerindeki etkili özellikleri

- Kısa nakliye döngüsü sağlamasından dolayı daha güvenlidir.
- Darbeye ve şoka daha az duyarlıdır.
- Pompalanarak delik dolumun da daha güvenli bir sisteme geçiş yapılmaktadır.
- Suya dirençli ve kartuşlarda yaşanan temassızlık ortadan kalkmaktadır.
- Hortum çapı kritik çaptan küçük olduğundan pompalanırken herhangi bir tehlike arz etmemektedir.
- Sülfürlü zeminlerde (Reaktif) sülfitler nitrat ile direkt tepkimeye girdiği için yüksek ısılar açığa çıkartmaktadır ve bu ısılarda prematüre patlatmalara yol açabilir. Bu durumu ortadan kaldırmaktadır.
- Nitratlı patlayıcılara göre çok daha düşük oranda yeraltı su kirliliğine sebep olmaktadır.

3. ÖRNEK UYGULAMA ve SONUÇLARI

Çalışma kapsamında patlatmalar Balıkesir bölgesinde faaliyet gösteren polimetalik maden üretimi gerçekleştiren bir yeraltı maden işletmesinde gerçekleştirilmiştir. Patlatma aynasına ait patern Şekil 2'de ve aynaya ait örnek bir görüntü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Patlatma aynasına ait patern

Şekil 3. Patlatma aynasına ait örnek bir görüntü

İşletmede kartuşlu patlayıcı ve Bulk-Emülsiyon kullanılarak birer atım izlenmiştir. Atımlara ait patlatma parametreleri ve kullanılan patlayıcı madde bilgileri ile miktarları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Atımlara ait patlatma parametreleri ve diğer bilgiler

Atım Verileri	**1. Atım**	**2. Atım**
Patlayıcı Cinsi	Kartuşlu Patlayıcı	Bulk-Emülsiyon
Ayna Genişliği	6x6	6x6
Delgi Boyu	3,8 m	3,8 m
Kapsüller	85 adet (LP 5 m)	72 adet (LP 5 m)
Dinamit (Powergel Magnum 365)	270 kg 365	36 kg
Bulk-Emülsiyon	-	360 kg
Delik Çapı	52 mm	52 mm
İlerleme Boyu	2,5 m	3,6 m
Ayna Yüzey Alanı	36 m^2	36 m^2
Özgül Şarj	1,98 kg/m^3	2,6 kg/m^3
Ayna Dolum Süresi	100 dk	60 dk

Patlatma sonrası atımlar incelendiğinde; Kartuşlu Patlayıcı kullanılarak yapılan patlatma sonucu elde edilen yığının ait görüntü Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4'den de anlaşılacağı üzere elde edilen yığının parça boyut dağılımındaki iri parçalanma açıkça gözlenmektedir.

Şekil 4. Kartuşlu Patlayıcı kullanılarak yapılan patlatma sonucu elde edilen yığına ait örnek görüntüler

Bulk-emülsiyon patlayıcı kullanılarak yapılan patlatma sonucu elde edilen yığının ait görüntü ise Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5'den de anlaşılacağı üzere elde edilen yığının parça boyut dağılımında iri parçaların azaldığı ve daha iyi bir parçalanma derecesine sahip olunduğu görülmektedir.

Şekil 5. Bulk-emülsiyon patlayıcı kullanılarak yapılan patlatma sonucu elde edilen yığının ait görüntü

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında incelenen patlatmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Pompalanabilir patlayıcı madde delik cidarını tamamen doldurabildiği için atım sonrası görüntülerine bakıldığında tane boyutunun kapsüle duyarlıya göre çok daha küçük olduğu gözlenmiştir.
- Pompalanabilir patlayıcı madde ile ayna şarj süresi kısalmıştır.
- Yapılan denemeler sonucunda delik sayısı %15 düşürülmüştür.
- Delik sayısının azaltılmasıyla kullanılan yıllık kapsül sayısı ve patlayıcı miktarı azalmıştır.
- Delik sayısının azalması ile delgi maliyetleri azalmıştır
- Düşen delik sayısına karşın ilerleme'de artış gözükmektedir.
- Atım sonrası açığa çıkan gaz miktarı çok azdır. Gaz miktarının az olması nedeni ile aynaya giriş süresi kısalmıştır.

- Tane boyunun küçülmesi pasa naklinde kamyon sayısını ve toplam nakliye süresini azaltmıştır.

KAYNAKLAR

Faramarzi, F., Mansouri, H., & Farsangi, M. E., 2013. A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting. International Journal of Rock Mechanic and Mining Science 60:82–94. https://doi.org/10.1016/j. ijrmms.2012.12.045

Hudaverdi, T., Kulatilake, P. H. S. W., & Kuzu, C., 2011. Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 35, 1318–1333. https://doi.org/ 10.1002/nag.957

Kahraman, E., & Kilic, A. M., 2020. Evaluation of empirical approaches in estimating mean particle size after blasting by using nondestructive methods. Arabian Journal of Geoscience, 13(14), 1–8. https://doi.org/10. 1007/s12517-020-05636-9

Kilic, A. M., Yasar, E., Erdogan, Y., & Ranjith, P. G., 2009. Influence of rock mass properties on blasting efficiency. Scientific Research and Essays, 4(11), 1213–1224.

Manzoor, S., Danielsson, M., So¨derstro¨m E, Schunnesson H, Gustafson A, Fredriksson H, & Johansson D., 2022. Predicting rock fragmentation based on drill monitoring: a case study from Malmberget mine, Sweden. Journal of South Africa Instute Mineral and Metallugy 122(3), 155–165.

Nikkhah, A., Vakylabad, A. B., Hassanzadeh, A., Niedoba, T., & Surowiak, A., 2022. An evaluation on the impact of ore fragmented by blasting on mining performance. Minerals 12(2), 258.

Ozdemir, K., 2021. Evaluation of blast fragmentation effects on jaw crusher throughput. Arabian Journal of Geoscience, 14(19), 1–11. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08426-z.

Satıcı, Ö., 2006. Drilling & Blasting As A Tunnel Excavation Method. 24 s.

NİĞDE BÖLGESİNDE ÜRETİLEN METAL MADENLERİNİN DÜNÜ, BUGÜNÜ VE YARINI

YESTERDAY, TODAY AND TOMORROW OF METAL MINES PRODUCED IN NIĞDE REGION

Mahmut Suat Delibalta
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Niğde

ÖZ: Niğde'de (Nahita) antik çağdan kalan metal maden işletmeleri ve çevresinde bulunan yazıttan (Yazılıtaş) hareketle, bölgedeki madenlerin M.Ö. 800'lü yıllardan itibaren işletildiği tespit edilmiştir. Niğde-Çamardı ilçesi ve Gümüşler kasabası üçgeninde Üçkapılı Granitoidi ile ilişkili pek çok eski metal maden ocağı bulunmaktadır. Madencilik faaliyetleri Hititlerden başlayarak, Bizans ve Osmanlı dönemlerini de kapsayarak günümüze kadar gelmiştir. Celaller köyünde Kasiterit (SnO_2), Gümüşler köyünde Hematit (Fe_2O_3), Stibnit (Sb_2S_3), Zinober (HgS), Kılavuz, Eynelli köyü ve Armutbeli mevkiinde Hematit, Tandırlı sırtında Galen (PbS), Sfalerit (ZnS) ve Gediz yaylasında Stibnit cevherleri çıkarılmıştır. Bu cevherlerin alterasyonu sonucu oluşan ikincil mineraller, sahada yaygın olarak görülmektedir. Günümüzde Gümüştaş A.Ş. tarafından işletilen Bolkardağı maden sahasında altın ve gümüş üretim faaliyetleri devam etmektedir. Niğde Tepeköy'de 400 ton/gün cevher işleme kapasiteli kurşun, çinko, pirit flotasyon tesisi ve 400 ton/gün cevher işleme kapasiteli altın, gümüş zenginleştirme tesisi bulunmaktadır. Ayrıca, bölgede özel sektöre ait firmaların metal madeni yeni ruhsat sahaları aldığı da görülmektedir. Yapılan araştırmada; Niğde bölgesinde üretilen metal madenlerinin dünü, bugünü ve yarını tarihsel gelişim süreciyle irdelenerek, bölgesel kalkınma ve gelişmedeki önemi sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Niğde, Metalik Madenler, Üretim, Ekonomi, Sürdürülebilirlik

ABSTRACT: *Based on the metal mining remaining from antiquity in Niğde (Nahita) and the inscription found around it (Yazılıtaş), it is believed that the mines in this region are M.D. it has been determined that it has been operated since the 800s. Many old metal mines associated with Üçkapılı Granitoid are also located in the triangle of Niğde-Çamardı district and Gümüşler town. Mining activities have come to the present day starting from the Hittites and covering the Byzantine and Ottoman periods. Kasiterite*

(SnO_2), Hematite (Fe_2O_3), Stibnite (Sb_2S_3), Zinober (HgS), Kılavuz, Eynelli village and Armutbeli region in Celaller village, Galena (PbS), Sphalerite (ZnS) in Tandırlı ridge and Stibnite ores were mined in Gediz plateau. Secondary minerals formed as a result of the alteration of these ores are also widely observed in the field. Nowadays, Gümüştaş Incorporated gold and silver production activities are continuing at the Bolkardağı mine site operated by the company. There is a lead, zinc and pyrite flotation plant with an ore processing capacity of 400 tons/day and a gold and silver enrichment plant with an ore processing capacity of 400 tons/day in Niğde Tepeköy. In addition, it is observed that privately owned companies in the region have obtained new metal mining license areas. In the research conducted; the past, present and future of the metal mines produced in the Niğde region are examined with the historical development process and their importance in regional development and progress is presented.

Keywords: *Niğde, Metallic Mines, Production, Economy, Sustainability*

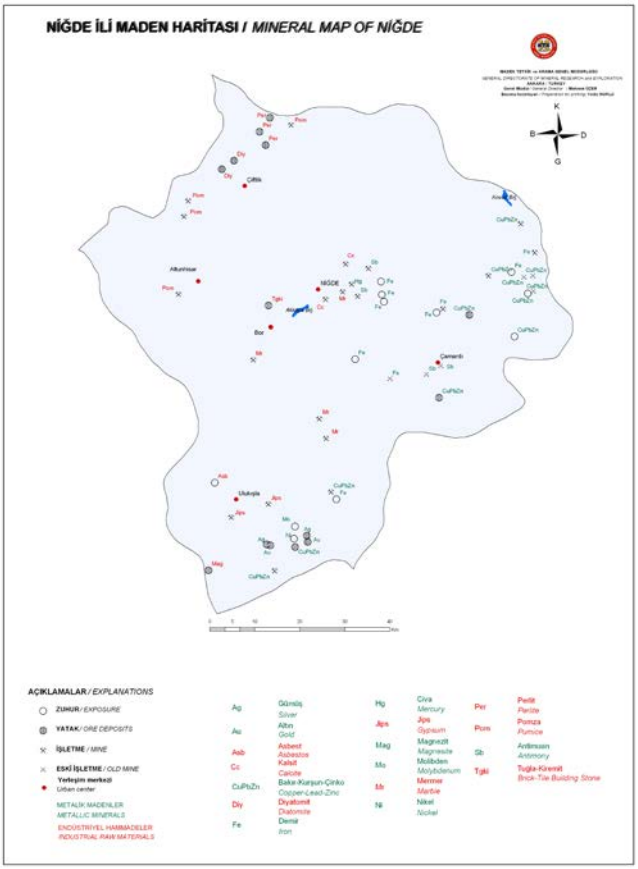
1. GİRİŞ

Kuzey Mezopotamya'da açığa çıkarılan birkaç tarihi buluntu hariç, dünyada ilk metal eserler günümüzden yaklaşık 9.000 ~ 10.000 yıl önce Anadolu'da üretilmeye başlamıştır. Madencilik alanında sadece bakırın kullanıldığı Neolitik Dönem (MÖ 9.500-5.500) sonrasında metal eserler teknolojisinin gösterdiği gelişim, çeşitli evrelere ayrılarak incelenebilir. Bu hususta ilk gelişim aşaması, Kalkolitik Dönem'de (MÖ 5.500 3.300) arsenikli bakır cevherleri ya da arsenik eklenerek bakırın daha dayanıklı hale getirilmesidir. Bir sonraki aşama olan Geç Kalkolitik Dönem'de ise sırasıyla gümüş, kurşun ve altın yavaş yavaş insanoğlunun kullanımına girmiştir. İlk Tunç Çağı'na (MÖ 3.300- 2.000) gelindiğinde, bakıra kalay eklenerek oluşturulan tunç sayesinde çok daha dayanıklı eserler elde edilmiştir.

Anadolu'da yaşayan insanların madencilik konusundaki başarıları, söz konusu bu toprakların maden cevherleri bakımından zengin olması ile doğru orantılıdır. Anadolu'daki binlerce maden yatağı içerisinde yüzeye

yakın cevherin tarih öncesi dönemlerde kullanılmış olabileceği düşünülmektedir. Öyle ki; Derekutuğun, Murgul, Bakırçay, Gümüşhacıköy, Küre, Gümüşköy-Aktepe, Hisarcık ve Kestel gibi maden yatakları, Anadolu'da henüz yazının icad olmadığı MÖ 3.000 yıl ve öncesinde kullanıldığı belirlenmiştir (Demirci, 1938; Fidan, 2016).

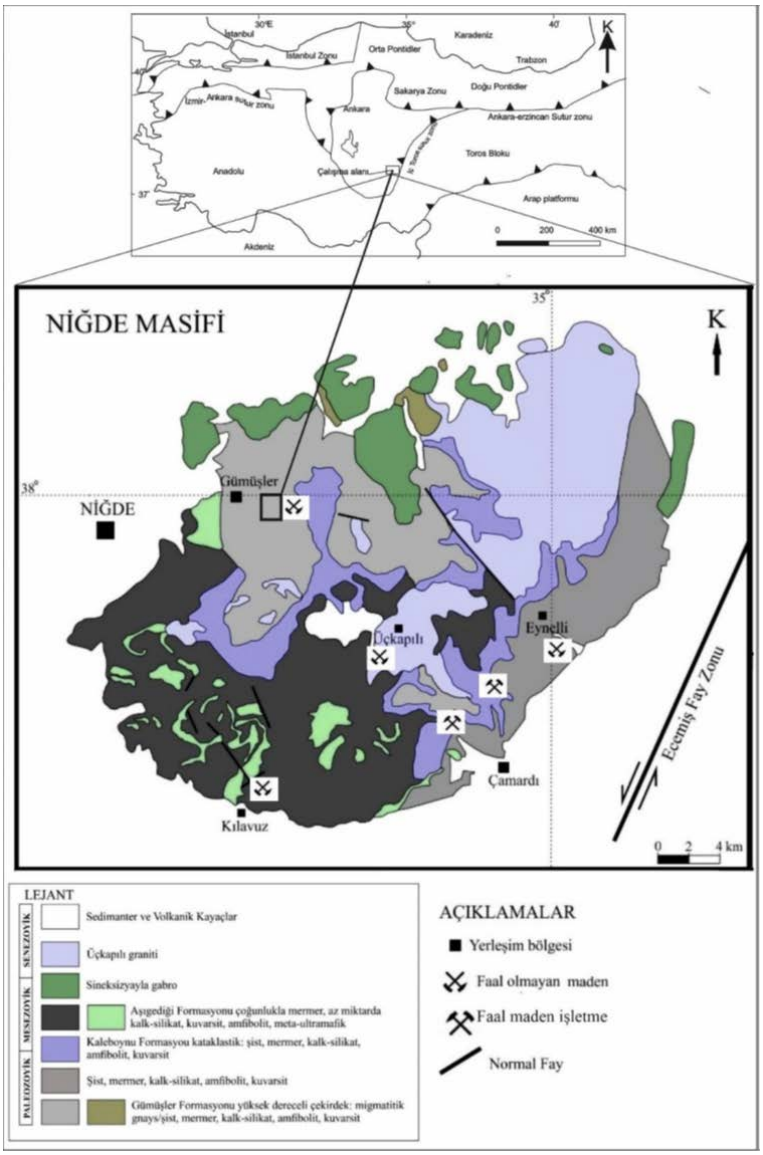
Niğde ili ve çevresinde Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'nün yaptığı saha çalışmaları sonucunda; metalik madenlerden altın, antimuan, bakır-kurşun-çinko, civa, demir ve volfram yatak ve zuhurları, endüstriyel hammadelerden ise diyatomit, jips, mermer ve tuğla-kiremit hammaddeleri tespit edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Niğde ili maden haritası (MTA, 2024)

Bu aramalara göre; Ulukışla-Bolkardağ sahasında iki adet potansiyel altın madeni, Bolkardağ-1 sahasında 8 gr/ton Au ve 273 gr/ton Ag tenörlü

175.000 ton, Bolkardağ-2 sahasında 3,12 gr/ton Au ve 140 gr/ton Ag tenörlü 152.000 ton görünür rezerv tespit edilmiştir. Antimuan oluşumlarına ise Merkez ve Çamardı ilçelerinde rastlanmaktadır. Bunlardan Çamardı-Madsan sahasının %Sb tenörü 2-5, Merkez-Gümüşler-Örendere sahasının %Sb tenörü 4 civarındadır. Her iki maden sahası da geçmiş yıllarda işletilmiştir (Şekil 2). Ayrıca, Gümüşler sahasında %1,5-2 Hg tenörlü geçmiş yıllarda işletilmiş civa yatağı ile %0,1 WO_3 tenörlü ve 100.000 ton mümkün rezerve sahip volfram zuhuru da yer almaktadır.



Şekil 2. Niğde masifi genel jeolojisi ve maden işletmeleri (Tümüklü ve Tosunbaş, 2021)

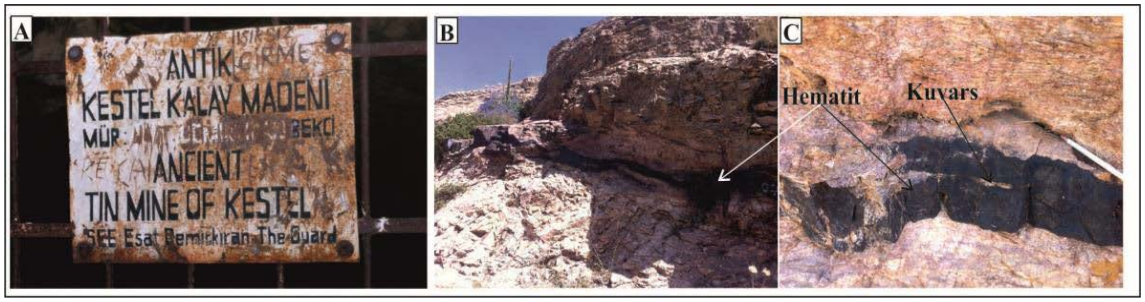
Niğde ili Ulukışla ve Çamardı ilçelerinde ise çok sayıda kurşun-çinko (Pb-Zn) yatak ve zuhurları bulunmaktadır. Ancak, bunların büyük çoğunluğu küçük boyutlu oluşumlardır. En önemli rezervler; Çamardı ilçesindeki Aladağ, Tekneli ve Dereköy zuhurları ile Ulukışla ilçesideki Bolkardağ-Öküzgönül ve Bolkardağ-Sulucadere zuhurlarıdır. Aladağ kurşun-çinko zuhurunda %14,12 Zn ve %6,72 Pb tenörlü 313.000 ton görünür+muhtemel, 84.000 ton mümkün rezerv; Tekneli kurşun-çinko zuhurunda % 20 Zn ve % 5 Pb tenörlü 90.000 ton görünür+muhtemel, 64.000 ton mümkün rezerv; Dereköy zuhurunda ise %25 Zn ve %10 Pb tenörlü 40.000 ton görünür+muhtemel, 19.000 ton mümkün rezerv tespit edilmiştir. Bolkardağ sahasındaki kurşun-çinko zuhurları ise %5,5 ve 8 Zn ve %2,3 ve 2,5 Pb tenörlerine sahip olup, toplam muhtemel rezervleri 700.000 ton civarındadır. Ayrıca; Bolkardağ-Sulucadere'de %0,2 Mo, Ulukışla-Suluocak'ta da %0,2 Ni içeriğine sahip çok küçük boyutlu molibden ve nikel oluşumlarının varlığı tespit edilmiştir. İl'deki mevcut demir yatak ve zuhurları genellikle Merkez, Ulukışla ve Çamardı ilçelerinde gözlenmektedir. Niğde-Çamardı arasında Armutbeli demir yatağı ile Eynelli, Kepeztepe, Kalerdere, Menikbaşı Tepe, Yapalıağzı boğazı, Tucur çeşme, Boztepe Sırtı, Elmadere, Meşeçatağı Dere, Armutlar Tepe, Aşılık Tepe ve Susuzyurt Sırtı mevkilerinde demir zuhurları bulunmaktadır. Armutbeli demir yatağınında %43,40 Fe, %9,16 SiO_2, %0,5 Al_2O_3 ve %0,04 S içerikli 22.000 ton görünür+muhtemel rezerv belirlenmiştir. Geçmiş yıllarda bu maden yatağından 20.249 ton cevher üretimi yapılmıştır. Niğde-Çamardı arasında yer alan rezervler çok küçük boyutlu zuhurlardır. Niğde-Ulukışla-Pozantı arasında da Esendemir ve Koçak demir yatakları yer almaktadır (Şişman ve Şenocak, 1981; Kelebek, 2007; Kahya, 2018; MTA, 2024). Bunlardan Esendemir yatağında 353.167 ton görünür+muhtemel, Koçak demir yatağında ise 50.000 ton muhtemel rezerv belirlenmiştir.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

Niğde bölgesinde yapılan madencilik faaliyetleri; antik çağdan kalan eski metal maden işletmelerinden başlayarak, Hititler, Bizans ve Osmanlı dönemlerini de kapsayarak günümüze kadar gelmektedir. Bugün Bolkardağı maden sahasında altın ve gümüş üretim faaliyetleri devam etmektedir. Ayrıca, özel sektöre ait firmaların bölgede metal madenleri yeni ruhsat sahaları aldığı görülmektedir. Niğde ve çevresinde sürdürülen metalik maden faaliyetleri, dönemler halinde ele alınarak aşağıda detaylı olarak verilmektedir.

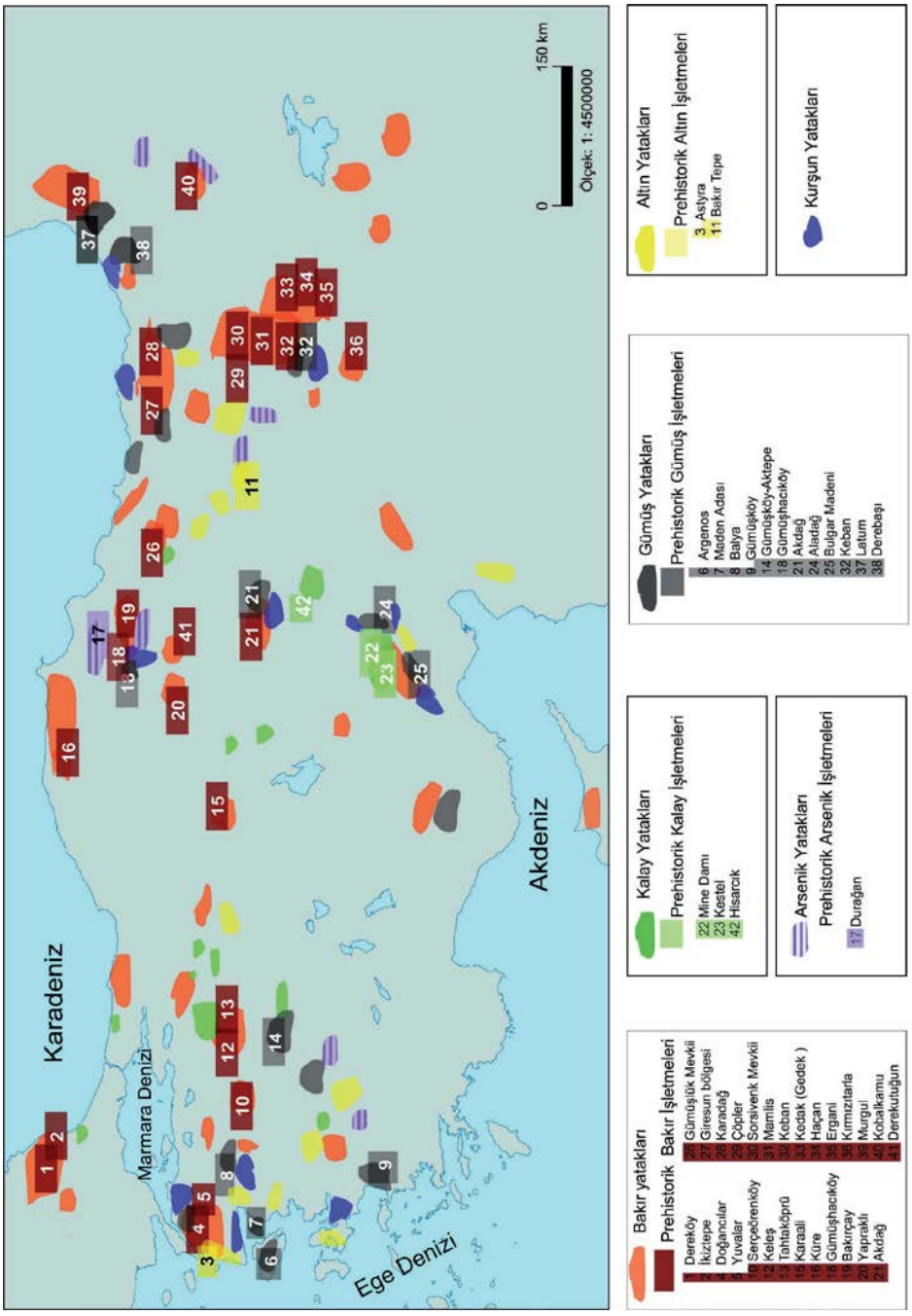
2.1. Antik Çağ Metal Madenciliği

Orta Anadolu'da tarih öncesi dönemlerde kullanıldığı kanıtlanan en önemli kalay yataklarının başında Niğde-Çamardı, Celaller köyü Kestel kalay işletmesi gelmektedir (Şekil 3). İlk kullanım tarihinin MÖ 3.000 yılın ilk yarısına kadar gittiği işletmede, İlk Tunç Çağı boyunca yaklaşık 100.000 ton kalay cevheri çıkarıldığı ve dolayısıyla yaklaşık 1.000 ton kalay elde edildiği hesaplanmıştır (Kaptan, 1988; Yener vd., 1989). Aynı şekilde, Kestel'in 1,5 km kuzeydoğusunda yer alan Mine Damı Mevkii'nde de İlk Tunç Çağı'nda kalay çıkarıldığı iddia edilmektedir.



Şekil 3. Celaller antik kalay ocağı A) Eski galeri girişi B-C) Antik galerinin bulunduğu alandaki kuvars içeren hematit damarları (Tümüklü vd., 2018)

Dünyada ilk metal eserin kullanıldığı Anadolu, bu ilk olma özelliğini burada yerleşik hayata geçen insanlara ve bu toprakların maden yatağı bakımından zengin olmasına borçludur. Yapılan araştırmalar, Anadolu'da erken dönemlerde işletilmiş olabilecek binlerce zengin maden yatağının olduğunu göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Anadolu'da maden yatakları ve tarih öncesi dönemlere ait maden işletmeleri (Fidan, 2016)

Prehistorik çağlarda kullanılmış olması muhtemel Anadolu'nun gümüş kaynakları; Toroslar üzerindeki Aladağ ve bu işletmenin güneybatısında yer alan Bulgar/Bolkar madeni işletmesi ile Yozgat'ta Akdağ madeni, Elazığ'da Keban madeni ve Kuzey Anadolu dağları üzerinde yer alan işletmelerdir (Fidan, 2016). Ayrıca; Orta Anadolu'da Gümüşhacıköy ve Akdağ madeninde kurşunun varlığı bilinmekte olup, Toroslar (Bolkardağı) çevresinde de kurşun yataklarına rastlanmaktadır.

Bolkardağı ile ilgili en somut kaynak, Neo-Hitit dönemine tarihlenen 5 satırlık hiyeroglif yazıttır. Alihoca köyünün 2-3 km doğusunda, asfalt yola yaklaşık 200 m mesafede bulunan bu yazıt, 3-4 m yükseklikteki sarp bir kayanın yüzeyinde bulunmaktadır (Şekil 5). Bu metnin Tuwanuwa (Tuwana) kralı Warpalawas'a (MÖ 738-710) bağlı prens Tarhunzas tarafından yazdırıldığı belirtilmiştir. Metinde "Tuwana kralı Urballa" olarak sözü edilen kral Warpalawas, "Muti dağı" olarak adlandırılan Bolkardağı yöresini Tarhunzas'a bağışlamaktadır. İlk maden ruhsatı olarak isimlendirilen bu metinde, Tarhunzas kral Warpalawas'ı kastederek "Efendim Warpalawas'a iyilik ettim, o da Muti dağı'nı bana verdi" demektedir (Kartalkanat, 2014). Yazıtta, "Kubab" gibi çeşitli tanrı ve tanrıçaların dağı bereketli kılması istenmekte; bu da bereketli olması beklenen madenlerin gümüş madenleri olduğunu düşündürmektedir.

Şekil 5. Hiyeroglif yazısı ile yazılmış "ilk maden ruhsatı" görünümü (Delibalta ve Türker, 2024)

Ayrıca, Niğde ili Çamardı ilçesi ve Gümüşler kasabası üçgeninde Üçkapılı Granitoidi ile ilişkili kabul edilen çok sayıda eski maden ocağı aynı bölgede bulunmaktadır. Celaller köyünde Sn, Gümüşler köyünde Fe, Sb ve Hg, Kılavuz, Eynelli köyü ve Armutbeli mevkiinde Fe, Tandırlı sırtında Pb-Zn ve Gediz yaylasında Sb cevherleri çıkarılmıştır (Şekil 6). Bölgede cevher mineralleri olarak, kasiterit (SnO_2), hematit (Fe_2O_3), stibnit (Sb_2S_3), zinober (HgS), galen (PbS), sfalerit (ZnS) bulunmaktadır. Bu cevherlerin alterasyonu sonucu oluşan ikincil mineraller de bölgede yaygın olarak görülmektedir. Cevherleşmeler genellikle süreksizlik zonlarında yer almaktadır.

Şekil 6. Gümüşler civarı Sb ve Hg işletme ve cevher mostraları A) Gümüşler civa üretim tesisi B) Civa üretim tesisinin günümüze yakın (2018) durumu C) Şistler ile uyumlu stibnit damarı D) Fay düzlemi içerisinde breş ile birlikte bulunan stibnit cevher mostrası (Tümüklü vd., 2018)

2.2. Osmanlı Dönemi Metal Madenciliği

Maden işletmelerine sahip olan şehirler, Osmanlı Devleti için ayrı bir önem arz etmiştir. Çünkü; devletin öncelikle para basımında kullandığı metaller, sosyal hayatta kullanılan madeni eşyalar ve başta dönemin harp sanayisinin hammadde ihtiyacı madenlerden karşılanmaktaydı. Bu ekonomik özelliğe sahip şehirlerinden biri de Niğde sancağıdır (Murat, 2023). Osmanlı Devleti Niğde'yi hâkimiyeti altına aldıktan sonra buradaki madenleri işletmeye açmış ve devletin muhtelif kurumlarının ihtiyaç duyduğu hammaddeyi burada bulunan Bereketli ve Bulgar/Bolkardağı madenlerinden karşılamıştır. Özellikle kurşun, gümüş ve altın cevherleri açısından ön plana çıkan Niğde sancağındaki Bereketli ve Bolkardağı madenleri, Osmanlı Devleti'nin önemli ve büyük madenleri arasında zikredilmiştir.

Osmanlı Devleti madenlerinin işletilmesini ve belli hizmetlerin yerine getirilmesini sağlamak maksadıyla, madende görevlendirilen ahaliye belli muafiyetler tanımıştır. Bazen bu köylülerin maden hizmetleri karşılığında yeterli miktarda ücret alamadıkları durumlar da olmuştur. Ancak; madenlerde istihdam edilen halk, maden hizmeti karşılığında vergilerden muaf oldukları gibi hizmetleri karşılığında ücret de almaktaydılar. Madenlerin gerek idari gerekse teknik anlamdaki işlerinin halledilmesi maksadıyla, muhtelif alanlarda görevliler tahsis edilmiştir. İdari anlamda bu görevliler; emin, maden müdürü, kâtip, mübaşir, naip, muhasebeci, mutemet ve müfettiş idi. Teknik personel ise; ustabaşı ile usta, piristat, kalcı, ifrazcı, herk emini, kantarcı, kalfa ve maden mühendisinden teşekkül idi. Bu görevlilerin haricinde madenin güvenliğini sağlamak için; tüfekçi, süvari ve piyade zabitiyesi görev almıştır. Zikredilen bu görevlilerin haricinde serüstad veya serusta, hademeler, kürek bağlayıcısı, ameleler, baltacılar, kömürciyan, kürün bekçisi, merkepçi zümresi ve hizmetçiler bulunmuştur. Bulgardağı madeni için maden personeli arasında arayıcılar, lağımcılar, taşçılar, tekneciler, dolapçılar, körükçüler, kelekçiler, iskele sırıkçıları, merkepçiler, hazinedar ile tatarlar gibi görevliler de zikredilmiştir. Madenin çıkartılmasına yönelik gerekli hazırlıkların yapılmasında, bu türden görevliler hemen hemen bütün Osmanlı madenlerinde bulunmuştur. Zikredilen görevliler arasında madenin bütün işlerinden sorumlu olan maden emininin madencilik, sosyal, hukuki, iktisadi ve askeri olmak üzere muhtelif alanlarda vazifeleri olmuştur. Bundan dolayı, maden eminlerinin atama ve azledilmelerine ayrı bir hassasiyet gösterilmiştir.

1575 yılına ait Niğde'deki güherçile üretiminde istihdam edilen kişi sayıları haricinde 18. ve 19. yüzyıllarda madenlerde istihdam edilen kişi sayıları hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Bahsi geçen yılda güherçile madeninde istihdam edilen kişi sayıları ise sancak merkezinde 318,

Anduğu'da (Altunhisar) 68, Karahisar-ı Develi'de 112 ve Ürgüb'de 21 olmak üzere toplamda 519 kişidir. Güherçile üretiminde istihdam edilen kişilerin idari dağılımında Niğde sancağından 4 kaza, 1 nahiye, 3 nefs, 68 karye, 8 mahalle, 1 mezra ve 9 cemaat bulunmaktadır. 1831 yılında yapılan Osmanlı Devleti'ndeki ilk nüfus sayımı madenlerde çalışan kişi sayısı hakkında bir değerlendirme yapma olanağı sağlamaktadır. Madenlerde sadece erkekler çalıştırıldığından, mezkûr yılda Niğde sancağında toplam 60.176 erkek nüfus bulunmakta idi. Dolayısıyla net bir rakam verilememekle birlikte, Niğde bölgesindeki madenlerde istihdam edilen kişi sayısının binleri bulduğu değerlendirilmektedir. 1878/1879 yılında ise Niğde kazasının 17.478, Yahyalı nahiyesinin 2.839, Anduğu nahiyesinin 2.628, Şücaüddin nahiyesinin 3.541 ve Çamardı nüfusunun 1.700 kişiden oluştuğu ifade edilmiştir. Bu rakamlar, belirtildiği üzere madenlerde çalışan nüfusun bir hayli kalabalık olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 1845 yılında Bulgardağı Madeni'nde 50 kadar Rum aile çalışmaktaydı. Yine bu madende 1871/1872 yılında 8 güvenlik görevlisi bulunmaktaydı. Bunun yanı sıra aynı yıl, Akdağ kaymakamlığından sadece çağılcı işçisi olarak 400 amele istenmiştir. 1850 yılında Bereketli madeni'nde kürünlerde kurşun üretimi yapan işçilerin sayısı 85 olarak belirtilmiştir.

Bölgedeki madenlerde keşfedilen cevherler işletilmeye açılmadan önce, Darphâne-i Âmire'den gerekli izinleri alma şartı koşulmuştur. Cevherlerin işletilmeye değer nitelikte olduğu Darphâne-i Âmire'de karar kılındıktan sonra, buraya önceden gönderilmiş olan numuneler kalcı ve ifrazcılar tarafından gerekli tetkiklere tabi tutulmuş ve cevhere bir değer biçilmiştir. Verilen bu değerin akabinde cevherin olduğu maden işletilmeye açılmıştır. Tanzimat'tan sonra ise cevherin işletilmesi için yapılan bu işlemi merkezde bulunan Kefçe-i Hümâyûnu'ndaki kalcı ve ifrazcılar uygulamıştır. Ayrıca, merkezden bir mübaşir görevlendirmesi de yapılarak bölgede maden

cevherinin olup olmadığı yerinde tetkik edilmiştir. Madenlerdeki çalışmalar genellikle bahar mevsimlerinde başlayarak güz aylarında bitmiştir. Bu süre, 21 Mart-7 Kasım veya 6 Mayıs-7 Kasım tarihleri arası olarak ifade edilmiştir. Kış mevsimi geldiğinde, elde edilen cevherler iskelelere nakledilmemiş ise depolara taşınmıştır.

2.3. Metal Madenciliğin Bugünü ve Yarını

Cumhuriyetin ilanından sonraki yıllarda, bölgede bulunan madenlerin işletilmesi için birkaç defa girişim yapılmıştır. 1927-1928 yılında madenler üzerinde ayrıntılı jeolojik çalışmalar yapılarak, işletme tesisleri kurulması önerilen fabrika planları hazırlanmıştır. 1935 yılından itibaren Bolkardağ madenlerinde MTA Enstitüsü araştırmalara başlamıştır. 1935-1938 yılları arasında Bolkardağ sahasında Yeşelli, Küçük Toyislam, Keçili ve Timyos mağaralarında bulunan cevherlerin rezerv hesapları yapılmış, işletme galerileri açılmıştır. 1939 yılında Bolkardağ-1,-2 sahası Etibank'a devredilmiştir. 1939-1942 yılları arasında Bolkardağ-1 ve 2 sahasında incelemeler sürdürülerek rezerv hesapları yapılmıştır. Ancak, II. Dünya Savaşı'nın çıkması ile madenlerin işletilmesine başlanamamıştır. Fakat, pek çok araştırmacı gerek jeolojik gerekse madencilik açısından bölgede incelemeler yapmıştır (Çağatay ve Arman, 1989; Tümüklü vd., 2018). 1976 yılında MTA ve Etibank ortak bir proje ile Bolkardağ bölgesinde ayrıntılı araştırmalara başlamış, Pb-Zn cevherleşmesi bakımından önemli olduğu düşünülen yeni sahalarda jeolojik ve jeofizik incelemeler tamamlanmış ve bu sahalarda araştırma sondajları yapılmıştır. MTA'nın jeolojik çalışmalarını yaptığı ve sondajlarla rezervini tespit ettiği saha Etibank'a devredilmiştir. Etibank sahayı bir süre işlettikten sonra, verimli olmadığı gerekçesiyle terk etmiştir. Günümüzde özel sektöre ait Gümüştaş A.Ş.'ye geçen sahada, altın ve gümüş üretim çalışmaları yapılmaktadır (Şekil 7).

Şekil 7. Niğde-Gümüştaş maden işletmelerine ait ocak ve tesisler (Gümüştaş A.Ş., 2024)

Bolkar 1 ve 2 yeraltı madenlerinde üretilen oksitli cevherler, kara yoluyla yaklaşık 40 km mesafedeki Tepeköy cevher zenginleştirme tesisine taşınmaktadır. 526.000 metre karelik alanda hizmet veren tesiste, tank liçi yöntemiyle işlenen cevherlerden dore altın ve gümüş elde edilmektedir. Temmuz 2011'de Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) kararı ile inşaatına başlanan tesis, üretim faaliyetlerine 2012'nin ilk çeyreğinde başlamıştır. Yıllık 130.000 ton cevher işleme kapasitesine sahip tesiste, ortalama 8,5 gr/ton Au ve 220 gr/ton Ag besleme tenörüyle 17 ton/saat tüvenan cevher işlenmektedir. Kesintisiz çalışan tesis; kırma-eleme, öğütme-boyutlandırma, sıcak kireç, liç, katı-sıvı ayrımı, solüsyon hazırlama, bozundurma (detoks), izabe (dökümhane), ADT ve kimyasal reaktif besleme olmak üzere toplam 10 üniteden oluşmaktadır. Tepeköy zenginleştirme tesisi'nde kimyasal analiz laboratuvarının yanı sıra, işlenecek tüvenan cevherden maksimum kazanım elde edilmesi için Ar-Ge çalışmalarının yapıldığı teknolojik test laboratuvarı da bulunmaktadır. Burada; başta altın, gümüş gibi değerli, kurşun, çinko, bakır, demir gibi baz metallerin analizleri yanı sıra, tesiste kullanılan kimyasalların kontrolü ve dore analizleri yapılmaktadır (Gümüştaş A.Ş., 2024). Niğde-Ulukışla Bolkar'da 2023 yılında devreye alınacak 125.000 ton/yıl cevher işleme kapasiteli yeni bir flotasyon tesisi yatırım kararı alan Gümüştaş A.Ş.; bu tesisi besleyecek bir milyon ton

kompleks tüvenan cevher üretimini, derin yeraltı madencilik yöntemiyle Bolkardağı sülfürlü zondan yapmayı planlamaktadır.

3. SONUÇLAR

Madenler üretim ve kullanım ölçüsünde tükenebilen, tekrar yerine konulamayan tabii kaynaklardır. Yerkürede bulunan tabii kaynakların coğrafi ve rezerv dağılımındaki farklılıklar, madenlerin uluslararası ithalat ve ihracatına neden olmaktadır. Dolayısıyla, madencilik faaliyetleri bugün küresel ölçekte aşırı rekabetçi ve stratejik bir pazar ekonomisi haline gelmiştir.

Dünyada ticareti yapılan maden/minerallerin %85'lik bölümünün varlığı ülkemizde belirlenmiş, halen yetmiş'e yakın madenin üretim ve ihracatı yapılmaktadır. Ülkemiz 2023 yılı maden ihracatı geçen yıla oranla %10,9 azalarak 5,748 milyar $ olarak gerçekleşmiştir. İhraç ürünlerimiz arasında 1,990 milyar $ ile metalik cevherler ilk sırada yer alırken, bunu 1,930 milyar $ ile doğaltaşlar ve 1,114 milyar $ ile endüstriyel mineraller izlemiştir (Kahraman, 2022).

Niğde özelinde 1 Ocak-30 Kasım 2023 yılı il verilerine göre, madencilik sektörü toplam 1900 kişiye istihdam sağlamış ve 5.533.480 $ ihracat gerçekleştirmiştir (Şekil 8). Ancak; ilin zengin metalik ve endüstriyel hammadde potansiyeli dikkate alındığında, doğal kaynakların tüvenan olarak değil, daha katma değeri yüksek teknolojik ve uç ürünlere dönüştürülerek satışı/ihracatı yapılmalıdır.

Şekil 8. Niğde ili madencilik sektörü ihracat rakamları ve % değişimi (TİM, 2023)

KAYNAKLAR

Çağatay, A. & Arman, B., 1989. Bolkardağ Sulucadere (Ulukışla-Niğde) Kalay İçerikli Çinko-Kurşun Cevheleşmesinin Mineralojisi, Türkiye Jeoloji Bülteni, Şubat - Ağustos 1989, Cilt 32, 15-20.

Delibalta, M. S. & Türker, A. Ö., 2024. Geçmişten Günümüze Niğde-Ulukışla Bolkardağı Antik Metal Madenciliğinin Önemi, MT Bilimsel, Yer Altı Kaynakları Dergisi, Ocak 2024, Yıl 13, Sayı 25, 47-55.

Demirci, A., 1938. Bolkardağ Madeni, MTA Mecmuası, Ağustos 1938, Ankara, Cilt 4, Sayı 3, 83-90.

Fidan, E., 2016. Tarih Öncesi Dönemlerde Anadolu'da Kullanılmış Olan Maden Yatakları, MT Bilimsel, Yer Altı Kaynakları Dergisi, Ocak 2016, Yıl 5, Sayı 9, 49-59.

Gümüştaş A. Ş., 2024. Niğde Bolkar Madeni, Gümüştaş Madencilik ve Ticaret A.Ş., https://gumustasmaden.com.tr/tr/nigde-bolkar-madeni.html Erişim tarihi:12.12.2024.

Kahraman, M., 2022. Maden sektörü ve ihracat, Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi, 14 (106), 116-117.

Kahya, A., 2018. Madenköy (Ulukışla/Niğde) Yöresi Karbonat Yan Kayaçlı Au-Ag-Zn±Pb Yatağının jeolojisi ve jeokimyası, Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 18 (2018) 015801, 648-663.

Kaptan, E., 1988. Türkiye Madencilik Tarihine Ait Çamardı-Celaller Köyü Yöresindeki Buluntular, IV. Arkeometri Sonuçları Toplantısı, T.C. Kültür Bakanlığı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Başkanlığı, Ankara, 23-27 Mayıs, 1-16.

Kartalkanat, A., 2014. Bolkar Dağlarındaki Eski İşletmeler Vadisinde Yeni Yaş Bulguları ve İlk Maden Ruhsatı: Yazılıtaş (Niğde), Türkiye Jeoloji Bülteni, Nisan 2014, Cilt 57, Sayı 2, 53-71.

Kelebek, G., 2007. Gümüşköy (Ulukışla-Niğde) Curuflarının Asit Maden Drenajı Oluşturma Potansiyeli ve Çevreye Etkisinin İncelenmesi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 110 s., Ağustos, Niğde.

MTA, 2024. Niğde İli Maden ve Enerji Kaynakları, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü, 5s., https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/maden_potansiyel_2010/Nigde_Madenler.pdf Erişim tarihi:12.12. 2024.

Murat, N., 2023. Osmanlı Madenciliğinde Niğde Sancağı'nın Yeri ve Önemi (18. ve 19. Yüzyıllar), Akademik Tarih ve Düşünce Dergisi, 10 (6), 1900-1924.

Şişman, N., & Şenocak, H., 1981. Bolkardağ Yöresinin Jeolojisi ve Maden Yatakları, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 58 s., Haziran 1981.

TİM, 2023. İhracat Rakamları. Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM). https://tim.org.tr/tr/ihracat-rakamlari , Erişim tarihi: 25.12.2023.

Tümüklü, A., Altuncu, S. & Özgür, F. Z., 2018. Niğde Masifinin Maden Yatakları Yönünden Değerlendirilmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayı 3, 1119-1123.

Tümüklü, A., & Tosunbaş, O., 2021. Gümüşler (Niğde) Antimon (Sb) Cevherleşmesinin Mineralojik ve Jeokimyasal Araştırılması, Gazi University Journal of Science, Part A, 8(1): 122-144.

Yener, A., Özbal, H., Kaptan, E., Pehlivan, A. N., & Goodway, M., 1989. Kestel: an early bronze age source of tin ore in the Taurus Mountains, Turkey, Science 244, 200-203.

THE APPLICATION OF ROASTING PRETREATMENT FOR REFRACTORY GOLD ORE FOLLOWED BY CYANIDE LEACHING (HASSAI GOLD MINE)

Ahmedaljaali Ibrahim Idrees Ibrahim
Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

Altijani Abubaker, Osama Babiker, Ahmed Basheer, Elamin Elgak
Omdurman Islamic University Department of Mining Engineering, Khartoum

ABSTRACT: In this study, the roasting process was applied as pre-treatment by studying two factors (Roasting time and temperature) followed by cyanide leaching. The required analysis was conducted on the ore sample and found that it contained 1.5 g/t Gold, The results of the microscopic analysis proved that the rock texture of the sample contains about 90% amorphous minerals, namely (Pyrrhotite) with a brown color at 40% of the ore concentration, (pyrite) round and semi-round granules occupied about 20%, sphalerite semi-round granules 10%, and arsenopyrite 5%.

Direct leaching of the "as-received" ore with cyanide has yielded only 22% gold extraction due to fine gold particles that are encapsulated in sulfidic minerals are not readily extracted, therefore, high-sulfur refractory gold ore cannot be treated effectively using direct cyanidation.

Approximately 92.5% of gold could be recovered under these conditions: roasting (80% passing through 300 microns, time 4.5 min, temperature 650 C) leaching (Cyanide concentration: 1.5 g/L, grinding time: 30 minutes, leaching time: 16 hours, mixing speed: 400 rpm, solid-liquid ratio: ¼, pH:11.6).

Keywords: Hassai Mine, Refractory Gold Ore, Roasting, Gold, Leaching

1. INTRODUCTION

According to statistics, over one-third of the world's gold production comes from refractory gold, while roughly two-thirds of the world's gold resources are found in hard-to-process ores. In the future, this percentage will rise even

further. For this reason, pretreatment of refractory gold is crucial (Zhou, TIAN et al. 2009).

The mine has yielded about 85 t of gold from its three deposits (Hassai S, Hadal Adawatib E, and Hadayamet). It was reviewed that "Au-rich VHMS" class of deposits, Hassai is one of the class's largest representatives, with 76 tons of gold content and a mean grade of 9.74 g/t (Mercier-Langevin, Dubé et al. 2007).

The primary mineral association was pyrite ± chalcopyrite ± sphalerite, with a noticeable lack in base metals (1.3% Cu, 2% Zn on average) and a very low Pb content, in good agreement with the oceanic setting of the Ariab arc. The gold grade varies from 2 to 3 g/t as an average (Abu Fatima 2006).

Basically, Refractory gold ores, with an average gold recovery efficiency of <50% using direct cyanidation, are divided into sulfide, tellurium, and carbon ore types. Because sulfide gold ores make up a significant fraction of refractory gold ores, recovering gold from them is extremely important (Qin, Guo et al. 2021).

Typically, gold is encapsulated or finely disseminated in refractory gold ores, and direct cyanidation is ineffective for gold extraction from these ores, even after the ore is ground up to small particles (Fairley 1998). Numerous oxidation pretreatment procedures, including pyrometallurgical techniques, have been proposed to recover gold from sulfide refractory gold ores, and Table 1 provides a detailed description of the respective pretreatment technologies. A significant aspect of these procedures is that they convert sulfides into oxides or sulfates, allowing gold to be easily leached.

Table 1. A detailed description of the respective pretreatment technologies.

Processes	**Basic principles**
Conventional roasting (Hammerschmidt, Güntner et al. 2016). And (Lin, Liu et al. 2019).	S, As and C in ores are oxidized and volatilized, and the mineral structure or gold-robbing materials are destructed.
Microwave roasting (Hu, Chen et al. 2017) and (Amankwah and Pickles 2009).	The material composed of polar molecules absorbs microwave better and converts it into heat.
Additive enhanced process (Liu, Wang et al. 2019) and (Qin, Guo et al. 2021).	The addition of additives changes the phase transformation process or changes the reaction process to form new phases during roasting.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

The high-sulfur and high-arsenic refractory gold ore used in this study was obtained from Ariab Gold & Mining Group Co., Ltd., Sudan. The sulfide refractory gold was dried for 12 h using a drying oven at 60 °C, the sample was crushed less than 12.5 mm using a primary jaw crusher and then grounded in a ball mill for 5, 10, and 15 minutes. Chemical reagents used in this study were of analytical grade and purchased from local suppliers. The XRD shows that the main contents of the raw gold ore are (Pyrrhotite) with a brown color at 40% of the ore concentration, (pyrite) round and semi-round granules occupied about 20%, sphalerite semi-round granules 10%, and arsenopyrite 5%. The sulfide refractory gold ore contains 41.578% Fe, and 43.409% S, the total content of Fe and S is up to 80% of the sulfide refractory gold ore. The size of the gold grains was measured to be about 5 microns.

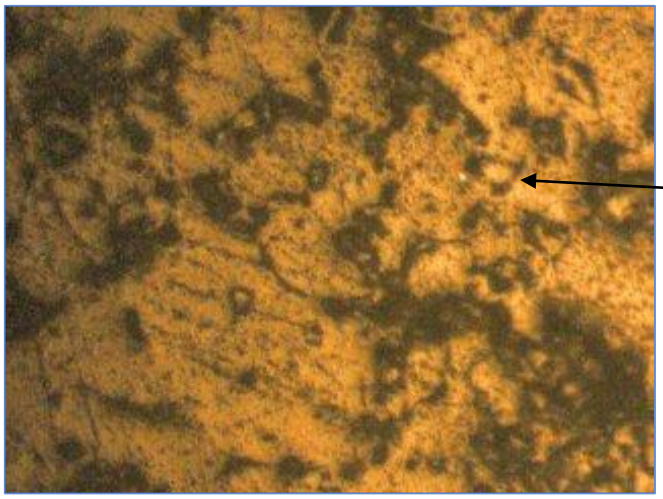


Figure 1. The gold grain in the sample for microscopic analysis in the polished sample.

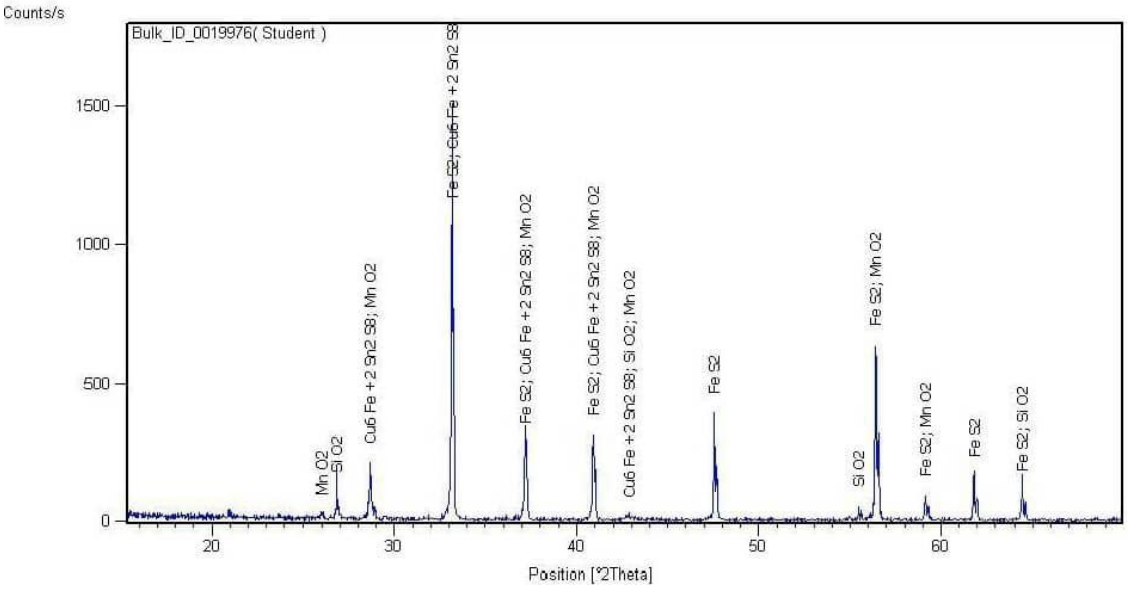


Figure 2. The XRD Analysis result

2.2. Experimental procedures

2.2.1. Direct leaching:

Direct leaching experiments were performed with ore samples ground for 10, 20, and 30 minutes to identify optimal conditions for maximizing gold recovery. The effects of cyanide concentration, mixing speed, solid-to-liquid ratio, and leaching time on gold recovery were systematically investigated.

2.2.2. Roasting tests:

Roasting tests were conducted using a PREE-770 G2 furnace. For each test, 50 g (80% passed through 300 microns) of sulfide refractory gold ore was placed in a quartz porcelain boat, two factors were investigated (roasting time and temperature, once the furnace reached the target temperature (450, 500, 550, 600, 600, 650) the samples were then roasted for a predetermined duration. After roasting, the resulting slags were removed from the quartz porcelain boat, collected, and subjected to further leaching tests.

2.2.3. Leaching Tests Following Roasting:

In each experiment, 5 g of roasted slag and 200 mL of distilled water were added to a 500 mL flask equipped with a mechanical stirrer. Leaching was conducted under the optimal conditions identified from direct leaching tests: cyanide concentration of 1.5 g/L, grinding time of 30 minutes, leaching time of 16 hours, mixing speed of 400 rpm, a solid-to-liquid ratio of 1:4, and pH 11.6.

After leaching, the solution was filtered, and the residue was dried for 8 hours at 100 °C. Gold (Au) content in the dried residue was then determined by fire assay to calculate the leaching efficiency of Au, using the following formula:

$$R = (\omega l * ml) / (\omega r * mr)$$

where ωl (g/t) is the element content of Au in the leaching residue, ml (g) is the weight of the leaching residue. ωr (g/t) Au content in the roasted gold ore, mr (g) weight of roasted gold ore

3. RESULTS AND DISCUSSION

As grinding time increases, the extraction percentage generally increases. This indicates that finer particle sizes, achieved through longer grinding, enhance the accessibility of gold to the leaching solution.

The plot suggests that there is an optimal leaching time for maximum extraction. Beyond this point, increasing leaching time might not lead to significant improvements or could even result in a slight decrease in extraction. This could be due to factors like solvent loss or degradation over extended periods.

The shape of the surface indicates that the effect of grinding time on extraction is influenced by leaching time. For instance, the positive impact of grinding time might be more pronounced at certain leaching times than others. This suggests that the two factors are interdependent.

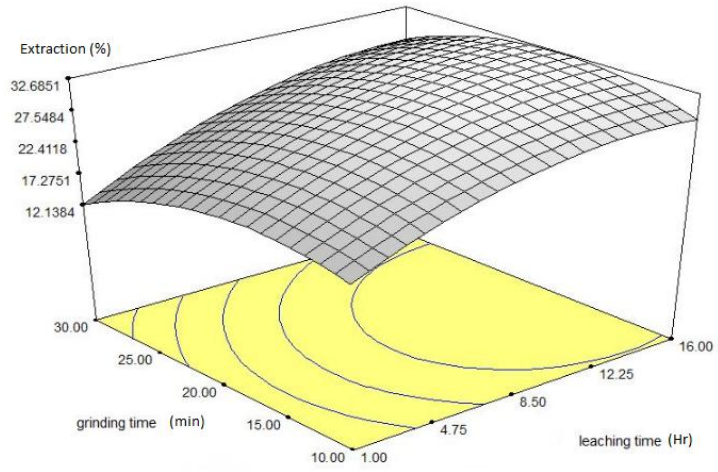


Figure 3. The effect of leaching and grinding time on the percentage of gold extraction.

As cyanide concentration increases, the extraction percentage generally increases. This is because cyanide is a strong complexing agent

that forms soluble gold cyanide complexes, facilitating the dissolution of gold from the ore.

The shape of the surface indicates that the effect of cyanide concentration on extraction is influenced by leaching time. For instance, the positive impact of increasing cyanide concentration might be more pronounced at certain leaching times than others. Also, two factors are interdependent.

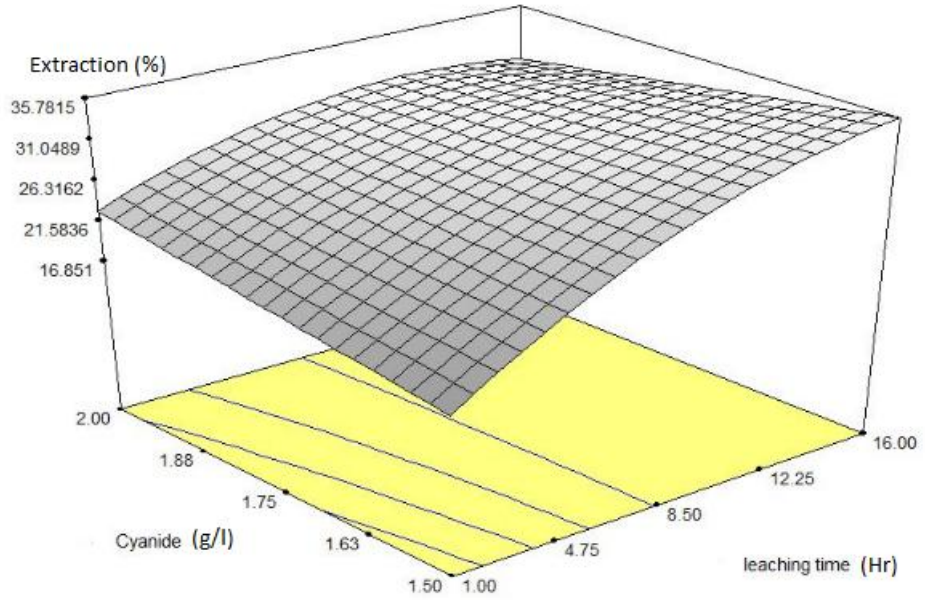


Figure 4. The effect of leaching time and cyanide concentration on the percentage of gold extraction.

As grinding time increases, the extraction ratio generally increases. This indicates that finer particle sizes, achieved through longer grinding, enhance the accessibility of the target material to the cyanide solution.

The shape of the surface indicates that the effect of grinding time on extraction is influenced by cyanide concentration. For instance, the positive impact of increasing grinding time might be more pronounced at certain cyanide concentrations than others. This suggests that the two factors are interdependent.

To determine the effect of the leaching time on the extraction rate of gold, experiments were conducted at various times (1–16 hr.) with cyanide 2 g/L concentration pulp density 25%, Ph 11.64, stirring speed of 100 rpm.

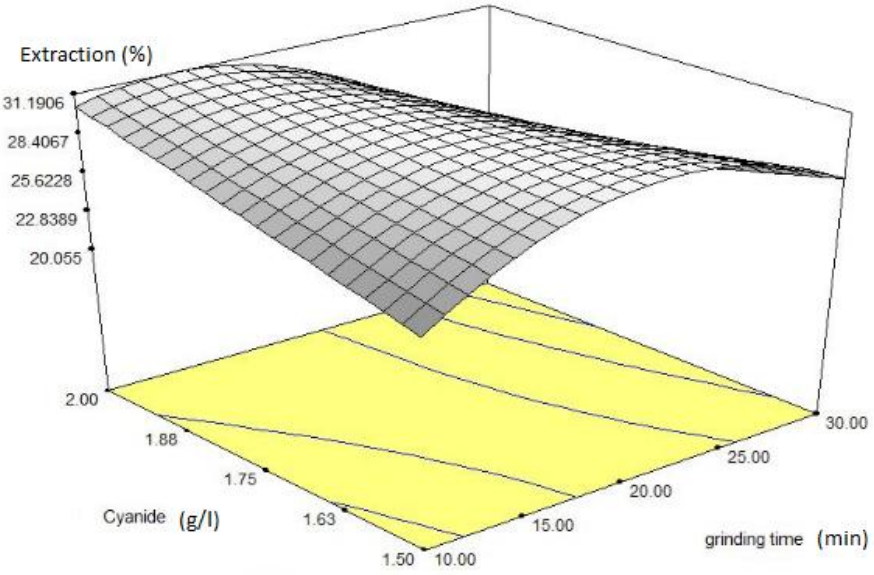


Figure 5. The effect of grinding time and cyanide concentration on the extraction ratio

As leaching time increases, the extraction percentage generally increases. This indicates that more gold is being dissolved from the ore over longer periods.

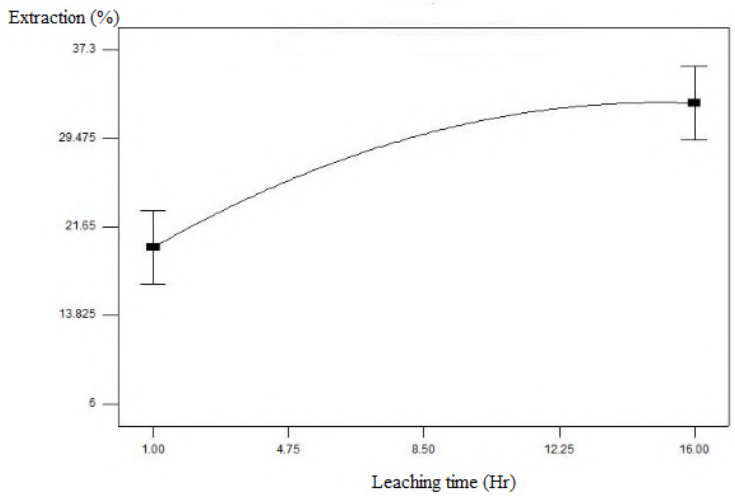


Figure 6. The relationship between the leaching time and the percentage of gold recovery.

The curve eventually reaches a plateau, suggesting that increasing leaching time beyond a certain point does not significantly improve extraction. This could be due to factors like equilibrium being reached or the exhaustion of the gold-bearing mineral.

As temperature increases, the percentage of weight loss generally rises, indicating that more volatile components are released from the refractory material. This relationship is not strictly linear, as there may be sections where weight loss speeds up or slows down, likely due to different volatile components with unique decomposition energies. In some cases, the weight loss curve may level off, suggesting that most volatile components have been removed at that temperature, so further increases do not result in significant additional weight loss.

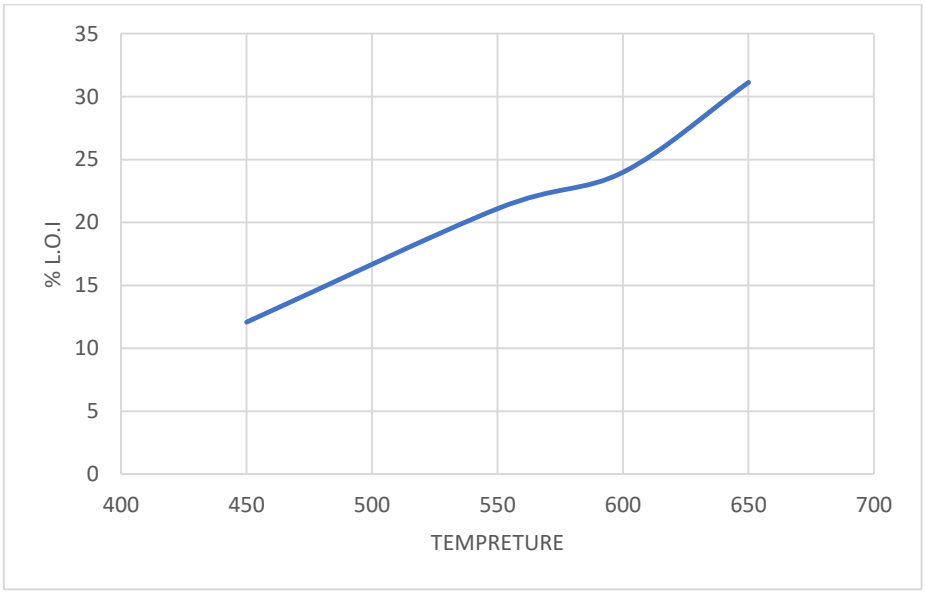


Figure 7. The weight loss at different temperatures

As temperature increases, the enrichment ratio also tends to increase, indicating that higher temperatures favor the formation of the desired product. The plot shows an optimal roasting time for maximum enrichment at each temperature, beyond which further roasting may reduce enrichment

due to over-roasting or degradation. This suggests that temperature and roasting time influence each other, with temperature having a stronger effect at certain roasting times.

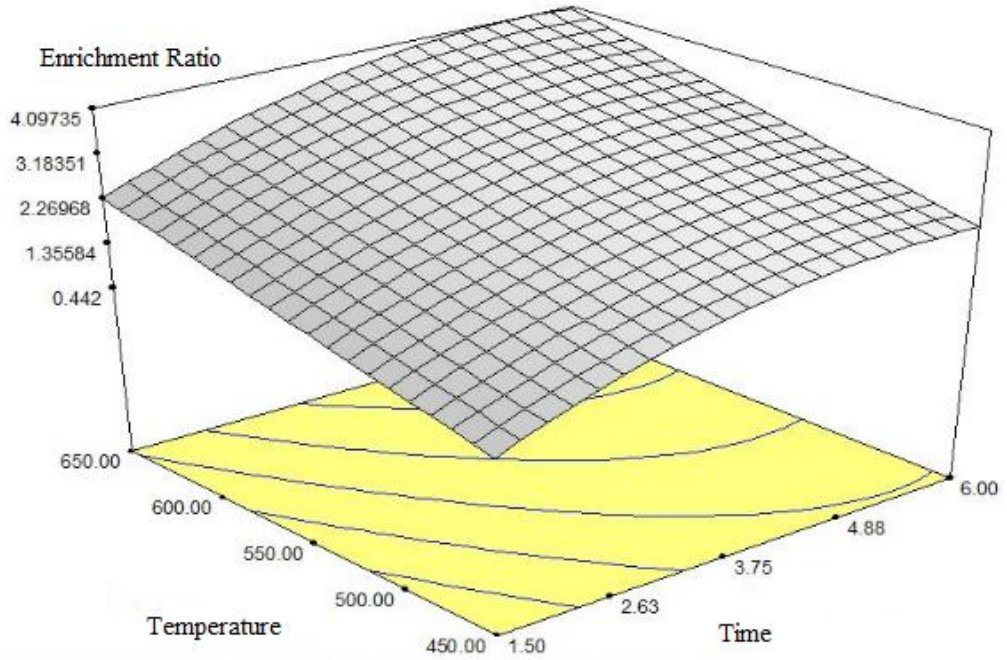


Figure 8. The influence of temperature and time of roasting on the enrichment ratio.

4. CONCLUSIONS

This study demonstrated gold extraction from high-sulfur refractory ores by applying roasting as pre-treatment followed by cyanide leaching under ideal conditions. The research focused on understanding the impact of different parameters for both roasting and leaching such as roasting temperature, roasting duration, cyanide concentration, grinding time, leaching time, and mixing speed on the efficiency of gold recovery. The roasting process played a vital role in breaking down the complex structure of the high-sulfur refractory ore, thus enabling higher cyanide accessibility and subsequent gold leaching by converting sulfide minerals to oxides.

The results show that finely ground ore, along with accurate roasting and leaching conditions, greatly increases gold recovery from refractory sulfide ores. According to the results, it was found that the optimum conditions for the highest gold recovery are:

Roasting: (4.5 hours and 650 C^0).

Leaching: (cyanide concentration: 1.5 g/L, grinding time: 30 minutes, leaching time: 16 hours, mixing speed: 400 rpm, solid-liquid ratio: ¼, pH:11.6) achieved a recovery efficiency of 92.5%

This technology provides a realistic avenue for effective and sustainable gold recovery from refractory ores, which may inspire future extraction processes at similar mining sites.

REFERENCES

Abu Fatima, M., 2006. Metallogenic genesis and geotectonic evolution of the Polymetallic massive sulphides and the associated gold deposits at Ariab-Arbaat Belt, Red Sea Hills, Sudan. Unpublished Ph. D. thesis, Henri Poincare University, Nancy, France, 340p.

Amankwah, R., & Pickles, C., 2009. Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrate." Minerals Engineering, 22(13), 1095-1101.

Fairley, L. M., 1998. A survey of conventional and novel processes for the treatment of refractory gold, University of British Columbia.

Hammerschmidt, J., Güntner, J., & Charitos, A., 2016. Roasting of gold ore in the circulating fluidized-bed technology. Gold ore processing, 393-409.

Hu, N., Chen, W., Ding, D., Li, F., Dai, Z., Li, G., Wang, Y., Zhang, H., & Lang, T., 2017. Role of water contents on microwave roasting of gold bearing high arsenic sulphide concentrate. International Journal of Mineral Processing, 161, 72-77.

Lin, J., Liu, C., Cao, H., Chenm, R., Yang, Y., Li, L., & Sun, Z., 2019. Environmentally benign process for selective recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by using conventional sulfation roasting. Green Chemistry, 21(21), 5904-5913.

Liu, P., Wang, Z., Xiao, Y., Horstemeyer, M. F., Cui, X., & Chen, L., 2019. Insight into the mechanisms of columnar to equiaxed grain transition during metallic additive manufacturing. Additive Manufacturing, 26, 22-29.

Mercier-Langevin, P., Dubé, B., Hannington, M. D., Richer-Laflèche, M., & Gosselin, G., 2007. The LaRonde Penna Au-rich volcanogenic massive sulfide deposit, Abitibi greenstone belt, Quebec: Part I. Geology and geochronology. Economic Geology, 102(4), 585-609.

Qin, H., Guo, X., Tian, Q., Yu, D., & Zhang, L., 2021. Recovery of gold from sulfide refractory gold ore: Oxidation roasting pretreatment and gold extraction. Minerals Engineering, 164, 106822.

Zhou, Y., 2009. Progress in the pretreatment technology for arsenic removal from high arsenic gold ore. Metal Mine, 2, 98-101.

YERALTI METAL MADENİ PATLATMALARINDA PATLATMA TASARIMI VE PARÇALANMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF BLAST DESIGN AND FRAGMENTATION FOR UNDERGROUND METAL-MINING BLASTS

Türker Hüdaverdi, Yaşar Ağan
İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZ: Bu çalışmada bir yeraltı metal madeninde patlatma tasarımı ve parçalanma verimliliği incelenmiştir. Atım tasarımı bilgisayar yazılımına aktarılarak ateşleme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gözlenen atımlarda delik boyu 4 metre, delik çapı ise 48 milimetredir. Patlatma paralel kesme tekniği ile gerçekleştirilmektedir. Suni serbest yüzey yaratmak amacıyla kesme bölgesinde 4 adet 89 mm boş delik delinmektedir. Şarj işleminde ANFO ve emülsiyon patlayıcılar birlikte kullanılmaktadır. Toplam kullanılan patlayıcı yaklaşık 170 kilogram olarak belirlenmiştir. Özgül şarj 1,92 kg/m^3 mertebesindedir. Özgül delme 2,80 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Ateşleme için uzun gecikmeye sahip elektriksiz kapsüller kullanılmaktadır. Atımın ateşlenmesi yaklaşık 7 saniyede tamamlanmaktadır. Ateşleme konturları çizilerek incelenmiş ve ateşlemenin paralel delikler ile patlatma tekniğine uygun olduğu görülmüştür. Ateşleme sırasında anlık şarjın değişimi analiz edilmiştir. En fazla aynı anda ateşlenen delik, 2500. milisaniyede patlayan 10 adet duvar deliğidir. Maksimum anlık patlayan şarj miktarı 27,96 kg olarak hesaplanmıştır. Atım sonrası yığından alınan ölçekli görüntüler, görüntü işleme yazılımı ile değerlendirilmiştir. Yığının ortalama parça boyutu 9,34 ile 15,77 cm arasında değişmektedir. Ortalama üniformite indeksi 1,62 mertebesindedir. Yan deliklere yerleştirilen kontur patlayıcıların özellikle aşırı sökümün önlenmesinde faydalı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Paralel Kesme, Parçalanma, Anlık Şarj, Ortalama Parça Boyutu

ABSTRACT: *In this study, blast design and fragmentation efficiency were investigated in an underground metal mine. The blast design was imported in a computer software and an initiation simulation was created. The hole diameter is 48 mm and the hole length is 4 meters. Burn-cut technique was*

applied for blast design. Four 89 mm empty holes were drilled in the cut region to create an artificial free face. ANFO and emulsion explosives were charged into blastholes. Total explosive charge is 170 kg in a round. Specific charge is 1.92 kg/m^3. The specific drilling is 2,80 kg/m^3. Long-delay non-electric detonators were used for initiation. The initiation was completed in 7 seconds. The initiation contours were drawn to inspect initiation sequence. The initiation was appropriate for a burn-cut blast pattern. Variation of instantaneous explosive charge was inspected during detonation. Maximum 10 holes were detonated in the 2500. millisecond. The maximum instantaneous explosive charge is 27,96 kilograms. After each blast, the scaled images were captured from blast muckpiles and analyzed using image processing software. The mean particle size of muckpiles ranges between 9.34-15.77 cm. The mean uniformity index is 1.62. The contour explosives loaded in the wall holes were found to be useful in preventing overbreak.

Keywords: *Burn-Cut, Fragmentation, Instantaneous Charge, Mean Fragment Size*

1. GİRİŞ

Yeraltı metal madenciliğinde cevherin yapısı nedeniyle kayaç kazısı patlayıcılar ile gerçekleştirilmektedir. Patlatma işleri üretim operasyonunun ilk aşaması olduğu için, patlatma verimi kendinden sonraki işlemleri de etkilemektedir. Galeri patlatmalarında mümkün olduğunca istenen ilerlemenin elde edilmesi arzulanır. Ek olarak yan ve tavan deliklerinde aşırı sökümün az olması hedeflenir. Bu amaçla çevre deliklerinde şarj miktarı bir miktar düşürülebilir. Atım sonrası yığının kolaylıkla yüklenebilir bir parça boyutuna sahip olması istenir. Ek olarak özellikle yerleşim yerlerine yakın patlatmalarda titreşim seviyesinin az olması beklenir. Yeraltı madenciliğinde titreşimin yakınlardaki tahkimatın stabilitesine zarar vermesi de mümkündür. Genellikle yeraltında uzun gecikmeye sahip kapsüller ile ateşleme yapılır (Johansen vd., 2000, Stiehr, 2011).

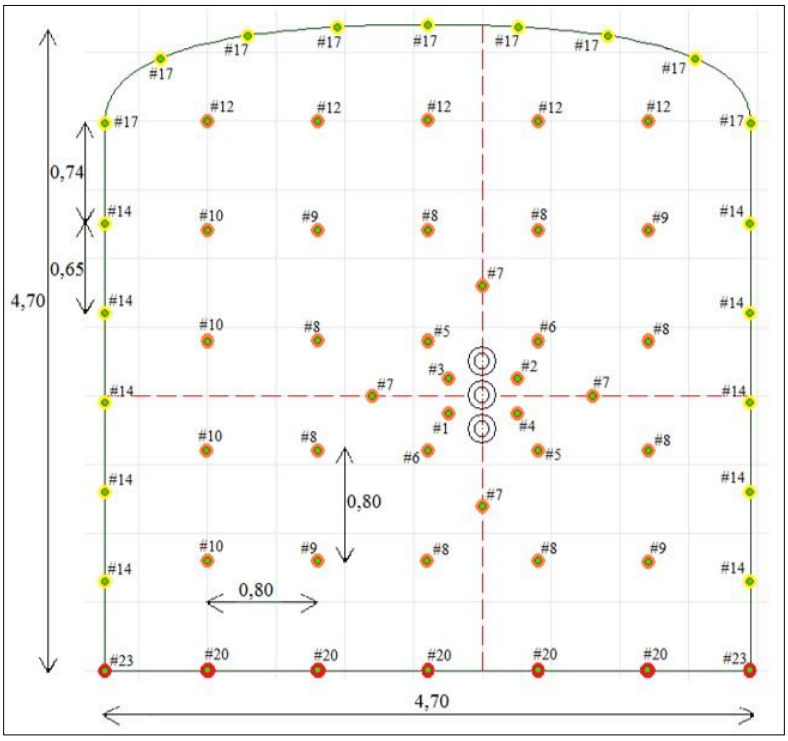
Bu çalışmada Kastamonu Küre yeraltı bakır madeninde gerçekleştirilen galeri patlatmaları incelenmiştir. Ocakta paralel delikler ile (burn-cut) patlatma yapılmaktadır. Bu patlatma tekniğinde tüm delikler birbirine paralel olarak delinir. Serbest yüzey oluşturmak için genellikle kesme bölgesine üretim deliklerinden daha geniş delikler açılır. İlk patlayan kesme delikleri bu boşluğa doğru hareket ederler. V-kesme tekniğinin aksine paralel kesme yönteminde deliklerin delinmesi daha kolay olduğu için bu yöntem daha çok tercih edilir. Kimi araştırmacılar paralel kesme tekniğinin üretim verimliliğini ve ilerleme miktarını artırdığını iddia etmektedir (Jimeno vd., 1995, Bhandari vd., 1997).

Patlatma verimliliğin incelenmesi için son yıllarda çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmaya başlanmıştır (Hüdaverdi ve Ağan, 2023, Milanovic vd., 2024). Bu çalışmada arazide incelenen patlatma tasarımı JKSimBlast yazılımına aktarılarak incelenmiştir. Simülasyon yazılımı ateşleme düzeninin ayrıntılı olarak incelenmesini sağlar. Ek olarak gerektiği zaman enerji dağılımı incelenebilir. Bu bildirinin 2. ve 3. kısmında patlatma tasarımı ve ateşleme düzeni yazılım yardımıyla irdelenmiştir. Atım sonrası yığından ölçekli fotoğraflar alınmış ve patlatma için üretilen özel bir görüntü işleme yazılımı ile yığının parça boyut dağılımı tespit edilmiştir. Açık ocaklarda sıkılıkla kullanılan görüntü işleme tekniğinin yeraltında da kullanılması ile atım verimliliği daha gerçekçi değerlendirilecektir. Bildirinin 4. Bölümü parçalanma analizine ayrılmıştır. Son bölümde ise bulguların genel bir değerlendirmesi mevcuttur.

2. GALERİ PATLATMA TASARIMI

Patlatma aynalarında deliklerin konumu ve ateşleme sırası Şekil 1'de verilmiştir. Atım bölgesinin ortasında 3 adet 89 mm boş delik mevcuttur. Bu

delikler suni serbest yüzey olarak görev yapmaktadır. Diğer tüm delikler 48 mm delinmektedir. Atım boyu yaklaşık 4 metredir. Taban delikleri, alt ve üst tarama delikleri arası mesafe 80 cm'dir. Yan delikler arası mesafe 65 cm'dir. Taban delikleri 63-64 cm aralıklar ile delinmektedir. Özellikle kesme bölgesinde delik yoğunluğu fazla ve delikler arası mesafe kısadır. İlk patlayan delikler boş deliklerin sağ ve solunda bulunan 4 adet kesme deliğidir.



Şekil 1. Madende uygulanan patlatma tasarımı

Çizelge 1'de kullanılan patlayıcıların teknik özellikleri sunulmaktadır. Taban deliklerine 8 adet emülsiyon kartuş patlayıcı şarj edilmektedir. Çevre deliklerine kapsül yerleştirilmiş bir adet emülsiyon patlayıcı ve 4 adet kontur patlayıcı konulmaktadır. Kontur patlayıcıların kullanılma amacı aşırı kırmayı engellemektir. Bu patlayıcılarda patlayıcı çapı delik çapından daha düşük olduğu için delikte beher metre başına şarj konsantrasyonu düşmektedir (Zhang, 2016). Üretim deliklerinde ve çevre deliklerinde delik

dibine kapsül içeren bir adet kartuş patlayıcı konulmakta ardından 1,5 m ANFO şarj edilmektedir. Delikte su bulunmuyorsa ANFO patlayıcı verimli ve bir ucuz bir seçenektir.

Çizelge 1. Kullanılan patlayıcılar

Özellik	ANFO	Kartuş Emülsiyon	Kontur Patlayıcı
İdeal İnfilak Hızı, VOD	4796 m/sn	5700 m/sn	5485 m/sn
Enerji	3810 kj/kg	4200 kj/kg	2980 kj/kg
Yoğunluk	0,8 g/cm^3	1,16 g/cm^3	1,1 g/cm^3
İnfilak Isısı	3059 K	2852 K	2120 K
Gaz Hacmi	978 lt/kg	872 lt/kg	905 lt/kg
Kartuş Ebadı ve Ağırlığı	–	36x420 mm 500 g	19 x735 mm 223 g
Suya Dayanım	Yok	Mükemmel	Mükemmel

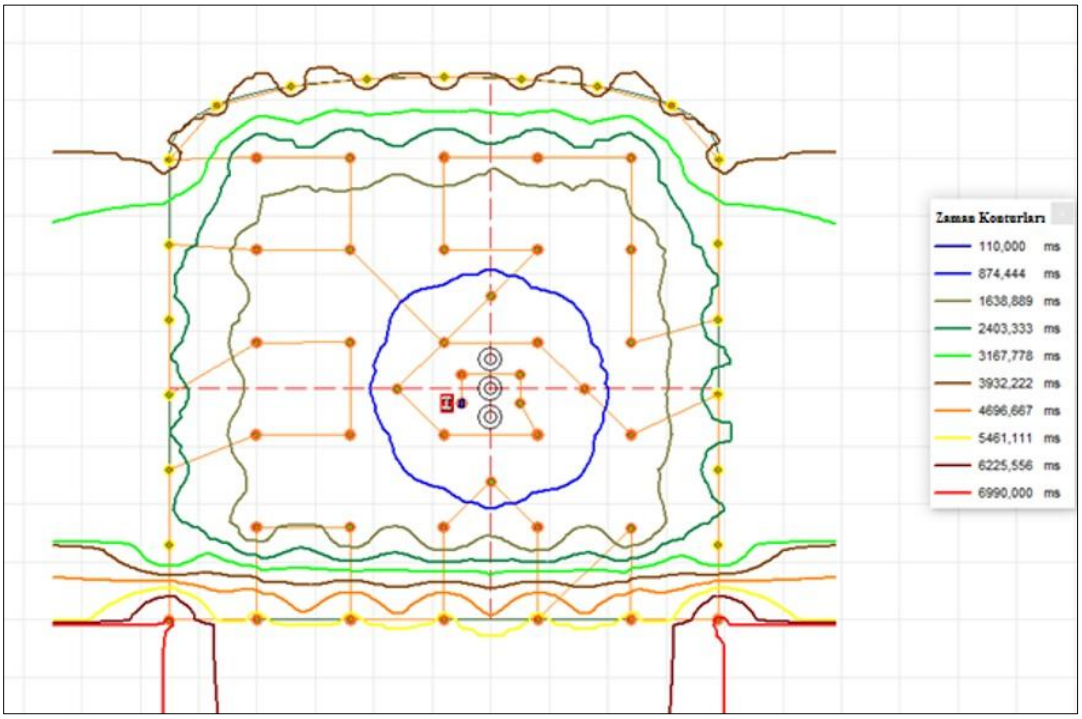
Patlatma tasarımı ile ilgili hesaplanan büyüklükler Çizelge 2'de sunulmuştur. Özgül şarj paralel kesme atımlarından beklenen seviyededir. Özgül şarj sert kayaçta 3 kg/m^3 değerine kadar ulaşabilir. Özgül delme metreküp başına delinen kayaç miktarıdır. Tavan ve yan deliklerde şarj miktarı kontur patlayıcıların kullanımıyla düşürülmüştür. Üretim deliklerinde doğrusal şarj miktarı 0,87 kg/m iken, tavan ve yan deliklerde bu değer 0,35 kg/m mertebesindedir.

Çizelge 2. Hesaplanan patlayıcı tüketim değerleri

Kesme-üretim deliklerindeki şarj miktarı	3,495 kg (emülsiyon +ANFO)
Tavan-Yan deliklerde şarj miktarı	1,392 kg (emülsiyon + kontur)
Taban deliklerinde şarj miktarı	4 kg (emülsiyon)
Özgül şarj	1,92 kg/m^3
Taban kısmında özgül şarj	2,29 kg/m^3
Özgül delme	2,80 m/m^3

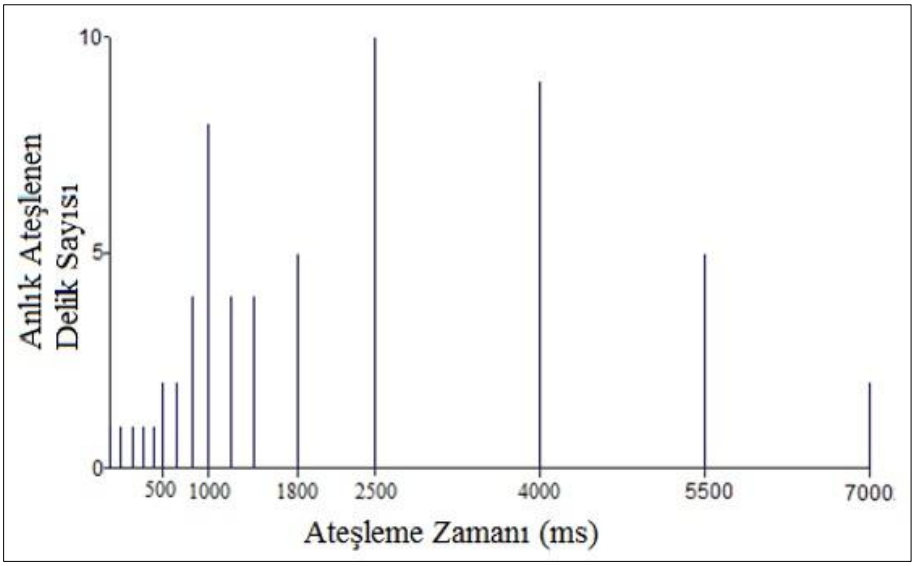
3. ATEŞLEME DÜZENİ

Ateşleme için yeraltı patlatmalarına uygun uzun gecikme sürelerine sahip kapsüller kullanılmıştır. Yeraltı patlatmalarında serbest yüzey daha az olduğu ve atım daha sıkışmış bir alanda gerçekleştiği için kapsüllerin gecikme aralığı fazladır. Kapsül numaraları Şekil 1'de verilmiştir. 1-5 No'lu kapsüllerde gecikme 100 ms aralıkla artmaktadır. 6-13 No'lu kapsüllerde gecikme 200 ms aralıkla artar. Tavandaki 17 No'lu kapsüllerin gecikme süresi 4000 milisaniyedir. Son patlayan 23 No'lu kapsüllerin gecikmesi 7000 ms'dir. Aşağıda Şekil 2 ateşleme sonrası oluşan zaman konturlarını göstermektedir (JKSimBlast, 2006). Zaman konturları bize ateşlemenin doğru bir çerçevede ilerleyip ilerlemediğini göstermektedir. 110 ms konturu kesme bölgesinden geçmektedir (Şekil 2). Konturlar incelendiğinde ateşlemenin merkezde başladığını ve atım bölgesinin kenarlarına doğru ilerlediğini görmek mümkündür.



Şekil 2. Ateşleme Konturları

Şekil 3'de anlık şarjın değişim grafiği verilmiştir. Ateşleme ayrıntılı olarak incelendiğinde 0–1800 ms aralığında yoğun ateşlemenin olduğu görülür. 0-1000 ms aralığında kesme bölgesinde birbirine yakın delikler patlamaktadır. En fazla 10 adet delik 2500. milisaniyede patlamıştır. Bu delikler 14 No'lu gecikme kapsülüne sahip çevre delikleridir. Çevre deliklerinde patlayıcı az olduğu için birlikte patlayan şarj miktarı 13,92 kg'dır. Maksimum anlık şarj ise 1000. milisaniyede ortaya çıkmaktadır (Şekil 3). 1000. milisaniyede 8 adet 8 No'lu üretim deliği patlamaktadır. Maksimum anlık şarj 27,96 kilogramdır.



Şekil 3. Anlık şarjın değişim grafiği

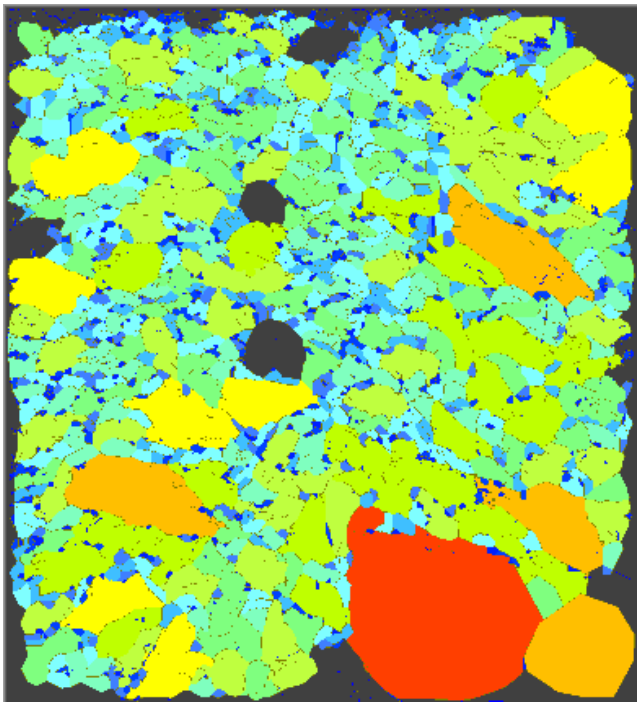
4. PARÇALANMANIN ANALİZİ

Patlatma sonrası parçalanmanın tespiti için yığından ölçekli fotoğraflar alınmıştır. Aşağıda Şekil 4'de 400 sika cebi hazırlık galerisinde yığından alınan fotoğraf görülmektedir. Görüntüde 2 adet 21 cm çaplı plastik tabak ölçek olarak kullanılmıştır. Görüntü yazılıma yüklendikten sonra alt ve üst ölçeğin boyutu tanımlanır. Ardından yazılım özel bir algoritma ile parçaların

sınırlarını belirler. Yeraltından örnek alırken en önemli konu ışıklandırmadır. Şekil 4'de fotoğraf alınırken kepçenin ışığı kullanılmıştır.

Şekil 4. Analiz için yığından alınan ölçekli fotoğraf

Görüntü işleme yazılımı öncelikle kayaç parçalarının sınırlarını temsil eden bir ağ oluşturmaktadır. Ardından yığın için parça boyutlandırması yapılır (Maerz vd., 1996). Boyutlandırması yapılmış yığın görüntüsü Şekil 5'de sunulmuştur. Her renk farklı boyut aralıklarını temsil etmektedir. Fotoğraftan da anlaşılacağı gibi koyu mavi renkle gösterilen parçalar ince parçalardır. Daha sonra boyut büyüdükçe sırasıyla açık mavi, yeşil, sarı gelmektedir. Parça boyut dağılım geniş bir aralığa sahipse parça boyutu renkleri sarıdan sonra turuncu ve kırmızı olarak devam etmektedir. Program otomatik olarak sınırları belirlese de düzeltmeler için kullanıcı müdahalesi zorunluluktur.

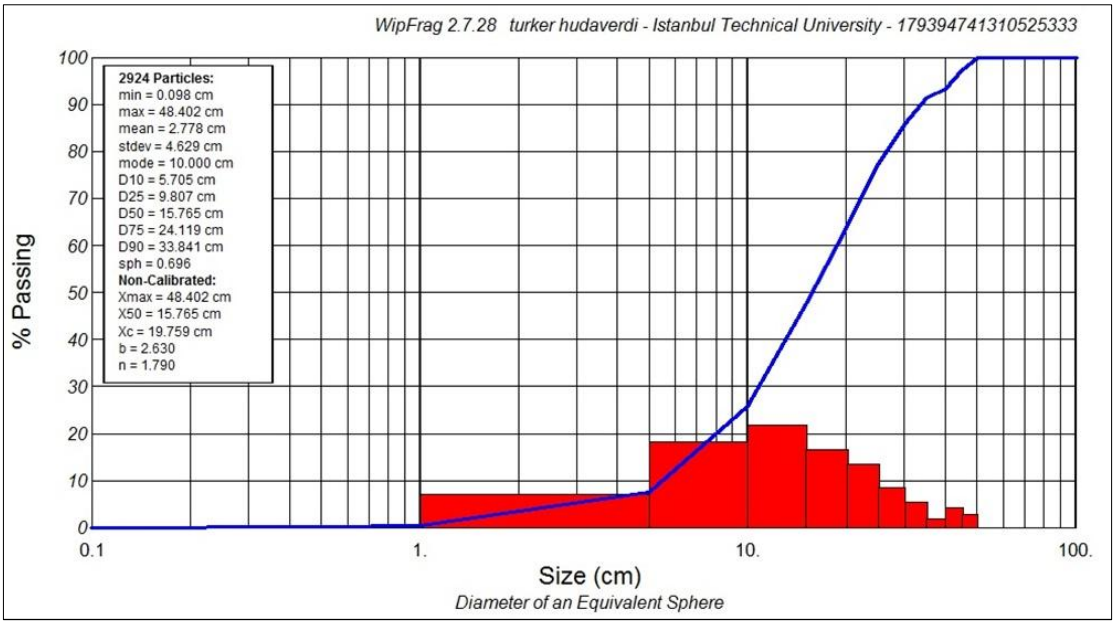


Şekil 5. Boyutlandırılması yapılmış yığın fotoğrafı

Yığının genişliğine göre yığını temsil eden birden fazla fotoğraf alınabilir. Yazılım birleştirme "merge" tekniği kullanarak birden fazla analizi birleştirerek tek bir parça boyut dağılım eğrisi oluşturabilir. Analize ait eğri Şekil 6'da verilmiştir. Bu örnek atımda ölçülen en büyük paraca boyutu 48,4 cm'dir. Üniformite indeksi (n) 1,790 civarındadır. Bu değer eğrinin eğimini temsil etmektedir. Üniformite indeksinin yükselmesi boyut dağılımının daha dar bir aralıkta olduğunu gösterir. Ortalama parça boyutu yani malzemenin %50'sin geçtiği elek açıklığı bu atımda 15,77 cm olarak gerçekleşmiştir (Şekil 6). Toplam 2924 parça ölçülmüştür. Yazılım parçaların küreselliğini de ölçebilir. Bu değer 0,69 bulunmuştur. Özellikle agrega gibi parça şeklinin önemli olduğu malzemelerde bu değere başvurulur.

Parçalanmanın analizi için sekiz farklı atım gözlenmiştir. Ölçülen atımlar Baki Baba ocağında gerçekleştirilmiştir ve birbirini takip eden atımlar incelenmiştir. Atım yapılan lokasyon sınırlı bir kısım olduğu için

jeolojide önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bölge jeolojisi ile ilgili detaylı bilgi için Demir'e (2012) ait lisansüstü tez incelenebilir.



Şekil 6. Örnek atıma ait parça boyut dağılım grafiği.

Çizelge 3'de incelenen 8 atıma ait karakteristik boyut parametreleri verilmiştir. D90 malzemenin %90'ının geçtiği elek açıklığıdır. Bu değer 5. Atımda 33,84, 6. Atımda 35,96 cm olarak gerçekleşmiştir. Bu iki atımda 30 cm'den büyük iri parçaların daha fazla olduğu söylenebilir. D10 boyutu yığındaki ince malzeme hakkında fikir verebilir. 1, 2 ve 3 No'lu atımda ince boyutlu malzemenin oranı 2,5 cm'nin altındadır. Xc karakteristik boyut olarak adlandırılır ve malzemenin %63,2'sinin geçtiği elek açıklığını belirtir. Karakteristik boyut teorik olarak Rosin-Rammler eğrisinin çizilmesinde ve çok sıklıkla başvurulan KuzRam parçalanma modelinde kullanılmaktadır (Cunningham, 2005, Akyıldız ve Hüdaverdi, 2016). Araştırma sonunda ölçülen 8 atımın ortalama üniformite indeksi 1,62 bulunmuştur (Çizelge 3). Atımlarda parçalanma konusunda önemli bir farklılık yoktur. Karakteristik boyuta bakıldığı zaman ortalamasının 16,83 cm, standart sapmasının ise 2,5

cm olduğu görülür. Kuşkusuz her atım farklı bir olaydır. Atım sonuçlarını kontrol edilen ve edilemeyen birçok parametre belirler. Patlatma işlemi laboratuvar ortamında kontrollü bir deney olmadığı için atım sonrası tamamen aynı değerleri elde etmek mümkün değildir.

Çizelge 3. İncelenen atımların parçalanma analizi sonuçları

Atım No	D10 (cm)	D50 (cm)	D90 (cm)	Xc (cm)	n
1	2,08	9,67	29,64	16,25	1,70
2	2,26	9,34	23,30	12,87	1,42
3	2,19	8,78	30,72	12,73	1,68
4	5,61	14,96	32,45	19,16	1,74
5	5,70	15,77	33,84	19,76	1,79
6	4,13	14,64	35,96	18,64	1,45
7	3,65	11,53	26,43	18,38	1,65
8	3,93	12,60	31,54	16,88	1,54

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Kastamonu Küre yeraltı bakır madeninde gerçekleştirilen galeri atımları patlatma simülasyon yazılımı ile irdelenmiştir. Özgül şarj 1,92 kg/m^3, özgül delme 2,80 m/m^3 mertebesinde hesaplanmıştır. Normalde yaklaşık 3,5 kg olan şarj miktarı çevre deliklerinde kontur patlayıcıların kullanımı ile 1,39 kg seviyesine indirilmiştir. Kontur patlayıcıların kullanımı aşırı sökümün önlenmesinde önem arz etmektedir. JKSimBlast yazılımı kullanılarak ateşleme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ateşleme merkezde kesme bölgesinden başlamakta ve çevre-taban deliklerine doğru ilerlemektedir. Ateşleme tekniği paralel kesme yöntemine uygundur.

Titreşim için önem arz eden anlık maksimum şarj hesabı yapılmıştır. Ateşleme sırasında en fazla 10 delik birlikte patlamaktadır. Ancak bu delikler şarj miktarı düşük olan çevre delikleri olduğu için 13,92 kg patlayıcı

anlık olarak ateşlenmektedir. Maksimum anlık şarj 1000. milisaniyede patlayan 8 adet üretim deliğinden kaynaklanmaktadır. Anlık şarj 27,96 kilogramdır. Galeri patlatmalarında deliklerin içerdiği patlayıcı miktarı farklı olduğu için çok sayıda deliğin patlaması kesin olarak maksimum anlık şarjı vermeyebilir. Delik içindeki patlayıcı miktarı da gözetilerek hesaplama yapılmadır.

Yığının ortalama parça boyutu 9,34–15,77 cm aralığında değişmektedir. Ortalama üniformite indeksi 1,62'dir. Ortalama karakteristik boyut 16,83 cm'dir. Yeraltında görüntü alınırken özellikle ışıklandırma ve gölgelere dikkate edilmelidir. Yeraltından örnek alma işlemi yığın küçük olduğu için açık işletmelerde gerçekleştirilen parça boyut analizine göre nispeten kolaydır. Gerek patlatma simülasyon yazılımı gerek ise görüntü işleme yazılımı patlatma planlamasında ve sonuçlarında değerlendirilmesinde son derece faydalıdır.

KAYNAKLAR

Akyıldız, Ö., & Hudaverdi, T., 2016. Application of the blast fragmentation models in a sandstone quarry, ISEE 42nd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Jan 31 –Feb 3, Las Vegas USA, pp.16-134

Bhandari, S., 1997. Engineering Rock Blasting Operations, A.A. Balkema, Rotterdam.

Cunningham, C. V. B., 2005. The Kuz−Ram fragmentation model –20 years on. Proceedings of Brighton Conference. South Africa. pp. 201−205.

Demir, D., 2012. Eti Bakır Küre İşletmesi yeni maden sahasının jeolojik ve jeomekanik yer altı modellemesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Hüdaverdi, T., & Ağan, Y., 2023. Kömür Ocağı Patlatmalarının Bilgisayar Destekli Analizi, Türkiye 23. Uluslararası Kömür Kongresi ve Sergisi, 12-13 Eylül, Zonguldak, s. 250-260.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L. & Carcedo, F. J. A., 1995. Drilling and Blasting of Rocks, A. A. Balkema, Brookfield Publication, Rotterdam.

JKSimBlast User Manuel, 2006. Soft-Blast Pty Ltd, Queensland, Australia.

Johansen, J., & Mathiesen, C. F., 2000. Modern Trends in Tunnelling and Blast Design, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands

Maerz, N. H., Palangio, T. C., & Franklin, J. A. 1996. WipFrag Image Based Granulometry System, in: Proceedings of the Fragblast-5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Canada, 23-24 August, pp 91-101. A.A Balkema, Rotterdam.

Milanovic, S., Simić, N., Kričak, L., Negovanović, M., & Đokić, N., 2024. Optimization and analysis of drilling and blasting parameters using O-Pitblast software. Underground Mining Engineering, 44, 51-67.

Stiehr, J. F., 2011. ISEE Blaster's Handbook, Society of Explosive Engineers, Cleveland, Ohio.

Zhang, Z-X., 2016. Rock fracture and blasting theory and applications, Butterworth-Heinemann, Oxford, 446 pages.

GÖKIRMAK BAKIR MADENİ JEOLOJİSİ VE ARA SONDAJLARIN CEVHER MODELİNE ETKİSİ

GEOLOGY OF THE GÖKIRMAK COPPER MINE AND THE EFFECT OF INTERMEDIATE DRILLING ON ORE MODELING

Cihan Tunoğlu, Rıdvan Kuşoğlu, Recep Baykan
Acacia Maden İşletmeleri A.Ş, Hanönü, Kastamonu

ÖZ: Bir maden varlığının ortaya çıkarılması için son adım sondaj faaliyetleridir. Sondaj faaliyetleri neticesinde maden varlıkları kaynak ve rezerve dönüşerek ekonomik değer kazanmaktadır. Gökırmak Bakır Madeni Kastamonu Hanönü ilçesinde 2009 yılında keşfedilmiş olup, yapılan sondaj çalışmalarından sonra kaynağa, daha sonra ise rezerve dönüştürülmüştür. 2018 yılında cevher üretim faaliyetleri başlamış olup, Mart 2019 yılında ilk konsantre üretimi gerçekleşmiştir. Proje kapsamında 2017 yılı fizibilite raporu aşamasında 162 adet sondajda yaklaşık 50.000 metre delgi yapılmıştır. 2024 yılı sonu itibariyle ise 778 adet sondajda 160.300 metre delgi tamamlanmıştır. Bu çalışmada fizibilite dönemi yapılan sondajlarla oluşturulan cevher modeli ile 2024 yılı son verileriyle oluşturulan cevher modeli arasındaki değişiklikler irdelenmiş, ara sondajların etkileri değerlendirilmiştir. Ara sondajlar sonrası bazı bölgelerde cevher kütlesi küçülürken, bazı bölgelerde ise büyüme göstermiştir. Cevher kaynak sınıflamasının ara sondajlar neticesinde daha güvenilir kategoriye geçtiği görülmüştür. Cevher, fiziksel özelliklerinin (şekil, yapı, yön vb.) ara sondajlarla beraber daha tutarlı olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ara Sondaj, Cevher Modeli, Maden Üretimi, Gökırmak Bakır Madeni (Hanönü)

ABSTRACT: *The last step to uncover a mineral asset is drilling activities. As a result of drilling activities, mineral assets gain economic value by turning into resources and reserves. Gökırmak Copper Mine was discovered in 2009 in Hanönü district of Kastamonu, and after the drilling activities, it was transformed into a resource and then into a reserve. In 2018, ore production activities started and the first concentrate production was realized in March 2019. Within the scope of the project, approximately 50,000 meters of drilling was carried out in 162 drillings during the feasibility report phase in 2017. By the end of 2024, 160,300 meters of*

drilling was completed in 778 drillings. In this study, the differences between the ore model created with the drilling performed during the feasibility period and the ore model created with the final data of 2024 were examined and the effects of interim drilling were evaluated. After the interim drilling, the ore body has decreased in some regions and increased in some regions. It was observed that the ore resource classification changed to a more reliable category as a result of intermediate drilling. Ore physical properties (shape, structure, direction, etc.) have been revealed more consistently with intermediate drilling.

Keywords: *Infill Drilling, Ore Modeling, Mining Production, Gökırmak Copper Mine (Hanönü)*

1. GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında arama sondajları sonucu ortaya çıkarılan bir maden varlığına, ilerleyen süreçlerde ara sondajların eklenmesinin etkileri ortaya koyulmuştur. Bu doğrultuda Gökırmak Bakır Madeninde, arama sondajları ile 2017 yılında ortaya koyulan cevher kaynağının, 2024 yılı sonuna kadar yapılan ara sondajlar arasındaki çalışmalarının etkileri değerlendirdi. Ara sondajların eklenmesi sonucu elde edilen son model, ilk model ile kıyaslanarak oluşan farklılıklar ve bunların nedenleri irdelenmiştir. Jeolojik model çalışmalarında Studio RM – Datamine Software kullanılmıştır.

Hanönü cevherleşmesi, yüksek sıcaklıktaki metalce zenginleşmiş akışkanların deniz tabanında yayılım gösteren hidrotermal konveksiyon ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Volkanojenik masif sülfit yatakları (VMS) tipik olarak polimetalik masif sülfit lensleri şeklinde, denizaltı volkanik ortamlarındaki deniz tabanına yayılım gösterip yan kayaçlar ile sınıflanmaktadır (Galley vd., 2007). Projedeki cevherleşme masif, yarı masif, yer yer lens ve mercek şeklindedir.

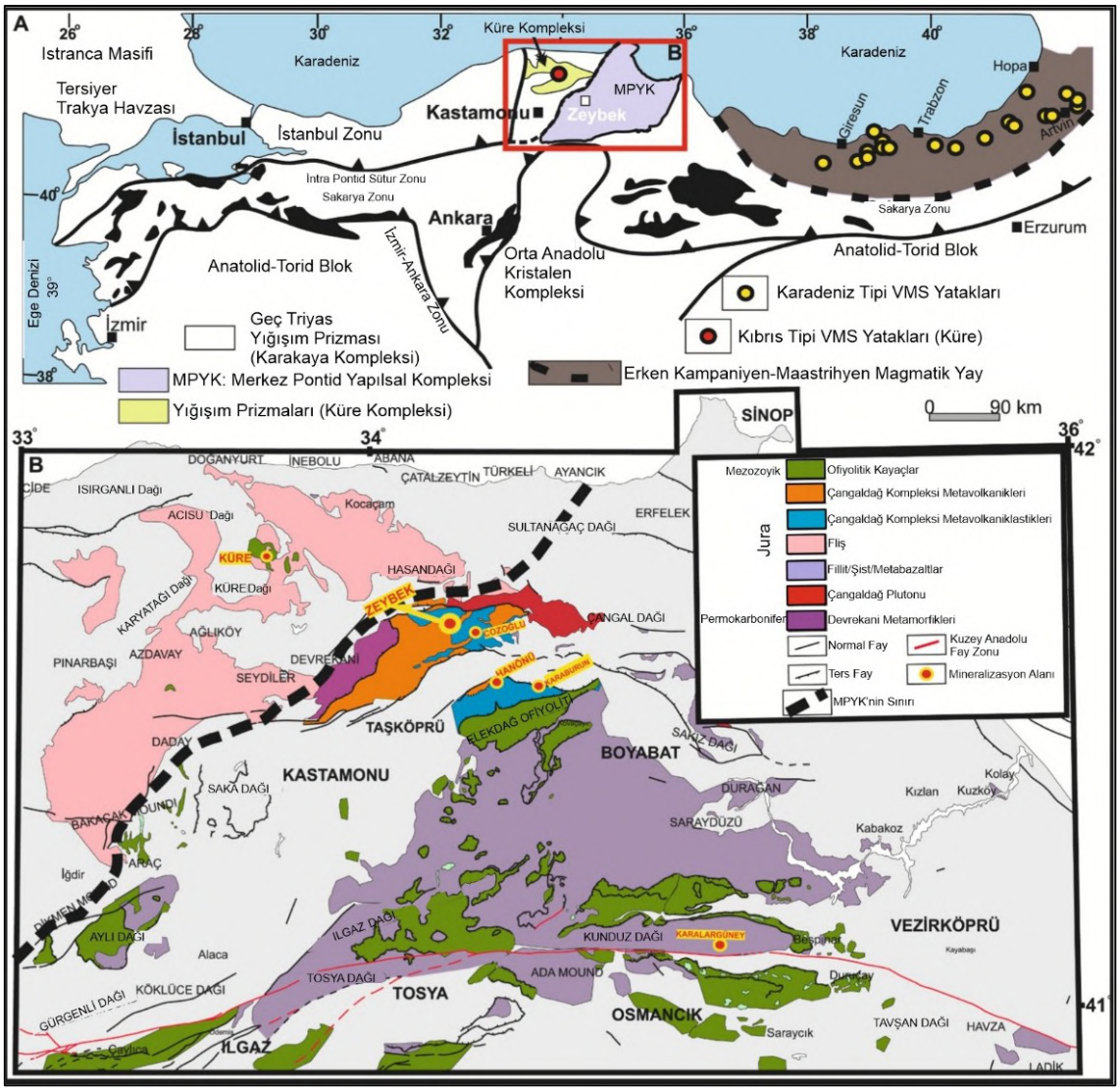
2. GÖKIRMAK BAKIR MADENİ JEOLOJİSİ (HANÖNÜ)

2.1. Genel Jeoloji ve Cevherleşme

Gökırmak Bakır Madeni Projesinde cevher oluşumu Besshi tipi VMS yatağıdır. Bu yataklar Hanönü-Taşköprü bölgesinde yüzeyleyen düşük-derece metamorfizma geçirmiş silisiklastik sedimanter kayaçlardan meydana gelmiş birimler (Akgöl formasyonu) içinde oluşmuştur. Bu birimler ensimatik ada yayı volkanikleri ve yay önü havza çökelleri, okyanusal kabuk kalıntıları ve volkanoklastiklerden yapılı Orta Jura yaşlı Çangaldağ Karmaşığı içinde görülür (Günay vd., 2018).

Açık ocakta yapılan incelemelerde cevherli zonlar siyah şist ve metabazik kayaçlarla ardalanmalı olarak gözlemlenmiştir (Şekil 1). Siyah şist ardalanmalı olarak gözlemlenen cevherli katmanlar ile tabakalanmaya paralel olarak oluşmuşlardır.

Şekil 1. Metabazik-Siyah Şist Ardalanması



Şekil 2. Çangaldağ Metamorfik Karmaşığının Basitleştirilmiş Jeolojik Haritası (Günay vd., 2018)

Gökırmak Nehri'nin güney kesimlerinde yer alan Hanönü cevherleşmesi siyahımsı, gri fillit – yeşil, gri renkli şistler içerisinde bulunur. Filitler, şistler ve metabazaltlar Çangaldağ kompleksinin birimleridir. Metabazaltlar klorit, epidot, tremolit ve aktinolitten kaynaklanan yeşil renk tonlu mineraller, yer yer kıvrımlanma ve şistoz doku içerirken, alt zonlarda yapraklanma iyi gelişmediği için masif bölümler ara katmanlar halinde gözlenir (Günay vd., 2018). Gökırmak mineralizasyonu, en yaygın cevher yapıları olan masif, bantlı ve yayılmış sülfitler olarak ortaya çıkar (Şekil 2).

2.2. Cevherleşme Yaşı

Çangaldağ Kompleksi'ndeki metadasitlerdeki zirkon mineralleri üzerinde gerçekleştirilen U-Pb yaşlandırma sistemi, Orta Jura yaşını ortaya çıkarmaktadır. Buna ek olarak, bu kompleksin kuzeyinde bulunan Çangaldağ Granitoyiti (161.4 ± 5.3 Ma; 169.9 ± 1.7 Ma), batısında bulunan Devrekani Granitoyiti (164.9 ± 2.9 Ma) ve Devrekani Metadiyoriti (163.3 ± 8.8 Ma) gibi önemli jeolojik birimlerin radyometrik yaşları da bölgede yaygın bir Orta Jura magmatizmasının varlığına işaret etmektedir (Çimen O., vd. 2015).

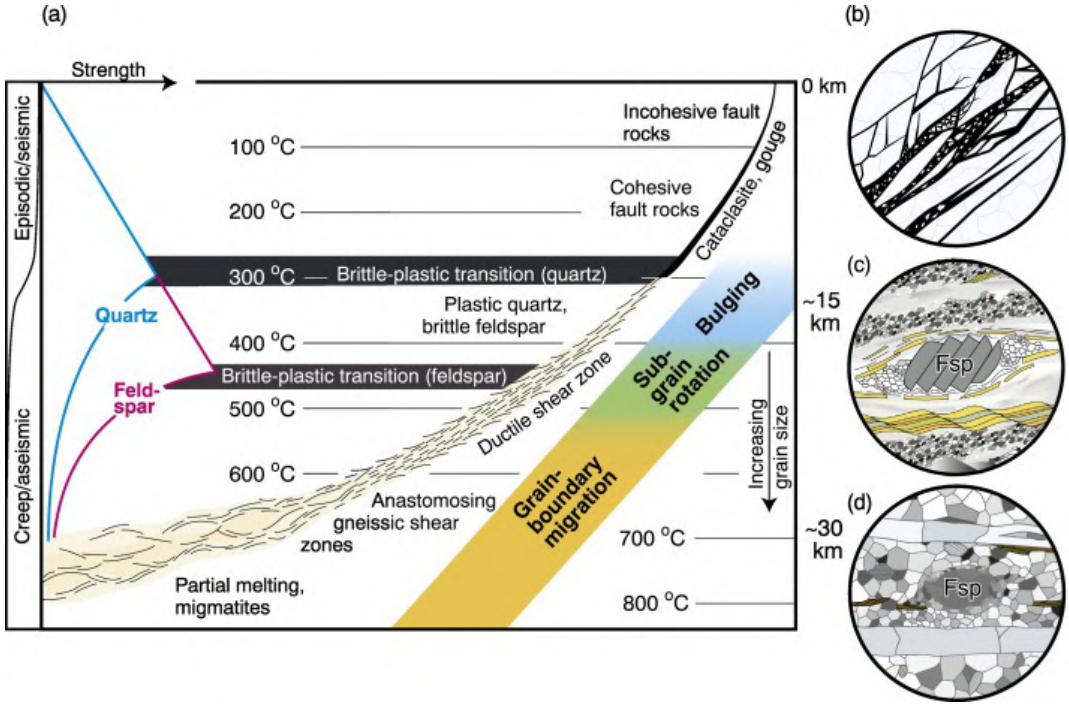
Proje alanının kuş uçuşu 20 km. Kuzeybatısında bulunan ve benzer özellikler gösteren Zeybek VMS yatağındaki Cu açısından zengin masif cevher örneklerinden kalkopiritlerin Re-Os jeokronolojik çalışmaları sonucunda 178 ± 2,2 My yaş elde edilmiştir. Zeybek VMS yatağıyla ilişkili jeokimyasal ve izotopik yaş verileri, mineralizasyonun, Tetis okyanusunun kapanmasına neden olan kuzeye doğru dalma-batmanın kapanması sonucu Orta Jura döneminde okyanus içi gelişen bir yay-geri yay tektonik ortamında meydana geldiğini göstermektedir (Günay vd., 2019).

Bölgede diğer yazarların yaptığı gözlemler ve yapılan yaş tayini çalışmalarından elde edilen veriler ışığında çalışma alanında yüzlek veren şistler, metavolkanik kayaçlar ve cevherleşme aynı yaşta olup Orta Jura'dır (Çimen vd., 2015; Günay vd., 2019).

2.3. Metamorfizma Yaşı

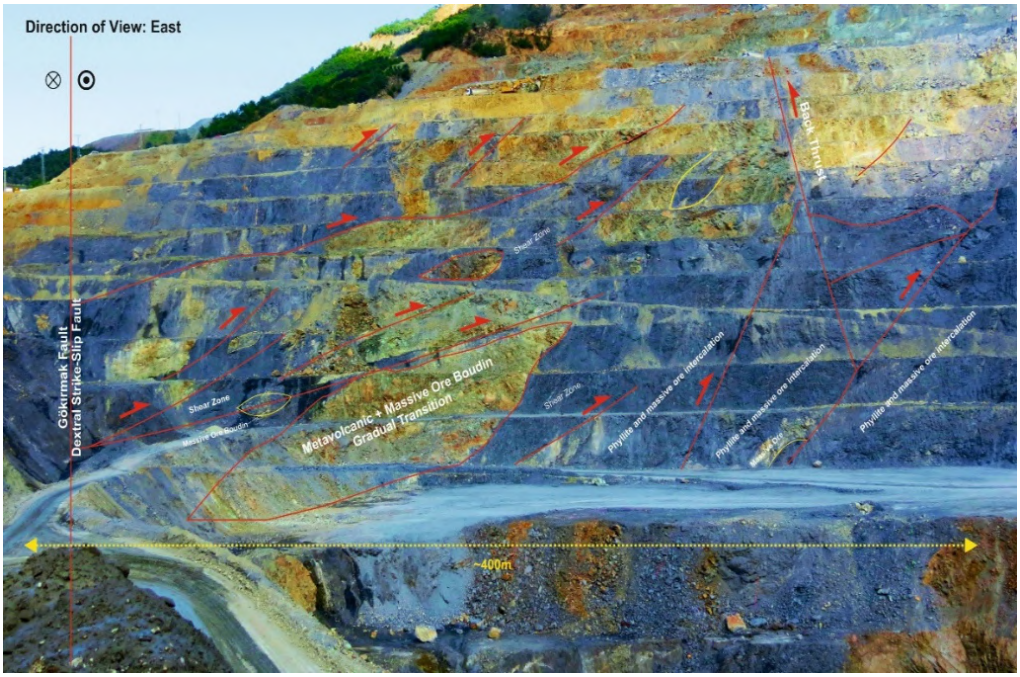
Çangaldağ Metamorfik Kompleksi, yaklaşık 50 km uzunluğunda ve zaman zaman 30 km genişliğinde bir yay şekline sahiptir. Çoğunlukla metavolkanik, metavolkaniklastik ve metaklastik kayaçları içeren büyük bir allokton kütledir. Kompleks içindeki metavolkanik kayaçlar, yeşilşist fasiyes özelliklerini yansıtan klorit, epidot ve aktinolit mineralleri içerir. Yılmaz ve Bonhomme (1991) metabazik kayaçlardan Erken Kretase (126-110 My)

metamorfizma yaşı elde etmiştir (Günay vd., 2019). Bir başka çalışmada Fillat örneklerinden alınan mikalar üzerinde Ar-Ar (136-125 My) Erken Kretase metamorfizma yaşı elde edilmiştir (Okay vd., 2013).

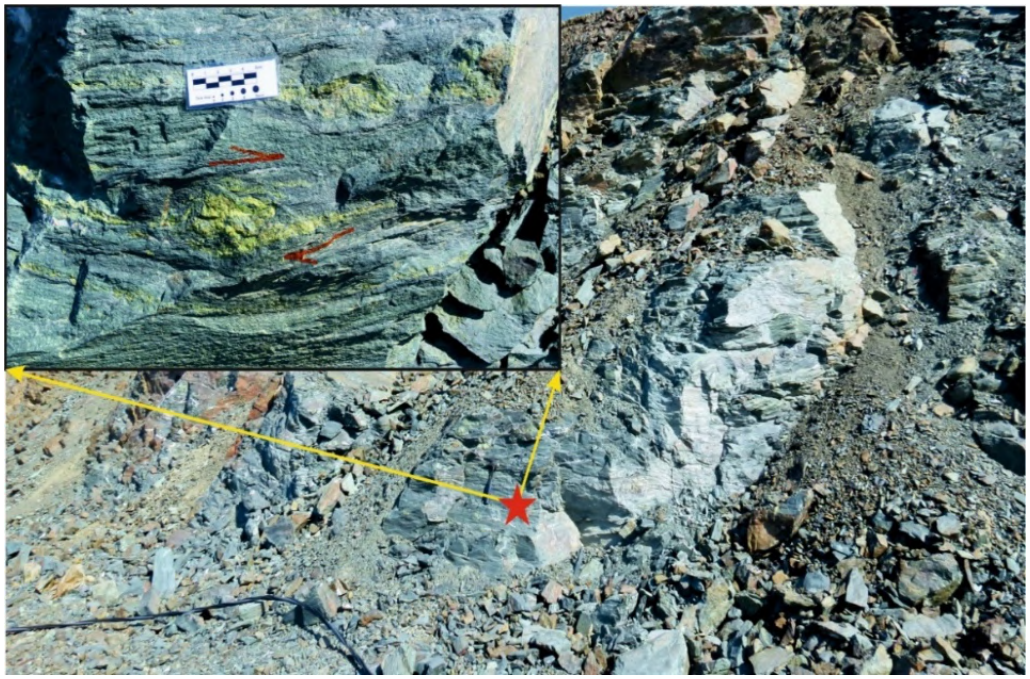


Şekil 3. Metamorfizma koşulları ve derinlik arasındaki ilişki

Yay ardı havzada gelişen rift ortamında cevherli zonlarla ardalanmalı olarak oluşan bu volkanosedimanter kayaçların üzerinde yapılan çalışmalar bu kayaçların Geç Kretase yaşlı metamorfizmaya uğradıklarını ve tüm bu kayaçların sünümlü deformasyon koşullarının etkili olduğu 15-20 km derinliklere okyanus kapanmasına bağlı olarak dalma-batma süreçleri ile daldıklarını göstermektedir. Tüm bu volkanosedimanter kayaç topluluğu cevherli zonlarla birlikte 15-20 km derinlikte sünümlü deformasyona uğrayarak metamorfizma geçirmiş ve foliasyona uğramışlardır (Şekil 3). Bu sünümlü deformasyonun izleri özellikle epidotlu metabazik kayaçların içerisinde makaslama zonları ve budinler şeklinde gözlemlenebilmektedir (Şekil 4 ve Şekil 5).



Şekil 4. Siyah şist, Metabazik ve Cevher 'in ardalanmalı istifte makaslama zonlarında gelişen sünümlü deformasyonlar

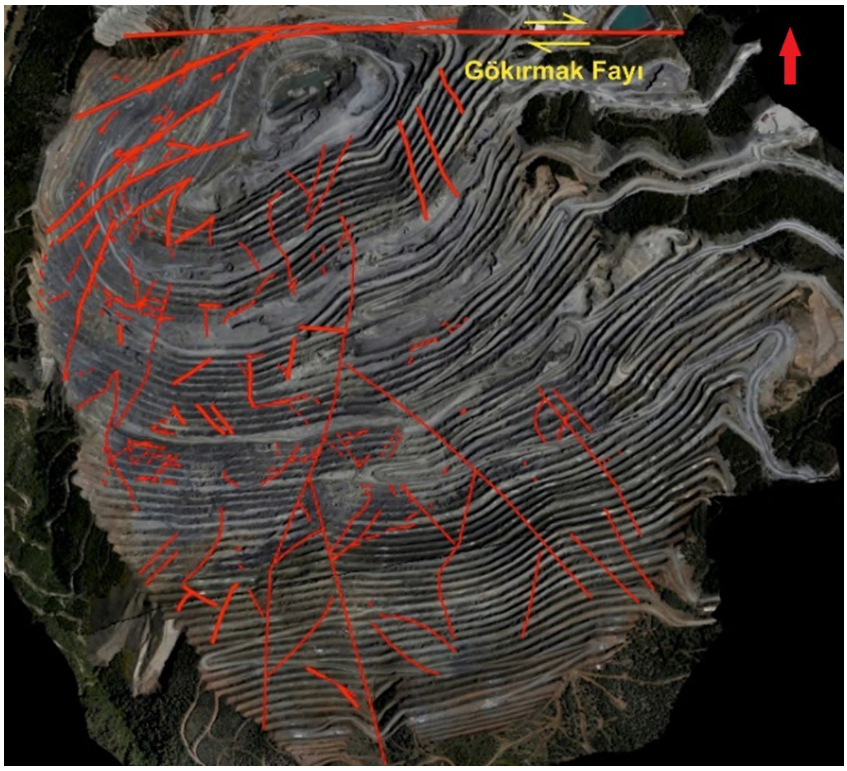


Şekil 5. Metabazik kayaçlardaki makaslama zonlarında gelişen sünümlü deformasyonlar

Sonuç olarak; cevherleşme yaşı, metamorfizma yaşından daha erkendir. Önce cevherleşme, sonra düşük dereceli yan kayaç metamorfizması oluşmuştur.

2.4. Yapısal Jeoloji

Bölgemize etki eden Kuzey Anadolu Fayı ile Sinop arasında birbirine paralel olarak gelişen fayların, Acacia Maden İşletmesinin de bulunduğu alanda sıkışmalı bir tektonik rejime neden olduğu gözlenmiştir. Bu nedenden dolayı Gökırmak Vadisinde doğrultu atımlı fay sistemi gelişerek açık ocak işletmesini kuzeyden sınırlamaktadır. Bu fay zonunun izleri işletmenin bulunduğu bölgede 090°/90 sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay olarak ölçülmüştür (Şekil 6).



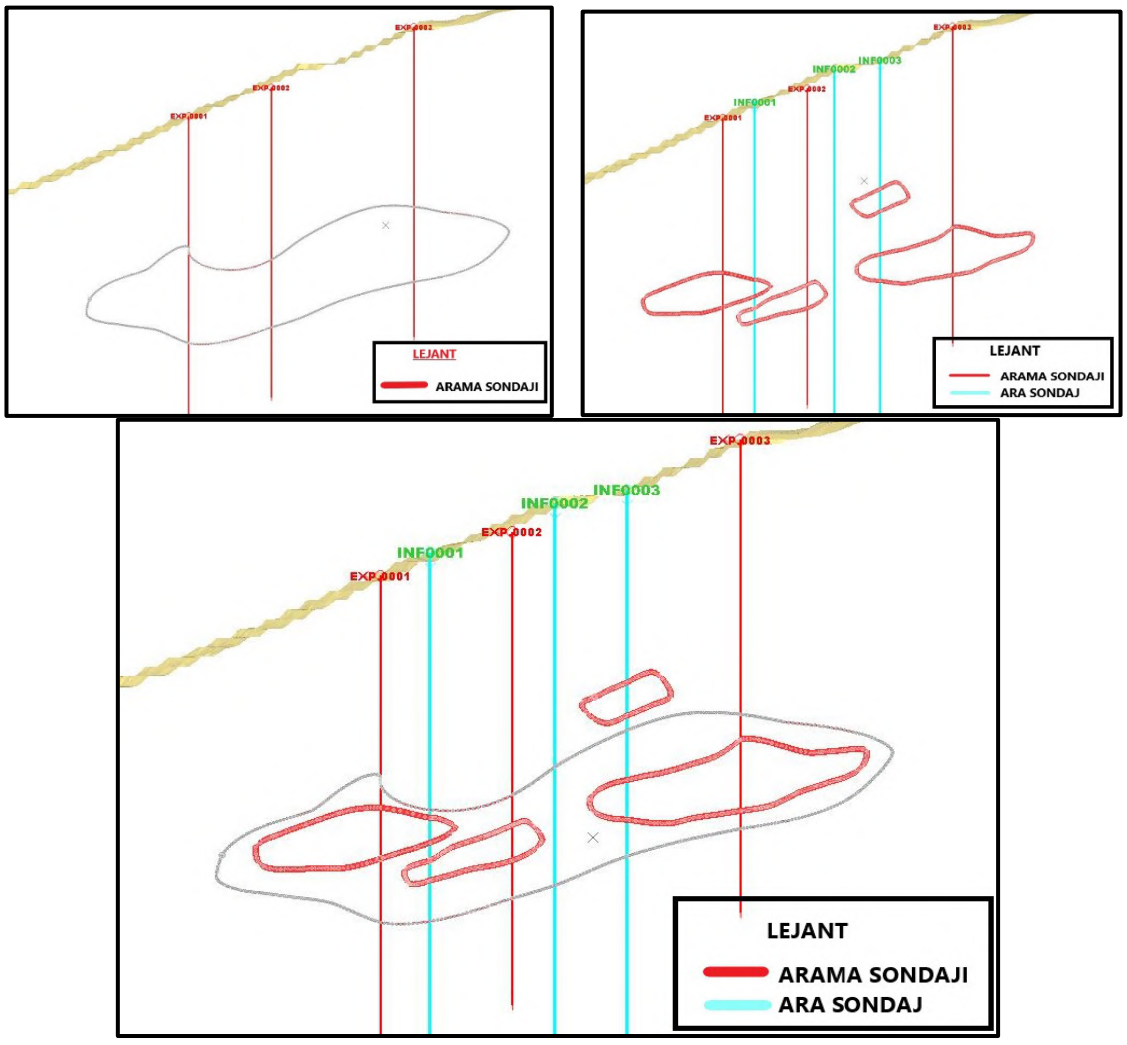
Şekil 6. Açık Ocak'ta yer alan Gökırmak Fayı ve bu faya yaklaşık dik gelişmiş faylar ve eklem yapıları.

Açık Ocağın Kuzeydoğusunda yapılan gözlemler sonucunda siyahşist, yeşilşist, metabazik, metasedimanter kayaçlar ve yer yer masif cevherli tabakalı zonların birbirleri üzerine sünümlü deformasyonlar olacak şekilde bindirdikleri gözlemlenmiştir. Bu bindirmeler GB yönlü olup doğrultuları 140° ila 160° arasındadır. Eğim açıları ise 20° ila 60° arasında değişmektedir.

3. FİZİBİLİTE DÖNEMİNDE YAPILAN ARA SONDAJLARIN CEVHER MODELİNE ETKİSİ

3.1. Ara Sondaj Nedir?

Ara sondajlar, arama sondajları ile belirlenen ve daha geniş mesafeyi temsil eden bir cevher varlığının tenör, tonaj, şekil, boyut ve yapısal özelliklerini gerçeğe daha yakın bir şekilde ortaya çıkarılarak, mineralizasyon sürekliliğinin teyit edilmesi ve özellikle küçük boyutlu cevherleşmelerin tanımlanması için yapılan daha kısa mesafeli sondajlardır (Şekil 7).

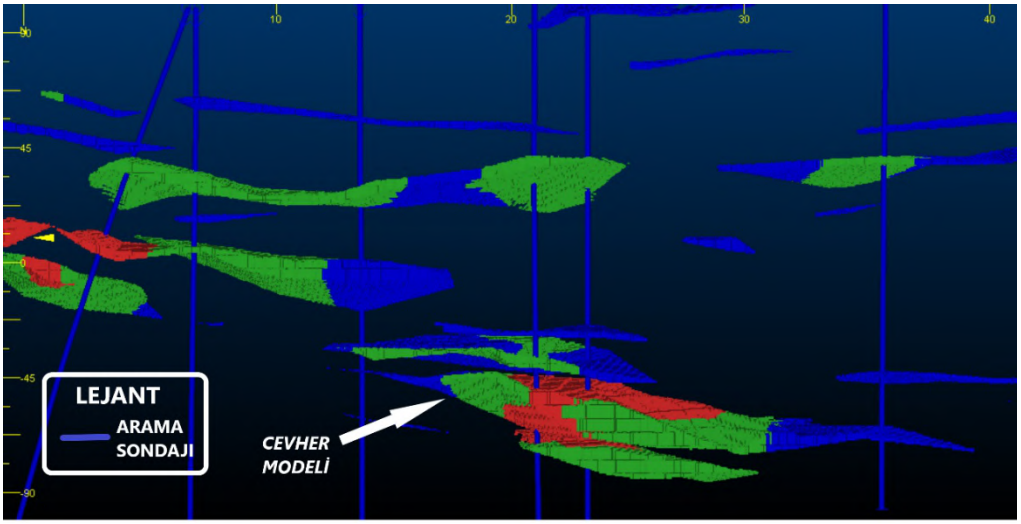


Şekil 7. Fizibilite dönemindeki jeolojik modele (1), ara sondajlar yapıldıktan sonra gerçeğe yakın ortaya çıkan cevher modeli (2). Her iki model karşılaştırması (3).

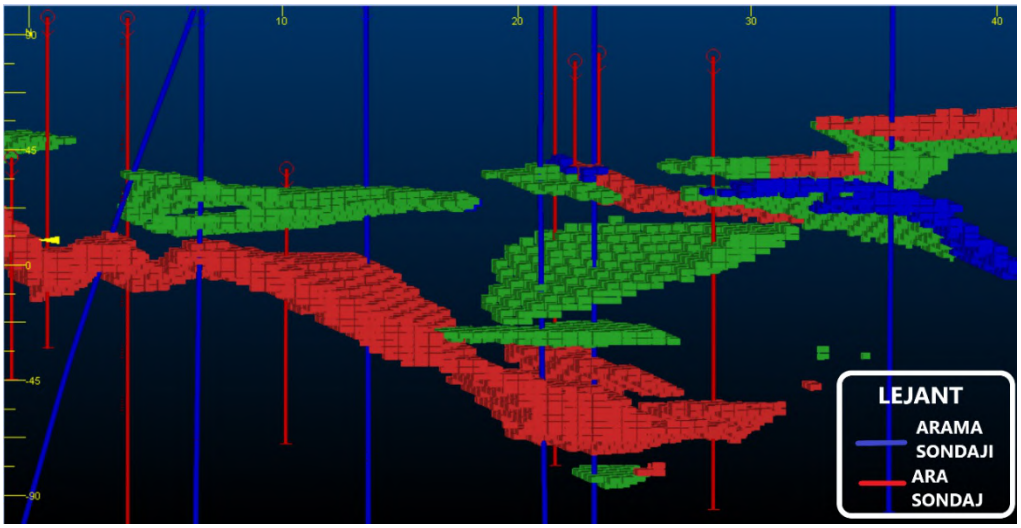
3.2. Ara Sondajın Amacı

Ara sondajlar, arama sondajlarında belirlenen cevher varlığının karakterini ve sınırlarını daha iyi belirlemek, yorumlamak ve anlamak için mesafe aralıklarının daraltılmasını amaçlamaktadır. Cevher varlığının tespiti sonrası belirlenen cevher sınırının dıştan içe doğru yapılan sondajlarla desteklenmesi gerekmektedir. Arama sondajlarıyla oluşturulan ilk modelin devamında yapılan, ara sondajların eklenmesiyle oluşan ikinci model ile kıyaslandığında tonaj ve tenör değerlerinin gerçeğe daha yakın olduğu görülmektedir.

Ara sondaj planlamalarında, mevcut cevher modeli değerlendirilmeli ve bu modelde yer alan belirsizlikler göz önüne alınmalıdır ve bunlara yönelik sondajlar planlanmalıdır. Ara sondaj planlamalarında kullanılan bir diğer veri devam eden üretim çalışmaları ve bu çalışmalara ilişkin kayıtların cevher modeliyle kıyaslanmasını da içermektedir. Üretilen cevher miktarının, cevher modeline göre üretimi planlanan değerle karşılaştırılması, sondaj verilerinin yol göstericiliğinin tutarlılığını ortaya koymaktadır. Güvenilirlik düzeyine göre maden kaynakları az güvenilirlik seviyesinden artana doğru mümkün, belirlenmiş ve ölçülmüş kaynak olarak üçe ayrılmaktadır. Ara sondajların bir diğer etkisi bir kaynağın güvenilirlik düzeyinin arttırılmasına katkı sağlamasıdır. Çoğu sondaj programı cevher tenörünün mekânsal değişkenliğini teyit etmeye çalıştığından süreklilik de kritik önem taşır. Gökırmak Bakır Projesinden bir kesitle bakıldığında, fizibilite aşamasındaki modelde mümkün (mavi) ve belirlenmiş (yeşil) kategoride olan cevher, ara sondajlarla ölçülmüş (kırmızı) kategorisine geçerek kaynak güvenilirlikleri artmıştır (Şekil 8 ve Şekil 9).

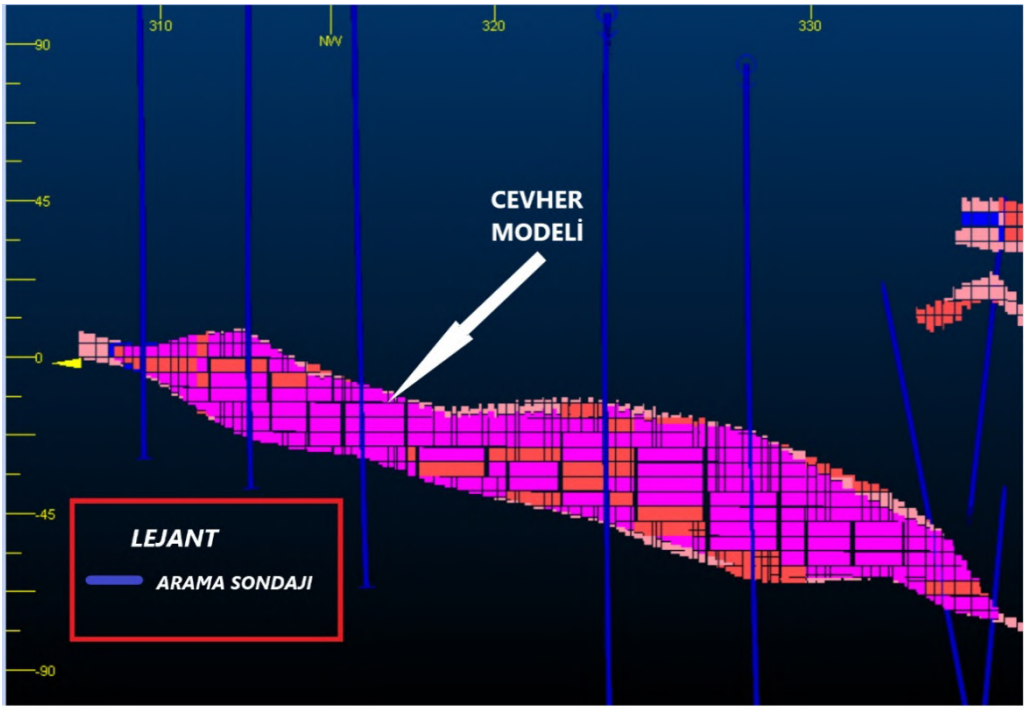


Şekil 8. Fizibilite dönemindeki kaynak kategori değerlerine göre model kesiti (AMC217027).

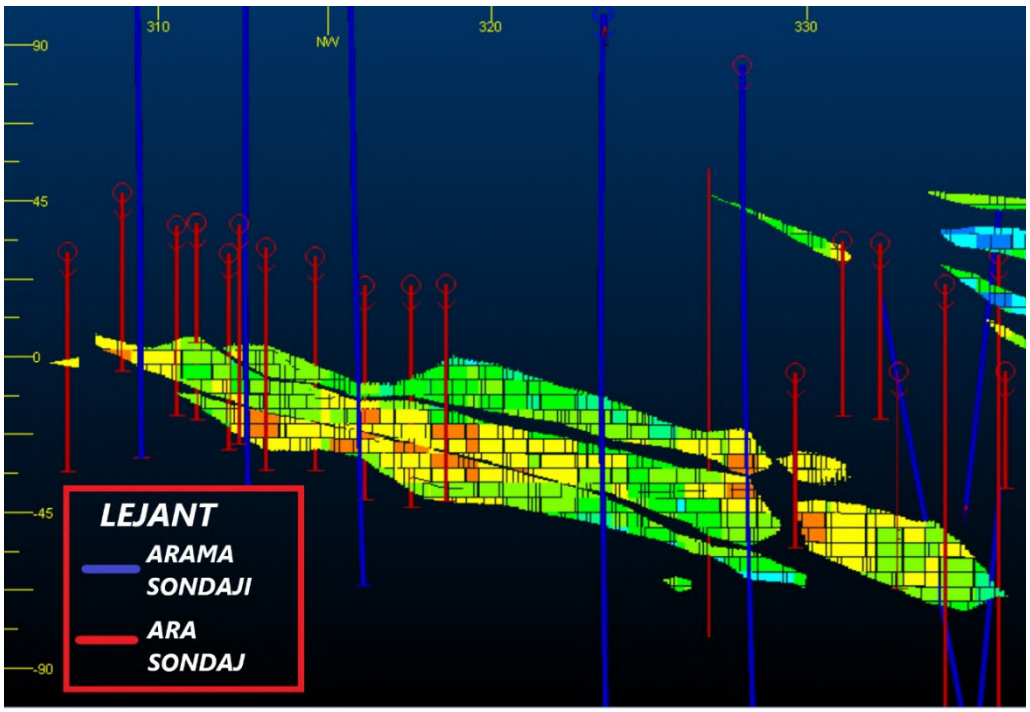


Şekil 9. Ara sondajdan sonra kaynak kategori değerlerine göre model değişimi (ACA-2024-001).

İlk yapılan arama sondajları arasındaki mesafe 80-100 metre iken, cevherleşme tipinin anlaşılmaya başlanması ile, sondaj aralıkları ara sondajlarla 30 metreye kadar düşürülmüştür. Sondaj aralıklarının sıklaştırılmasıyla beraber Gökırmak Bakır Madeni Projesinde belli bölgelerde cevherin şekli değişmiştir. İlk başta tek parça, masif düşünülen cevher (AMC217027), son modelde üç lens olduğu anlaşılmıştır (ACA-2024-001). Bu sondajlar ışığında en gerçekçi cevher modelinin oluşturulması amaçlanmaktadır (Şekil 10 ve Şekil 11).



Şekil 10. Fizibilite döneminde oluşturulan cevher modelinin şekli (AMC217027).



Şekil 11. Ara sondajlardan sonra oluşturulan cevher modelinin şekli (ACA-2024-001).

Ayrıca; cevherleşeme tipi ve yatağın cinsine göre sondaj aralıkları 15-20 metrelere kadar düşürülebilir. Daha küçük lensli, damar tipli, ağsal

cevherleşmelerde bu mesafeler düşürüldüğünde daha iyi sonuçlar vermektedir (damar tip altın cevherleşmesi).

3.3. Ara Sondajın Maliyet Açısından Projeye Etkisi

Ara sondajlar cevherleşme ve model oluştuktan sonra yapıldıkları için, arama sondajları kadar derin olmak zorunda değildir. Mineralizasyon zonunu geçtikten sonra jeolojik etkenlerin uygunluğuna göre kuyular tamamlanmaktadır. Böylece proje maliyetleri düşmektedir. Daha az maliyetle daha çok alana sondaj yapılarak kaynağın yapısı en doğru şekilde belirlenmektedir.

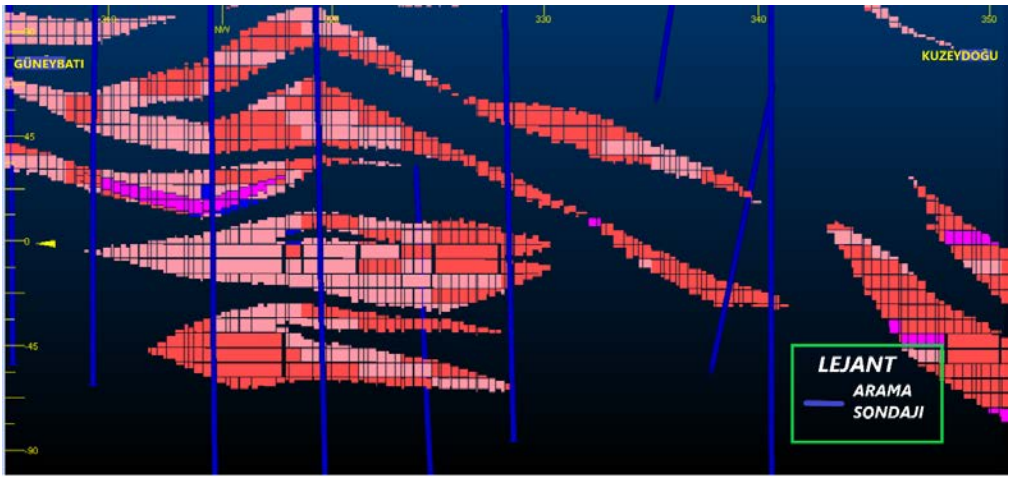
Bilinen model belirsizliklerine rağmen, gerekli olan durumlarda sondaj maliyetlerinin yüksek olduğu gerekçesiyle sondaj çalışmalarının yapılmaması cevher üretimi aşamasında modelin tutarsız olmasına sebebiyet verecektir. Sondaj çalışmalarıyla artan veri sayısıyla doğru orantılı olarak üretim ve model arasındaki doğruluk oranı artıracaktır. Böylece başta maliyet gibi gözüken kalemler daha sonrasında olumlu yönde üretime yönelik katkı sağlayacaktır. Üretim hedeflerinin tutarlı olması için cevher modeline, cevher modeli içinde ara sondajlar kaçınılmazdır. Bir maden yatağında hepsi birbiri ile ilişkili ve olmazsa olmazlardandır.

Gökırmak Bakır Madeni Projesinde cevher modelini oluşturmak için yapılan sondajlardaki veri tabanı (koordinat, litoloji, analiz, yön, derinlik vb.) Datamine RM programında cevher yapısına göre katı modelleri oluşturulmakta, oluşturulan katı model bloklara bölünmekte ve “Ordinary Kriging” yöntemi ile kestirim yapılarak yoğunluk bazlı tonajı hesaplanmaktadır. Bu çalışmalar danışman firmalar tarafından yürütülmüştür. Fizibilite aşamasında oluşan cevher modeli (AMC217027) ve sonrasında ara sondajlarla oluşturulan cevher modelinden bir kesit aşağıda Tablo 1’de hazırlanarak sunulmuştur (ACA-2024-001).

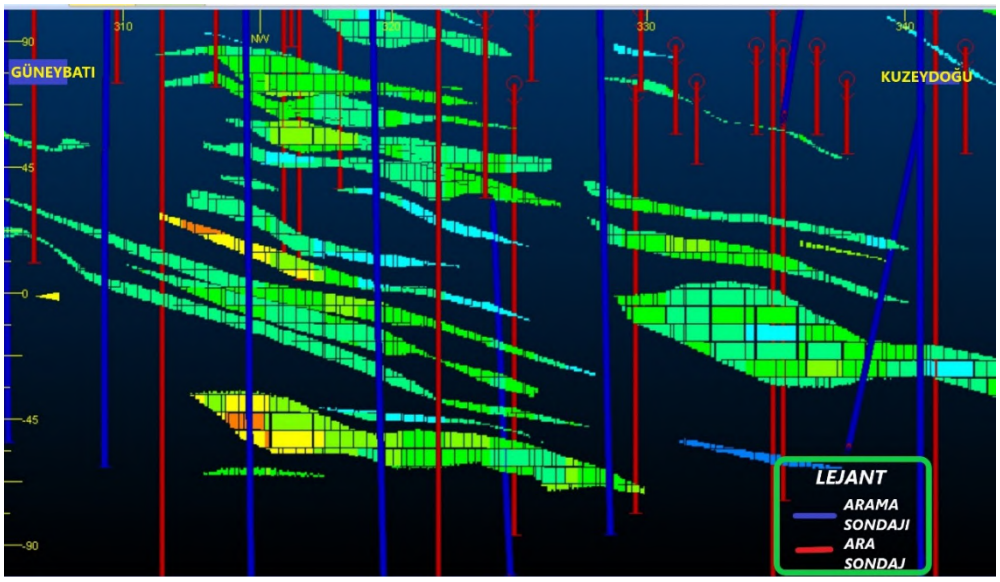
Tablo 1. Açık Ocağın Güneybatısından alınan kesitte ara sondajlardan sonra olumlu yönde cevher modelindeki Tonaj ve % Cu tenör farkları

	İlk Model (Fizibilite)	**Son Model**
Tonaj	315.000,00	454.000,00
%Cu	1,22	1,30

Bu sonuçlara göre hem tonaj hem tenör değerleri artmıştır. Cevher kaynağının kesitte Kuzeydoğu bölgesinde büyüdüğü; Güneybatı bölgesinde ise daha çok küçük lenslere ayrıldığı tespit edilmiştir (Şekil 12 ve Şekil 13).



Şekil 12. Fizibilite döneminde oluşturulan cevher modeli (AMC217027).



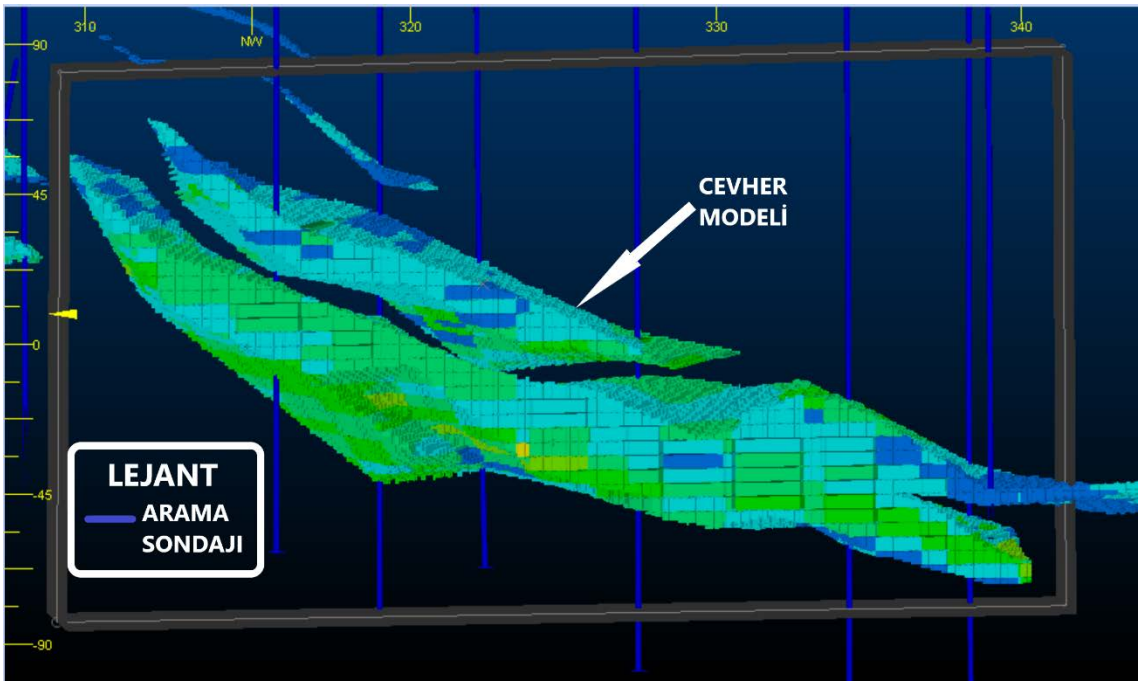
Şekil 13. Ara sondajlardan sonra oluşturulan cevher modeli (ACA-2024-001).

Gökırmak Projesinde bir başka örnekte ise ara sondajlardan sonra cevherin şekli ve yapısının ilk modele göre daha parçalı yapıda olduğu görülmüştür. İlk başta tek parça olarak yorumlanan cevher kütlesi, ara sondajlardan sonra birkaç lens olarak yorumlanmıştır. Kaynak raporuna göre cevherin tonajı düşerek, tenörü artmıştır (Tablo 2).

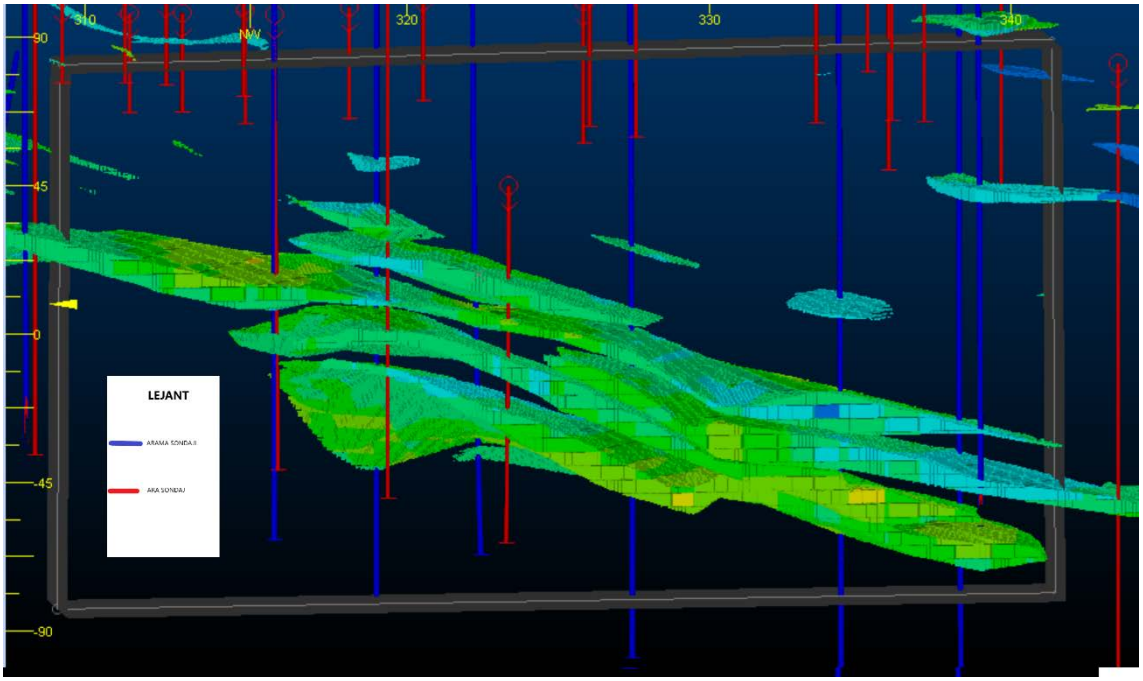
Tablo 2. Ara sondajlardan sonra güvenilirlik kategorisine göre Tonaj ve %Cu tenör farkları

	İlk Model (Fizibilite)	**Son Model**
Tonaj	469.183,00	414.982,00
%Cu	0,87	1,03

Cevherin şekil ve boyutu değişerek güvenilirlik kategorisi değişmiştir (Şekil 14 ve Şekil 15).



Şekil 14. Arama Sondajlarından sonra oluşan model (AMC217027).



Şekil 15. Fizibilite aşamasında ve sonrasında ara sondajlarla oluşturulan cevher modeli (ACA-2024-001).

4. SONUÇLAR

Gökırmak Bakır Madeni cevherleşmesi düşük derece metamorfizma geçirmiş silisiklastik sedimanter kayaçlardan meydana gelmiş Akgöl formasyonu içinde oluşan volkanojenik masif sülfit (VMS) yatağıdır. Hanönü, Gökırmak cevherleşmesinde masif kütlenin kalınlığı yer yer 80 – 90 metrelere kadar ulaşmakta olup, bazen de 1-2 metrelik lensler şeklinde görünmektedir. Maden projelerinde ilk fizibilite yıllarında ve sonraki yıllarda yapılan cevher modellerini gerçeğe daha yakın hale getirmek için ara sondajlar yapılmalıdır. Bu yapılan sondajlarla belli bölgelerde cevher tonajları azalsa da genel olarak mevcut kaynağa güvenilirlik yönünden olumlu etkisi olmaktadır. Cevherleşme tipine göre sondaj ara mesafeleri kısaltılabilir. Böylece ara sondajlarla en gerçekçi modele ulaşılmaya çalışılmaktadır. Ara sondajlar ilk başta çok maliyet gibi görünse de işletme

döneminde operasyonel olarak doğru veriler ışığında daha kaliteli bir üretim sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Çimen, O., Sayit, K., & Göncüoğlu, M. C., 2015. Prelimilary Geological and Geochemical Data from the Cangaldag Complex (Kastamonu-Turkey): Implications for the Geodynamic Evolution of the Central Pontides. EGU General Assembly 2015 in Vienna, Austria. Id: 2181.

Galley, A. G., Hannington, M. D., & Jonasson, I. R., 2007. Volcanogenic Massive Sulphide Deposits. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 141-161 Special Publication no. 5.

Gokirmak Copper Project – Feasibilitiy Study, AMC217027 Hanonu Feasibility Study 170607 secured.

Gokirmak Cu Project JORC Compliance MRMR Study_Jan2025_v01 (ACA-2024-001)

Günay, K., Donmez, C., Oyan, V., Yıldırım, N., Ciftci, E., Yıldız, H., & Ozkumuş, S., 2018. Geology and geochemistry of sediment-hosted hanonu massive sulfide deposit (Kastamonu – Turkey). Ore Geol. Rev.,101, 652–674.

Günay, K., Dönmez, C., Oyan, V., Baran, C., Çiftçi, E., Parlak, O., Yildirim, N., Deng, X-H., Li, C., Yildirim, E., & Özkümüş, S., 2019. Geology, Geochemistry and Re-Os geochronology of the Jurassic Zeybek Volcanogenic Massive Sulfide Deposit (Central Pontides, Turkey), Ore Geology Reviews.

Okay, A. I., Sunal, G., Sherlock, S., Altıner, D., Tuysuz, O., Kylander-Clark, A. R. C., & Aygul, M., 2013. Early Cretaceous sedimentation and orogeny on the active margin of Eurasia: Southern Central Pontides, Turkey, Tectonics, 32, 1247–1271, doi:10.1002/tect.20077.

Yılmaz, O., & Bonhomme, M. G., 1991. K-Ar isotopic age evidence for a lower to middle Jurassic low-pressure and a lower Cretaceous high-pressure metamorphic events in north-central Turkey. Terra Abstr. 3, 501.

YERALTI METALİK MADENLERİNDE AKILLI MADEN TEKNOLOJİLERİNİN ÖNEMİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

A REVIEW ON THE IMPORTANCE OF SMART MINING TECHNOLOGIES IN UNDERGROUND METALLIC MINES

Cemaleddin Akyürekli
Zimer Communication Group

Ayhan Aytaç
Zimer Communication Group, Trakya Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi

ÖZ: Bu çalışma, yeraltı metalik maden işletmelerinde dijital dönüşümün temel unsurlarından biri olan akıllı madencilik teknolojilerini incelemektedir. Özellikle Ultra Geniş Bant (UWB) tabanlı personel takip sistemleri ve yeraltı trafik sinyalizasyon çözümleri, hem iş sağlığı ve güvenliği hem de operasyonel verimlilik açısından değerlendirilmektedir. Türkiye'deki yasal çerçeveye uygunluk, dünya örnekleriyle karşılaştırmalı olarak ele alınmakta, teknolojilerin mühendislik altyapısı, avantajları ve uygulama kısıtları detaylı biçimde tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Madencilik, UWB, SCADA, Trafik Sinyalizasyonu, Yeraltı Metalik Madenler, İş Güvenliği

ABSTRACT: *This study examines smart mining technologies, which constitute one of the fundamental components of digital transformation in underground metallic mining operations. In particular, Ultra-Wideband (UWB)-based personnel tracking systems and underground traffic signalization solutions are evaluated in terms of both occupational health and safety and operational efficiency. The legal framework in Türkiye is discussed in comparison with global examples, while the engineering infrastructure, benefits, and implementation constraints of these technologies are analyzed in detail.*

Keywords: *Smart Mining, UWB, SCADA, Traffic Signalization, Underground Metallic Mines, Occupational Safety*

1. GİRİŞ

Yeraltı madenciliği, özellikle metalik madenler söz konusu olduğunda, zorlu çalışma koşulları ve yüksek riskli operasyonlar nedeniyle dijitalleşmeye en çok ihtiyaç duyulan alanlardan biridir (Hustrulid ve Bullock, 2001). Geleneksel üretim tekniklerinin, derinleşen ocak yapıları ve karmaşık jeolojik formasyonlar karşısında yetersiz kaldığı modern madencilikte; güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik hedefleri için dijital teknolojilerden faydalanmak kaçınılmaz hale gelmiştir (Paraszczak ve Fytas, 2012).

Akıllı madencilik; sensörler, uzaktan izleme sistemleri, konumlama teknolojileri ve veri analitiği gibi bileşenlerin yeraltı maden ortamına entegre edilmesiyle şekillenen yeni nesil bir üretim modelidir (T.C. Çalışma Bakanlığı, 2022). Bu sistemler, yalnızca üretim takibini kolaylaştırmakla kalmamakta; aynı zamanda personel güvenliğini sağlamada, acil durumlara müdahale sürelerini azaltmada ve maliyetleri düşürmede de büyük avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışma, nitel araştırma yöntemi ile yapılandırılmıştır. Literatür taramasında uluslararası bilimsel yayınlar, MAPEG teknik rehberleri, IEEE ve ISO standartları ile Türkiye'deki işletme raporları incelenmiştir. Çalışma kapsamında;

- Kaynak analizine dayalı karşılaştırmalı değerlendirme yöntemi,
- Ülke örnekleriyle karşılaştırmalı içerik analizi (Kanada, Avustralya, Polonya, Şili),
- Yasal mevzuat ve teknik gerekliliklere dayalı betimsel analiz kullanılmıştır.
- Veri seti, 23 kaynaktan oluşmakta olup makaleler, teknik raporlar, kanun metinleri ve saha faaliyet raporlarını içermektedir. Bulgular,

belirlenen dört başlık altında sınıflandırılmıştır: teknolojik yapı, mevzuat uyumu, uygulama yaygınlığı ve gelişim zorlukları.

Araştırma bulguları, Türkiye'de yeraltı metalik madenciliğinde akıllı teknolojilerin genellikle mevzuat zorunluluğu temelli uygulandığını, proaktif teknoloji entegrasyonunun ise sınırlı olduğunu göstermektedir. Özellikle UWB tabanlı personel takip sistemleri ve SCADA kontrollü otomasyon altyapılarının büyük firmalar tarafından benimsendiği tespit edilmiştir. Ancak küçük ve orta ölçekli işletmelerde bu teknolojilerin kullanımında finansal kısıtlar, teknik personel eksikliği ve altyapı uyumsuzluğu önemli engeller olarak öne çıkmaktadır. Uluslararası karşılaştırmalarda Kanada ve Avustralya'nın tam otonom yeraltı sistemlerine geçişte ileri seviyede olduğu, Polonya'nın ise AB destekli pilot projelerle kademeli dönüşüm izlediği görülmektedir. Şili, derin bakır madenlerindeki uzaktan izleme uygulamalarıyla çevresel izleme alanında öne çıkarken, Türkiye'nin bu ülkelerle karşılaştırıldığında henüz yarı entegre sistem düzeyinde olduğu anlaşılmaktadır.

2. AKILLI MADENCİLİKTE TEKNOLOJİK YAPI

Günümüz madencilik sektöründe dijitalleşme, otomasyon ve yapay zekâ tabanlı uygulamalarla şekillenen teknolojik yapı, "akıllı madencilik" kavramını ortaya çıkarmış ve özellikle yeraltı işletmelerinde üretim güvenliği ile verimliliği eş zamanlı olarak artıran stratejik bir dönüşüm başlatmıştır.

2.1. Literatür Taraması: UWB Teknolojilerinin Gelişimi

UWB teknolojisinin yeraltı madenlerinde kullanımı, 2000'li yılların başlarında IEEE 802.15.4f standardının kabulüyle birlikte hız kazanmıştır. Aşağıda bu konuda yapılmış önemli çalışmalar özetlenmiştir:

- **Alarifi et al. (2016):** UWB sistemlerinin iç mekânda hata payı analizini ele almış, yeraltında %3–5 hata payı ile çalışabildiğini göstermiştir (Pérez-Pérez vd., 2022).
- **Lee & Scholtz (2002):** UWB sinyallerinin yoğun çok yollu (multipath) ortamlardaki performansını değerlendirmiş, madencilik gibi karmaşık ortamlarda RFID ve Wi-Fi'dan daha başarılı olduğunu savunmuştur (Musa ve Wahid, 2020).
- **Musa & Wahid (2020):** UWB sistemleri ile SCADA arasında entegrasyon modeli geliştirmiş, bu kombinasyonun acil durum senaryolarında optimum sonuç verdiğini göstermiştir (ISO/IEC 27001:2022).
- **Pérez-Pérez et al. (2022):** Şili bakır madenlerinde UWB destekli personel izleme sistemlerinin enerji tasarrufuna olan katkısını değerlendirmiştir.

Bu çalışmalar, UWB'nin yalnızca konum izleme değil, operasyonel verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından da kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

2.2. Kavramsal Temeller

Akıllı madencilik, Endüstri 4.0 çerçevesinde değerlendirilen siber-fiziksel üretim sistemlerinin, yeraltı madenciliğine uygulanması anlamına gelmektedir (Deloitte, 2021). Bu sistemler aşağıdaki dört katmanda yapılandırılmaktadır:

1. **Algılama katmanı:** Gaz sensörleri, konum belirleyiciler (UWB, RFID), ortam ısısı-nem ölçerler
2. **İletişim katmanı:** UWB, Wi-Fi, Zigbee, 5G ve LoRaWAN gibi veri taşıyıcı protokoller

3. **Veri kontrol katmanı:** SCADA sistemleri, PLC kontrolörler, RTU (Remote Terminal Unit) bileşenleri
4. **Karar destek katmanı:** Büyük veri (Big Data), yapay zekâ (AI) ve kestirimci analiz yazılımları

Her bir katmanın işlevi, verinin doğru zamanda, doğru karar mekanizmasına ulaşmasını sağlamaktır (McNab, 2019).

2.3. Maden Ortamına Uyum ve Zorluklar

Yeraltı madenciliğinde en büyük zorluklardan biri, sınırlı görüş alanı, zayıf iletişim ağı ve yüksek elektromanyetik parazit ortamıdır. Bu koşullarda, kablosuz veri iletimine dayalı sistemlerin istikrarlı çalışması ancak uygun donanım ve mühendislik altyapısıyla mümkün olmaktadır (Ling, 2020). Akıllı sistemlerin başarılı olabilmesi için öncelikle madende iletişim ağlarının topolojik haritalaması yapılmalı ve sensör yerleşimi buna göre planlanmalıdır.

3. UWB TEKNOLOJİSİNE DAYALI PERSONEL TAKİP SİSTEMLERİ

Yüksek konum hassasiyeti ve çoklu yol ortamlarında güvenilir veri aktarımı sağlayan UWB (Ultra Wideband) teknolojisi, yeraltı madenciliğinde çalışanların anlık olarak izlenmesini mümkün kılan personel takip sistemlerinin temelini oluşturarak iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında yeni bir standart ortaya koymuştur.

3.1. Neden UWB Sistemi

Ultra Wideband (UWB), 3.1–10.6 GHz aralığında çalışan ve yüksek bant genişliği sayesinde düşük güçlü sinyallerle çok hassas konum belirleme

yapabilen kablosuz haberleşme teknolojisidir (Alarifi, 2016). Bu teknoloji, yeraltı ortamındaki metalik yansımalara karşı dirençli yapısıyla öne çıkmakta; ±10–30 cm doğrulukla konum bilgisi sağlayabilmektedir.

UWB'nin en temel farkı, veri iletiminde çok kısa süreli darbe sinyalleri kullanmasıdır. Bu sinyaller, çok yollu yayılım (multipath) etkisinden daha az etkilenir. Böylece maden gibi kapalı ortamlarda dahi kararlı performans gösterebilir (IEEE 802.15.4f Standard).

3.2. Konum Belirleme Algoritmaları

UWB sistemleri, konum tayininde genellikle TDOA (Time Difference of Arrival) algoritmasını kullanır. Sabit anchor noktalarından gelen sinyal sürelerinin farkına göre mobil tag'in konumu üçgenleme yoluyla hesaplanır. Alternatif olarak kullanılan TOF (Time of Flight) ve AOA (Angle of Arrival) algoritmaları da özel durumlarda tercih edilir (Gezici, 2005).

3.3. UWB Tabanlı Sistemlerin Yeraltındaki Uygulamaları

Ultra Geniş Bant (UWB) tabanlı sistemler, yeraltı madenciliği gibi sinyal zayıflamasının ve çoklu yol (multipath) etkisinin yoğun olduğu ortamlarda, milimetre düzeyine yakın konum doğruluğu sağlayarak personel, ekipman ve çevresel koşulların anlık izlenmesini mümkün kılmaktadır. Bu sistemler, klasik RFID veya Wi-Fi tabanlı çözümlere kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek zaman çözünürlüğü sunar; bu da acil durum yönetimi, üretim verimliliği ve iş güvenliği açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Özellikle Türkiye'de MAPEG tarafından yayımlanan 2020 *tarihli* Yeraltı Madenlerinde Dijital İzleme Sistemleri Teknik Rehberi uyarınca, tehlikeli iş sınıfına giren yeraltı metal madenlerinde personel takip sistemlerinin kurulması zorunlu hale gelmiş; bu doğrultuda UWB teknolojisi, yerli ve yabancı firmalar tarafından geliştirilen entegre takip

çözümlerinin temelini oluşturmuştur. Yeraltı ağ yapısına entegre edilen bu sistemler sayesinde operatörler, merkezi kontrol odalarından tüm personelin konumunu, hareket durumunu ve riskli alanlara giriş-çıkışlarını anlık olarak

3.3.1.*Gerçek Zamanlı Personel Takibi*

Yeraltı madenlerinde UWB sistemleriyle yapılan personel izleme uygulamaları, sadece konum tespitine değil; acil durum yönetimi, vardiya kontrolü, yetkisiz alanlara giriş engelleme ve enerji verimliliği gibi pek çok işlevi beraberinde getirmektedir (Eti Bakır A.Ş, 2021). Birçok maden işletmesi, bu sistemleri entegre ederek aynı zamanda üretim planlamasını da optimize etmektedir.

3.3.2. *Yeraltı Trafik Sinyalizasyon Sistemleri ve Scada*

Yeraltı madenciliğinde artan makine yoğunluğu ve insan-makine etkileşiminin güvenli yönetimi gerekliliği, UWB (Ultra Wideband) tabanlı trafik sinyalizasyon sistemleri ile SCADA altyapılarının entegre kullanımını zorunlu hale getirmiş; bu entegrasyon sayesinde hem trafik akışı optimize edilmekte hem de tehlikeli çakışmaların önüne geçilerek operasyonel güvenlik artırılmaktadır.

3.3.2.1. *SCADA Sisteminin Yapısı*

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), madende kurulu sensörlerden ve kontrol ekipmanlarından gelen verileri toplayan, analiz eden ve operatöre karar desteği sunan merkezi sistemdir (Boliden, 2020). Özellikle trafik sinyalizasyon sistemleri SCADA'ya bağlı olarak çalışır ve şu bileşenleri içerir:

- PLC (Programlanabilir Lojik Kontrolör): Sinyalizasyon mantığını yönetir

- RTU (Remote Terminal Unit): Veriyi uzak noktadan merkez SCADA sistemine iletir
- HMI (Human Machine Interface): Operatöre görsel arayüz sağlar
- Sinyal cihazları: LED paneller, sirenler, yön göstergeleri

Bu yapılar sayesinde yeraltı taşıma hatlarında araç geçişi, insan trafiği ve acil durum sinyalleri eş zamanlı koordine edilir.

3.3.2.2. *Trafik Yönetiminde SCADA Uygulaması*

Yeraltı trafik akışında en büyük risk, karşılıklı dar galerilerde araçların çakışması ve personelin makineyle temas etmesidir. SCADA destekli sistemlerde:

- Araçlar üzerindeki tag'ler ile galeri başlarındaki sensörler haberleşir,
- Trafik yoğunluğu dinamik olarak analiz edilir,
- Karşı yönden gelen araçlara otomatik sinyal gönderilir,
- Sistem, personelin o alanda bulunup bulunmadığını da hesaba katar.

3.3.2.3. *Örnek Uygulama: Boliden – Garpenberg (İsveç)*

İsveç'te Boliden firmasına ait Garpenberg kurşun-çinko yeraltı madeninde, SCADA destekli sinyalizasyon sistemleri ile:

- Karşılaşma kaynaklı kazaların %70 azaldığı,
- Araç geçiş sürelerinin ortalama %25 kısaldığı,
- Acil durum kaçış yollarının sistem tarafından otomatik olarak güncellendiği raporlanmıştır (6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012).

Sistem, aynı zamanda enerji tüketimini de analiz ederek boşta çalışan ekipmanları devre dışı bırakmaktadır.

4. TÜRKİYE'DE YASAL ZORUNLULUKLAR VE TEKNOLOJİK UYUM

Türkiye'de yeraltı madenciliği faaliyetleri, yüksek risk grubunda yer alması nedeniyle yasal mevzuatla sıkı şekilde denetlenen sektörlerden biridir. Özellikle 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile Maden İşyerlerinde Sağlık ve Güvenlik Yönetmeliği**,** işverenlere; risk değerlendirmesi yapma, acil durum planları hazırlama, gaz ölçüm sistemleri kurma ve çalışanları sürekli izleme gibi çok sayıda teknik yükümlülük getirmiştir. 2020 yılında MAPEG tarafından yayımlanan *"Yeraltı Madenlerinde Dijital İzleme Sistemleri Teknik Rehberi"* ise bu zorunlulukları daha da somutlaştırarak; personel takip sistemlerinin, çevresel sensörlerin, SCADA ve CCTV altyapılarının hangi koşullarda ve hangi teknolojiyle kurulması gerektiğini teknik şartlara bağlamıştır. Bu bağlamda, yasal düzenlemeler yalnızca güvenlik standartlarını artırmakla kalmamış, aynı zamanda madencilik sektöründe UWB, SCADA, LIDAR gibi ileri teknolojilerin entegrasyonunu teşvik eden bir çerçeve sunmuştur. Dolayısıyla Türkiye'de teknolojik uyum süreci, mevzuat temelli bir zorunluluktan doğmuş ve bu durum, yerli ve yabancı teknoloji tedarikçilerinin çözüm üretme kapasitesini doğrudan etkilemiştir.

4.1. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu

Bu kanun, işverenlere çalışanların güvenliğini sağlama, risk analizi yapma ve acil durumlara karşı gerekli önlemleri alma yükümlülüğü getirmektedir. Özellikle Madde 10 ve Madde 12, konum takibi ve acil müdahale sistemlerinin kurulmasını gerekli kılar (Maden İşyerlerinde Sağlık ve Güvenlik Yönetmeliği. 2013).

4.2. Maden İşyerlerinde Sağlık ve Güvenlik Yönetmeliği

Yönetmeliğin 22. ve 24. maddeleri, yeraltı işletmelerinde:

- Çalışanların nerede olduğunun izlenmesini,
- Galerilerin ve geçiş alanlarının sinyalizasyonla düzenlenmesini,
- Acil tahliye planlarının teknolojik olarak desteklenmesini zorunlu kılar (MİGEM, 2020).

4.3. MİGEM Teknik Rehberi

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı MİGEM tarafından 2020 yılında yayımlanan teknik rehberde, özellikle UWB gibi yüksek hassasiyetli konum sistemleri "önerilen minimum güvenlik standardı" olarak tanımlanmıştır (Lee ve Scholtz, 2002).

5. ÜLKE ve TEKNOLOJİ KARŞILAŞTIRMALARI: ULUSLARARASI ÖRNEKLER

Günümüzde akıllı madencilik teknolojilerinin benimsenme düzeyi, ülkelerin doğal kaynak politikaları, endüstriyel altyapıları, dijital dönüşüm stratejileri ve mevzuat yapıları doğrultusunda farklılık göstermektedir. Bu çerçevede, Türkiye**,** geleneksel üretim tekniklerinden dijital sistemlere geçiş sürecinde MAPEG'in teknik rehberleri ve 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu doğrultusunda dijital izleme ve personel takip sistemlerinin kullanımını yasal zorunluluk haline getirmiştir (MİGEM, 2020).

Her biri**,** farklı coğrafi, ekonomik ve teknolojik koşullarda akıllı madencilik teknolojilerini benimsemiş**,** bu alanda öncü veya stratejik gelişme aşamasında yer alan ülkeler olan Kanada, Avustralya, Polonya ve Şili**,** Türkiye ile karşılaştırmalı olarak seçilmiştir. Türkiye'nin geçirdiği

dijital dönüşüm sürecini anlamak ve uluslararası standartlara ne ölçüde yaklaştığını değerlendirmek için bu ülkeler örnek niteliğindedir.

Kanada, özellikle Sudbury ve Ontario bölgesindeki madenlerde kullanılan otonom LHD (yükleyici) araçları, uzaktan kumandalı sondaj sistemleri ve yeraltı Wi-Fi tabanlı iletişim altyapısı sayesinde yapay zekâ destekli üretim optimizasyonu konusunda dünya genelinde öncü konumdadır (MIRARCO, 2021).

Avustralya**,** özellikle BHP Billiton **ve** Rio Tinto gibi küresel firmaların yatırımlarıyla, veri odaklı yönetim, yapay zekâ destekli karar sistemleri, IoT tabanlı sensör ağları ve SCADA merkezli otomasyon gibi bileşenlerle tam entegre dijital madencilik sistemlerini hayata geçirmiştir (BHP, 2020).

Polonya, Avrupa Birliği destekli projeler aracılığıyla "Digital Mining" başlıklı dönüşüm programlarını başlatmış ve pilot uygulamalarla dijital altyapısını kademeli olarak geliştirmektedir. Tomasz Nowak'ın 2022 tarihli çalışmasında, Polonya'daki dijital madencilik projelerinin özellikle personel güvenliği ve üretim verimliliği odaklı olarak tasarlandığı vurgulanmaktadır (Nowak, 2022).

Şili ise dünyanın en büyük bakır üreticilerinden biri olarak, derin madenlerde uzaktan izleme sistemleri, çevresel gaz sensörleri, 3B modelleme yazılımları ve uzaktan kontrollü ekipmanlar ile sürdürülebilir madencilik ve güvenlik alanında önemli ilerlemeler kaydetmiştir. CODELCO gibi kamuya ait işletmeler, yapay zekâ ve büyük veri entegrasyonu konularında özel sektörle iş birliği içinde çalışmaktadır (CODELCO, 2021).

Bu ülkeler arasında yapılacak karşılaştırmalı analizler, Türkiye'nin akıllı madencilik politikalarının uluslararası ölçekte nerede konumlandığını değerlendirmek ve teknoloji-uyum stratejilerini daha etkin planlamak açısından önemli bir referans çerçevesi sunmaktadır.

Tablo Türkiye – Kanada – Avustralya – Polonya – Şili Karşılaştırması

Ülke	**Personel Takip Zorunluluğu**	**UWB Kullanımı**	**SCADA Entegrasyonu**	**Dijitalleşme Skoru (10 üzerinden)**
Türkiye	Evet (6331 sayılı yasa)	Artmakta	Kısmi (büyük madenlerde)	6/10
Kanada	Evet	Yaygın	Tam SCADA + AI destekli	9/10
Avustralya	Evet	Standart hale gelmiş	SCADA + RTU uygulamalı	10/10
Polonya	Evet	Sınırlı (pilot seviyede)	Kısmi otomasyon	5/10
Şili	Evet	Orta düzey	Yüksek entegrasyon	8/10

Polonya'da dijital sistemler henüz pilot düzeydedir. Şili ise özellikle bakır madenlerinde dijital gözetim ve SCADA uygulamalarında öne çıkmaktadır.

5.1. UWB'nin Diğer Sistemlerle Teknik Karşılaştırması

UWB'nin hata payı düşüklüğü ve çok yollu sinyal kırılmasına karşı dayanıklılığı, özellikle metalik ortamlarda (örneğin çinko-bakır madenleri) vazgeçilmez kılmaktadır (Lee ve Scholtz, 2002).

Sistem	**Ortalama Hata Payı**	**Enerji Tüketimi**	**Metal Ortam Dayanımı**	**Uygunluk**
RFID	±3–5 metre	Düşük	Düşük	Zayıf
Wi-Fi	±1–2 metre	Orta	Orta	Orta
UWB	±10–30 cm	Düşük	Yüksek	Çok İyi
Bluetooth	±1 metre	Yüksek	Düşük	Düşük

6.AKILLI MADENCİLİK TEKNOLOJİSİNE İLİŞKİN SİSTEMSEL ZORLUKLAR VE GELİŞİM ALANLARI

Akıllı madencilik teknolojilerinin uygulanmasında karşılaşılan sistemsel zorluklar; altyapı eksiklikleri, entegrasyon uyumsuzlukları, yüksek yatırım maliyetleri ve nitelikli insan kaynağı yetersizliği gibi faktörlerden kaynaklanmakta olup, bu sorunların aşılması aynı zamanda sektör için önemli bir gelişim ve yenilik alanı doğurmaktadır.

6.1. Karşılaşılan Başlıca Zorluklar

1. **Yüksek kurulum maliyetleri:** UWB sistemleri, anchor ve tag maliyeti yanında yazılım lisanslarıyla da ciddi bir yatırım gerektirir.
2. **Uzman eksikliği:** SCADA ve kablosuz konum sistemleri konusunda Türkiye'de yetkin mühendis sayısı sınırlıdır.
3. **Veri güvenliği:** Gerçek zamanlı takip sistemleri, dışa açık veri akışı nedeniyle siber saldırılara açık hale gelebilir.
4. **Mevzuat denetimi eksikliği:** Yasal zorunluluklara rağmen çoğu işletmede denetimler yüzeysel yapılmaktadır.

6.2. Gelişim Önerileri

- **Yerli üretim UWB donanımı:** Anchor ve tag cihazlarının TÜBİTAK destekli projelerle yerli olarak geliştirilmesi
- **Modüler sistem tasarımı:** Küçük ölçekli madenlere uyarlanabilir taşınabilir sistem modelleri
- **Akademi-sanayi işbirliği:** Mühendislik fakültelerinde SCADA ve UWB temelli madencilik laboratuvarları kurulmalı
- **Veri güvenliği standardı:** ISO/IEC 27001 gibi veri güvenliği standartları madencilik yazılımlarına entegre edilmeli

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yeraltı metalik madenlerinde akıllı madencilik teknolojileri, sadece üretim verimliliğini değil, aynı zamanda insan hayatını doğrudan etkileyen güvenlik faktörlerini de şekillendirmektedir. Ultra Geniş Bant (UWB) tabanlı personel takip sistemleri ve SCADA destekli yeraltı trafik sinyalizasyon çözümleri, bu dönüşümün merkezinde yer almaktadır.

Türkiye, yasal mevzuat altyapısına sahip olmasına rağmen; uygulamada teknik kapasite, bütçe kısıtları, yerli üretim eksikliği ve uzman açığı gibi nedenlerle dijitalleşme sürecinde arzu edilen seviyeye ulaşamamıştır. Oysa, bu teknolojilerin yalnızca büyük ölçekli işletmelerde değil, orta ve küçük ölçekli madenlerde de modüler çözümlerle uygulanabilir hâle getirilmesi, sektördeki güvenlik ve verimlilik standardını önemli ölçüde yükseltecektir. Akıllı madencilik teknolojilerinde Türkiye'nin uluslararası rakiplerine yetişebilmesi ve sektörün dışa bağımlılığının azaltılabilmesi için aşağıdaki önlem ve eylemler hayata geçirilmelidir:

- UWB ve SCADA sistemlerinin kurulumu yasal denetim kriteri hâline getirilmeli
- TÜBİTAK ve Sanayi Bakanlığı destekli yerli donanım üretimi teşvik edilmeli
- Üniversitelerde madencilik odaklı SCADA/UWB laboratuvarları kurulmalı
- ISO/IEC 27001 gibi veri güvenliği standartları sektöre entegre edilmeli
- Küçük işletmeler için taşınabilir ve düşük maliyetli sistem modelleri geliştirilmeli

Bu çerçevede kamu-özel sektör-akademi işbirliğinin artırılmasıyla Türkiye, dijital madencilikte sadece kullanıcı değil, aynı zamanda üretici ülke konumuna gelebilir.

KAYNAKLAR

Alarifi, A. vd., "UWB Positioning", *Sensors*, Cilt 16, Sayı 5, 2016, Makale No: 707. S.1-23.

BHP, *Mining Automation and Smart Operations Report,* Avustralya, 2020, s. 8–14.

Boliden AB, *Sustainability Report 2020 – Garpenberg Site*, İsveç, 2020, s. 29.

CODELCO, *Annual Sustainability and Innovation Report*, Santiago, Şili, 2021, s. 30–35.

Deloitte, *Tracking the Trends 2021*, Deloitte Global, 2021, s. 4–8.

Gezici, S., "Wireless Position Estimation", *IEEE Wireless Communications*, Cilt 12, Sayı 6, 2005, s.24-40.

Gök, M. & Çelik, T., "SCADA Uygulamaları", *Mühendislikte Otomasyon Dergisi*, 2020, s. 77–81.

Hustrulid, W.A. & Bullock, R.L., *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, SME, 2001, s.8.

IEEE, *IEEE 802.15.4f Standard – Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, IEEE Press, 2012.

International Organization for Standardization (ISO), *ISO/IEC 27001:2022 – Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection*, Cenevre, 2022.

Lee, J.Y. & Scholtz, R.A., "UWB in Dense Multipath", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Cilt 20, Sayı 9, 2002, s. 1677–1683.

Ling, D., "Smart Mining Architecture", *Automation in Mining Journal*, 2020, s. 45–49.

MAPEG (MİGEM), *Teknik Rehber: Yeraltı Madenlerinde Dijital İzleme Sistemleri*, Ankara, 2020, Bölüm 4, s. 9–13.

McNab, K., "The Digital Mine", *Mining Magazine*, 2019, s. 12–15.

MIRARCO (Mining Innovation Rehabilitation and Applied Research Corporation), *Underground Mining Technology and Automation in Canada*, Sudbury, Kanada, 2021, s. 12–18.

Musa, A. & Wahid, A., "SCADA–UWB Integration Models for Emergency Response", *IEEE Access*, Cilt 8, 2020, s. 15432–15440.

Nowak, T., "Digital Mining in Poland: Pilot Projects and Challenges", *Journal of Mining Innovation*, Cilt 28, Sayı 1, 2022, s. 21–25.

Paraszczak, J. & Fytas, K., "Toward a Better Understanding of Productivity in Underground Mining", *Mining Engineering*, Cilt 64, Sayı 10, 2012, s. 36–42.

Pérez-Pérez, C. vd., "UWB Positioning in Chilean Copper Mines", *Journal of Sustainable Mining*, Cilt 17, Sayı 4, 2022, s. 215–228.

Rio Tinto, *Mine of the Future Program*, Londra, 2019, s. 22–27.

T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, *Maden Kazaları Raporu*, Ankara, 2022, s. 15.

T.C. Yasalar, *6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu*, Resmî Gazete: 30.06.2012, Sayı: 28339, Madde 10–12.

T.C. Yönetmelikler, *Maden İşyerlerinde Sağlık ve Güvenlik Yönetmeliği*, Resmî Gazete: 19.09.2013, Madde 22–24.

BİYOREAKTÖR KULLANARAK KÜRE BAKIR CEVHERİNİN (ETİ BAKIR A.Ş., KASTAMONU, TÜRKİYE) BİYOLİÇ İŞLEMİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF BIOLEACHING PROCESSING OF KÜRE COPPER ORE (ETI BAKIR CO., KASTAMONU, TÜRKİYE) USING A BIOREACTOR

Zehra Çetinkaya
Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Adana

ÖZ: Bu çalışma, Türkiye'nin Kastamonu ilinde bulunan Küre bakır cevherinin biyoreaktör kullanarak biyoliç yöntemiyle işlenme potansiyelini araştırmaktadır. Biyoliç, düşük tenörlü metal cevherlerinden ekonomik ve çevre dostu bir yöntemle metal kazanımı sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Çalışmada, Acidithiobacillus ferrooxidans bakteri kültürü kullanılarak biyoreaktörde 576 saat boyunca bakteri sayımı, pH, bakır ve demir kazanımları incelenmiştir. Bu yöntem, erlenmayerlerde gerçekleştirilen biyolojik yıkama yöntemlerine kıyasla daha yüksek katı oranlarında metal kazanımına olanak sağladığı için avantajlıdır ve endüstriyel uygulamalar için daha pratik bir alternatif sunmaktadır. Çalışma, biyoliç yönteminin sürdürülebilir bir teknoloji olarak düşük tenörlü bakır cevherlerinin işlenmesinde etkili bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, özellikle Eti Bakır A.Ş. gibi şirketlerin biyolojik yöntemleri entegre ederek metal kazanım süreçlerinde çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyoliç, Acidithiobacillus Ferrooxidans, Bakır Cevheri

ABSTRACT: *This study investigates the potential of processing the Küre copper ore, located in Kastamonu, Türkiye, using the bioleaching method in a bioreactor. Bioleaching plays a significant role in providing an economical and environmentally friendly method for metal recovery from low-grade metal ores. In this study, the bacterial culture Acidithiobacillus ferrooxidans was used in a bioreactor, and bacterial count, pH, copper, and iron recoveries were analyzed over a period of 576 hours. This method is advantageous because it allows for metal recovery at higher solid ratios compared to bioleaching processes carried out in Erlenmeyer flasks, making it a more practical alternative for industrial applications. The study*

demonstrates that bioleaching is an effective option for processing low-grade copper ores as a sustainable technology. These results emphasize the potential for companies like Eti Bakır Co. to reduce environmental impacts in their metal recovery processes by integrating biological methods.

Keywords: *Bioleaching, Acidithiobacillus Ferrooxidans, Copper Ore*

1. GİRİŞ

Bakır, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve modern teknolojinin vazgeçilmez bir unsuru olan önemli bir metaldir. Bakır mineralleri, magmatik, hidrotermal, sedimanter, oksidasyon ve ayrışma süreçleri gibi çeşitli jeolojik mekanizmalar sonucunda oluşur. Bu süreçler, kalkopirit ($CuFeS_2$) gibi birincil sülfür minerallerinin yanı sıra, malakit ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$) gibi ikincil minerallerin birikmesini sağlar (Geology Science, 2025). Kalkopirit, dünyada en bol bulunan bakır sülfür mineralidir ve ekonomik açıdan en önemli bakır mineralidir (Bakhti vd., 2024). Türkiye'de aktif olarak işletilen önemli bakır yatakları bulunmaktadır. Özellikle Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri, bakır madenciliğinin yoğunlaştığı başlıca alanlardır.

Eti Bakır A.Ş., Kastamonu'nun Küre ilçesi ve Artvin'in Murgul ilçesindeki ocaklardan bakır cevheri çıkararak, bu cevherleri flotasyon tesislerinde zenginleştirip bakır konsantresi üretmektedir (ETİ BAKIR, 2025). Küre İşletmesi'nde yılda yaklaşık 1,5 milyon ton tüvenan bakır cevheri işlenmekte ve 170.000 ton bakır konsantresi üretilmektedir. Ayrıca, bu tesiste yılda 500.000 ton pirit konsantresi üretimi de gerçekleştirilmektedir. Murgul İşletmesi'nde ise cevher üretimi ve bakır konsantresi üretimi yapılmaktadır. Eti Bakır A.Ş., Samsun'daki izabe tesisinde yıllık 70.000 ton katot bakır üreterek Türkiye'nin bakır ihtiyacının

yaklaşık %20'sini karşılamaktadır. Türkiye genelinde, 2023 yılı itibarıyla toplam tüvenan bakır cevheri üretimi 5,9 milyon ton olarak kaydedilmiştir. Bakır cevherleri ve zenginleştirilmiş bakır cevherleri ihracatı ise aynı yıl 390.000 ton ile son altı yılın en yüksek seviyesine ulaşmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025)

Geleneksel bakır üretim yöntemleri, yüksek tenörlü cevherlerin azalması ve çevresel etkilerin artması nedeniyle giderek daha az sürdürülebilir hale gelmektedir. Bu durum, düşük tenörlü cevherlerden bakır kazanımını mümkün kılan alternatif yöntemlere olan ilgiyi artırmıştır. Bu yöntemler arasında öne çıkan biyoliç, düşük maliyetli ve çevre dostu bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir. Biyoliç, mikroorganizmaların metal sülfürleri çözündürerek metallerin çözeltiye alınmasını sağlayan bir süreçtir ve özellikle bakır, altın ve nikel kazanımında başarıyla uygulanmaktadır (Jia vd., 2019; Johnson vd., 2023; Roberto vd., Schippers, 2022). Geleneksel pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlere kıyasla daha az enerji tüketir ve çevresel etkileri en aza indirir. Ayrıca, düşük tenörlü cevherlerin işlenmesinde ekonomik bir çözüm sunar. Biyoliç prosesi, birçok avantajına rağmen bazı dezavantajlara da sahiptir. Hidrometalurjik ve pirometalurjik proseslere kıyasla çok daha yavaş ilerlemesi, kontrolünün zor olması ve sistemde istenen mikroorganizmaların aktifliğinin sürekli olarak sağlanması gerekliliği, biyoliç prosesinin başlıca dezavantajları arasında yer almaktadır (Çiftçi ve Akçıl, 2003). Biyoliç prosesinin verimli bir şekilde yürütülebilmesi için reaksiyon koşullarının kontrollü olması büyük önem taşımaktadır. Bu noktada biyoreaktörler, sıcaklık, pH, oksijen seviyesi ve karıştırma hızı gibi parametrelerin optimize edilmesine olanak tanıyarak sürecin daha stabil ve etkin ilerlemesini sağlamaktadır. Ayrıca, biyoreaktör kullanımı, erlenmayer şişelerinde gerçekleştirilen biyoliç deneylerine kıyasla daha yüksek katı oranlarında çalışılmasına imkân tanır ve böylece

endüstriyel ölçekli uygulamalara daha uygun bir alternatif sunar. Siyah şeyl kökenli bir bakır konsantresinin biyoliçi üzerine yapılan çalışmada, kesikli biyoliç testlerinde %95'ten fazla, sürekli biyoliç testlerinde ise %91 bakır geri kazanımı elde edilmiştir (Spolaore vd., 2011). Ranjbar vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, bir bakır tesisinden alınan kalkopirit konsantresi, farklı tane boyutları (d_{80} = 45, 32 ve 16 μm) ve iki farklı bakteri kültürü kullanılarak karıştırmalı tanklarda tek ve iki aşamalı sürekli biyoliç testlerine tabi tutulmuş, iki aşamalı sistemde %95 bakır çözünmesi sağlanmıştır. Ayrıca, matematiksel modelleme ile tane boyutu küçülme kinetiği incelenmiş ve en hızlı küçülmenin ilk beş günde gerçekleştiği belirlenmiştir. Bakthi vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, İran'daki Sarcheshmeh bakır madeninden alınan numunelerin mikrobiyal çeşitliliği incelenmiş ve asidofilik mikroorganizmalar tespit edilmiştir. Yapılan biyoliç deneylerinde, çalkalamalı şişelerde %32, kolonlarda %73 ve biyoreaktörlerde %76 bakır geri kazanımı sağlanmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, kalkopirit cevherinin biyoliç yöntemiyle değerlendirilmesinde yüksek katı oranlarının metal kazanımına etkisi üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği görülmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin Kastamonu ilinde bulunan Küre bakır cevherinin biyoliç yöntemiyle değerlendirilmesi, biyoreaktör kullanımının süreç üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve yüksek katı oranlarının metal kazanımına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

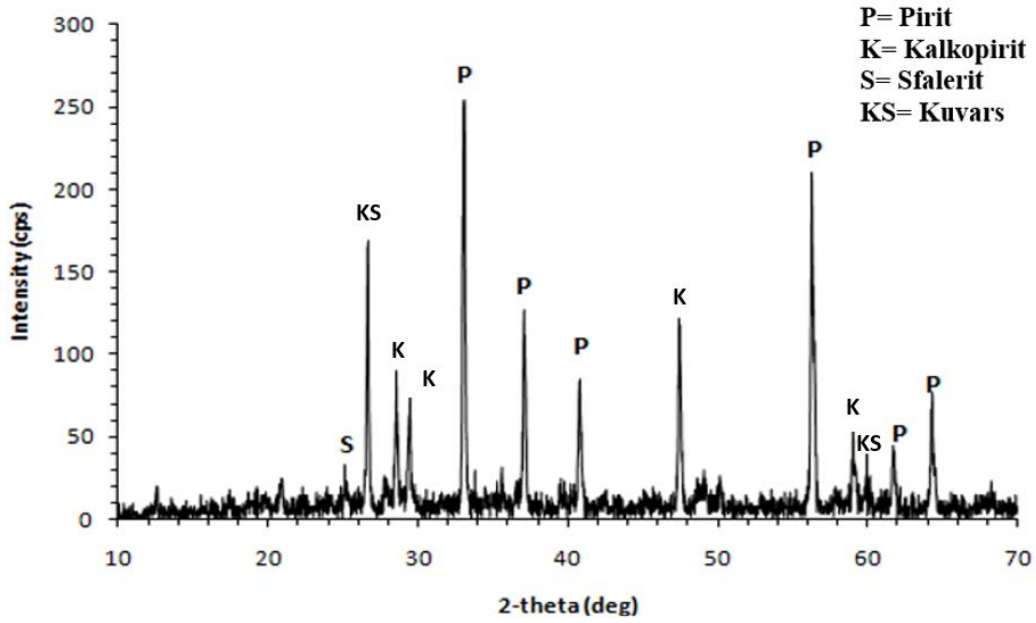
Deneysel çalışmalarda, Küre bakır işletmesinden temin edilen tüvenan bakır cevheri numunesi kullanılmıştır. Numunenin kimyasal bileşimi XRF analiz yöntemi (Panalytical marka) ile belirlenmiş olup, sonuçlar Çizelge 1'de

sunulmuştur. Tüvenan cevher bileşimindeki bakır, demir ve sülfür oranı sırasıyla %1,90, %27,29 ve %40,06 olarak tespit edilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Tüvenan cevherin kimyasal analizi

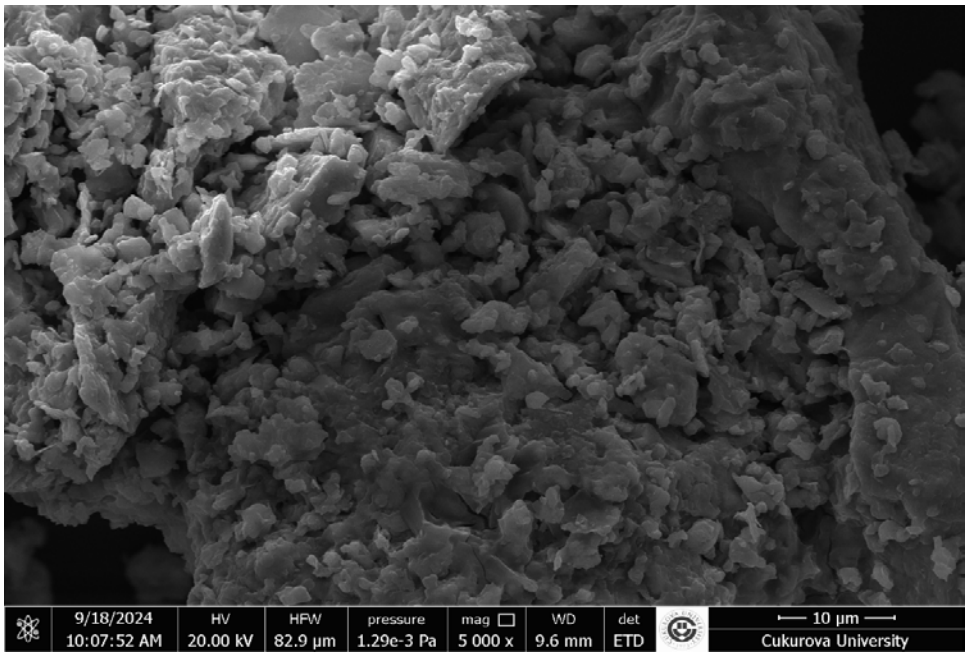
Bileşik Adı	**(%)**
SiO_2	13,00
CaO	1,54
K_2O	0,25
TiO_2	0,29
S	40,06
Fe	27,29
Cu	1,90
Zn	0,42
Pb	0,19

Numunenin mineralojik analizi ise X-Işını Difraksiyon (XRD, Rigaku Miniflex II marka cihaz) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, FEI Quanta 650 field-emission) yöntemi kullanılarak ile gerçekleştirilmiştir. XRD tekniği ile belirlenen başlıca mineraller pirit, kalkopirit, sfalerit ve kuvars olarak tespit edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Tüvenan cevherin XRD patterni

Numunenin SEM analizi ve EDX spektrum sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Şekilde sunulan EDX spektrumları, alansal analiz yöntemiyle elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre demir ve sülfür elementlerinin yoğunluğu, cevherin büyük oranda pirit (FeS_2) içerdiğini göstermektedir. Ayrıca, bakırın varlığı, kalkopirit ($CuFeS_2$) gibi bakır içeren sülfürlü minerallerin mevcudiyetine işaret etmektedir. Silisyumun tespiti ise kuvars (SiO_2) mineralinin varlığını göstermektedir. EDX analizinde tespit edilen altın ise, örneğe yapılan altın kaplama işleminden kaynaklanmaktadır. Örneğin SEM incelemesi ve XRD analiz sonuçlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir.



C: %3,44, O: %34,09, Mg: %0.31, Si: %7,54, S: % 18,96, Fe: %%24,26, Cu: %1.01, Au: %8,69

Şekil 2. Tüvenan cevherin SEM analizi ve EDX ile belirlenen kimyasal bileşimi

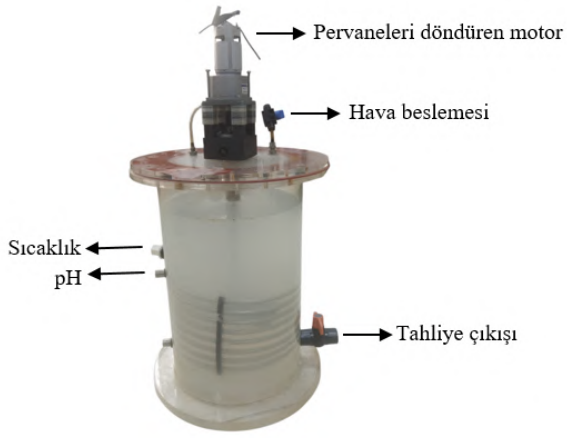
Biyoliç deneyleri öncesinde numune, çeneli kırıcı ve bilyalı değirmen kullanılarak tamamı -75 µm tane boyutuna ulaşacak şekilde kırılıp öğütülmüştür. Deneysel çalışmalarda *Acidithiobacillus ferrooxidans* türü bakteri kullanılmış olup, bu saf kültür Almanya'daki Zellkulturen (DSMZ)

kültür koleksiyonundan temin edilmiştir. Bakterinin optimum kültürleme koşulları 30°C sıcaklık, başlangıç pH değeri 2 ve 150 rpm karıştırma hızında ayarlanmıştır. *Acidithiobacillus ferrooxidans* için kullanılan besiyeri Çizelge 2'de verilmiştir. Biyoliç deneylerinin başlangıcında bakteri konsantrasyonu $8{,}70\times10^{7}$ hücre/mL seviyesine ulaşmıştır.

Çizelge 2. Acidithiobacillus ferrooxidans'ın besi ortamı

$FeSO_{4\ x}\ 7H_2O$	55,6 g/L
$(NH_4)_{2\ x}\ SO_4$	0,4 g/L
$MgSO_{4\ x}\ 7H_2O$	0,4 g/L
$KH_{2\ x}\ PO_4$	0,2 g/L
KCI	0,1 g/L
pH (0,1 N H_2SO_4 ile)	2,0

Daha yüksek katı oranlarını (ağırlık/hacim cinsinden %10, %15 ve %20) incelemek amacıyla deneyler, 16 litrelik hava beslemeli pleksiglas biyoreaktörde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Gerekli hava beslemesi, maksimum çıkışı 6 L/dakika olarak belirtilen bir akvaryum pompası ile sağlanmıştır. Biyoreaktör sterilize edildikten sonra, demir içermeyen besiyeri ile birlikte bakır örnekleri reaktöre yerleştirilmiştir. 60 dakikalık karıştırmanın ardından biyoreaktöre 1600 ml bakteri kültürü eklenmiş ve deneyler 576 saat boyunca sürdürülmüştür.

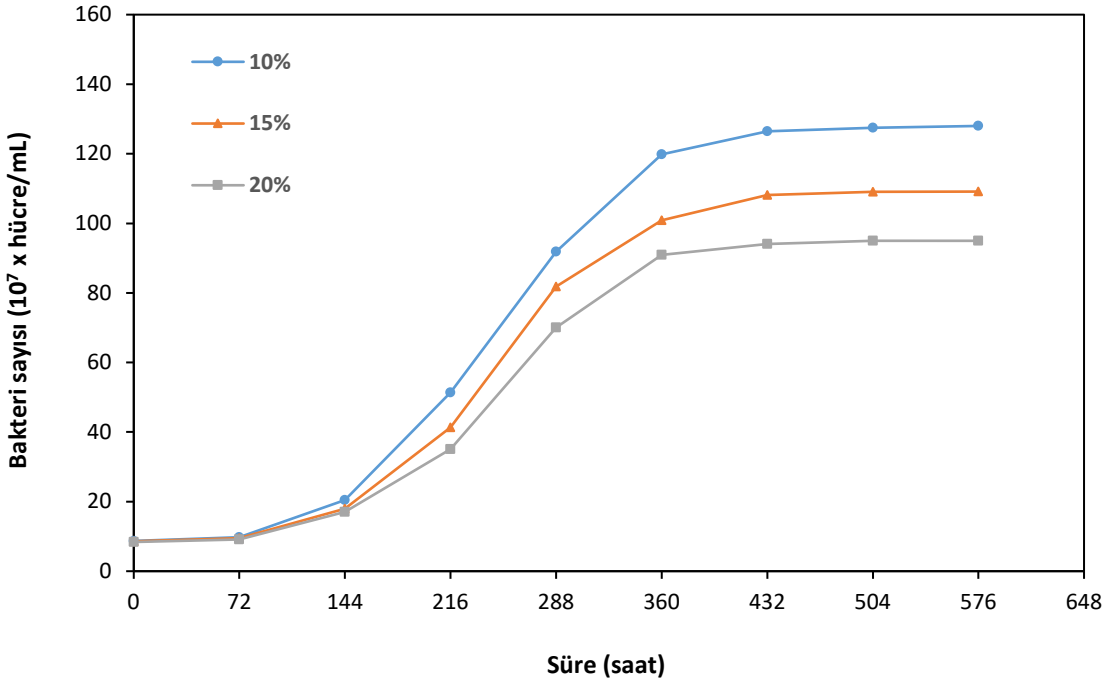


Şekil 3. Hava beslemeli pleksiglas biyoreaktör (Çetinkaya, 2024).

Biyoliç deneyleri süresince, her 3 günde bir çözeltilerden 10 mL örnek alınmış ve analiz öncesinde, çözeltideki süspanse katıların uzaklaştırılması amacıyla 0,2 mikron gözenek çapına sahip membran filtreden geçirilmiştir. Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) analizleri, bu filtrasyon işleminden sonra elde edilen çözelti üzerinden gerçekleştirilmiştir. Liç çözeltisindeki toplam demir ve bakır, Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü Kimya Laboratuvarında bulunan Perkin Elmer PinAAcle 900H marka Atomik Absorpsiyon Spektroskopisiyle (AAS) analiz edilmiştir. Çözeltinin pH değeri, bir pH metre (WTW S-720) ile ölçülmüştür. Liç çözeltisindeki bakteri sayısı üç günde bir Nikon YS-100 model mikroskop kullanılarak Petroff-Hausser Lamı ile yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışma parametresi olarak belirlenen farklı katı oranlarında yapılan deneylerde pH ve bakteri sayısı ölçümlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 4-7'de sunulmuştur. 576 saat süren biyoliç deneylerinde bakteri sayımı ile birlikte üç günde bir pH ölçümleri de yapılmıştır. Bakteri kültürünün; kuluçka, çoğalma ve duraklama evreleri belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Biyoliç deneylerinde, %10 katı oranında, bakteri gelişim fazı 360. saatten sonra tamamlanmış ve bakteri sayısı $1.2x10^9$ hücre/mL seviyesinde kalmıştır. Ancak katı oranının artması durumunda bu süreç uzamış ve %20 katı oranında ortamdaki bakteri sayısı $9.4x10^8$ hücre/ml olduğu belirlenmiştir (Şekil 4).

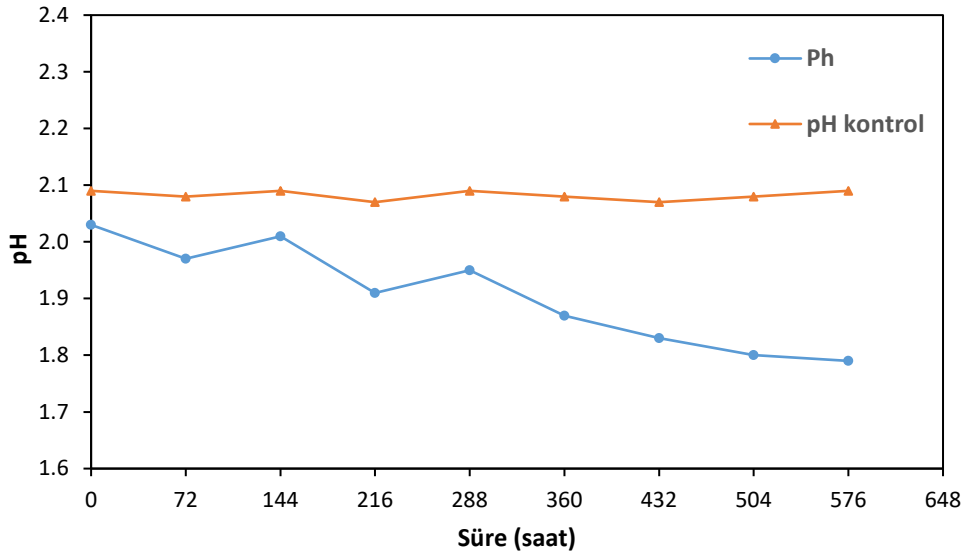


Şekil 4. Biyoliç deneylerinde (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) farklı katı oranlarında elde edilen bakteri sayıları

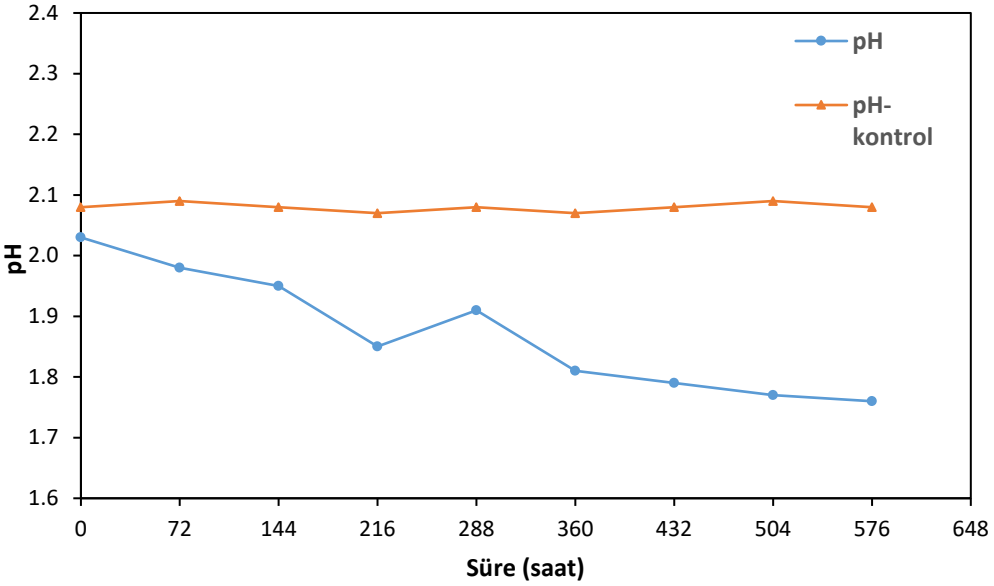
Biyoliç deneyleri boyunca, %10 ve %15 katı oranlarında pH değerlerinde deneyin başlangıcından itibaren belirgin bir azalma gözlemlenmiştir (Şekil 5–6). Bu durum, *Acidithiobacillus ferrooxidans*'ın metabolik olarak aktif hale geldiğini ve sülfür ile demir bileşiklerinin oksidasyonunun başladığını göstermektedir. Öte yandan, %20 katı oranıyla yürütülen deneyde ilk 72 saat boyunca pH'da bir artış meydana gelmiş, bu sürecin ardından ise pH değeri hızlı bir şekilde azalmaya başlamıştır (Şekil 7). Genel olarak, tüm deney koşullarında pH değerlerindeki düşüş, *Acidithiobacillus ferrooxidans*'ın aktif olduğunu ve biyoliç sürecinin başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir.

Bakteri içermeyen kontrol gruplarında pH değerleri incelendiğinde, deney süresi boyunca pH'ın stabil kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ortamda herhangi bir biyolojik oksidasyon sürecinin gerçekleşmediğini, dolayısıyla sülfür ve/veya demir bileşiklerinin mikrobiyal yolla

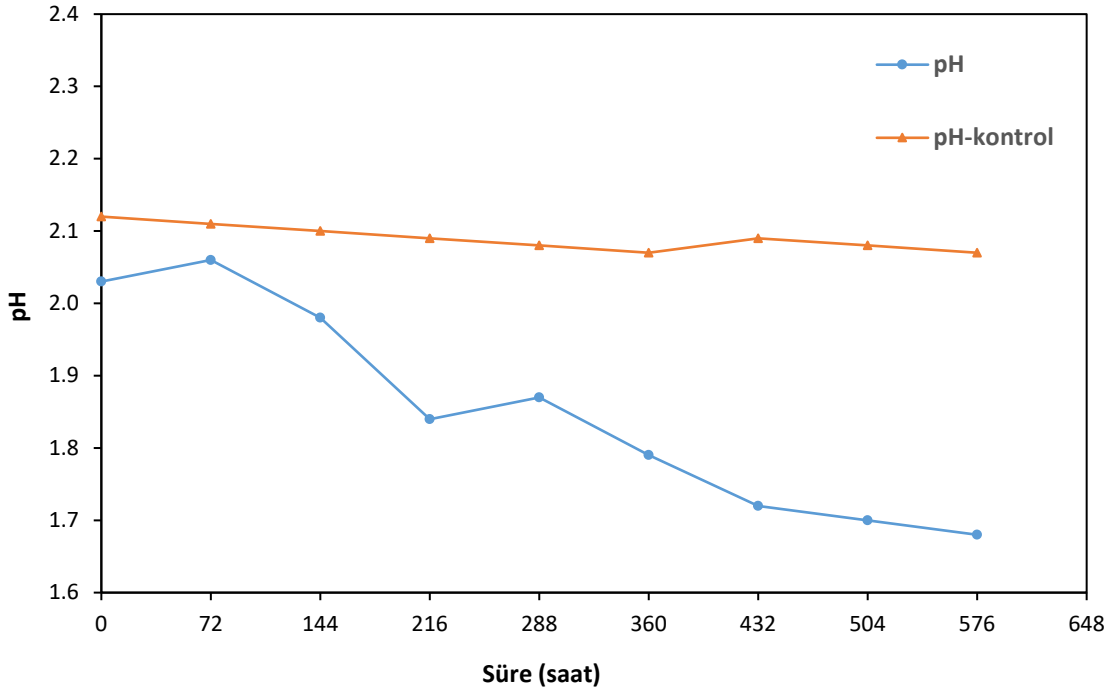
oksidasyonunun söz konusu olmadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, pH düşüşünün biyolojik aktiviteye bağlı olduğunu açık bir şekilde ortaya koymakta ve *Acidithiobacillus ferrooxidans*'ın biyoliç sürecindeki etkin rolünü desteklemektedir.



Şekil 5. Biyoliç deneylerinde (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) %10 katı oranında pH değişimi

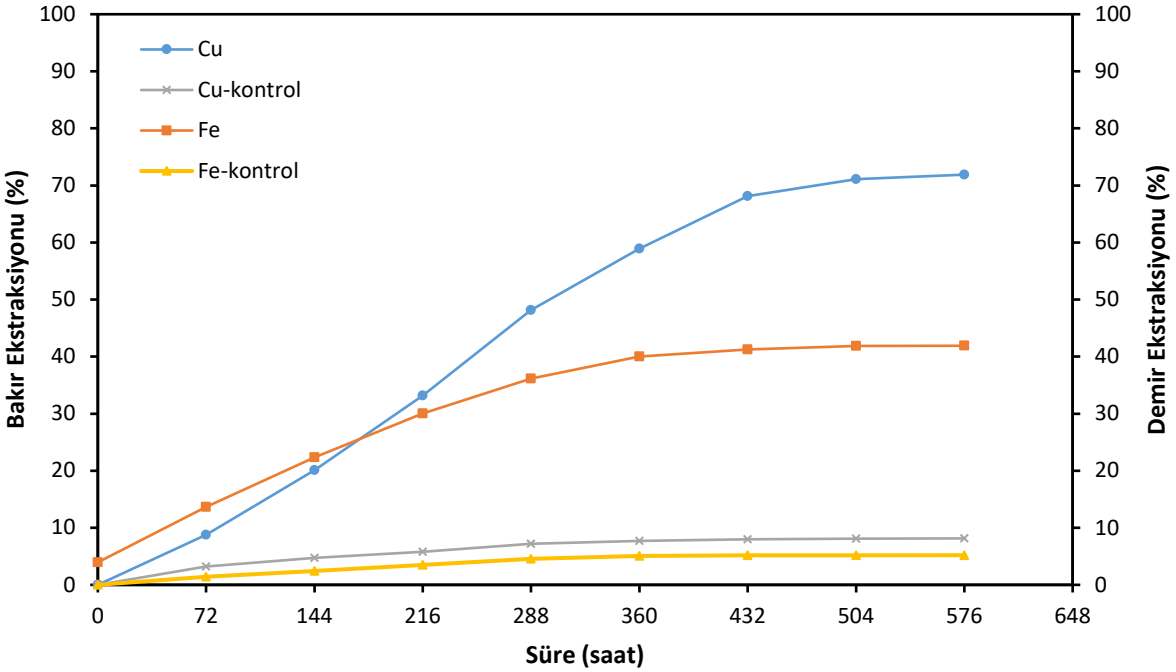


Şekil 6. Biyoliç deneylerinde (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) %15 katı oranında pH değişimi

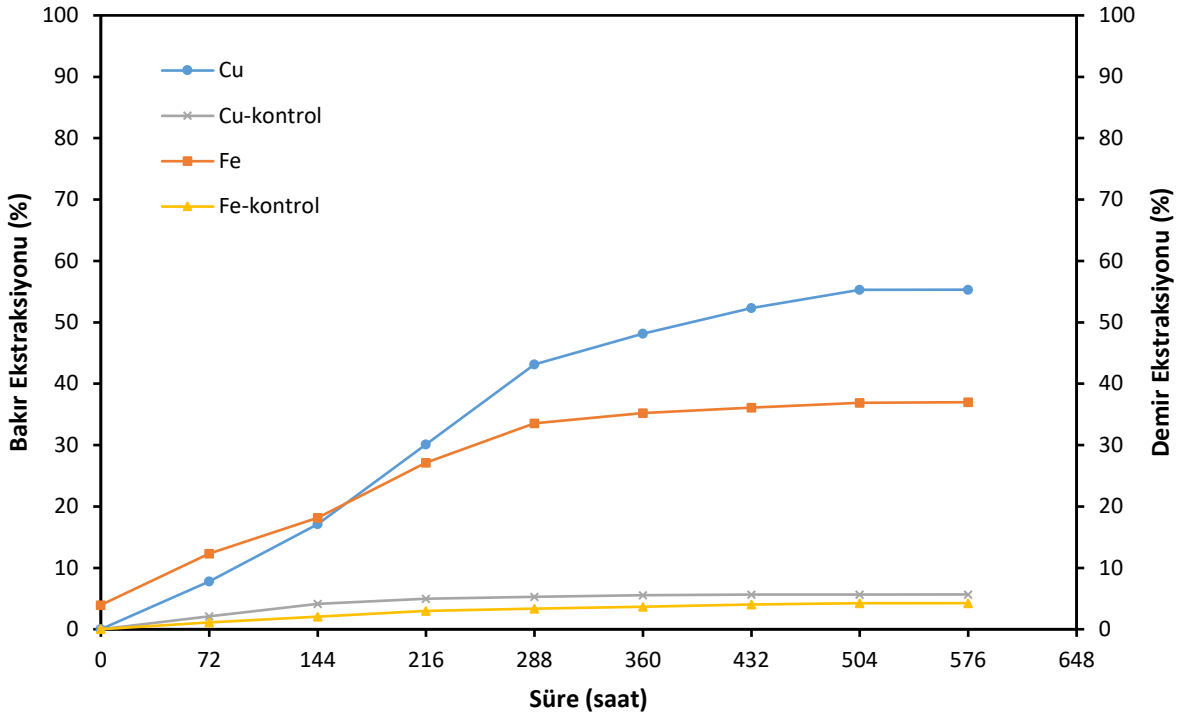


Şekil 7. Biyoliç deneylerinde (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) %20 katı oranında pH değişimi

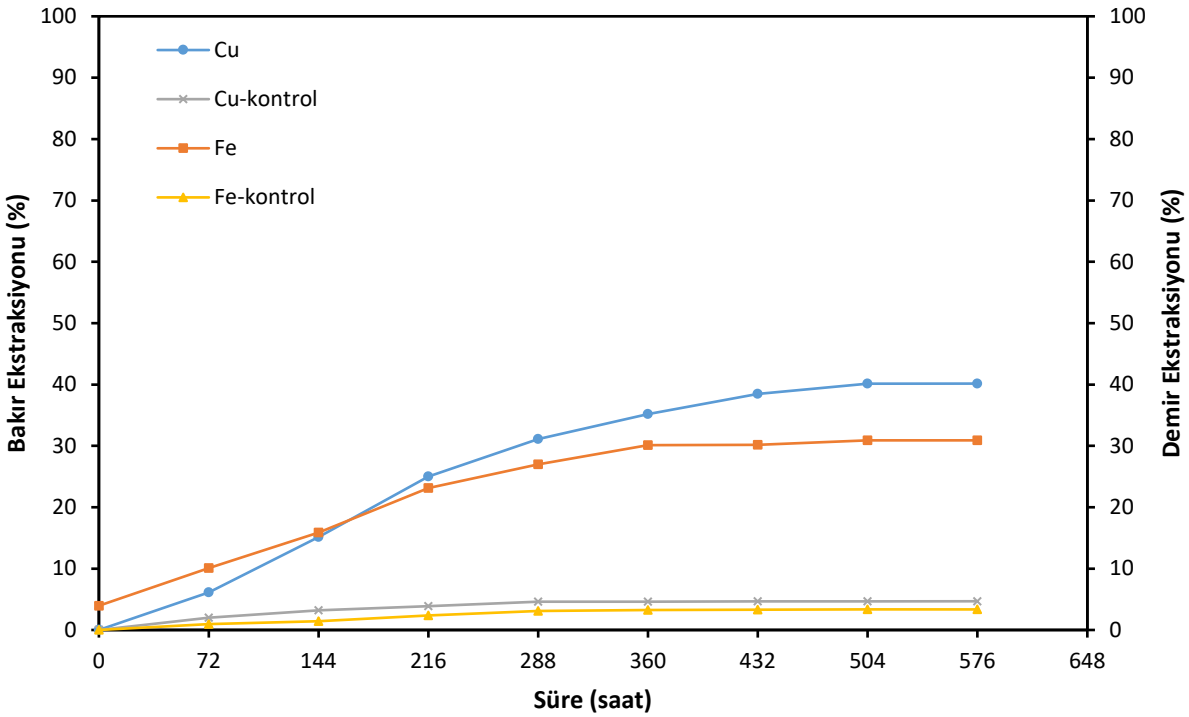
Katı oranının metal kazanımına etkisi, 576 saatlik ölçümlerle incelenmiş ve kalkopiritin bakır ve demir kazanım oranları hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular Şekil 8, 9 ve 10'da sunulmuştur. Biyoliç deneylerinde, katı oranı arttıkça bakır ve demir kazanımlarında bir düşüş gözlenmiştir. En yüksek kazanım, %10 katı oranında %71,89 bakır ve %41,90 demir olarak elde edilmiştir. Bu değerler, %20 katı oranında sırasıyla %40,15 bakır ve %30,9 demire kadar düşmüştür. Kontrol deneylerinde ise metal kazanımları %8,14 bakır ve %5,20 demiri geçmemektedir. Akçıl ve Çiftçi (2003) tarafından ifade edildiği gibi, katı oranındaki artışla birlikte liç çözeltisindeki numune miktarı artmakta ve bununla birlikte mineral yüzey alanında da bir artış gözlenmektedir. Bu durumda, bakteri konsantrasyonu ile mineral yüzey alanı arasındaki oran azalmaktadır, bu da katı oranının artışıyla metal kazanımlarının düşmesine yol açmaktadır.



Şekil 8. Biyoliç deneylerinde (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) %10 katı oranında metal kazanımları



Şekil 9. Biyoliç deneylerinde (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) %15 katı oranında metal kazanımları



Şekil 10. Biyoliç deneylerinde (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) %20 katı oranında metal kazanımları

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, Kastamonu ili Küre bakır cevherinin biyoreaktör kullanılarak biyoliç yöntemiyle işlenme potansiyelini değerlendirmiştir. *Acidithiobacillus ferrooxidans* bakterisi kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, katı oranının metal kazanımına etkisi incelenmiş ve biyoliç sürecinin düşük tenörlü bakır cevherlerinin değerlendirilmesinde etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Özellikle düşük katı oranlarında (%10) gerçekleştirilen deneylerde, %71,89 oranında bakır ve %41,90 oranında demir kazanımı elde edilmiştir. Buna karşılık, katı oranının %20'ye çıkarılmasıyla birlikte kazanım oranlarında belirgin bir düşüş gözlenmiştir.

Sonuç olarak, düşük tenörlü bakır cevherlerinin biyoreaktör kullanılarak biyoliç yöntemiyle işlenmesinin etkili bir metal kazanımı

sağladığı ve bu yöntemin sürdürülebilir, çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilebileceği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

Akçıl, A., & Çiftçi, H., 2003. Küre bakır cevherinin bakteriyel liçi. Madencilik Dergisi, 43(4), 15-25.

Bakhti, A., Moghimi, H., Bozorg, A., Stankovic, S., Manafi, Z., & Schippers, A., 2024. Comparison of bioleaching of a sulfidic copper ore (chalcopyrite) in column percolators and in stirred-tank bioreactors including microbial community analysis. Chemosphere, 349, 140945.

Çetinkaya, Z., 2024. Investigation of removal of ash and sulfur from Kangal (Sivas/Turkey) lignite with the application of combined methods. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 1-18. https://doi.org/10.1080/19392699.2024.2391908

Çiftçi, H., & Akçıl, A., 2003. Piritli bakır cevherinin mezofilik bakterilerle çözündürülmesinde demir oksidasyonu üzerine bir çalışma. Geosound, 43, 63-75.

ETİ BAKIR, 2025. https://www.etibakir.com.tr/kure-isletmesi Erişim tarihi: 17.02.2025.

Geology Science, 2025. https://tr.geologyscience.com/oreminerals/coppercuore/#:~:text=Bak%C4%B1r%20cevheri%20tipik%20olarak%20yerkabu%C4%9Funda,k%C3%B6t%C3%BC%20havadan%20a%C5%9F%C4%B1nma%20of%20kayalar. Erişim tarihi: 17.02.2025.

Jia, Y., Tan, Q., Sun, H., Zhang, Y., Gao, H., & Ruan, R., 2019. Sulfide mineral dissolution microbes: community structure and function in industrial bioleaching heaps. GEE 4, 29–37. https://doi.org/10.1016/j.gee.2018.04.001

Johnson, D. B., Bryan, C. G., Schlömann, M., & Roberto, F. F., 2023. Biomining technologies: extracting and recovering metals from ores and wastes. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05382-5

Ranjbar, M., Fazaelipoor, M. H., Hamghavandi, M. R., Schaffie, M., & Manafi, Z., 2020. Modeling study of the bio-dissolution of copper concentrate in a continuous bioreactors system. Minerals Engineering, 153, 106384.

Roberto, F. F., & Schippers, A., 2022. Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries. Appl. Microbiol. Biotechnol. 106, 5913–5928. https://doi.org/10.1007/s00253-022-12085-9

Spolaore, P., Joulian, C., Gouin, J., Morin, D., & d'Hugues, P., 2011. Relationship between bioleaching performance, bacterial community structure and mineralogy in the bioleaching of a copper concentrate in stirred-tank reactors. Applied Microbiology and Biotechnology, 89, 441-448.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025. https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabiikaynaklar-bakir Erişim tarihi 17.02.2025.

A STRATEGIC INDUSTRIAL PLAYER IN THE GLOBAL COBALT AND FERTILIZER SUPLLY CHAIN

Murat Yıldırım, Gökhan Kürşat Demir, Muhammet Gül
Deputy Production Manager, ETİ Bakır A.Ş. Mazıdağı İşletmesi, Mardin

Salih Söker
Production Manager, ETİ Bakır A.Ş. Mazıdağı İşletmesi, Mardin

ABSTRACT: Eti Gübre, the only worldwide factory that integrates fertilizer production and metal recovery plants, is a trademark under Eti Bakır A.Ş and located in Mazıdağı, Mardin. Eti Gübre premises consist of sulphuric acid, phosphoric acid, ammonia, fertilizer, hydrometallurgical production plants and auxiliaries as well as phosphate rock mine sites. Not only, the pyrite which was a mine tailing is utilized as a feedstock of sulphuric acid and hydrometallurgy processes but also converted completely to the valuable products without creating any waste in a sustainable manner. On the other hand, the waste heat obtained from pyrite burning is used to produce steam for processes and electricity transmission that improves energy efficiency and makes a great contribution to lower carbon footprint goals. This plant is the only one in the world that recovers cobalt from pyrite, also recovering copper as cathodes, zinc as carbonate and iron cake as raw material to steel mills as well as precipitated cobalt/nickel mix carbonates. The biggest production of the hydrometallurgical plant is cobalt carbonate, that is sold to industries in sectors such as ceramics, glass, feed, adhesives and reports to 2% share in global cobalt production. National lower grade phosphate rock mines can be processed to produce phosphoric acid followed by fertilizer in an efficient way by means of integration of pyrite feedstock usage.

Keywords: Pyrite Calcine, Sulphuric Acid, Phosphate Rock, Phosphoric Acid, Ammonia, Fertilizer, Pressure Leaching

1. INTRODUCTION

Phosphate rock is a marine biochemical rock rich in phosphorus (P), with more than 18 wt.% P_2O_5. Phosphate is an important mineral used at 85-90% in fertilizer, 10-15% in feed, food, chemical and detergent industries. In our

country, the interest in phosphate rock began in the 1960s. During these years, many phosphate deposits were discovered by the Mine Assistance Commission, which was established in 1961 under the Union of Chambers of Commerce and Industry of Turkey, and later by MTA. Then, MTA executed several explorations until 1974 and determined the phosphate reserves almost located in the GAP region. Mardin Mazıdağı Region constitutes Türkiye's most important phosphate field.

Under the "meeting the domestic phosphate rock need with domestic resources" policy, the licenses of all phosphate deposits in the Mazıdağı Mardin Region were transferred to Etibank. Although there was initially an assignment to establish a fertilizer plant here, it was given up mainly due to the lack of raw materials such as pyrite as a sulfur source and natural gas as an ammonia source and then decided to establish a concentrator plant after feasibility studies. Technological studies were carried out in 1976 and construction of a single line concentrator facility was completed in 1987 with 125 million dollars investment. The plant was commissioned in 1988 and achieved 750,000 tons/year nameplate capacity in 1989. However, it was closed in 1994 on the grounds of "made a loss" during the economic crisis on those days.

As a result of the privatization made in 2011, the facility was transferred to T.M.C Mazıdağı Fosfatları San. ve Tic. A.Ş. In 2014, it was taken over by Eti Bakır A.Ş, a subsidiary of Cengiz Holding and started to develop an integrated fertilizer plant. With a 1.2 billion dollars investment, first industrially integrated calcine processing plant in the world was commissioned in 2018. Site is located in the district of Mazıdağı in Mardin, southeastern region of Turkey. Site location is shown in Figure 1.

Figure 1. Site location of Eti Bakır A.Ş. Mazıdağı phosphate plant

The plant is a multiproduct facility which produces fertilizer as its main product and the copper cathode, cobalt and zinc carbonates are generated from the feed roasted pyrite concentrate of Eti Bakır Küre Plant. The pyrite ore is fed into a roaster to produce SO_2 containing gas necessary for the production of sulfuric acid. The sulfuric acid is then utilized in the fertilizer production and small amounts of acid goes to the hydrometallurgical leaching process. The main process connection in Eti Bakır Mazıdağı Phosphate Plant is shown in Figure 2.

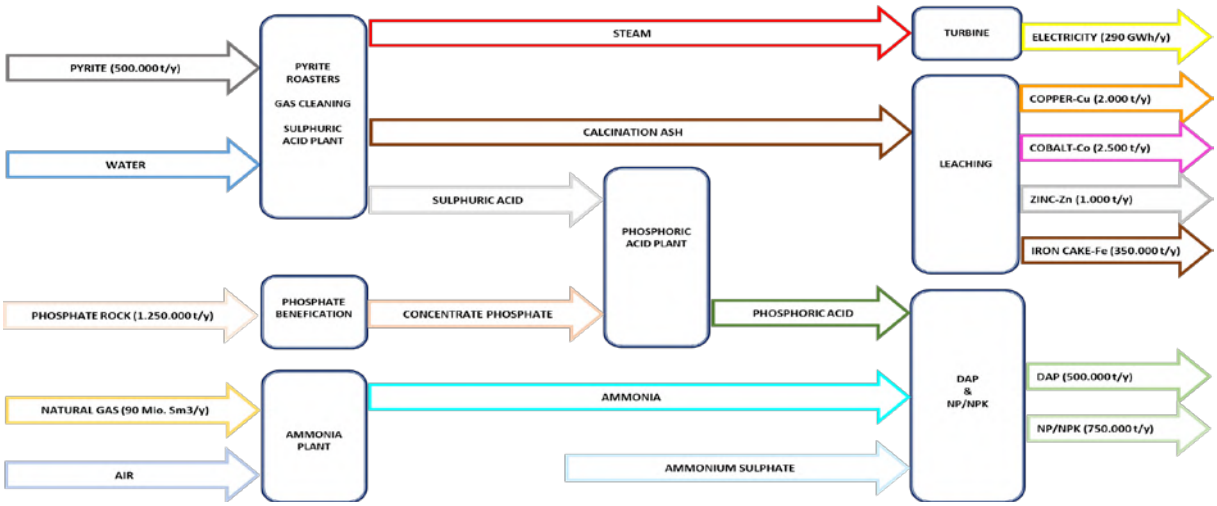


Figure 2. Main process connection in Eti Bakır Mazıdağı phosphate plant

2. PRODUCTION PROCESSES

2.1.Phosphate Rock

Phosphate rock ores were explored in the 1960s by the Mining Assistance Commission and later by MTA and Etibank. These reserves can be collected in 3 main regions. The total reserve and P_2O_5 content are given in Table 1.

Table 1. Phosphate rock reserves in Türkiye in million tons

Region	District	Proven Reserves	Potential Reserves	Total Reserves	P_2O_5 Content (%)
Mardin/Mazıdağı	Akras	-	2-10	2-10	8-14
	Kasrık	75	24-33	99-108	10-24
	Taşıt	-	200-300	200-300	8-15
Bitlis Massif	Bingöl/Genç	-	43-50	43-50	1-3
	Bitlis/Ünaldı	-	17-18	17-18	5-13
Lower Fırat Basin	Hatay/Yayladağı	-	3-5	3-5	10-15
	Kilis	-	3-5	3-5	9-13
	Adıyaman/Basni	-	2-3	2-3	8-10
TOTAL		75	294-424	294-424	

The Mazıdağı phosphates from bottom to top occur on the gently dipping northern flank of the Derik anticline. Taşıt (Turonian), Kasrık (East Kasrik) and Şemikan (West Kasrık) phosphate (both Santonian–Coniacian) are all phosphorus-rich members of the Karababa Formation. Furthermore, Akras phosphate (Maastrichtian), a phosphorus-rich member of the Kermav Formation, is located in the eastern part. The Şemikan (West Kasrik) member is the richest in phosphates, reaching 25%–32% P_2O_5 content.

The Şemikan phosphate area is one of the areas with the highest economic potential among the Mazıdağı phosphates deposits. The average

phosphate thickness in these sectors is around 35-40 cm. The phosphate level in the region is characterized by interlayers, alternating with chert and carbonate veins. The average overburden ratio is about 1:5.

2.2. Phosphoric Acid Plant

The wet process is used for phosphoric acid production. There is a phosphate beneficiation process prior to phosphoric acid production. While Outotec technology is used for beneficiation process, dihydrate process technology of Prayon is used for weak and SNC Lavalin technology is used for concentrated phosphoric acid production. Beneficiation process has 2880 tpd concentrated phosphate rock capacity in dry basis and phosphoric acid process has 700 tpd P_2O_5 (100%) capacity.

The raw phosphate rock which has 16-20% P_2O_5 content is crushed via jaw crusher followed by ground in a wet autogenous mill. Concentrated phosphate, which has 22-26% P_2O_5 content, is collected through trommel and vibrating sieves. Then, the slurry is sent to a dewatering thickener and densified underflow of this thickener is fed to attack tank for phosphoric acid production.

The Prayon Mark 4 dihydrate process has a reaction train and tilting pan filtration system. Phosphate slurry and sulphuric acid (98%) are fed to a reaction tank called attack tank to obtain weak phosphoric acid (24-26% P_2O_5) in liquid form and calcium sulphate dihydrate as called gypsum in solid form with the following main chemical reaction.

$$Ca_3(PO_4)_2 + 3H_2SO_4 + 6H_2O \rightarrow 2H_3PO_4 + 3(CaSO_4.2H_2O) \quad (1)$$

Temperature of this exothermic reaction is kept constant between 78-80 ºC with a flash cooler system which also provides calcium sulphate

dihydrate seed back into first tank. The slurry is transferred to the digestion section of the reactor and then fed to tilting vacuum pan filter. While the filtrate is collected to feed to concentration unit, gypsum is sent to a disposal area by trucks. The reaction and filtration process flowsheet are given in Figure 3.

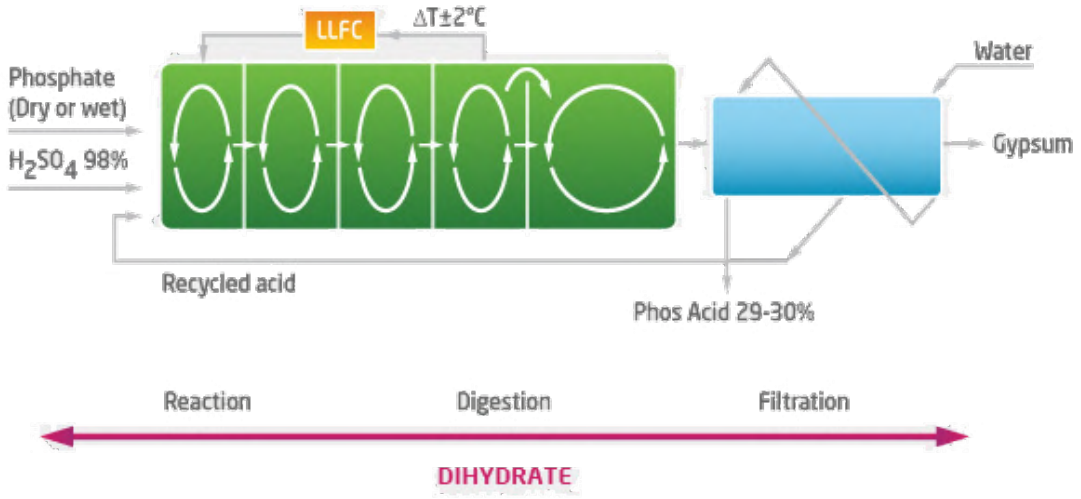


Figure 3. Reaction and filtration process

The concentration and fluorine recovery process consists of two parallel lines. The weak phosphoric acid is concentrated through specific carbon tubed heat exchanger and single stage forced circulation evaporator. The concentrated phosphoric acid (46-50% P_2O_5) is transferred to storage tanks to be used in fertilizer production.

2.3. Sulphuric Acid Plant

Sulfuric acid plant is a metallurgical process using roasting, gas cleaning and "DCDA - Double Contact Double Absorption" acid production technology of Outotec, respectively. The main raw material is the pyrite concentrate containing 46-48% sulfur as well as 0.4-0.6% cobalt, 0.3-0.5% copper and

0.1-0.5% zinc. Pyrite is mine tailing of Küre copper concentrate plant and carried about 1200 km by train to process in Mazıdağı plant.

98% technical grade sulfuric acid is produced to be used in phosphoric acid production which is a raw material of phosphate fertilizer and metal production. The plant has 2080 tpd sulphuric acid production capacity with two roaster lines and one combined single line consisting of gas cleaning, drying, converter and absorption processes. Calcination ash (calcine) is also produced with 1000 tpd capacity to be fed to metal recovery plant. Supersaturated steam at 400 °C and 60 bars is another product with 2880 tpd capacity to be utilized mostly to produce electricity and the remaining used in phosphoric acid, fertilizers and leach processes at required pressure and temperatures.

The pyrite concentrate is converted in the fluidized bed roaster into calcine and sulphur dioxide (SO_2) gas at 750-800 °C. Calcine extracted from roaster chutes, waste heat boilers, cyclones and electrostatic precipitators in powder form is transferred and stored in silos to be used in metal recovery plant after being cooled by rotary drum coolers. The waste heat coming out of combustion reactions is utilized in boilers to produce a maximum amount of supersaturated steam for power generation. SO_2 gas is separated from the fine particles and aerosols in the gas cleaning unit by means of venturi scrubbers and electro filters, making it suitable for reaction in acid production. The cleaned gas is fed to the converter containing vanadium pentoxide to produce sulfur trioxide required for acid production. The gas containing sulfur trioxide is then absorbed in the absorption towers with sulfuric acid containing low water and acid production occurs. The product is sent to acid stock tanks and distributed to users within the facility. A flowsheet of sulphuric acid production process from pyrite is given in Figure 4.

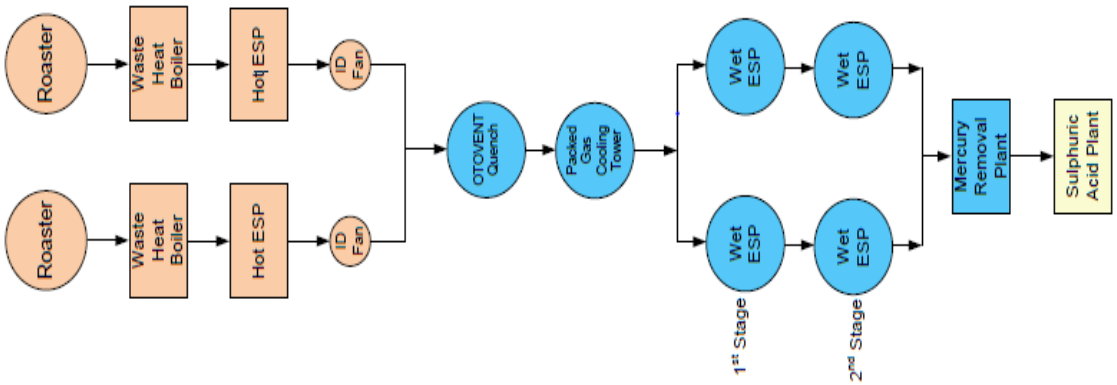


Figure 4. Sulphuric acid production process

The combustion air serves both as a carrier medium for the fluidized bed and as a source of oxygen for the predominant reaction, which converts iron sulphide into iron oxide (hematite) and sulphur dioxide. In the fluidized bed roaster, the following main reactions take place:

$$2FeS_2 + 5.5O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 4SO_2 \quad (2)$$

$$2FeS + 3.5O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 2SO_2 \quad (3)$$

$$ZnS + 1.5O_2 \rightarrow ZnO + SO_2 \quad (4)$$

$$PbS + 1.5O_2 \rightarrow PbO + SO_2 \quad (5)$$

$$Cu_2S + 2O_2 \rightarrow 2CuO + SO_2 \quad (6)$$

Sulphuric acid is produced through a four-bed converter and double absorption processes. Sulphuric acid manufacture from a metallurgical plant can be described by two simple chemical reactions. In the first reaction, usually called the contact or conversion reaction, sulphur dioxide (SO_2) reacts with oxygen (O_2) in the process gas to form sulphur trioxide (SO_3) plus a large amount of heat:

$$SO_2(g) + ½O_2(g) \rightarrow SO_3(g) \quad (7)$$

The reaction is performed in the converter in contact with a vanadium pentoxide catalyst at starting temperatures from 400 °C to 435 °C. As the reaction proceeds, the temperature can rise to over 620 °C, but is limited to 630 °C in order not to damage the catalysts. Without any catalyst to initiate and accelerate the process, the chemical conversion cannot be completed effectively, even at much higher temperatures. In the second reaction, SO_3 is absorbed into strong sulphuric acid (H_2SO_4), where it reacts with water to form more sulphuric acid plus a large amount of heat:

$$SO_3(g) + H_2O(l) = H_2SO_4(l) \quad (8)$$

This second reaction is performed in the inter/final absorption tower. A relatively small amount of water is already introduced to the sulphuric acid process via the process gases leaving the gas cleaning section. This water is removed from the gases in the drying tower and then added back into the system in the absorption tower in the form of strong acid (approximately 98.5% w/w H_2SO_4).

Both above reactions are strongly exothermic. Heat generated by the chemical reactions in the process gas is used to increase the temperature of the process gas to the desired temperatures in the individual converter beds as well as incoming cold boiler feed water by running the respective water through an economizer. The heat generated by the chemical reactions in the drying and absorption towers is transferred to the cooling water in the acid cooler heat exchangers.

After intermediate absorption further conversion takes place in the fourth and final catalyst bed. Compared to a single absorption process, an essentially higher final SO_2 conversion is achievable, which is in practice

more than 99.8%. The remaining SO_3 is absorbed in the final absorption tower.

2.4. Ammonia Plant

The plant is designed with steam methane reforming technology by Haldor Topsoe comprising desulphurization on ZnO, primary and secondary reforming, two step shift conversion, OASE CO_2 removal, methanation, compression, ammonia synthesis loop, hydrogen recovery unit and product recovery processes. The process lay-out of this plant is illustrated in Figure 5.

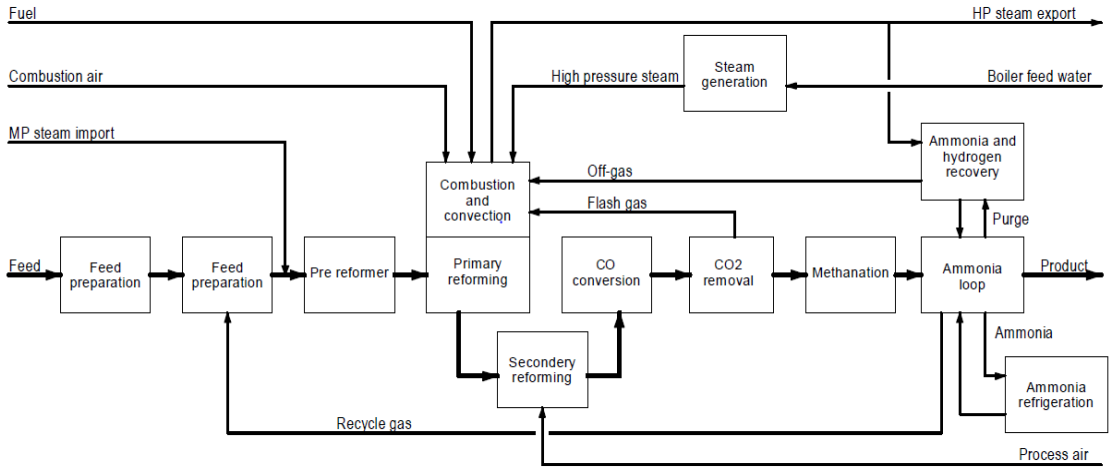


Figure 5. Process lay-out of ammonia production

Natural gas contains contaminants, the main contaminant being sulfur, which deactivates the reforming and CO conversion catalysts. The contaminants are removed in the feed purification section. Since natural gas contains both hydrogen sulfide and organic sulfur compounds, the desulphurization takes place in two stages. First, the organic sulfur compounds are converted to hydrogen sulfide in the hydrogenator, and then

the hydrogen sulfide is absorbed in the sulfur absorbers by the following reactions.

$$RSH + H_2 \leftrightarrow RH + H_2S \quad (9)$$

$$ZnO + H_2S \leftrightarrow ZnS + H_2O \quad (10)$$

The primary reformer in the front-end section is based on the well-known side fired concept, and to achieve a compact lay-out the convection section is located on top of the reforming furnace. The secondary reformer including the nozzle burner follows the primary reformer.

In the reforming section, the desulfurized hydrocarbon feed is converted into synthesis gas by catalytic reforming of the hydrocarbon mixture with steam according to the following reactions.

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n+m/2)H_2 \quad (11)$$

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 \quad (12)$$

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \quad (13)$$

Reaction 11 describes the reforming of higher hydrocarbons, 12 is the reforming of methane, and 13 is the water gas shift reaction. The reforming of the hydrocarbon feed takes place in three stages. The reforming of higher hydrocarbons in natural gas feed to methane takes place in adiabatic pre-reformer. Most of the methane reforming takes place in the primary reformer. The remaining unconverted methane is converted in the secondary reformer. Carbon monoxide and steam are converted into carbon dioxide and hydrogen by the exothermic water gas shift reaction 13 in two adiabatic reactors: the HT CO converter operating at high temperature, and the LT CO converter operating at low temperature. The CO_2 removal system is based on

the OASE process. The carbon dioxide is removed from the gas by reactive absorption in the OASE solution, which is based on amines and contains an activator which increases the mass transfer rate of carbon dioxide from the gas phase to the liquid phase. The overall reactions occurring during the absorption process are described by reactions 14 and 15.

$$R_3N + H_2O + CO_2 \leftrightarrow R_3NH^+ + HCO_3^- \quad (14)$$

$$2R_2NH + CO_2 \leftrightarrow R_2NH_2^+ + R_2N\text{-}COO^- \quad (15)$$

In the methanation section, the residual carbon oxides are converted into methane and water. As the amount of carbon dioxide is negligible, the main reaction consists in the conversion carbon monoxide according to reaction 16.

$$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O \quad (16)$$

The methane acts as an inert gas in the ammonia synthesis loop, whereas oxygen-containing compounds such as carbon oxides are severe poisons to the ammonia synthesis catalyst. The converted gas leaving the CO_2 removal section is heated up to the optimum inlet temperature of the methanator in the gas-gas exchanger by exchanging heat with the outlet gas from the same reactor. The outlet gas from the methanator is cooled in the gas-gas exchanger and is then routed to the final cooler and the final gas separator where the process condensate is separated from the gas. Process gas leaving the methanation section contains nitrogen, hydrogen and inerts such as argon and methane and less than 5 ppm vol. (dry) of carbon oxides. The ammonia synthesis from hydrogen and nitrogen proceeds according to reaction 17.

$$3H_2 + N_2 \leftrightarrow 2NH_3 \quad (17)$$

The ammonia synthesis takes place in the ammonia converter. Only part of the hydrogen and nitrogen is converted when the gas passes through the catalyst bed. The unconverted remainder is recycled to the converter after cooling and separation of the liquid ammonia product. The synthesis gas from the methanation section is compressed to the normal pressure for the ammonia loop in the first section of the synthesis gas compressor. Part of the synthesis gas is taken out after the first stage of the synthesis gas compressor and recycled back to the feed preparation and purification section. The second section of the synthesis gas compressor forms the recirculation compressor for the unconverted synthesis gas. From this last stage, the synthesis gas is preheated and fed to the ammonia converter.

The result is production of high-pressure steam, preheating of the boiler feed water and preheating of the converter feed gas. The gas is then cooled with water and liquid ammonia until a temperature at which most of the ammonia condenses. The condensed ammonia is separated from the synthesis gas, which is then recirculated to the ammonia converter through the recirculation compressor. The separated ammonia is flashed, and the liquid fraction forms the liquid ammonia product.

In the ammonia and hydrogen recovery section ammonia is recovered from the purge gas from the ammonia loop and from various other low pressure off-gases and delivered as liquid ammonia meeting the product purity specifications. Hydrogen is also recovered from the purge gas after removal of ammonia.

2.5. Diamonium Phosphate Fertilizer Plant

The plant is equipped with 2 pipe reactors (PRs) installed in parallel inside the granulator drum and one preneutralizer (PN) reactor. While Incro's pipe reactor process can be applied for the production of DAP (diammonium phosphate) and NPK (nitrogen phosphate potassium) grades without AS (ammonium sulphate), Incro's mixed process (preneutralizer + PR or PN) can be used for the production of NP/NPK with AS.

The plant has been designed to produce 1760 tpd DAP or up to 2200 tpd NP/NPK with AS capacity. Raw materials are concentrated phosphoric acid (50-54% P_2O_5), weak phosphoric acid (27-29% P_2O_5), liquid anhydrous ammonia, concentrated sulphuric acid, potassium chloride, ammonium sulphate, prilled urea, and filler (clay or similar). Additional chemicals and utilities are defoamer, coating oil, process water, cooling water, instrument air, plant air, natural gas for drying and low/medium pressure steam. The plant flowsheet is given in Figure 6.

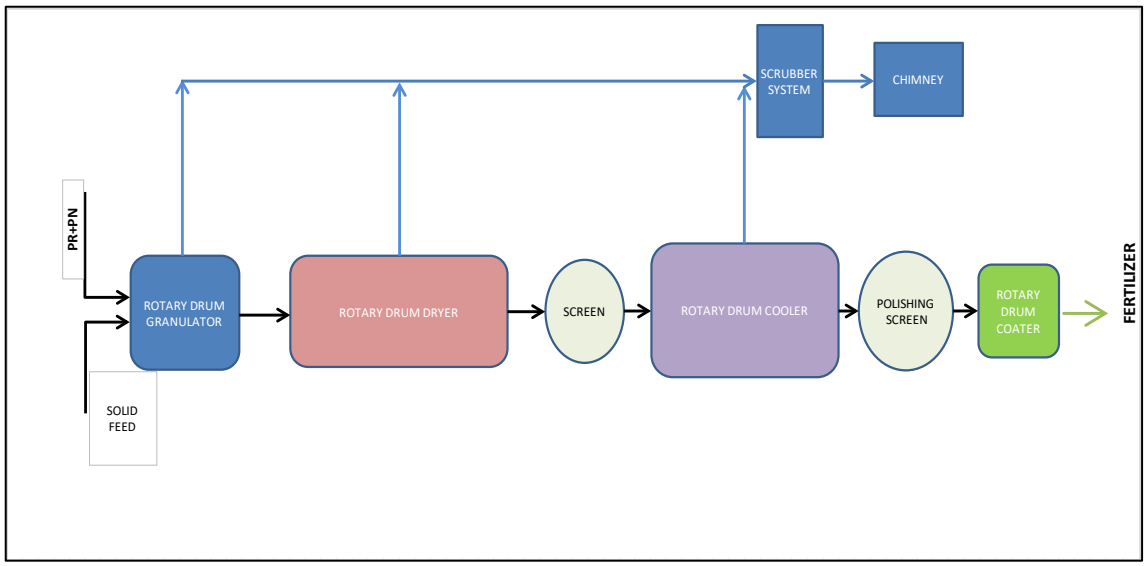


Figure 6. Fertilizer plant flowsheet

PR is directly installed inside the granulator and not require slurry pumping. It can produce ammonium phosphates slurries with moisture contents as low as 4-8%, so that the moisture of the granulator bed can be easily adjusted to the required level for an optimum granulation, resulting in low recycle ratio. An optimized version of the conventional PN reaction tank is installed, so that holding volume is reduced, the formation of insoluble P_2O_5 is minimized and it is possible to operate at slightly higher slurry densities (lower slurry water content). The main chemical reaction is the ammonia neutralization with phosphoric acid, and in a lesser extent with sulphuric acid:

$$H_2SO_4 + 2NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 \quad (18)$$

$$H_3PO_4 + NH_3 \rightarrow NH_4H_2PO_4 \quad (19)$$

$$NH_4H_2PO_4 + NH_3 \rightarrow (NH_4)_2HPO_4 \quad (20)$$

First reaction is stronger than the rest, so ammonia will tend first to react with sulphuric acid and only once neutralization of the first sulphuric acid has been completed the other reactions will occur, starting by the MAP (monoammonium phosphate) production and once it is completed, DAP production.

The function of the granulation system is to transform the slurry and solid raw materials into a granular fertilizer product with the required composition and size. Granulation occurs in the drum granulator where ammonium phosphate or ammonium sulpho-phosphates slurries are sprayed onto a bed of dry material, composed by the added solid raw materials (potash, ammonium sulphate, urea and filler) plus the fines, crushed oversizes and part of the commercial product returned to granulator. Slurries are directly sprayed from the pipe reactor distribution pipe, or by pumping

from pre-neutralizer pumps, in this last case sprayed using a distribution pipe with spray nozzles.

Solids leaving granulator, normally with moisture content around 2-3% will be gravity fed to dryer, in order to achieve the final requested moisture of 1.0-1.5%. In the rotary drum type dryer, the solids are lifted and cascaded through a co-current flow of hot air from the natural gas fired combustion chamber. The dryer is designed for maximum efficiency and minimization of material build-up.

After dryer, the material is transferred to double deck vibrating oversize process screens through conveyor followed by elevator. While the fraction between 1 to 4 mm is taken and sent to rotary drum cooler, the oversize fraction, above 4 mm, is crushed in double rotor chain mills and led to recycling conveyor. The fines below 1 mm is also sent back to recycling conveyor.

Rotary cooler discharges cooled product directly to final product elevator which lifts it to the single desk polishing screen. Fines under 1 mm are separated and discharged directly to polishing fines conveyor which returns back fines to recycle, whereas commercial size product between 1-4 mm falls by gravity to the rotary coater drum. Coating oil is added to the coater drum for caking control. Coating is particularly necessary when bulk storage during long periods of time or ship exportation is envisaged, because the hygroscopic features of fertilizer can promote caking, mostly when variations of air temperature and moisture occur. Coating agent is normally an amine containing high viscosity oil or wax (paraffin), normally solid at ambient temperature and with a pour point of around 50 °C. The coating oil is kept at around 70-80 °C in the coating oil tank (using its steam coil heater D2-E-07) and is fed to the coater drum by using the dosing pumps, through low pressure steam traced pipes and air atomized spray nozzles. After

coating, product falls by gravity to the Final Product Belt Conveyor, which will send product to the final storage area and stored as bulk. The product can be sold as bulk and 50 kgs polypropylene bags.

2.6. Metal Recovery Plant (Leach)

The precious metals contained in the calcine ash obtained by burning the pyrite mine in the sulfuric acid plant, which is the waste of the copper concentrate production of Eti Bakır Küre Plant, are sent to the leach facility for recovery. Calcine is sludged and leached in autoclave (under high temperature and pressure, with the addition of oxygen and sulfuric acid), then the cobalt, zinc and copper elements are separated from the sludge (solid) in solution.

The solution obtained is sent to the copper solvent extraction unit and thanks to the selective organic copper element is separated from other metals. The dissociated copper is obtained as cathode copper in the electrowinning zone. The solution containing cobalt and zinc from the copper solvent extraction unit is sent to the cobalt solvent extraction unit and the cobalt and zinc elements are separated from other metals thanks to the selective organic. Separated cobalt and zinc are separately precipitated with sodium carbonate and packaged as cobalt carbonate and zinc carbonate.

Calcine processing technologies include pressure leaching and subsequent hydrometallurgical refining resulting in LME-A grade copper cathodes at 2000 tpa metallic copper equivalent, cobalt carbonate mixed precipitate at 2500 tpa metallic cobalt equivalent and zinc carbonate mixed precipitate at 1000 tpa metallic zinc equivalent capacities. Figure 7 summarizes the hydrometallurgical calcine leaching process.

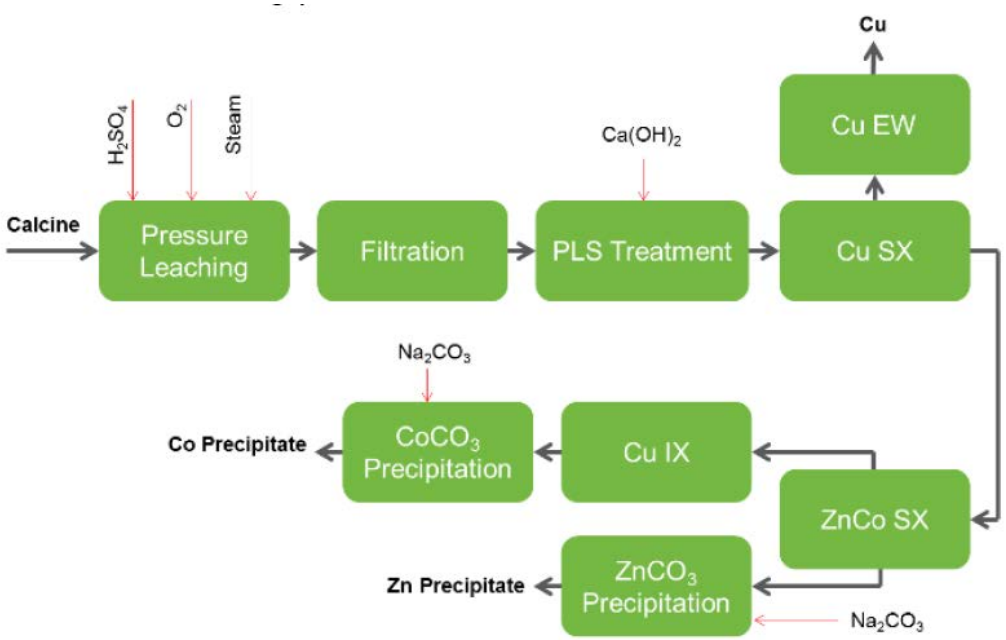


Figure 7. Hydrometallurgical calcine leaching process

The hydrometallurgical leaching process of Eti Gübre starts with pulping of the roasted calcine in acidic medium where the calcine is converted to slurry to around 50 wt% solids. Table 2 summarizes the elemental composition of the valuable metals to be recovered from the ore. The calcine slurry with design mass flow capacity of 50 tons per hour is then fed into the autoclave circuit for leaching.

Table 2. ETİ Bakır roasted calcine elemental analysis

Element	Content (wt%)
Fe	55-65
Cu	0.5-0.9
Co	0.6-0.9
Zn	0.1-0.5

The pressure leaching stage consists of two-stage preheating, an autoclave and two-stage flashing/energy recovery and a vent gas scrubbing

system. The calcine slurry is fed into two-stage preheating in series before the autoclave leaching. The autoclave, on the other hand, is a five-compartment vessel equipped with VSD controlled agitators and separates high pressure steam and oxygen lines. Sulfuric acid is injected into the first compartment together with the preheated slurry HP steam and oxygen are simultaneously added. Autoclave design conditions were chosen to be at 220 ºC and 27 barg and acid concentration of 50-60 gpL exiting the second stage flashing. The gas vents of the preheaters and autoclave are treated in the vent gas scrubbing system before being released into the atmosphere. The material of construction in the pressure leaching stream is made sure to tolerate high pressure, temperature and highly acidic conditions. The following main reactions occur during pressure oxidative leaching:

Me^{2+} (Cu, Co, Zn, Fe) sulfate dissolution:

$$MeSO_4(s) \rightarrow Me^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \quad (21)$$

Me^{3+} (Al, Fe) sulfate dissolution:

$$Me_2(SO_4)_3(s) \rightarrow 2Me^{3+}(aq) + 3SO_4^{2-}(aq) \quad (22)$$

Metal oxide (Cu, Co, Zn) leaching by acid:

$$MeO(s) + 2H^+(aq) \rightarrow Me^{2+}(aq) + H_2O \quad (23)$$

Ferrous iron oxidation to ferric iron:

$$Fe^{2+}(aq) + H^+(aq) + O_2(g) \rightarrow Fe^{3+}(aq) + H_2O \quad (24)$$

Ferric iron precipitation to hematite:

$$2Fe^{3+}(aq) + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3(s) + 6H^+(aq) \quad (25)$$

The leached calcine slurry will undergo filtration to separate the cake from the pregnant liquor. The filtrate and wash filtrate from the filtration circuit will be utilized as pulping solution for the raw calcine and will serve as feed material to PLS, pregnant leach solution, treatment facility followed by copper, cobalt and zinc solvent extraction processes respectively. The following main reactions occur during solvent extraction:

Extraction phase: $Me^{2+}(aq) + 2HR(org) \leftrightarrow MeR_2(org) + 2H^+(aq)$ (26)

Stripping phase: $MeR_2(org) + 2H^+(aq) \leftrightarrow Me^{2+}(aq) + 2HR(org)$ (27)

Where: Me^{2+} (Cu, Co, Zn); HR (organic phase); H^+ (Acid medium, sulfate/chloride). The PLS is then treated with calcium hydroxide to lower down the acid concentration of the pregnant liquor. The treated liquor is then forwarded to a thickener, and the overflow solution is fed to a polishing filter prior to copper solvent extraction and electrowinning. In the Cu SX process, the circuit contains three extraction stages with internal neutralization, one washing stage, two stripping stages and a loaded organic tank. For Cu SX's production solution, rich electrolyte, there is also after settler and dual media filters before the electrolyte circulation tanks. Rich electrolyte taken from stripping stage of Cu SX has been send to Electrowinning cells and 'A grade copper cathode' that has been over 99.997%.

The Cu raffinate (CoZn rich solution) is fed to the iron removal circuit to remove the total iron in the circuit prior to CoZn solvent extraction. Iron is removed in the circuit with the aid of calcium hydroxide with a pH target of 4.2-4.5. The Fe free CoZn solution is forwarded to a thickener and the overflow solution fed to polishing filter before the CoZn solvent extraction and stripping stage where Co and Zn are separated. CoZn SX consists of one kerosene wash stage, four extraction stages, two organic washing stages, four

cobalt stripping stages, two zinc stripping stages, barren organic tank, organic pre-neutralization reactor, production solution after settlers, production solution organic removal filters and crud treatment process.

In the final stage the Zn rich solution is mixed with sodium carbonate in a reactor producing Zn carbonate while the Co rich solution is sent to an ion exchange column to separate the remaining Cu in the solution. The Cu free Co solution is then sent to a reactor where cobalt carbonate is formed with the aid of sodium carbonate.

Extracted solution from the CoZn SX and solutions from the Co and Zn precipitations are send to the end neutralization. While the solution from the end neutralization stage is utilized in phosphoric acid plant, solids is sent back to the PLS treatment stage to recover remaining precipitated cobalt and zinc. The solid residue after leaching of calcine is sent to thickening and filtration processes to produce iron cake. The hematite of this cake is more than 90% and therefore it is sold to steel mills as a raw material.

3. CONCLUSION

ETİ Gübre has a unique process that enables production of contemporary precious metals and fertilizer together using a state of art technology in a well-equipped integrated facility. It is the 1st metal and fertilizer combination plant in the worldwide. An idle concentrate phosphate plant from state has been converted to a fertilizer complex, consisting sulphuric acid, phosphoric acid, ammonia, fertilizer plants with a 1.2 billion dollars investment which is the biggest private sector capital investment in this region in the history of Turkish Republic.

Chosen the proper technologies have provided to process lower quality of national phosphate rocks in an economic and sustainable way. Eti

Gübre is the 1st phosphate fertilizer producer with domestic phosphorus and sulphur in Türkiye having about 50% market share on Turkish phosphate-based fertilizer market. The pyrite which was a mine tailing has been utilized as a feedstock of sulphuric acid and hydrometallurgy processes and converted completely to the valuable products like copper as cathodes, cobalt and zinc as carbonate, and iron cake as raw material to steel mills without creating any waste in a sustainable manner. On the other hand, the waste heat obtained from pyrite burning is utilized to produce steam for processes and electricity transmission that improves energy efficiency and makes a great contribution to lower carbon footprint goals. The total cobalt carbonate production corresponds to about 2% share in the global cobalt market. This product is mainly sold to ceramics, glass, animal feed, and adhesives industries. ETİ Gübre follows the technological advancements and has intensified research and development studies on precursor and cathode active material production of NMC and LFP lithium-ion batteries using its final and intermediate products.

REFERENCES

Şengül, B., Canbazoğlu, M., Kayışoğlu, E., & Laitala, H., 2019. Pressure leaching and solvent extraction of Cu – Co – Zn. Calcine Processing Plant, IMPC Eurasia, Antalya, Turkey.

Gundogar, D. Y., & Sasmaz, A., 2022. Geochemical approach to determine the possible precipitation parameters of the coniacian–santonian Mazıdağı Phosphates. Minerals, 12, 1544.

ETİ Bakır, 2018. Eti Bakır Co. Mazıdağı Phosphate Plant. Process description manuals, Confidential.

NİKEL HİDROMETALURJİSİNDE ÇEVRESEL ETKİLER VE ATIK YÖNETİMİ

ENVIRONMENTAL IMPACTS AND WASTE MANAGEMENT IN NICKEL HYDROMETALLURGY

Burçin Kaymakoğlu
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Adana

Tuğba Deniz Tombal Kara
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

ÖZ: Bu çalışma, nikel hidrometalurjisindeki çevresel zorluklara ve atık yönetimi stratejilerine kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Elektrikli araç bataryaları ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin ihtiyaçları doğrultusunda nikele olan talep arttıkça, endüstri özellikle toksik atıklar, atık sular ve hava kirliliği gibi atık yönetimiyle ilgili önemli sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Baca gazı desülfürizasyonu ve yenilikçi geri dönüşüm yaklaşımları gibi mevcut uygulamalar ve stratejiler, bu çevresel etkileri azaltmak için hayati bileşenler olarak incelenmektedir. Ayrıca, biyoliç ve sürdürülebilir proses teknolojilerinde ortaya çıkan teknikler, kaynak geri kazanımını artırırken zararlı kimyasallara bağımlılığı azaltan daha çevreci uygulamalara doğru bir geçişe işaret etmektedir. Döngüsel ekonomi ilkelerinin entegrasyonu, nikel içeren atık ürünlerin geri dönüşümünü ve yeniden işlenmesini teşvik ederek çevresel ayak izlerini daha da en aza indirmektedir. Bununla birlikte, teknolojik sınırlamalar, mevzuat farklılıkları, ekonomik hususlar ve toplum katılımının gerekliliği gibi zorluklar devam etmektedir. Bu makale, daha sürdürülebilir ekstraksiyon yöntemlerini teşvik etmek için sektör genelinde sürekli yenilik ve işbirliğinin kritik önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nikel, Atık Yönetimi, Çevresel Etki

ABSTRACT: *This study provides a comprehensive overview of environmental challenges and waste management strategies in nickel hydrometallurgy. As the demand for nickel increases in line with the needs of electric vehicle batteries and renewable energy technologies, the industry faces significant waste management challenges, particularly toxic wastes,*

effluents and air pollution. Current practices and strategies such as flue gas desulphurization and innovative recycling approaches are being examined as vital components to mitigate these environmental impacts. In addition, emerging techniques in bioprocessing and sustainable process technologies indicate a shift towards greener practices that reduce reliance on harmful chemicals while increasing resource recovery. The integration of circular economy principles is further minimizing environmental footprints by promoting the recycling and reprocessing of nickel-containing waste products. However, challenges remain, such as technological limitations, regulatory differences, economic considerations and the need for community involvement. This paper highlights the critical importance of continued innovation and collaboration across the industry to promote more sustainable extraction methods.

Keywords: *Nickel, Waste Management, Environmental Impacts*

1. GİRİŞ

Nikel hidrometalurjisi, nikeli cevherlerden ve endüstriyel atıklardan, öncelikle liç, solvent ekstraksiyonu ve çökeltme yoluyla çıkarmayı amaçlayan bir dizi işlemi kapsamaktadır. Liç işlemi, nikelin asidik veya alkali çözeltiler kullanılarak cevherlerinden çözülmesini ve ardından nikeli diğer metallerden ve safsızlıklardan ayırmak için çözücü ekstraksiyonunu içermektedir. Yüksek basınçlı asit liçi (High-pressure acid leaching/HPAL) ve yığın liçi, nikel laterit cevherlerini işlemek için kullanılan iki yaygın yöntemdir; HPAL, nikelin asidik ortamlarda artan çözünürlüğü nedeniyle daha yüksek geri kazanım oranlarına izin vermektedir (Zhu vd., 2019; Cao vd., 2012). Liç işleminin ardından, nikel iyonlarını liç sıvısından seçici olarak ayırmak için solvent ekstraksiyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu genellikle nikel iyonlarının organik bir faza aktarılmasını kolaylaştıran ve istenmeyen safsızlıkları geride bırakan Cyanex 272 ve Alamine 336 gibi organik ekstraktanlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Lee vd., 2011;

Yuda, 2024; Kurşunoğlu ve Kaya, 2019). Nikeli çözeltiden geri kazanmak için, genellikle nikelin filtrelenebilen katı bileşikler oluşturmasına neden olan reaktiflerin eklenmesini içeren çökeltme yöntemleri de kullanılabilmektedir (Lee vd., 2010; Nazemi ve Rashchi, 2011).

Nikelin çeşitli endüstrilerdeki önemi göz ardı edilemez. Nikel, korozyon direnci ve mukavemeti nedeniyle küresel nikel tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturan paslanmaz çelik üretiminde kritik bir bileşendir. Ayrıca nikel, özellikle nikel bakımından zengin katotların enerji yoğunluğunu ve performansını artırdığı elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji depolama sistemleri için akü endüstrisinde giderek daha önemli hale gelmektedir (Han vd., 2019; El-Shaarawy vd., 2021). Elektronik sektörü de iletkenlik özellikleri nedeniyle nikele büyük ölçüde güvenmektedir ve bu da nikeli konektörler ve devre kartları gibi bileşenlerin üretimi için gerekli kılmaktadır (Sundhararasu vd., 2021). Ayrıca, nikelin çeşitli kimyasal süreçlerde katalizör olarak oynadığı rol, endüstriyel uygulamalardaki çok yönlülüğünün ve öneminin altını çizmektedir (Yao ve Drieß, 2011).

Nikel hidrometalurjisi, metal ekstraksiyonu için etkili olmakla birlikte, sağlam atık yönetimi stratejilerinin uygulanmasını gerektiren önemli çevresel zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Hidrometalurjik süreçler, özellikle de liç işlemi, genellikle güçlü asitlerin ve diğer tehlikeli kimyasalların kullanımını içerdiğinden, uygun şekilde yönetilmediği takdirde toprak ve su kirliliğine yol açabilmektedir. Örneğin, nikelin laterit cevherlerinden liç edilmesinde tipik olarak sülfürik asit kullanılmakta, bu da asit maden drenajına ve ağır metallerin çevredeki ekosistemlere sızmasına neden olabilmektedir (Rizky vd., 2023). Ayrıca, atıklar ve kullanılmış kimyasallar dahil olmak üzere bu işlemlerden kaynaklanan atıklar hava ve su kirliliğine katkıda bulunabilmekte ve nikel üretiminin sürdürülebilirliğine ilişkin endişeleri artırmaktadır (Rocchetti vd., 2013).

Bu çevresel etkileri azaltmak için çeşitli atık yönetimi stratejileri kullanılmaktadır. Yaklaşımlardan biri, nikel üretim süreçlerinin çevresel ayak izini değerlendirmek için yaşam döngüsü değerlendirmelerinin (Life cycle assesments/LCA) kullanılması ve iyileştirme için kilit alanların belirlenmesidir. Örneğin, çalışmalar hidrometalurjik sürecin optimize edilmesinin nikel üretimiyle ilişkili enerji tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir (Shu ve Gong, 2018). Ayrıca, döngüsel ekonomi ilkelerinin hidrometalurjiye entegrasyonu, atık malzemelerin geri dönüşümünü teşvik ederek ve tehlikeli maddelerin kullanımını en aza indirerek ilgi çekmektedir (Binnemans ve Jones, 2022). Buna, geleneksel çözücülere kıyasla çevresel yükü azaltabilen iyonik sıvıların kullanımı gibi daha sürdürülebilir ekstraksiyon yöntemlerinin geliştirilmesi de dahildir (Park vd., 2014).

Ayrıca, nikel geri kazanımı için alternatif yöntemler olarak biyoliç ve fitomadencilik gibi yenilikçi teknolojiler araştırılmaktadır. Bu yöntemler, metalleri cevherlerden ve atıklardan çıkarmak için biyolojik süreçleri kullanmakta ve potansiyel olarak daha çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Örneğin biyolojik liç, sert kimyasallara olan ihtiyacı azaltarak nikel çıkarımının genel çevresel etkisini düşürebilmektedir (Sani ve Haris, 2022). Benzer şekilde, fitomadencilik, topraktaki nikeli emmek için bitkilerden yararlanmakta, bu bitkiler daha sonra hasat edilip işlenebilmekte ve böylece toprağın iyileştirilmesi ve metal geri kazanımı gibi ikili bir fayda sağlamaktadır (Zhang vd., 2016).

Nikel hidrometalurjisi çeşitli çevresel zorluklar ortaya koyarken, devam eden araştırmalar ve yenilikçi atık yönetimi stratejilerinin benimsenmesi bu etkilerin azaltılması için çok önemlidir. Nikel endüstrisi, sürdürülebilir uygulamaları ve alternatif çıkarma yöntemlerini entegre

ederek, bu temel metale yönelik artan talebi karşılarken ekolojik ayak izini azaltmaya odaklanabilir.

2. NİKEL HİDROMETALURJİSİNE İLİŞKİN TEMEL BİLGİLER

Nikel hidrometalurjisi, nikelin çeşitli kaynaklardan geri kazanılması için birkaç kritik süreci içermektedir. Nikel ekstraksiyonunun ana aşamaları arasında liç, solvent ekstraksiyonu ve çökeltme ve saflaştırma yer almaktadır. Bu aşamaların her biri, önemli endüstriyel uygulamalara sahip olan nikeli verimli bir şekilde geri kazanmak için farklı metodolojiler ve kimyasal süreçler kullanmaktadır.

2.1. Liç Yöntemi

Sülfürik Asit Liçi: Sülfürik asit liçi, lateritik cevherlerden nikel elde etmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu işlemin avantajı, nikeli etkili bir şekilde çözerken aynı zamanda kobalt ve diğer değerli metalleri de yakalayabilmesinde yatmaktadır. Araştırmalar, sülfürik asit liç işleminin, solvent ekstraksiyonu ve elektrokazanım gibi sonraki saflaştırma adımları için gerekli olan konsantre bir nikel çözeltisi verdiğini göstermektedir. Ancak nikel liçinin verimliliği, sülfürik asit konsantrasyonu, sıcaklık ve cevherin tane boyutu da dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenebilmektedir. Dolayısıyla, bu parametrelerin optimize edilmesi, ideal koşullar altında genellikle %90'ı aşan gelişmiş nikel geri kazanım oranlarına yol açabilmektedir (Rizky vd., 2023; Özgün vd., 2020).

Amonyak Liçi: Amonyak liçi, özellikle nikel sülfürlü cevherlerden nikel ekstraksiyonu için bir başka etkili tekniktir. Reaksiyon tipik olarak amonyağın bir liç maddesi olarak hareket ettiği yarı kapalı bir sistemde gerçekleşerek nikeli çözmek için daha az agresif ancak yine de etkili bir

yöntem sağlamaktadır. Bu yöntem, sülfürik asit liçine kıyasla daha az zararlı yan ürün ürettiği için bazı çevresel avantajlar sunmaktadır. Çalışmalar, amonyak liçi yoluyla genel ekstraksiyon verimliliğinin amonyak konsantrasyonu ve sıcaklığının ayarlanmasıyla artırılabileceğini göstermiştir (Yang vd., 2021). Bu durum, çevresel kaygıları ele alırken nikel geri kazanımını optimize etmek için hidrometalurjik süreçlerde amonyak liçinin çok yönlülüğünün altını çizmektedir.

Yüksek Basınçlı Asit Liçi (HPAL): HPAL, özellikle düşük dereceli lateritik cevherlerden nikel elde etmek için gelişmiş bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, cevherlerin yüksek sıcaklıklara ve basınçlara maruz bırakılmasını içermekte ve liç kinetiğini önemli ölçüde iyileştirmektedir. HPAL koşulları altında, nikelin geleneksel atmosferik liç işlemlerinden daha yüksek verimle çıkarılabildiği gösterilmiştir. HPAL kullanımı genellikle liç aşamasından önce nikel cevherinin işlenebilirliğini artırabilen kalsinasyon veya kavurma gibi yenilikçi besleme hazırlama yöntemleriyle birleştirilmektedir. Bununla birlikte, HPAL, aşırı koşullara dayanmak için gereken özel ekipman nedeniyle önemli miktarda sermaye yatırımı gerektirmekte ve bu da yaygın olarak benimsenmesinin önünde bir engel teşkil edebilmektedir (Zeng vd., 2015; Liu vd., 2023).

Doğal Liç ve Biyoliç Seçenekleri: Ortaya çıkan araştırmalar, biyolojik süreçleri geleneksel liç yöntemleriyle birleştirme potansiyelini vurgulamaktadır. Cevherlerden metal liçini iyileştirmek için mikroorganizmaları kullanan biyolojik liç, nikel ekstraksiyonuna daha sürdürülebilir bir yaklaşım getirmektedir. Bu yöntem, standart yöntemlerle işlenmesi genellikle uygun maliyetli olmayan atıkların ve düşük dereceli cevherlerin yeniden işlenmesinde özellikle etkili olabilmektedir. Biyoliç, daha düşük enerji gereksinimi ve daha az toksik yan ürün gibi belirgin

çevresel avantajlar sunarken, verimliliği genellikle geleneksel liç yöntemlerinden daha yavaştır (Wang vd., 2017).

Bu liç yöntemlerinin devam eden değerlendirmeleri, nikel ekstraksiyonu için daha sürdürülebilir bir hidrometalurjik prosese yönelik yollar önermektedir. Malzeme bilimindeki yenilikler ve liç kinetiğinin daha iyi anlaşılması, ekstraksiyon verimliliğinde önemli gelişmelere yol açmıştır. Geleneksel hidrometalurjinin yanı sıra mekanokimyasal aktivasyon gibi yenilikçi ön arıtma tekniklerinin geliştirilmeye devam edilmesi, gelişmiş geri kazanım potansiyelini vurgulamaktadır. Endüstriler çevreye duyarlı metal çıkarma yöntemlerine giderek daha fazla öncelik verdikçe, liç teknolojilerinin gelişimi nikel üretiminin gelecekteki manzarasında çok önemli bir rol oynayacaktır (Yang vd., 2017; Yuliusman vd., 2018).

2.2. Solvent Ekstraksiyon

Solvent ekstraksiyonu, nikelin liç çözeltilerinden saflaştırılmasında ve nikelin safsızlıklardan, özellikle de kobalt, manganez ve karışımda bulunan diğer metal iyonlarından ayrılmasında çok önemli bir işlemdir. Bu metodoloji sadece verimliliği ile değil, aynı zamanda modern endüstriyel uygulamalarda gerekli olan çevre dostu koşullar altında çalışma kabiliyeti ile de dikkat çekmiştir.

Solvent Ekstraksiyonu Mekanizması: Solvent ekstraksiyonu tipik olarak metal iyonlarının sulu çözeltilerden bir ekstraktant ile etkileşim yoluyla organik bir faza kimyasal transferini içermektedir. Solvent ekstraksiyon işleminin seçiciliği, metal iyonlarının ekstraktan moleküllerine bağlanma afinitesi tarafından belirlenmektedir ve bu da farklı metaller arasında önemli ölçüde değişebilmektedir. Di-2-etilheksil fosforik asit (D2EHPA) ve Cyanex 272 gibi son derece seçici ekstraktantlar, nikelin safsızlıklarından verimli bir şekilde ayrılmasını kolaylaştırmak için yaygın

olarak kullanılmaktadır (Arslan vd., 2023; Zhaowu vd., 2019). Ekstraksiyon verimliliği pH, sıcaklık, ekstraktanların konsantrasyonu ve sulu besleme çözeltisinin yapısı gibi parametrelerden etkilenmektedir (Botelho vd., 2018).

Kobalt ve Diğer Safsızlıklardan Ayırma: Nikel geri kazanımında karşılaşılan başlıca zorluklardan biri, benzer kimyasal özellikleri nedeniyle liç çözeltilerinde nikele sıklıkla eşlik eden kobaltın etkili bir şekilde ayrılmasıdır. Çalışmalar, D2EHPA kullanılan bir çözücü ekstraksiyon işleminin sülfat çözeltilerindeki kobaltı nikelden etkili bir şekilde ayırabildiğini göstermiştir (Arslan vd., 2023). Bu ayrıştırma, kobalt iyonlarının tercihen D2EHPA ile kompleks oluşturduğu ve nikel çözeltide kalırken sulu fazdan uzaklaştırılmasına yol açan seçici iyon transferi yoluyla gerçekleşmektedir. Ayrıca, Cyanex 272, nikel çözeltilerinden magnezyum giderimindeki rolü açısından araştırılmış ve çok bileşenli liç çözeltilerinin arıtılmasında çözücü ekstraksiyonunun çok yönlülüğünü vurgulamıştır (Zhaowu vd., 2019).

Sinerjik Ekstraksiyon Sistemleri: Sinerjik çözücü ekstraksiyon sistemlerinin uygulanması nikel geri kazanımının seçiciliğini ve verimliliğini daha da artırabilmektedir. Araştırmacılar, D2EHPA ve Cyanex 272 gibi ekstraktanların bir kombinasyonunu kullanarak nikel ve kobalt için gelişmiş seçicilik profilleri elde etmişlerdir (Guimarães vd., 2014). Bu yaklaşım genel ekstraksiyon verimliliğini artırmakta ve gerekli ekstraktan miktarını azaltarak işletme maliyetlerini optimize etmektedir. Sinerjik sistemler yalnızca daha yüksek ekstraksiyon oranlarına izin vermekle kalmayıp aynı zamanda istenmeyen metal iyonlarının birlikte ekstraksiyonunu azaltarak daha saf nikel ürünleri elde edilmesini sağlamaktadır.

Solvent ekstraksiyonu genellikle pirometalurji gibi geleneksel hidrometalurjik tekniklere göre daha çevre dostu bir alternatif olarak

görülmektedir, çünkü yüksek sıcaklık prosesleriyle ilişkili emisyonları ve atık oluşumunu en aza indirmektedir. Bununla birlikte, organik çözücülerin seçimi ve çıkarılan fazların işlenmesi, potansiyel çevresel etkilerden kaçınmak için dikkatle değerlendirilmesi gereken kritik hususlar olmaya devam etmektedir. Son gelişmeler, sürdürülebilir metal geri kazanım stratejilerinin ayrılmaz bir yönü olarak yenilenebilir kaynaklardan elde edilen organik çözücülerin kullanımı gibi daha çevreci ekstraksiyon yöntemlerini araştırmıştır (Yuda vd., 2024). Solvent ekstraksiyon teknolojisinde devam eden yenilikler, çevresel kaygıları ele alırken metal seçiciliğini artırmaya odaklanmaktadır. İyonik sıvılar ve işlevselleştirilmiş polimerler gibi ekstraktanlar için gelişmiş malzemelerin kullanımı, umut verici bir araştırma alanını temsil etmektedir. Bu malzemeler daha düşük konsantrasyonlarda daha yüksek seçicilik sağlayabilir, böylece zararlı çözücülerin kullanımını ve reaktif tüketimini en aza indirgemektedir (Peng et al., 2019). Ayrıca, solvent ekstraksiyonunun çökeltme ve iyon değişimi gibi diğer saflaştırma teknikleriyle birleştirilmesi, karmaşık liç çözeltilerinden nikel geri kazanımında gelişmiş saflaştırma verimliliği sağlayabilmektedir (Han vd., 2019; Mystrioti vd., 2018).

3. NİKEL HİDROMETALURJİSİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Nikel hidrometalurjisi, pirometalurjiye kıyasla metal geri kazanımı ve çevresel ayak izi açısından avantajlar sunarken, özellikle atık üretimi açısından önemli çevresel zorluklarla ilişkilidir. Hidrometalurjik prosesler genellikle atık, atık su, cüruf ve artıklar şeklinde önemli miktarlarda katı atığa yol açmaktadır.

3.1. Atık Ürünlerin Oluşumu

Nikel hidrometalurjisinin birincil yan ürünlerinden biri, liç işlemlerinden kaynaklanan katı atıklardır. Bu atıklar yüksek hacimlerde üretilmekte ve genellikle kullanılan ekstraksiyon yöntemlerine bağlı olarak toksik olabilen kalıntı maddeler içermektedir. Örneğin, çalışmalar nikel lateritik cevherlerinin hidrometalurjik yöntemlerle işlenmesinin önemli miktarda atık oluşumuna neden olabileceğini ve bunun da çevresel etkileri azaltmak için uygun yönetim gerektirdiğini göstermektedir (Rizky vd., 2023; Sun vd., 2021). Hidrometalurjik süreçlerin sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi çevresel faydaları, yönetilmeyen atıklardan kaynaklanan toprak ve su kirliliği potansiyeline karşı değerlendirilmelidir (Harpprecht vd., 2021; Roy vd., 2024).

Üstelik bu süreçlerden kaynaklanan atık sular, genellikle ağır metaller ve asidik atıklar da dahil olmak üzere çeşitli kirleticiler içerdiğinden özellikle endişe verici olabilmektedir. Kirlenmiş suyun yönetimi, yerel ekosistemler üzerindeki olumsuz etkileri önlemek için kritik önem taşımaktadır (Rauf vd., 2024). Atık sular, toksik metallerin yakındaki su kütlelerine sızmasına yol açarak nikel çıkarımının çevresel ayak izini daha da kötüleştirebilmektedir (Shen vd., 2018).

Atıklara ve atık sulara ek olarak, nikel üretiminin saflaştırma aşamalarında cüruf ve artıklar ortaya çıkmaktadır. Bu yan ürünler genellikle değerli metaller ve uygun şekilde yönetilmediği takdirde çevresel risk oluşturmaya devam edebilecek kirleticiler içermektedir. Nikel üretimi, üretilen her ton nikel için 6 ila 16 ton cüruf üretebilmekte ve bu da önemli depolama ve kirlilik sorunları yaratmaktadır (Fadliah vd., 2024; Yu vd., 2021). Ergitme işlemlerinden kaynaklanan nikel artıklarının tehlikeli maddeler içerdiği gösterilmiştir, bu da sektörün karşılaştığı çevresel zorluklara katkıda bulunmaktadır (Zhang vd., 2023).

3.2. Kontaminasyon ve Çevre Kirliliği Riskleri

Nikel atıklarından ve cürufundan kaynaklanan kirlilik yalnızca ağır metaller içermekle kalmamakta, aynı zamanda toprak ve su kalitesi üzerinde uzun vadeli etkileri olabilecek karmaşık silikat ve oksit karışımlarını da içerebilmektedir (Mitrašinović ve Wolf, 2015). Bu tür kirliliğin etkisi, etkilenen bölgelerde biyoçeşitlilik kaybına yol açabilmekte ve insan yerleşimlerinin atık sahalarına yakınlığına bağlı olarak halk sağlığı üzerinde geniş kapsamlı sonuçlar doğurabilmektedir (Zhang vd., 2020).

Bu endişeleri gidermek için, çeşitli çalışmalar cüruftan değerli metallerin geri kazanılmasını ve böylece atıkların azaltılmasını amaçlayan yenilikçi proses yöntemlerinin geliştirilmesini savunmaktadır (Kasikov vd., 2022; Wu vd., 2024). Bu yaklaşımlar, atıkları potansiyel olarak bir kaynağa dönüştürebilen asit liçi gibi yöntemlerle cürufun hidrometalurjik olarak işlenmesine odaklanmaktadır (Kasikov vd., 2022; Shen vd., 2017). Bununla birlikte, bu teknolojilerin ölçekli olarak uygulanması, ekonomik sonuçlar ve bu tür yöntemlerin teknolojik hazırlığı nedeniyle bir zorluk olmaya devam etmektedir.

Hidrometalurjik prosesler metal geri kazanımı için daha temiz seçenekler sunarken, etkili bir şekilde yönetilmesi gereken tehlikeli atık oluşumuna önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Atık değerlendirme ve geri kazanım teknolojilerinde gelecekte kaydedilecek ilerlemeler bazı çevresel kaygıları azaltabilecektir ancak nikel hidrometalurjisi sektöründe sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesini sağlamak için paydaşların ortak çaba göstermesi gerekecektir.

3.3. Hava Kirliliği

Toprak ve su kirliliğine ek olarak, nikel hidrometalurjisi, özellikle liç ve arıtma sırasında yüksek sıcaklıktaki işlemlerden kaynaklanan kükürt dioksit

(SO_2) ve azot oksit (NO_x) emisyonları olmak üzere önemli hava kirliliği ile ilişkilidir. Nikel ergitme işleminin bir yan ürünü olan kükürt dioksit sadece asit yağmurlarına katkıda bulunmakla kalmayıp aynı zamanda insan sağlığı için solunum yolu tehlikeleri de oluşturmaktadır (Golroudbary vd., 2023). Azot oksitlerin salınımı, hava kalitesi sorunlarını daha da kötüleştirerek yerel halkta duman ve solunum rahatsızlıkları gibi sorunlara yol açmaktadır (Simpson & Spadaro, 2016; Golroudbary vd., 2023). Bu tür emisyonlar, nikel proses tesislerini çevreleyen bölgelerde hava kalitesini kontrol etmek için sıkı düzenleyici önlemlere duyulan ihtiyacın altını çizmektedir.

3.4. Enerji Tüketimi ve Çevresel Çıkarımlar

Nikel hidrometalurjisi için enerji gereksinimleri bir diğer kritik hususdur. Yüksek basınç ve yüksek sıcaklık operasyonları, karbondioksit (CO_2) emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunan, öncelikle yenilenemeyen kaynaklardan gelen önemli miktarda enerji girdisi gerektirmektedir. Araştırmalar, üretilen birim nikel başına enerji tüketiminin diğer metallerinkinden önemli ölçüde daha yüksek olabileceğini ve nikel üretiminin genel çevresel ayak izini artırdığını göstermektedir (Kenzhegali ve Nuruly, 2023; Rizky vd., 2023). Bu enerji yoğunluğu yalnızca sera gazı emisyonlarının artmasına yol açmakla kalmayıp aynı zamanda işletme maliyetlerini de yükselterek daha sürdürülebilir işleme yöntemlerinin araştırılmasına neden olmaktadır (Rizky vd., 2023).

4. ATIK YÖNETİMİ STRATEJİLERİ

Nikel hidrometalurjisinden kaynaklanan atıkların yönetimi, üretilen büyük hacimler ve yetersiz yönetimle ilişkili potansiyel çevresel riskler nedeniyle kritik bir zorluk teşkil etmektedir. Bu karmaşıklık, hem atık depolama hem

de geri dönüşüm seçeneklerini kapsayan etkili atık yönetimi stratejilerinin uygulanmasını gerektirmektedir.

4.1. Atıkların Yönetimi

4.1.1. *Atık depolama tesisleri (TSF'ler)*

Atık depolama tesisleri nikel ekstraksiyon işlemlerinden kaynaklanan katı atıkların yönetimi için yaygın bir yöntemdir. Bu tesisler atıkların tutulması ve çevresel etkilerinin azaltılması için tasarlanmıştır. Bununla birlikte, geçmişte yıkıcı çevresel felaketlere yol açan baraj arızaları riski de dahil olmak üzere önemli zorluklarla karşı karşıyadırlar. TSF'lerin stabilitesi, atıkların bileşimi, çevredeki alanın hidrolojisi ve iklim koşulları gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir (Carneiro ve Fourie, 2019; Barsi ve Wilson, 2023). Bu zorluklar, daha güvenli ve daha sürdürülebilir yönetim uygulamaları sağlamak için TSF'lerin tasarımını ve işletimini iyileştirme konusunda devam eden tartışmalara yol açmaktadır (Araya vd., 2021; Barsi ve Wilson, 2023).

Buna ek olarak, üretilen atıkların büyük hacmi depolama kapasitelerini aşabilmekte, bu da üretimi en aza indirmek veya depolama çözümlerini optimize etmek için alternatif yöntemlerin araştırılmasını gerektirmektedir (Carneiro ve Fourie, 2019). Uygun jeoteknik değerlendirmeler ve sağlam mühendislik uygulamalarının uygulanması, çevresel bozulmayı önlemek ve düzenleyici standartlara uyumu sağlamak için bu tesislerin sürdürülebilir işletimi için gereklidir (Boshoff vd., 2023; Opara vd., 2022).

4.1.2. *Atıkların geri dönüşümü*

Hidrometalurjik işlemler sırasında oluşan nikel atıklarının geri dönüşümü, madencilik sektöründe atık yönetiminin giderek önem kazanan bir yönüdür.

Çevresel etkileri en aza indirme ve değerli metalleri geri kazanma potansiyeli ile atıkların geri dönüşümünü ve yeniden kullanımını geliştirmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir.

En önemli geri dönüşüm stratejilerinden biri nikel atıklarının inşaat malzemesi olarak kullanılmasıdır. İnşaat sektörünün agrega talebi yüksek olmasına rağmen, bu sektörde maden atıklarının fiili kullanımı oldukça düşüktür (üretilen toplam hacmin %1'inden azı). Bu tutarsızlık, nakliye maliyetleri ve inşaat standartlarını karşılamak için işleme ihtiyacı gibi zorlukların yanı sıra, atıkların diğer malzemelere kıyasla nispeten düşük ekonomik değerinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, atıkların beton ve yol temellerine dahil edilmesi, yalnızca depolanmalarıyla ilişkili çevresel riskleri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda geleneksel olarak atık olarak kabul edilen malzemelerden ekonomik değer elde etme fırsatını da temsil etmektedir (Araujo vd., 2022). Ayrıca, atıkların inşaat malzemelerine geri dönüştürülmesi, atıkların bir kaynağa dönüştürüldüğü döngüsel ekonomi ilkelerine katkıda bulunmaktadır. Bu yaklaşım, yeni agrega çıkarma ihtiyacını azaltarak ve madencilik faaliyetleriyle ilişkili çevresel ayak izini en aza indirerek önemli ekolojik faydalar sağlayabilmektedir (Rachman vd., 2022).

Hidrometalurjik ve biyoteknolojik yöntemler kullanılarak nikel atıklarından değerli metallerin geri kazanılması, geri dönüşüm için umut verici bir başka yolu temsil etmektedir. Biyoliç gibi teknikler, atıklardan metalleri çözündürmek için mikrobiyal süreçleri kullanarak nikel, kobalt ve bakırın geri kazanım oranlarını artırmaktadır. Araştırmalar, biyoliç işleminin düşük tenörlü cevherlerden metal çıkarma oranlarını etkili bir şekilde artırabileceğini ve böylece atıkların depolanmasıyla ilgili çevresel sorunları ele alırken ekonomik kaynakları geri kazanabileceğini göstermektedir (Wang vd., 2017).

Ayrıca, solvent ekstraksiyonu ve çökeltme yöntemlerini içeren ekstraksiyon teknolojileri ile atıklardan nikelin kimyasal geri dönüşümünde ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu teknikler, işlenmemiş atıklardan kaynaklanabilecek asit drenajı ve ağır metal liçi gibi çevresel etkileri en aza indirirken metalleri verimli bir şekilde geri kazanabilmektedir (Atia vd., 2023). Bu geri kazanım süreçlerine yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yaklaşımlarının uygulanması, çevresel etkilerinin ölçülmesine yardımcı olarak sürdürülebilirlik uygulamalarındaki iyileştirmelere rehberlik etmektedir (Korkmaz vd., 2024).

Atık geri dönüşümünün karmaşık zorluklarını ele almak için yeni hidrometalurjik süreçler gibi yenilikçi teknolojiler geliştirilmiştir. Örneğin, ince mineral tanelerinin sınıflandırılması ve geri kazanılmasına yönelik yöntemlerin kullanılması, metal geri kazanımının verimliliğini artırırken çevreye salınan atıkları en aza indirebilmektedir (Lv vd., 2023). Bu gelişmiş teknolojilerin geleneksel geri dönüşüm yöntemleriyle entegrasyonu, normal şartlarda atıklarda sıkışıp kalacak metallerin geri kazanılması için uygun yollar sunmaktadır (Liu ve Chen, 2011).

4.2. Su Arıtma ve Atık Su Yönetimi

Su arıtma ve atık su yönetimi, nikel hidrometalurjisinin özellikle asidik atık sular ve ağır metal kirliliğinin yarattığı çevresel zorlukların ele alınmasında kritik öneme sahip bileşenleridir. Etkili stratejiler asidik atık suların nötralizasyonu, ağır metallerin giderilmesi ve su geri dönüşümünü kapsamakta olup, bunlar toplu olarak hidrometalurjik operasyonların sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

4.2.1. *Asidik atıkların nötralizasyonu*

Asidik atık sular genellikle liç işlemlerinde sülfürik asit kullanımı nedeniyle hidrometalurjik proseslerden kaynaklanmaktadır. Bu asidik akıntılar su ekosistemleri ve toprak kalitesi üzerinde zararlı etkilere sahip olabilmektedir; bu nedenle nötralizasyon hayati önem taşımaktadır. Nötralizasyon süreci tipik olarak atık suyun pH'ını yükseltmek için kireç (kalsiyum karbonat) veya sodyum hidroksit gibi alkali maddelerin eklenmesini içermektedir. Araştırmalar, bu tür kimyasal nötralizasyonların sadece asitliği etkili bir şekilde nötralize etmekle kalmayıp aynı zamanda metallerin çökelmesini kolaylaştırdığını ve böylece ikili bir arıtma etkisine izin verdiğini göstermektedir (Ayala-Parra vd., 2016). Uygun nötralize edici maddelerin seçimi, etkili arıtma sağlamak ve çevreye daha fazla zarar verilmesini önlemek için çok önemlidir.

4.2.2. *Ağır metal giderimi*

Atık sulardan ağır metallerin giderilmesi, nikel hidrometalurjisinde su arıtımının bir diğer önemli yönüdür. Metal giderme teknikleri genellikle üç kategoriye ayrılmaktadır: kimyasal çöktürme, adsorpsiyon ve biyoremediasyon.

Kimyasal Çöktürme: Bu yöntem, çözünmeyen bileşikler oluşturmak için çözünmüş metallerle reaksiyona giren ve daha sonra çökeltme yoluyla giderilebilen maddelerin eklenmesini içermektedir. Örneğin, sülfit çöktürme bakır ve kurşun gibi metalleri etkili bir şekilde uzaklaştırabilmektedir, ancak artık çamur yönetimi gibi zorluklar ortaya çıkabilmektedir (Gunarathne vd., 2020).

Adsorpsiyon: Adsorpsiyon teknikleri, sudan ağır metalleri yakalamak için aktif karbon, zeolitler veya biyokömür gibi malzemeleri kullanmaktadır. Son gelişmeler, tarımsal yan ürünler ve mikrobiyal biyokütle gibi

biyosorbanları, çevre dostu olmaları ve düşük maliyetleri nedeniyle etkili alternatifler olarak öne çıkarmıştır (Vijayaraghavan ve Balasubramanian, 2015). Örneğin, alg ve mantarların yüksek yüzey alanları ve aktif metabolik süreçleri nedeniyle ağır metal biyosorpsiyonunda etkili oldukları gösterilmiştir (Piccini vd., 2019; Fazlı vd., 2015).

Biyoremediasyon: Ağır metal giderimi için mikroorganizmaların kullanılması umut verici ve sürdürülebilir bir yaklaşımdır. Çalışmalar, bakterilerin (örn. Bacillus spp.) ve alglerin ağır metalleri emebildiğini veya biyolojik olarak biriktirebildiğini, böylece kirlenmiş atık sulardan geri kazanımı kolaylaştırdığını göstermektedir (Shammi ve Ahmed, 2016; Escamilla-Rodríguez vd., 2021). Biyoremediasyon toksik metalleri daha az zararlı formlara dönüştürür ve metal geri kazanımı için potansiyel taşır, bu da onu çift amaçlı bir strateji haline getirmektedir.

4.2.3. *Su geri dönüşümü*

Su geri dönüşüm stratejileri, su tüketimini azaltmaya ve çevresel ayak izini en aza indirmeye yardımcı olduklarından nikel hidrometalurjik operasyonlarının sürdürülebilirliğini artırmak için çok önemlidir. Etkili geri dönüşüm yöntemleri şunları içermektedir:

Su Islah Sistemleri: Biyolojik ve fizikokimyasal süreçleri birleştiren arıtma sistemlerinin uygulanması, suyun yeniden kazanılmasını ve proses devresi içinde yeniden kullanılmasını sağlayabilmektedir (Sravan vd., 2024). Örneğin, arıtılmış su madencilik ve ekstraksiyon sürecinin çeşitli aşamalarında yeniden kullanılarak harici su kaynaklarına bağımlılığı azaltabilmektedir.

Biyoremediasyonun Geri Dönüşüme Entegrasyonu: Su geri dönüşüm sistemlerine biyoremediasyon tekniklerinin dahil edilmesi, metal geri kazanımını artırırken aynı zamanda kirlenmiş suyu da arıtabilmektedir. Alg

sistemlerinin kullanımı, hem besin maddelerinin hem de ağır metallerin emilimini kolaylaştırarak atık su arıtımını ve kaynak geri kazanımını etkili bir şekilde ele alabilmektedir (Piccini vd., 2019; Saavedra vd., 2019).

Kapalı Döngü Sistemleri: Kapalı döngü su sistemlerinin kurulması, proses suyunu devridaim ettirerek toplam su kullanımını azaltmaktadır. Bu sayede atık su deşarjı ile ilişkili çevresel etkiler en aza indirilmekte ve değerli kaynaklar korunmaktadır (Nancharaiah vd., 2015).

4.3. Katı Atık Yönetimi

Etkili katı atık yönetimi, nikel hidrometalurjisi bağlamında tehlikeli atıkların ve geri dönüştürülemeyen malzemelerin ortaya çıkardığı zorlukların üstesinden gelmek için gereklidir. Bu, tehlikeli maddelerin stabilizasyonu ve katılaştırılması, güvenli depolama sahası bertaraf stratejileri ve değerli kaynakları geri kazanmak için yan ürünlerin yenilikçi kullanımı gibi uygulamaları içermektedir.

4.3.1. *Stabilizasyon solidifikasyon*

Stabilizasyon ve solidifikasyon teknikleri, nikel prosesinden kaynaklanan tehlikeli atıkların yönetiminin ayrılmaz bir parçasıdır. Süreç, bu kalıntıların reaktivitelerini ve çevreye sızabilirliklerini azaltmak için arıtılmasını içermektedir, böylece toprak ve yeraltı sularının kirlenmesi önlenmektedir. Çimentolu malzemelerin kullanılması, tehlikeli metalleri kapsülleyerek toksik bileşenleri sızdırma olasılığı daha düşük olan daha kararlı bir forma dönüştürebilmektedir (Symanzik vd., 2019; Ali vd., 2024). Endüstriler, tehlikeli yan ürünleri katılaştırma yoluyla etkili bir şekilde arıtarak nikel madenciliği ve prosesiyle ilişkili çevresel riskleri önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Araştırmalar, katılaştırmanın yalnızca metallerin hareketliliğini azaltmaya yardımcı olmakla kalmayıp aynı zamanda atık yönetimiyle ilişkili uzun vadeli yükümlülükleri de azaltabileceğini göstermektedir (Han vd., 2023; Ali vd., 2024). Madencilik şirketleri, etkili stabilizasyon yöntemleri sayesinde çevresel düzenlemelere uyumu artırabilir ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarını teşvik edebilmektedir.

4.3.2. *Atık depolama sahası bertarafı*

Geri dönüşüm ve geri kazanım fırsatlarına öncelik verilirken, işlenemeyen veya yeniden kullanılamayan malzemeler için güvenli depolama sahası bertarafı gerekli olmaya devam etmektedir. Uygun depolama sahası yönetimi, atık malzemelerin ayrışmasından kaynaklanabilecek atık suların neden olduğu çevresel etkileri en aza indirmek için hayati önem taşımaktadır. Düzenli depolama sahası atık suları genellikle madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan toksik ağır metallerle yüklüdür ve gelişmiş arıtma mekanizmaları gerektirmektedir (Wdowczyk ve Szymańska-Pulikowska, 2021; Kumar ve Kumari, 2024). Modern düzenli depolama sahalarının tasarımı, yeraltı suyu kirlenme risklerini azaltmak için sızıntı suyu toplama ve arıtma sistemlerini entegre etmelidir (Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska, 2021; Ali vd, 2024).

Ayrıca, düzenli depolama sahalarının sürekli izlenmesi, atık su kalitesinin zaman içinde değerlendirilmesine yardımcı olarak etkili uzun vadeli yönetim ve azaltma stratejileri için gereklidir (Wdowczyk ve Szymańska-Pulikowska, 2021). Katı atık bertarafının düzenleyici standartlara uygun olmasını sağlamak, halk sağlığını ve çevreyi korumak için çok önemlidir.

4.3.3. *Yan ürünlerin kullanımı*

Nikel hidrometalurjisinden elde edilen yan ürünlerin kullanımı, atık yönetimi için potansiyel yükümlülükleri ekonomik varlıklara dönüştürebilecek yenilikçi stratejiler sunmaktadır. Gelecek vaat eden alanlardan biri, atıklardan değerli metallerin geri kazanılmasıdır, çünkü bunlar sadece nikel değil aynı zamanda kobalt ve nadir toprak elementleri gibi diğer değerli elementleri de içerebilmektedir (Yao vd., 2018; Altınkaya vd., 2018). Birçok çalışma, bu minerallerin atık akışlarından çıkarılmasını ve biyoliç veya hidrometalurjik geri kazanım teknikleri gibi yöntemler kullanılarak işlenmesini araştırmış ve madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliğini önemli ölçüde artırmıştır (Renforth, 2019; Cao vd., 2024).

Ayrıca, atıkların inşaat malzemelerine dönüştürülmesi de bir başka uygulanabilir geri dönüşüm yolu sunmaktadır. Örneğin, atıklar beton veya diğer inşaat uygulamalarında agrega olarak kullanılarak işlenmemiş malzeme ihtiyacını azaltabilir ve atık yönetimi için sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır (Cao vd., 2024). Bu stratejilerin uygulanması yalnızca katı atık sorunlarını ele almakla kalmaz, aynı zamanda kaynak döngüsünü kapatarak döngüsel ekonomi ilkeleriyle de uyum sağlamaktadır.

4.4. Hava Kirliliği Kontrolü

Hava kirliliği kontrolü, nikel hidrometalurjisi operasyonlarında, özellikle kükürt dioksit (SO_2) emisyonlarının ve toz halindeki partikül maddelerin azaltılması açısından çok önemli bir husustur. Etkili yönetim stratejileri arasında SO_2 tutulması için baca gazı kükürt giderme teknolojilerinin yanı sıra ergitme ve liç tesislerinden kaynaklanan toz partikül madde emisyonlarını en aza indirmek için tasarlanmış sistemlerin uygulanması yer almaktadır.

4.4.1. *Bacagazı desülfürizasyonu (FGD)*

Bacagazı desülfürizasyon (FGD), nikel ergitme işlemi sırasında oluşan sülfür dioksit emisyonlarını yakalamak için yaygın olarak benimsenen bir teknolojidir. Esas olarak kükürt bakımından zengin cevherlerin yanmasından ve metalürjik süreçlerdeki çeşitli kimyasal reaksiyonlardan üretilen SO_2, asit yağmurlarına ve insanlarda solunum sorunlarına katkıda bulunarak önemli bir çevresel risk oluşturmaktadır (Zhong vd., 2020).

Yaş temizleme, kuru temizleme ve deniz suyu ile temizleme dahil olmak üzere çeşitli FGD teknolojileri kullanılmaktadır. En yaygın yöntem olan ıslak fırçalama, SO_2 ile reaksiyona girmek için kalsiyum karbonat veya kireçtaşı gibi alkali maddelerden oluşan bir bulamaç kullanır ve bertaraf edilebilen veya daha fazla işlenebilen alçı veya diğer kararlı bileşikleri oluşturmaktadır. Bu yöntem yalnızca SO_2 emisyonlarını yakalamakla kalmayıp, aynı zamanda inşaat sektöründe uygulamaları olan alçıtaşı gibi faydalı yan ürünlerin geri kazanılmasına da olanak sağlamaktadır. FGD teknolojisindeki son gelişmeler, artan çevresel düzenlemelere uymaya çalışırken verimliliği artırmayı ve işletme maliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır (Kusuma vd., 2023).

4.4.2. *Partikül madde kontrolü*

SO_2 emisyonlarına ek olarak, nikel ergitme ve liç işlemlerinden kaynaklanan partikül madde (PM) emisyonları da önemli bir çevresel kaygıyı temsil etmektedir. Partikül madde ağır metaller ve diğer toksik maddeler içerebilmekte ve hem insan sağlığı hem de çevre için tehlike oluşturmaktadır. Verimli partikül madde kontrol sistemleri, bu proseslerden kaynaklanan toz emisyonlarının azaltılması için çok önemlidir (Liu vd., 2024).

Partikül emisyonlarını kontrol etmeye yönelik teknolojiler tipik olarak torbalı sistemleri, elektrostatik çökelticileri (ESP'ler) ve yaş temizleyicileri içermektedir. Torbalar, egzoz gazlarından partikül maddeyi yakalamak için kumaş filtreler kullanarak PM gideriminde yüksek verimlilik elde etmektedir (Liu vd., 2024). Elektrostatik çökelticiler, partikülleri yüklemek için elektrik alanları kullanarak daha sonra bertaraf etmek veya geri dönüştürmek üzere ekipman içindeki yüzeylerde toplanmalarını sağlamaktadır. Teknoloji seçimi, emisyonların spesifik özellikleri, düzenleyici gereklilikler ve ekonomik hususlar dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır.

5. MEVCUT ATIK YÖNETİMİ UYGULAMALARININ ZORLUKLARI VE SINIRLAMALARI

Nikel hidrometalurji sektöründe atıkların etkin yönetimi, atık bertarafının verimliliğini ve madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliğini etkileyen çeşitli zorluklar ve sınırlamalarla doludur. Temel konular arasında teknolojik sınırlamalar, düzenleyici engeller, ekonomik faktörler ve toplum ve paydaş katılımının rolü yer almaktadır.

Atık yönetimi uygulamalarındaki temel zorluklardan biri, ileri atık arıtma teknolojileriyle ilişkili yüksek maliyetlerin getirdiği teknolojik sınırlamalardır. Biyoliç ve ileri ayrıştırma teknikleri gibi yenilikçi yöntemlerin etkinliği kanıtlanmış olmasına rağmen, altyapı ve ekipman için gereken önemli sermaye yatırımları nedeniyle bunların yaygın olarak benimsenmesi sınırlı kalmaktadır (Bernstad vd., 2011). Ayrıca, bu teknolojilerin birçoğu hala geliştirme aşamasındadır, bu da ticarileştirilmelerini ve yaygın olarak uygulanmalarını göz korkutucu bir görev haline getirmektedir. Buna ek olarak, atık bileşimindeki değişkenlik, hem ekonomik olarak uygulanabilir hem de çevre dostu olan uygun arıtma

süreçlerinin tasarlanmasında zorluklara yol açabilmektedir (Badu-Yeboah vd., 2018) . Bu nedenle, bu tür teknolojilerin verimliliğini artırırken maliyetlerini düşürmeye odaklanan araştırma ve geliştirme çalışmalarının devam etmesi, bu engellerin aşılması için elzemdir.

Ülkeler arasındaki çevresel düzenlemelerdeki farklılıklar, etkili atık yönetimi stratejileri için bir başka önemli zorluk teşkil etmektedir. Tutarsız mevzuat genellikle uyum gerekliliklerinde eşitsizliklere yol açmakta ve birden fazla yargı alanında faaliyet gösteren şirketlerin atık yönetimi uygulamalarını uyumlu hale getirmelerini zorlaştırmaktadır (Karthikeyan vd., 2018). Bu tutarsızlık, kapsamlı atık yönetimi çerçevelerinin oluşturulmasını engelleyebilir ve en iyi uygulamaların küresel olarak uygulanmasını karmaşıklaştırabilir. Ayrıca, düzenleyici çerçeveler, elektronik atıklar ve hidrometalurjide üretilen tehlikeli maddeler gibi yeni ortaya çıkan atık akışlarını yeterince ele almayarak gözetim ve uyum konusunda boşluklar yaratabilmektedir (Badu-Yeboah vd., 2018; Kombiok vd., 2021). Düzenlemeleri standartlaştırmanın yanı sıra uluslararası işbirliğini ve bilgi paylaşımını teşvik etmeye yönelik çabalar, atık yönetimi uygulamalarının etkinliğini artırarak çevreye duyarlı operasyonları teşvik edebilecektir (Ismaeel & Lotfy, 2022).

Ekonomik hususlar da kapsamlı atık yönetimi çözümlerinin uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmiş atık yönetimi teknolojileriyle ilişkili maliyet-fayda dengesi, özellikle finansal kaynakların sınırlı olabileceği gelişmekte olan ülkelerde yatırımları caydırabilmektedir (Karthikeyan vd., 2018). Şirketler, bu tür sistemlerin sağlayabileceği uzun vadeli çevresel ve ekonomik faydalara rağmen, genellikle ön maliyet gerektiren kapsamlı atık yönetim sistemlerine yatırım yapmakta tereddüt etmektedir. Dahası, algılanan kısa vadeli finansal baskılar, atık yönetimi uygulamalarının uzun vadeli sürdürülebilirliğini düşünmek yerine acil

operasyonel verimliliklere odaklanılmasına yol açabilmektedir (Rosana & Handoko, 2021). Çevresel faydalar ve kaynak geri kazanımı yoluyla yatırımın geri dönüşünü net bir şekilde ortaya koyan stratejiler, atık yönetimine dahil olan paydaşların ekonomik katılımını teşvik etmek için çok önemlidir.

Son olarak, atık yönetimi politikalarının şekillendirilmesinde yerel toplulukların ve paydaşların rolü çok önemlidir ancak genellikle göz ardı edilmektedir. Etkili atık yönetimi, yerel topluluklar, devlet kurumları, çevre örgütleri ve endüstri temsilcileri de dahil olmak üzere çeşitli paydaşların aktif katılımını gerektirmektedir (Huyben vd., 2018). Bu grupların karar alma süreçlerine dahil edilmesi, atık yönetimi stratejilerinin belirli yerel ihtiyaçları karşılayacak şekilde uyarlanmasına, şeffaflığın artırılmasına ve girişimler için toplum desteğinin teşvik edilmesine yardımcı olabilmektedir. Atık yönetimi uygulamaları hakkında kamu bilinci ve eğitimi de, özellikle uygun atık ayrıştırma ve geri dönüşüm çabalarıyla ilgili olarak, toplum katılımını motive etmede önemli bir rol oynamaktadır (Rondinel-Oviedo, 2021). Paydaşlar arasındaki işbirliklerinin güçlendirilmesi, toplumsal değerleri ve öncelikleri yansıtan daha etkili ve sürdürülebilir atık yönetimi politikaları üretebilmektedir.

6. NİKEL HİDROMETALURJİSİ ATIK YÖNETİMİNDE GELECEK YÖNELİMLER VE YENİLİKLER

Nikel hidrometalurjisinde atık yönetiminin zorlukları giderek daha belirgin hale geldikçe, sürdürülebilirliği artırmak ve çevresel etkiyi en aza indirmek için ilerlemelere ve yenilikçi yaklaşımlara acil ihtiyaç duyulmaktadır. Geleceğin kilit yönelimleri arasında yeşil kimyadaki ilerlemeler, döngüsel ekonomi uygulamaları, karbon nötrlüğüne ulaşma stratejileri ve atık

yönetimi süreçlerine otomasyon ve yapay zekanın entegrasyonu yer almaktadır.

Yeşil kimya alanı, nikel hidrometalurjisinin çevresel ayak izini azaltmak için umut verici yollar sunmaktadır. Yenilikler, minimum toksik atık üreten daha sürdürülebilir çözücülerin veya liç maddelerinin kullanımına odaklanmaktadır. Örneğin, organik asitler ve çevresel olarak iyi huylu iyonik sıvılar gibi alternatif liç maddelerine yönelik araştırmalar, daha sürdürülebilir ekstraksiyon süreçleri için fırsatlar sunmaktadır (Danilina vd., 2020). Bu alternatifler yalnızca metal geri kazanımının etkinliğini korumakla kalmayıp aynı zamanda tehlikeli kimyasallara maruz kalmayı azaltarak çalışanlar ve çevredeki ekosistemler için güvenliği de artırmaktadır. Ayrıca, biyoteknolojinin liç işlemine dahil edilmesi, toksik reaktiflerin kullanımını en aza indirirken daha seçici ekstraksiyon yöntemlerine yol açabilmektedir. Yeşil metodolojilere doğru bir geçişi teşvik etmek, sürdürülebilirliğe yönelik daha geniş hareketle uyumludur ve nikel çıkarımını potansiyel olarak daha çevre dostu bir operasyona dönüştürmektedir.

Döngüsel ekonomi çerçevesi, atık akışlarından değerli metallerin geri kazanılmasını teşvik ederek kaynak verimliliğini artırırken çevresel etkileri azaltmaktadır (Macusi vd., 2019). Örneğin, kullanılmış pillerden nikel ve kobaltın geri kazanılması, yalnızca işlenmemiş malzeme çıkarma ihtiyacını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda giderek teknoloji odaklı hale gelen bir dünyada kaynak kıtlığı konusunda artan endişeleri de gidermektedir. Kapsamlı toplama ve geri dönüşüm girişimlerinin uygulanması, toplum katılımını teşvik etmek ve sektörler arasında sürdürülebilir uygulamaları desteklemek için çok önemlidir (Martin vd., 2022).

Nikel ekstraksiyonu ile ilişkili karbon emisyonlarının azaltılması, sektör iklim değişikliğini ele almaya çalışırken hayati bir hedeftir. Gelecekteki yenilikler, fosil yakıtlara bağımlılığı en aza indirmek için

hidrometalurjik süreçlere güneş veya rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesini kapsayabilir. Ayrıca, metalürjik faaliyetler sırasında üretilen CO_2 emisyonlarını yakalamak için karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri araştırılabilir ve böylece nikel üretiminin genel karbon ayak izinde bir azalma sağlanabilir (Doussoulin ve Colther, 2022). Yenilenebilir enerjiyi geleneksel proses yöntemleriyle birleştiren hibrit sistemlerin fizibilitesine yönelik araştırmalar, sektördeki karbon nötrlüğü hedeflerini önemli ölçüde ilerletme potansiyeline sahiptir. Nikel endüstrisi, enerji tüketimini optimize ederek ve daha temiz enerji alternatifleri kullanarak sürdürülebilirlik ve düşük karbonlu bir geleceğe yönelik küresel çabalara anlamlı bir şekilde katkıda bulunabilir.

Atık yönetiminde otomasyon ve yapay zekanın (AI) entegrasyonu, geleneksel süreçleri dönüştürerek daha fazla verimlilik ve çevresel etkinin azaltılmasına yol açmaktadır. Örneğin, yapay zeka algoritmaları atık toplama rotalarını optimize edebilir, atık üretim eğilimlerini tahmin edebilir ve görüntü tanıma teknolojileri aracılığıyla ayırma ve geri dönüşüm prosedürlerini geliştirebilir (Gunaseelan vd., 2023). Atık yönetimi operasyonları, rutin görevleri otomatikleştirerek ve sensör teknolojilerini dahil ederek doğruluğu artırabilir ve insan hatasını azaltabilir. Ayrıca, makine öğrenimi modellerinin kullanılması, şirketlerin atık yönetimi ihtiyaçlarını gerçek zamanlı olarak daha iyi anlamasına ve bunlara yanıt vermesine olanak tanıyan tahmine dayalı analitik sağlayabilir. Veri odaklı karar verme sürecine doğru yaşanan bu değişim, atık yönetimine daha proaktif bir yaklaşım getirilmesini sağlayarak çevresel bozulmayı en aza indirirken operasyonların iyileştirilmesini kolaylaştırmaktadır (Setiawan vd., 2024; Eshkiti vd., 2023).

Nikel hidrometalurjisinde atık yönetiminin geleceği, yeşil kimyadaki ilerlemelerin benimsenmesinde, döngüsel ekonomi ilkelerinin

uygulanmasında, karbon nötrlüğünün sağlanmasında ve otomasyon ve yapay zeka teknolojilerinden yararlanılmasında yatmaktadır. Sektör bu yeniliklere yöneldikçe, çevresel etkilerin azaltılması, değerli kaynakların geri kazanılması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkıda bulunulması giderek daha mümkün hale gelecektir. Bu dönüştürücü yaklaşımı teşvik ederek, nikel hidrometalurjisi gelecekte sorumlu madencilik uygulamaları için bir model haline gelebilir.

7. SONUÇ

Nikel hidrometalurjisi, özellikle tehlikeli atıkların, sülfür dioksit emisyonlarının ve partikül maddelerin yönetimi ile ilgili önemli çevresel zorluklarla karşı karşıyadır. Nikel ekstraksiyonu ile ilgili süreçler toksik atıkların ve atık suların oluşmasına yol açarak toprak, su ve hava kalitesi için risk oluşturabilmektedir. Bu etkileri azaltmak için etkili atık yönetimi stratejileri gereklidir ve metal geri kazanımını artırırken zararlı kimyasallara olan ihtiyacı azaltan baca gazı kükürt giderme ve sürdürülebilir proses yöntemleri gibi gelişmiş teknolojik çözümleri içermektedir.

Döngüsel ekonomi yaklaşımlarının uygulanması, elektronik cihazlardan, pillerden ve madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan atıkların ele alınmasında hayati önem taşımakta ve nikel içeren malzemelerin geri dönüştürülmesine ve yeniden kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu girişimler, kaynak kullanımını optimize ederken ve sürdürülebilirliği teşvik ederken çevresel zararı önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Küresel ölçekteki elektrifikasyon eğilimleri ve yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik baskılar nedeniyle nikele olan talep artmaya devam ettikçe, yenilikçi atık yönetimi uygulamalarının önemi de giderek daha belirgin hale gelmektedir. Nikelin sürdürülebilir bir şekilde çıkarılmasını

sağlamak için daha çevreci teknolojilerin, daha verimli geri dönüşüm süreçlerinin ve etkili atık minimizasyon stratejilerinin geliştirilmesine ve benimsenmesine odaklanmak çok önemlidir. Yeşil kimya ve biyoteknolojilerdeki gelecek yenilikler, geleneksel uygulamaları dönüştürmek ve nikel üretiminin çevresel etkisini azaltmak için umut vaat etmektedir.

Nikel endüstrisi, çevre sağlığı ve kaynakların korunmasına öncelik veren sürdürülebilir uygulamaları benimsemeyi taahhüt etmelidir. Bu, yalnızca gelişmiş atık yönetimi teknolojilerine yatırım yapmayı değil, aynı zamanda operasyonlar genelinde sorumlu atık işleme ve kaynak geri kazanım uygulamalarını zorunlu kılan daha katı düzenlemeleri teşvik etmeyi de kapsamaktadır. Hükümetler, endüstri liderleri ve yerel topluluklar dahil olmak üzere paydaşlar, en iyi uygulamaları paylaşmak ve daha sürdürülebilir bir nikel madenciliği sektörüne geçişi kolaylaştıracak tutarlı çerçeveler oluşturmak için küresel olarak işbirliği yapmalıdır. Birlikte çalışarak, atık yönetimi ile ilgili acil zorlukları ele almak ve sorumlu nikel üretimi yoluyla daha yeşil bir geleceğe katkıda bulunmak mümkündür.

KAYNAKLAR

Ali, M., Mewafy, F., Qian, W., Faruwa, A., Shebl, A., Dabaa, S., & Saleem, H., 2024. Numerical simulation of geophysical models to detect mining tailings' leachates within tailing storage facilities. Water, 16(5), 753. https://doi.org/10.3390/w16050753

Altınkaya, P., Liipo, J., Kolehmainen, E., Haapalainen, M., Leikola, M., & Lundström, M., 2018. Leaching of trace amounts of metals from flotation tailings in cupric chloride solutions. Mining Metallurgy & Exploration, 36(2), 335-342. https://doi.org/10.1007/s42461-018-0015-9

Araujo, F., Llano, I., Fantucci, H., Nunes, E., & Santos, R., 2022. Recycling strategies of mine tailing, with environmental, safety, technical and materials considerations. https://doi.org/10.20944/preprints202207.0010.v1

Araya, N., Quiñonez, O. M., Cisternas, L. A., & Krasławski, A., 2021. Sustainable development goals in mine tailings management: targets and indicators. International Conference on Raw Materials and Circular Economy, 82. https://doi.org/10.3390/materproc2021005082

Arslan, F., Güven, Z., Yenial, Ü., Gönül, B., & Arslan, C., 2023. Solvent extraction of nickel from iron and cobalt containing sulfate solutions. Material Science & Engineering International Journal, 7(1), 1-6. https://doi.org/10.15406/mseij.2023.07.00195

Atia, T., Deferm, C., Machiels, L., Khoshkhoo, M., Riaño, S., & Binnemans, K., 2023. Solvent extraction process for refining cobalt and nickel from a "bulk hydroxide precipitate" obtained by bioleaching of sulfidic mine tailings. Industrial & Engineering Chemistry Research, 62(43), 17947-17958. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02612

Ayala-Parra, P., Sierra-Álvarez, R., & Field, J., 2016. Treatment of acid rock drainage using a sulfate-reducing bioreactor with zero-valent iron. Journal of Hazardous Materials, 308, 97-105. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.029

Badu-Yeboah, K., Clifford, A., & Kwasi, K., 2018. Stakeholders perceptions on key drivers for and barriers to household e-waste management in Accra, Ghana. African Journal of Environmental Science and Technology, 12(11), 429-438. https://doi.org/10.5897/ajest2018.2409

Barsi, D. ve Wilson, G. W., 2023. General properties of commingled materials for mix designs. Minerals, 14(1), 30. https://doi.org/10.3390/min14010030

Bernstad, A., Jansen, J., & Aspegren, H., 2011. Local strategies for efficient management of solid household waste – the full-scale augustenborg experiment. Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy, 30(2), 200-212. https://doi.org/10.1177/0734242x11410113

Binnemans, K. ve Jones, P., 2022. The twelve principles of circular hydrometallurgy. Journal of Sustainable Metallurgy, 9(1), 1-25. https://doi.org/10.1007/s40831-022-00636-3

Boshoff, J., McNab, L., & Mensah, N. A., 2023. A case study on the commingling of tailings and waste rock at a brownfields open cast mine in Ghana. Paste 2023: 25th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2355_55

Botelho, A., Correa, M., Espinosa, D., Dreisinger, D., & Tenório, J., 2018. Recovery of cu(ii) from nickel laterite leach using prereduction and chelating resin extraction: batch and continuous experiments. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 97(4), 924-929. https://doi.org/10.1002/cjce.23306

Cao, H., Aiai, W., Lianku, X., Xi-Zhi, Z., Wang, Y., & Gao, Q., 2024. Research progress of solid waste resource utilization backfill mining for jinchuan nickel mine, China. Frontiers in Materials, 11. https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1442564

Cao, Z., Zhong, H., Liu, G., & Wang, S., 2012. Recovery of nickel and iron from lixivium of nickel laterite ores. Advanced Materials Research, 524-527, 1037-1040. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.524-527.1037

Carneiro, A. ve Fourie, A., 2019. Life cycle assessment of tailings management options: a conceptual case study in western Australia. Proceedings of the International Conference on Mine Closure. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1915_93_carneiro

Danilina, M., Kravetz, E., Brilon, A., Astafieva, I., Blekus, V., Shirokova, L., & Doholyan, S., 2020. Innovative solutions for recycling and waste disposal and labour market in Russia. E3s Web of Conferences, 217, 04011. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021704011

Doussoulin, J. ve Colther, C., 2022. Evaluating the efficiency of municipal solid waste collection services in developing countries: the case of Chile. Sustainability, 14(23), 15887. https://doi.org/10.3390/su142315887

El-Shaarawy, H., Hussein, H., Abdel-Fatah, M., Hussien, N., & Hawash, S., 2021. Electrolytic generation of nickel hydroxide and nickel oxide nanoparticles for advanced applications. Egyptian Journal of Chemistry, 0(0), 0-0. https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.84356.4129

Escamilla-Rodríguez, A., Carlos-Hernández, S., & Díaz-Jiménez, L., 2021. Evidence of resistance of heavy metals from bacteria isolated from natural waters of a mining area in Mexico. Water, 13(19), 2766. https://doi.org/10.3390/w13192766

Eshkiti, A., Sabouhi, F., & Bozorgi-Amiri, A., 2023. A data-driven optimization model to response to covid-19 pandemic: a case study. Annals of Operations Research, 328(1), 337-386. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05320-7

Fazlı, M., Soleimani, N., Mehrasbi, M., Darabian, S., Mohammadi, J., & Ramazani, A., 2015. Highly cadmium tolerant fungi: their tolerance and removal potential. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 13(1). https://doi.org/10.1186/s40201-015-0176-0

Golroudbary, S. R., Krasławski, A., Wilson, B. P., & Lundström, M. ,2023. Assessment of environmental sustainability of nickel required for mobility transition. Frontiers in Chemical Engineering, 4. https://doi.org/10.3389/fceng.2022.978842

Guimarães, A., Silva, P., & Mansur, M., 2014. Purification of nickel from multicomponent aqueous sulfuric solutions by synergistic solvent extraction using cyanex 272 and versatic 10. Hydrometallurgy, 150, 173-177. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.005

Gunarathne, V., Rajapaksha, A., Vithanage, M., Alessi, D., Selvasembian, R., Naushad, M., & Ok, Y., 2020. Hydrometallurgical processes for heavy metals recovery from industrial sludges. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52(6), 1022-1062. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1847949

Gunaseelan, J., Sundaram, S., & Mariyappan, B., 2023. A design and implementation using an innovative deep-learning algorithm for garbage segregation. Sensors, 23(18), 7963. https://doi.org/10.3390/s23187963

Han, B., Bøckman, O., Wilson, B., Lundström, M., & Louhi-Kultanen, M., 2019. Purification of nickel sulfate by batch cooling crystallization. Chemical Engineering & Technology, 42(7), 1475-1480. https://doi.org/10.1002/ceat.201800695

Han, L., Fan, Y., Chen, R., Zhai, Y., Liu, Z., Zhao, Y., & Xia, L., 2023. Probabilistic risk assessment of heavy metals in mining soils based on fractions: a case study in southern Shaanxi, China. Toxics, 11(12), 997. https://doi.org/10.3390/toxics11120997

Harpprecht, C., Oers, L. V., Northey, S., Yang, Y,. & Steubing, B., 2021. Environmental impacts of key metals' supply and low-carbon technologies are likely to decrease in the future. Journal of Industrial Ecology, 25(6), 1543-1559. https://doi.org/10.1111/jiec.13181

Huyben, D., Boqvist, S., Passoth, V., Renström, L., Bengtsson, U., Andréoletti, O., & Vågsholm, I., 2018. Screening of intact yeasts and cell extracts to reduce scrapie prions during biotransformation of food waste. Acta Veterinaria Scandinavica, 60(1). https://doi.org/10.1186/s13028-018-0363-y

Ismaeel, W. ve Lotfy, R., 2022. An integrated building information modelling-based environmental impact assessment framework. Clean Technologies and Environmental Policy, 25(4), 1291-1307. https://doi.org/10.1007/s10098-022-02443-6

Karthikeyan, L., Suresh, V., Krishnan, V., Tudor, T., & Varshini, V., 2018. The management of hazardous solid waste in India: an overview. Environments, 5(9), 103. https://doi.org/10.3390/environments5090103

Kasikov, A., Щелокова, E., Timoshchik, O., & Sokolov, A., 2022. Utilization of converter slag from nickel production by hydrometallurgical method. Metals, 12(11), 1934. https://doi.org/10.3390/met12111934

Kenzhegali, M. S. ve Nuruly, Y., 2023. Complex ni and co extraction from leached nontronitized serpentinite via hydrometallurgical process at atmospheric pressure. Materials of International Practical Internet Conference “Challenges of Science”, 62-71. https://doi.org/10.31643/2023.07

Korkmaz, K., Junestedt, C., Elginöz, N., Almemark, M., Svärd, M., Rasmuson, Å., & Forsberg, K., 2024. System analysis with life cycle assessment for nimh battery recycling. Philosophical

Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences, 382(2284). https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0243

Kumar J, S. ve Kumari, R. M., 2024. Evaluation of potential level in the municipal solid waste of dumping yard of mandya by using leachate pollution index. jaz. https://doi.org/10.53555/jaz.v45i2.3951

Kurşunoğlu, S. ve Kaya, M., 2019. Hydrometallurgical processing of nickel laterites- a brief overview on the use of solvent extraction and nickel/cobalt project for the separation and purification of nickel and cobalt. Bilimsel Madencilik Dergisi, 58(2), 131-144. https://doi.org/10.30797/madencilik.580147

Kusuma, S., Permadi, D., & Dirgawati, M., 2023. Development of emission reduction measures of trace gas emissions from coal-fired power plants in Indonesia. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, 1239(1), 012013. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1239/1/012013

Lee, J., Rao, S., Kumar, B., Kang, D., & Reddy, B., 2010. Nickel recovery from spent raneynickel catalyst through dilute sulfuric acid leaching and soda ash precipitation. Journal of Hazardous Materials, 176(1-3), 1122-1125. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.137

Lee, M., Nam, S., & July, R., 2011. Solvent extraction of ni(ii) from strong hydrochloric acid solution by alamine336. Bulletin of the Korean Chemical Society, 32(1), 113-116. https://doi.org/10.5012/bkcs.2011.32.1.113

Liu, H. ve Chen, W., 2011. Simulation study on recycling resource of metallic tailings. Advanced Materials Research, 268-270, 178-183. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.268-270.178

Liu, J., Liu, B., Zhou, P., Wu, D., & Wu, C., 2023. An overview of flashing phenomena in pressure hydrometallurgy. Processes, 11(8), 2322. https://doi.org/10.3390/pr11082322

Liu, W., Zhang, X., Zhou, Z., & Lu, J., 2024. The behavior and removal of condensable particulate matter in flue gas in a multi-field force: a modeling and experimental study. Atmosphere, 15(3), 250. https://doi.org/10.3390/atmos15030250

Lv, W., Wei, Q., Ji, Y., Liu, B., Ma, H., Huang, Y., & Fu, P., 2023. Enhancement of the classification and recovery process of fine mineral particles via a newly developed volute feed hydrocyclone. Environmental Science and Pollution Research, 30(36), 86047-86059. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28516-7

Macusi, E., Morales, I., Abreo, N., & Jimenez, L., 2019. Perception of solid waste management and rate of accumulation in schools in Mati city, Mindanao island, Philippines. Journal of Marine and Island Cultures, 8(2). https://doi.org/10.21463/jmic.2019.08.2.09

Martin, N., Nicholaides, K., & Southard, P., 2022. Enhanced water resources risk from collocation of disposal wells and legacy oil and gas exploration and production regions in Texas. Jawra Journal of the American Water Resources Association, 58(6), 1433-1453. https://doi.org/10.1111/1752-1688.13048

Mitrašinović, A. ve Wolf, A., 2015. Separation and recovery of valuable metals from nickel slags disposed in landfills. Separation Science and Technology, 150615133933004. https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1056360

Mystrioti, C., Papassiopi, N., Xenidis, A., & Komnitsas, K., 2018. Counter-current leaching of low-grade laterites with hydrochloric acid and proposed purification options of pregnant solution. Minerals, 8(12), 599. https://doi.org/10.3390/min8120599

Nancharaiah, Y., Mohan, S., & Lens, P., 2015. Metals removal and recovery in bioelectrochemical systems: a review. Bioresource Technology, 195, 102-114. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.058

Nazemi, M. ve Rashchi, F., 2011. Recovery of nickel from spent nio/al2o3 catalyst through sulfuric acid leaching, precipitation and solvent extraction. Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy, 30(5), 492-497. https://doi.org/10.1177/0734242x11417984

Opara, C. B., Kutschke, S., & Pollmann, K., 2022. Fractionation of metal(loid)s in three European mine wastes by sequential extraction. Separations, 9(3), 67. https://doi.org/10.3390/separations9030067

Özgün, M., Terlemez, A., Açma, M., Eker, Y., & Batıbay, A., 2020. Endodontide kullanılan nikel-titanyum atık eğelerin sülfürik asit liçi işlemleri ile geri kazanımı. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi. https://doi.org/10.31202/ecjse.741512

Park, J., Jung, Y., Kusumah, P., Lee, J., Kwon, K., & Lee, C., 2014. Application of ionic liquids in hydrometallurgy. International Journal of Molecular Sciences, 15(9), 15320-15343. https://doi.org/10.3390/ijms150915320

Peng, F., Mu, D., Li, R., Liu, Y., Ji, Y., Dai, C., & Ding, F., 2019. Impurity removal with highly selective and efficient methods and the recycling of transition metals from spent lithium-ion batteries. RSC Advances, 9(38), 21922-21930. https://doi.org/10.1039/c9ra02331c

Piccini, M., Raikova, S., Allen, M., & Chuck, C., 2019. A synergistic use of microalgae and macroalgae for heavy metal bioremediation and bioenergy production through hydrothermal liquefaction. Sustainable Energy & Fuels, 3(1), 292-301. https://doi.org/10.1039/c8se00408k

Rauf, I., Heryanto, H., Tahir, D., Gaus, A., Rinovian, A., Veeravelan, K., & Akouibaa, A., 2024. Uncovering the potential of industrial waste: turning discarded resources into sustainable

advanced materials. Physica Scripta, 99(6), 065998. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad4ad1

Raya, I., Taba, P., Burhanuddinnur, M., Gaffar, M., Dahani, W., Palit, C., & Nur, A., 2024. The advances in the recovery process for precious metals from nickel slag, a review. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, 1339(1), 012030. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1339/1/012030

Renforth, P., 2019. The negative emission potential of alkaline materials. Nature Communications, 10(1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09475-5

Rizky, M. A., Sukamto, U. ,& Setiawan, A., 2023. Literature review: comparison of caron process and rkef on the processing of nickel laterite ore for battery. Journal Mineral, Energi, Dan Lingkungan, 6(2), 47. https://doi.org/10.31315/jmel.v6i2.6900

Rocchetti, L., Vegliò, F., Kopacek, P., & Beolchini, F., 2013. Environmental impact assessment of hydrometallurgical processes for metal recovery from weee residues using a portable prototype plant. Environmental Science & Technology, 130125102742005. https://doi.org/10.1021/es302192t

Rondinel-Oviedo, D., 2021. Construction and demolition waste management in developing countries: a diagnosis from 265 construction sites in the lima metropolitan area. International Journal of Construction Management, 23(2), 371-382. https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1874677

Rosana, K. ve Handoko, J., 2021. Effect of hurdle rate and confidence on commitment escalation. Journal of Accounting Entrepreneurship and Financial Technology (Jaef), 3(1), 1-14. https://doi.org/10.37715/jaef.v3i1.1828

Roy, S., Moustafa, H. M., Vaidya, K., Harvey, J., & Fradette, L., 2024. On process-based granular reconstruction of life cycle inventories: sustainably coherent planning of primary battery-grade nickel. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5639090/v1

Saavedra, R., Muñoz, R., Taboada, M., & Bolado, S., 2019. Influence of organic matter and co2 supply on bioremediation of heavy metals by chlorella vulgaris and scenedesmus almeriensis in a multimetallic matrix. Ecotoxicology and Environmental Safety, 182, 109393. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109393

Sani, S. ve Haris, A., 2022. A microbial technology approach using bioleaching for low grade metals extraction - a review. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, 1103(1), 012019. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1103/1/012019

Setiawan, S., Purnama, D., Witdiawati, W., & Sunarya, U., 2024. Socialization of waste sorting and management action in rw 04 jayawaras village, tarogong kidul district, garut regency.

Jurnal Kesehatan Stikes Muhammadiyah Ciamis, 11(1), 13-17. https://doi.org/10.52221/jurkes.v11i1.532

Shammi, T. ve Ahmed, S., 2016. Heavy metal tolerance and antibiotic resistance of bacillus spp. isolated from two major rivers in Bangladesh. Bangladesh Journal of Microbiology, 30(1-2), 17-22. https://doi.org/10.3329/bjm.v30i1-2.28448

Shen, Y., Chen, M., Zhang, Y., Xu, X., Li, G., & Du, X., 2017. Influence of temperature control system on the crystallization behavior of magnetite phases in nickel slags. Steel Research International, 89(3). https://doi.org/10.1002/srin.201700300

Shen, Y., Huang, Z., Zhang, Y., Zhong, J., Zhang, W., Yang, Y., & Du, X., 2018. Transfer behavior of fe element in nickel slag during molten oxidation and magnetic separation processes. Materials Transactions, 59(10), 1659-1664. https://doi.org/10.2320/matertrans.m2018002

Shu, D. ve Gong, X., 2018. Life cycle assessment of nickel production in China. Materials Science Forum, 913, 1004-1010. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.913.1004

Simpson, S. L. ve Spadaro, D. A., 2016. Bioavailability and chronic toxicity of metal sulfide minerals to benthic marine invertebrates: implications for deep sea exploration, mining and tailings disposal. Environmental Science &Amp; Technology, 50(7), 4061-4070. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00203

Sravan, J., Μάτσακας, Λ., & Sarkar, O., 2024. Advances in biological wastewater treatment processes: focus on low-carbon energy and resource recovery in biorefinery context. Bioengineering, 11(3), 281. https://doi.org/10.3390/bioengineering11030281

Sun, W., Xiong, L., Liu, R., Zhai, Q., & Li, J., 2021. Recovery of valuable metals from nickel smelting slag based on reduction and sulfurization modification. Minerals, 11(9), 1022. https://doi.org/10.3390/min11091022

Sundhararasu, E., Tuomikoski, S., Runtti, H., Hu, T., Varila, T., Kangas, T., & Lassi, U., 2021. Alkali-activated adsorbents from slags: column adsorption and regeneration study for nickel(ii) removal. Chemengineering, 5(1), 13. https://doi.org/10.3390/chemengineering5010013

Symanzik, C., John, S., & Strunk, M., 2019. Nickel release from metal tools in the German hairdressing trade—a current analysis. Contact Dermatitis, 80(6), 382-385. https://doi.org/10.1111/cod.13251

Vijayaraghavan, K. ve Balasubramanian, R., 2015. Is biosorption suitable for decontamination of metal-bearing wastewaters? a critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions. Journal of Environmental Management, 160, 283-296. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.06.030

Wang, X., Yang, H., Tong, L., Jin, Z., & Zhao, S., 2017. Research on bio-leaching of nickel-bearing tailings in Jilin, China. Solid State Phenomena, 262, 177-180. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.262.177

Wdowczyk, A. ve Szymańska–Pulikowska, A., 2021. Comparison of landfill leachate properties by lpi and phytotoxicity-a case study. Frontiers in Environmental Science, 9. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.693112

Wu, Z., Meng, F., Chen, Z., Zhang, Y., Wang, Q., Deng, H., & Lin, Z., 2024. A new method and mechanism of oxidation/ammonia leaching-phosphoric acid synergistic regulation of nickel smelting slag for graded high-value recovery of iron and nickel. Acs Es&t Engineering, 4(8), 1871-1883. https://doi.org/10.1021/acsestengg.4c00101

Yang, P., Liang, X., Wu, C., Cui, T., & Wang, Y., 2021. Study on adding ammonium hydrogen fluoride to improve manganese leaching efficiency of ammonia leaching low-grade rhodochrosite. Metals, 11(9), 1496. https://doi.org/10.3390/met11091496

Yang, Y., Zheng, X., Cao, H., Zhao, C., Lin, X., Ning, P., & Sun, Z., 2017. A closed-loop process for selective metal recovery from spent lithium iron phosphate batteries through mechanochemical activation. Acs Sustainable Chemistry & Engineering, 5(11), 9972-9980. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01914

Yao, S. ve Drieß, M., 2011. Lessons from isolable nickel(i) precursor complexes for small molecule activation. Accounts of Chemical Research, 45(2), 276-287. https://doi.org/10.1021/ar200156r

Yao, Y., Farac, N., & Azimi, G., 2018. Recycling of rare earth element from nickel metal hydride battery utilizing supercritical fluid extraction. Ecs Transactions, 85(13), 405-415. https://doi.org/10.1149/08513.0405ecst

Yu, J., Qin, Y., Gao, P., Sun, Y., & Ma, S., 2021. The growth characteristics and kinetics of metallic iron in coal-based reduction of jinchuan ferronickel slag. Minerals, 11(8), 876. https://doi.org/10.3390/min11080876

Yuda, A., Avista, D., Astuti, W., & Petrus, H., 2024. Separation of nickel and cobalt from nitrate leaching solutions of laterite ore by solvent extraction using trihexyltetradecylphosphonium bis (2,4,4-trimethyl pentyl) phosphinate. E3s Web of Conferences, 503, 06007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450306007

Yuliusman, Y., Silvia, S., Nurqomariah, A., & Fajaryanto, R., 2018. Recovery of cobalt and nickel from spent lithium ion batteries with citric acid using leaching process: kinetics study. E3s Web of Conferences, 67, 03008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186703008

Zeng, X., Li, J., & Shen, B., 2015. Novel approach to recover cobalt and lithium from spent lithium-ion battery using oxalic acid. Journal of Hazardous Materials, 295, 112-118. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.064

Zhang, G., Wang, N., Chen, M., & Cheng, Y., 2020. Recycling nickel slag by aluminum dross: iron-extraction and secondary slag stabilization. Isij International, 60(3), 602-609. https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2019-173

Zhang, J., Zhou, Y., Chen, S., Meng, J., & Wang, J., 2023. Study on the mechanical properties and mechanism of a nickel-iron slag cement-based composite under the action of sodium sulfate. Materials, 16(21), 7041. https://doi.org/10.3390/ma16217041

Zhang, X., Laubie, B., Houzelot, V., Plasari, E., Echevarria, G., & Simonnot, M., 2016. Increasing purity of ammonium nickel sulfate hexahydrate and production sustainability in a nickel phytomining process. Chemical Engineering Research and Design, 106, 26-32. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.12.009

Zhaowu, Z., Zhang, J., Aifei, Y., Hui, S., Wang, L., & Tao, Q., 2019. Magnesium removal from concentrated nickel solution by solvent extraction using cyanex 272. International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 4(2), 36. https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20190402.11

Zhong, Q., Shen, H., Yun, X., Chen, Y., Ren, Y., Xu, H., & Tao, S., 2020. Global sulfur dioxide emissions and the driving forces. Environmental Science & Technology, 54(11), 6508-6517. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07696

Zhu, Z., Zhang, J., Yi, A., Shen, H., Wang, L., & Qi, T., 2019. Magnesium removal from concentrated nickel solution by solvent extraction using cyanex 272. International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 4(2), 36. https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20190402.11

BATI AFRİKA DEMİR CEVHERİ ATIKLARININ ZENGİNLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK ANAHTAR TESLİM TESİS TASARIMI VE UYGULAMASI

TURNKEY PLANT DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR THE BENEFICIATION OF WEST AFRICAN IRON ORE TAILINGS

Temel Furkan Akyol, Begli Nazarov
BAS Endüstriyel Çözümler ve Mühendislik Uygulama San. Tic. Ltd., Ankara

Burak Köse, Ehsan Samet
ARGETEST Cevher Zenginleştirme ve Analiz Hizmetleri, Ankara

ÖZ: Demir cevheri madenciliği faaliyetleri sonucunda oluşan atıklar, içerdiği düşük tenörlü fakat zenginleştirilebilir manyetit mineralleri nedeniyle ekonomik bir kaynak potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmada, Batı Afrika'da yaklaşık 10 yıllık birikime sahip ve %25–29 Fe içeriği gösteren demir cevheri atıklarının değerlendirilmesine yönelik anahtar teslim bir tesis proses yaklaşımı sunulmaktadır. 360 ton/saat kapasiteli tesis, kuru ve yaş manyetik ayırma ünitelerinden oluşmakta olup, proses sonunda %64 Fe içeriğinde yüksek saflıkta demir konsantresi elde edilmektedir. Proses akışı; ön sınıflandırma, homojenizasyon, çok kademeli manyetik ayırma, öğütme ve filtrasyon adımlarını içeren kapalı devre bir sistem olarak tasarlanmıştır. Su tüketiminin minimize edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması proses tasarımında temel önceliklerden biri olmuştur. Çalışma, düşük tenörlü atıkların değerlendirilmesinde yüksek verimlilik sağlayan manyetik ayırma teknolojilerinin uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve sürdürülebilir madencilik açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir

Anahtar Kelimeler: Demir Cevheri Atıkları, Manyetik Ayırma, Manyetit Zenginleştirme, Anahtar Teslim Tesis, Sürdürülebilir Madencilik

ABSTRACT: *Waste generated from iron ore mining operations often contains low-grade but upgradeable magnetite minerals, representing a significant economic resource potential. This study presents a turnkey process approach for the beneficiation of iron ore tailings in Western Africa, accumulated over approximately 10 years and containing 25–29% Fe. The 360 tph capacity plant consists of dry and wet magnetic separation units and yields a high-purity iron concentrate with 64% Fe content at the end of the process. The process flow is designed as a closed circuit system,*

incorporating pre-classification, homogenization, multi-stage magnetic separation, grinding, and filtration. Minimization of water consumption and reduction of environmental impact were among the core priorities in process design. The study demonstrates the feasibility and efficiency of magnetic separation technologies in the beneficiation of low-grade tailings and provides a relevant case for sustainable mining practices.

Keywords: *Iron Ore Tailings, Magnetic Separation, Magnetite Beneficiation, Turnkey Plant, Sustainable Mining*

1. GİRİŞ

BAS olarak, Batı Afrika'daki demir madeni atıklarından demir kazanımına yönelik ön, genel ve detay mühendislik çalışmalarını üstlendiğimiz 360 tph kapasiteye sahip projenin tesis devreye alma süreci başarıyla tamamlanmış ve müşterimize teslim edilmiştir. Yaklaşık 10 yıldır biriken bu demir madeni atıkları, %25-29 Fe içeriğine sahip değerli manyetit minerali barındırmakta olup, tesisde gerçekleştirilecek prosesler sonucunda %64 Fe oranında yüksek saflıkta demir konsantresi elde edilmesi taahhüt edilmiştir. Mevcut ekonomik büyüme hızıyla birlikte, zengin demir cevheri yataklarının çoğu tükenmiştir. Bu nedenle, daha düşük tenörlü, karmaşık demir cevheri yataklarını ve demir cevheri atıklarının verimli bir şekilde işleyip değerlendirebilecek uygun teknolojilerin bulunması zaruridir. Çeliğin nispeten düşük fiyatı nedeniyle, düşük kaliteli demir cevherlerini işlemek için kullanılan zenginleştirme yöntemlerinin hem ekonomik hem de etkili olması gerekmektedir.

Günümüzde, çeşitli demir kaynaklarından demir minerallerini zenginleştirmek ve geri kazanmak için yüksek proses kapasitesi, düşük işletme maliyeti, geniş uygulanabilirlik ve çevre dostu olması gibi avantajlar sunan manyetik separasyon yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle, manyetiti ve zayıf manyetik demir minerallerini geri kazanmak

için düşük yoğunluklu manyetik separasyon (LIMS) tercih edilmektedir. Demir cevheri atıklarının özelliklerine dayanarak, LIMS prosesi sırasında mikronize manyetit separasyonunun pulp katı oranı, pulp akışı ve LIMS separatör separasyon alan tasarımı gibi hidrodinamik parametrelere son derece duyarlı olduğu ve işletme koşulları ile yakından ilişkili olduğu gerçeği unutulmamalıdır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Müşteri firma tarafından, laboratuvarımıza 6 farklı fraksiyonda numune gönderilmiştir. Bu numunelerde farklı zenginleştirme metotları kombinasyonu ile satılabilir demir konsantresi elde edilmesi amaçlanmıştır. Laboratuvarımıza, A (+2mm), B (+1mm), C (+500µm), D (+212µm), E (+75µm) ve F (-75µm) olarak iletilen boyutlandırılmış numunelere (Şekil 1) düşük alan şiddetli manyetik ayırma, yüksek alan şiddetli manyetik ayırma ve graviteyle zenginleştirme metotlarından biri olan sallantılı masa ile zenginleştirme yöntemleri uygulanmıştır. Tambur tipi manyetik ayırma cihazı, filtre tipi manyetik ayırma cihazı ve sallantılı masa kullanılmıştır. Laboratuvarımıza iletilen numunelerin fraksiyonel dağılımı Çizelge 1'de sunulmuştur.

Şekil 1. Deney numuneleri

Çizelge 1. Deney numuneleri fraksiyonel dağılımı

		Fe		SiO_2		Al_2O_3		MgO		CaO		P_2O_5		S	
Elek Açıklığı (µm)	**Ağırlık (%)**	**Tenör (%)**	**Verim (%)**	**Tenör (%)**	**Verim (%)**	**Tenör (%)**	**Verim (%)**	**Tenör (%)**	**Verim (%)**	**Tenör (%)**	**Verim (%)**	**Tenör (%)**	**Verim (%)**	**Tenör (%)**	**Verim (%)**
(+2000)	0.79	2.21	0.07	16.00	0.02	4.40	0.02	15.17	0.09	23.71	4.17	0.02	0.59	0.04	0.57
(-2000 +1000)	6.34	35.67	9.42	33.10	6.61	5.61	8.29	5.43	11.16	0.65	13.95	0.17	17.18	0.11	44.81
(-1000 +500)	22.61	26.34	24.81	47.50	25.01	5.36	29.93	4.70	34.90	0.54	35.95	0.14	36.63	0.05	44.94
(-500 +212)	38.36	15.49	24.75	65.80	34.56	4.30	33.25	3.65	30.12	0.41	23.60	0.11	18.20	0.01	5.92
(-212 +75)	23.05	22.74	21.84	56.90	26.37	4.09	24.13	3.62	21.68	0.49	20.33	0.17	24.31	0.01	2.96
(-75)	8.86	51.78	19.11	18.30	7.42	2.64	4.37	1.90	2.05	0.51	2.00	0.22	3.09	0.01	0.81
Giriş	**100.00**	**24.00**	**100.00**	**47.12**	**100.00**	**4.47**	**100.00**	**4.03**	**100.00**	**0.52**	**100.00**	**0.14**	**100.00**	**0.04**	**100.00**

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kimyasal Analiz

Laboratuvarımıza gönderilen A(+2mm), B(+1mm), C(+500µm), D(+212µm), E(+75µm) ve F(-75µm) kodlu 6 adet numuneden alınan giriş analizleri sonucu, en yüksek demir tenörüne sahip F(-75µm) kodlu numunede %51.78 Fe¸ %18.30 SiO_2 ve %1.89 MgO tenörler alınırken en az demir tenörüne sahip olan D(+212µm) kodlu numunede %15.49 Fe¸ %65.80 SiO_2 ve %3.65 MgO tenörler alınmıştır. Diğer deneysel çalışma yapılmış B(+1mm) kodlu numuneden %35.67 Fe¸ %33.10 SiO_2 ve %5.42 MgO, C(+500µm) kodlu numuneden %26.34 Fe¸ %47.50 SiO_2 ve %4.70 MgO, E(+75µm) kodlu numuneden %22.74 Fe¸ %56.90 SiO_2 ve %3.62 MgO tenörler alınırken üzerinde deneysel olarak çalışılmamış olan A(+2mm) kodlu numuneden %36.93 Fe¸ %27.44 SiO_2 ve %5.34 MgO olduğu saptanmıştır.

3.2. Deneysel Çalışmalar

3.2.1. *Numune B (+1mm)*

Numunede bulunan demir minerallerinin konsantre olarak ayırabilmek için düşük alan şiddetli manyetik ayırma (2000 gauss), filtre tipi yüksek alan şiddetli manyetik ayırma (20000-8000 gauss arası) ve sallantılı masa deneyleri ile kombine çalışma sağlanmıştır.

2000 gauss alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1 sonucunda; manyetik konsantre tenörleri %41.56 Fe (%79.42 randımanla), %29.50 SiO_2 (%56.74 randımanla), %5.13 MgO (%62.35 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-1'in konsantre ve ara-ürün-1 ürünlerinin Yaş

Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 - 150µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin giriş tenörleri %40.16 Fe, %41.48 SiO_2, %8.51 MgO olmuştur. Deney sonucunda Fe tenörü %63.32 (%71.93 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %21.93 (%24.12 randımanla) ve MgO tenörü minimal bir değişimle %8.38 (%44.93 randımanla) seviyelerine düşmüştür.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non manyetik ürünüyle paralel Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-7 ve Sallantılı Masa Deneyi-2 yapılmıştır. 12000 gauss manyetik alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma deneyi-7 konsantre tenörleri %26.26 Fe (%70.53 randımanla), %41.67 SiO_2 (%46.21 randımanla), %8.12 MgO (%67.47 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-2'in konsantre ve ara-ürün-1 ürünlerinin Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 - 75µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'nin giriş tenörleri %52.00 Fe, %18.01 SiO_2, %3.14 MgO olmuştur. Deney sonucunda (Nihai Manyetit Konsantresi) Fe tenörü %65.38 (%78.78 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %4.28 (%14.89 randımanla) ve MgO tenörü %1.09 (%21.81 randımanla) seviyelerine düşmüştür

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'ün non-manyetik ürünleriyle devam eden 3 kademe temizlemeli 12000 gauss, 10000 gauss ve 8000 gauss manyetik ayırma deneyi sonucunda elde edilen konsantre (Nihai Hematit Konsantresi) tenörleri kümülatif olarak incelendiğinde %37.16 Fe (%50.63 randımanla), %36.64 SiO_2 (%34.32 randımanla), %4.17 MgO (%28.99 randımanla) olmuştur.

Elde edilen konsantre ürünlere kümülatif olarak baktığımızda Nihai Manyetit Konsantre %65.38 Fe (%61.53 randımanla), %4.28 SiO_2 (%3.85 randımanla), %1.09 MgO (%6.98 randımanla) olmuştur. Nihai Hematit Konsantre %37.16 Fe (%7.01 randımanla), %36.64 SiO_2 (%6.61 randımanla), %4.17 MgO (%5.53 randımanla) olmuştur.

Tamamlanan deney setleri sonrasında elde edilen Nihai Manyetit Konsantreden homojen numuneler alınarak Davis Tube deneyi ve fraksiyonel kimyasal analiz saptanması amacıyla 3 fraksiyonda eleme yapılmıştır.

Yapılan Davis Tube deneyi sonucunda elde edilen konsantre ürününün tenörleri %69.05 Fe (%96.15 randımanla), %2.67 SiO_2 (%58.07 randımanla), %0.63 MgO (%53.41 randımanla) olmuştur.

Yapılan fraksiyonal kimyasal analiz çalışmasında da fraksiyonlar arasındaki tenör farklılıklarının çok az (±%1) miktarda olduğu gözlemlenmiştir.

3.2.2. *Numune C (+500µm)*

Numunede bulunan demir minerallerinin konsantre olarak ayırabilmek için düşük alan şiddetli manyetik ayırma (2000 gauss), filtre tipi yüksek alan şiddetli manyetik ayırma (20000-8000 gauss arası) ve sallantılı masa deneyleri ile kombine çalışma sağlanmıştır.

2000 gauss alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1 sonucunda; manyetik konsantre tenörleri %34.08 Fe (%69.67 randımanla), %40.40. SiO_2 (%43.14 randımanla), %5.98 MgO (%59.92 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non manyetik ürünüyle paralel Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-7 ve Sallantılı Masa Deneyi-1 yapılmıştır. 20000 gauss manyetik alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma deneyi-7

konsantre tenörleri %17.92 Fe (%82.45 randımanla), %61.39 SiO_2 (%75.27 randımanla), %5.60 MgO (%79.86 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-1'in konsantre ve ara-ürün-1 ürünlerinin Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 - 150µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin giriş tenörleri %33.20 Fe, %50.67 SiO_2, %7.36 MgO olmuştur. Deney sonucunda Fe tenörü %61.85 (%66.78 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %25.06 (%17.72 randımanla) ve MgO tenörü minimal bir değişimle %7.42 (%36.13 randımanla) seviyelerine düşmüştür.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non manyetik ürünüyle paralel Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-8 ve Sallantılı Masa Deneyi-2 yapılmıştır. 12000 gauss manyetik alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma deneyi-8 konsantre tenörleri %27.70 Fe (%69.14 randımanla), %39.46 SiO_2 (%29.49 randımanla), %8.34 MgO (%55.44 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-2'in konsantre ve ara-ürün-1 ürünlerinin Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 - 75µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'nin giriş tenörleri %46.78 Fe, %25.79 SiO_2, %2.98 MgO olmuştur. Deney sonucunda (Nihai Manyetit Konsantresi) Fe tenörü %64.81 (%77.20 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %5.00 (%10.80 randımanla) ve MgO tenörü %1.12 (%20.92 randımanla) seviyelerine düşmüştür.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'ün non-manyetik ürünleriyle devam eden 3 kademe temizlemeli 12000 gauss, 10000 gauss ve 8000 gauss manyetik ayırma deneyi sonucunda elde edilen konsantre (Nihai Hematit

Konsantresi) tenörleri kümülatif olarak incelendiğinde %32.30 Fe (%36.05 randımanla), %45.27 SiO_2 (%22.61 randımanla), %3.28 MgO (%19.19 randımanla) olmuştur.

Elde edilen konsantre ürünlere kümülatif olarak baktığımızda Nihai Manyetit Konsantre %61.81 Fe (%51.13 randımanla), %5.00 SiO_2 (%1.98 randımanla), %1.12 MgO (%4.60 randımanla) olmuştur. Nihai Hematit Konsantre %32.30 Fe (%5.00 randımanla), %45.27 SiO_2 (%3.52 randımanla), %3.28 MgO (%2.64 randımanla) olmuştur.

Tamamlanan deney setleri sonrasında elde edilen Nihai Manyetit Konsantreden homojen numuneler alınarak Davis Tube deneyi ve fraksiyonel kimyasal analiz saptanması amacıyla 3 fraksiyonda eleme yapılmıştır.

Yapılan Davis Tube deneyi sonucunda elde edilen konsantre ürününün tenörleri %69.11 Fe (%94.25 randımanla), %2.41 SiO_2 (%43.03 randımanla), %0.45 MgO (%35.65 randımanla) olmuştur.

Yapılan fraksiyonal kimyasal analiz çalışmasında da fraksiyonlar arasındaki tenör farklılıklarının çok az (±%1.5) miktarda olduğu gözlemlenmiştir.

3.2.3. *Numune D (+212µm)*

Numunede bulunan demir minerallerinin konsantre olarak ayırabilmek için düşük alan şiddetli manyetik ayırma (2000 gauss), filtre tipi yüksek alan şiddetli manyetik ayırma (20000-8000 gauss arası) ve sallantılı masa deneyleri ile kombine çalışma sağlanmıştır.

2000 gauss alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1 sonucunda; manyetik konsantre tenörleri %28.90 Fe (%56.68 randımanla), %48.10 SiO_2 (%21.92 randımanla), %4.39 MgO (%46.37 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non manyetik ürünüyle paralel Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-7 ve Sallantılı Masa Deneyi-1 yapılmıştır. 20000 gauss manyetik alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma deneyi-7 konsantre tenörleri %10.55 Fe (%81.68 randımanla), %76.56 SiO_2 (%70.50 randımanla), %3.42 MgO (%81.84 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-1'in konsantre ve ara-ürün ürünlerinin Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 - 150µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin giriş tenörleri %18.40 Fe, %68.99 SiO2, %5.17 MgO olmuştur. Deney sonucunda Fe tenörü %56.20 (%51.38 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %32.20 (%8.16 randımanla) ve MgO tenörü %6.70 (%22.37 randımanla) seviyelerine düşmüştür.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non manyetik ürünüyle paralel Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-8 ve Sallantılı Masa Deneyi-2 yapılmıştır. 12000 gauss manyetik alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma deneyi-8 konsantre tenörleri %14.35 Fe (%82.30 randımanla), %65.67 SiO_2 (%57.92 randımanla), %4.68 MgO (%73.55 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-2'in konsantre ve ara ürün ürünlerinin Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 - 75µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'nin giriş tenörleri %30.62 Fe, %48.27 SiO_2, %2.75 MgO olmuştur. Deney sonucunda (Nihai Manyetit Konsantresi) Fe tenörü %63.75 (%60.82 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %6.71 (%4.06 randımanla) ve MgO tenörü %0.92 (%9.76 randımanla) seviyelerine düşmüştür.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'ün non-manyetik ürünleriyle devam eden 3 kademe temizlemeli 12000 gauss, 10000 gauss ve 8000 gauss manyetik ayırma deneyi sonucunda elde edilen konsantre (Nihai Hematit Konsantresi) tenörleri kümülatif olarak incelendiğinde % 35.53 Fe (%33.09 randımanla), %41.03 SiO_2 (%9.69 randımanla), %3.03 MgO (%13.42 randımanla) olmuştur.

Elde edilen konsantre ürünlere kümülatif olarak baktığımızda Nihai Manyetit Konsantre %63.75 Fe (%40.14 randımanla), %6.71 SiO2 (%0.95 randımanla), %0.92 MgO (2.56% randımanla) olmuştur. Nihai Hematit Konsantre %35.53 Fe (%8.07 randımanla), %41.03 SiO_2 (%2.10 randımanla), %3.03 MgO (%3.05 randımanla) olmuştur.

Tamamlanan deney setleri sonrasında elde edilen Nihai Manyetit Konsantreden homojen numuneler alınarak Davis Tube deneyi ve fraksiyonel kimyasal analiz saptanması amacıyla 4 fraksiyonda eleme yapılmıştır.

Yapılan Davis Tube deneyi sonucunda elde edilen konsantre ürününün tenörleri %67.99 Fe (%96.16 randımanla), %1.55 SiO_2 (%20.83 randımanla), %0.22 MgO (%21.65 randımanla) olmuştur.

Yapılan fraksiyonal kimyasal analiz çalışmasında -25µm fraksiyonu kütlece %53.31'lik bir değere sahip olup, 61.39% Fe (%51.89 randımanla) ile en düşük Fe tenörüne sahiptir. Diğer kimyasal analiz çalışmasında da fraksiyonlar arasındaki tenör farklılıklarının çok az (±%1) miktarda olduğu gözlemlenmiştir.

3.2.4. *Numune E (+75µm)*

Numunede bulunan demir minerallerinin konsantre olarak ayırabilmek için düşük alan şiddetli manyetik ayırma (2000 gauss), filtre tipi yüksek alan

şiddetli manyetik ayırma (20000-8000 gauss arası) ve sallantılı masa deneyleri ile kombine çalışma sağlanmıştır.

2000 gauss alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1 sonucunda; manyetik konsantre tenörleri %49.38 Fe (%60.24 randımanla), %23.50 SiO_2 (%11.32 randımanla), %2.35 MgO (%2.41 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non manyetik ürünüyle paralel Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-7 ve Sallantılı Masa Deneyi-1 yapılmıştır. 20000 gauss manyetik alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma deneyi-7 konsantre tenörleri %18.23 Fe (%57.71 randımanla), %62.79 SiO_2 (%33.28 randımanla), %6.04 MgO (%58.69 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-1'in konsantre ve ara-ürün ürünlerinin Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 - 150µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin giriş tenörleri %37.22 Fe, %49.62 SiO_2, %5.83 MgO olmuştur. Deney sonucunda Fe tenörü %57.23 (%69.68 randımanla) ve MgO tenörü minimal bir artışla %6.70 (%51.26 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %31.49 (%28.77 randımanla) seviyelerine düşmüştür.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non manyetik ürünüyle paralel Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-8 ve Sallantılı Masa Deneyi-2 yapılmıştır. 12000 gauss manyetik alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma deneyi-8 konsantre tenörleri %22.32 Fe (%93.60 randımanla), %56.84 SiO_2 (%82.15 randımanla), %3.83 MgO (%83.19 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-2'nin non-manyetik ürünüyle devam eden Sallantılı Masa Deneyi-2'in konsantre ve ara ürün ürünlerinin Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in konsantre ürününün birleştirilmesiyle d100 -

75µm olacak şekilde öğütme yapılmıştır. Sonrasında yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'nin giriş tenörleri %49.88 Fe, %23.21 SiO_2, %2.82 MgO olmuştur. Deney sonucunda (Nihai Manyetit Konsantresi) Fe tenörü %67.91 (%66.77 randımanla) seviyesine yükselirken, SiO_2 tenörü %4.00 (%8.45 randımanla) ve MgO tenörü %0.87 (%15.15 randımanla) seviyelerine düşmüştür.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-3'ün non-manyetik ürünleriyle devam eden 3 kademe temizlemeli 12000 gauss, 10000 gauss ve 8000 gauss manyetik ayırma deneyi sonucunda elde edilen konsantre (Nihai Hematit Konsantresi) tenörleri kümülatif olarak incelendiğinde 50.28 %Fe (%40.79 randımanla), %21.27 SiO_2 (%13.78 randımanla), %2.69 MgO (%16.28 randımanla) olmuştur.

Elde edilen konsantre ürünlere kümülatif olarak baktığımızda Nihai Manyetit Konsantre %67.91 Fe (%48.86 randımanla), %4.00 SiO_2 (%0.98 randımanla), %0.87 MgO (3.87% randımanla) olmuştur. Nihai Hematit Konsantre %50.28 Fe (%8.65 randımanla), %21.27 SiO_2 (%1.25 randımanla), %2.69 MgO (%2.86 randımanla) olmuştur.

Tamamlanan deney setleri sonrasında elde edilen Nihai Manyetit Konsantreden homojen numuneler alınarak Davis Tube deneyi ve fraksiyonel kimyasal analiz saptanması amacıyla 3 fraksiyonda eleme yapılmıştır.

Yapılan Davis Tube deneyi sonucunda elde edilen konsantre ürününün tenörleri %70.47 Fe (%93.63 randımanla), %0.99 SiO_2 (%22.45 randımanla), %0.19 MgO (%19.75 randımanla) olmuştur.

Yapılan fraksiyonal kimyasal analiz çalışmasında da fraksiyonlar arasındaki tenör farklılıklarının çok az (± %0.5) miktarda olduğu gözlemlenmiştir.

3.2.5. *Numune F (-75µm)*

Numunede bulunan demir minerallerinin konsantre olarak ayırabilmek için düşük alan şiddetli manyetik ayırma (2000 gauss), filtre tipi yüksek alan şiddetli manyetik ayırma (20000-8000 gauss arası) deneyleri ile kombine çalışma sağlanmıştır.

2000 gauss alan şiddetinde yapılan Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1 sonucunda; manyetik konsantre (Nihai Manyetit Konsantre) tenörleri %67.49 Fe (%72.30 randımanla), %3.62 SiO_2 (%11.11 randımanla), %0.63 MgO (%23.30 randımanla) olmuştur.

Yaş Manyetik Ayırma Deneyi-1'in non-manyetik ürünleriyle devam eden 3 kademe temizlemeli 12000 gauss, 10000 gauss ve 8000 gauss manyetik ayırma deneyi sonucunda elde edilen konsantre (Nihai Hematit Konsantresi) tenörleri kümülatif olarak incelendiğinde %50.14 Fe (%49.11 randımanla), %14.90 SiO_2 (%13.03 randımanla), %3.71 MgO (%45.49 randımanla) olmuştur.

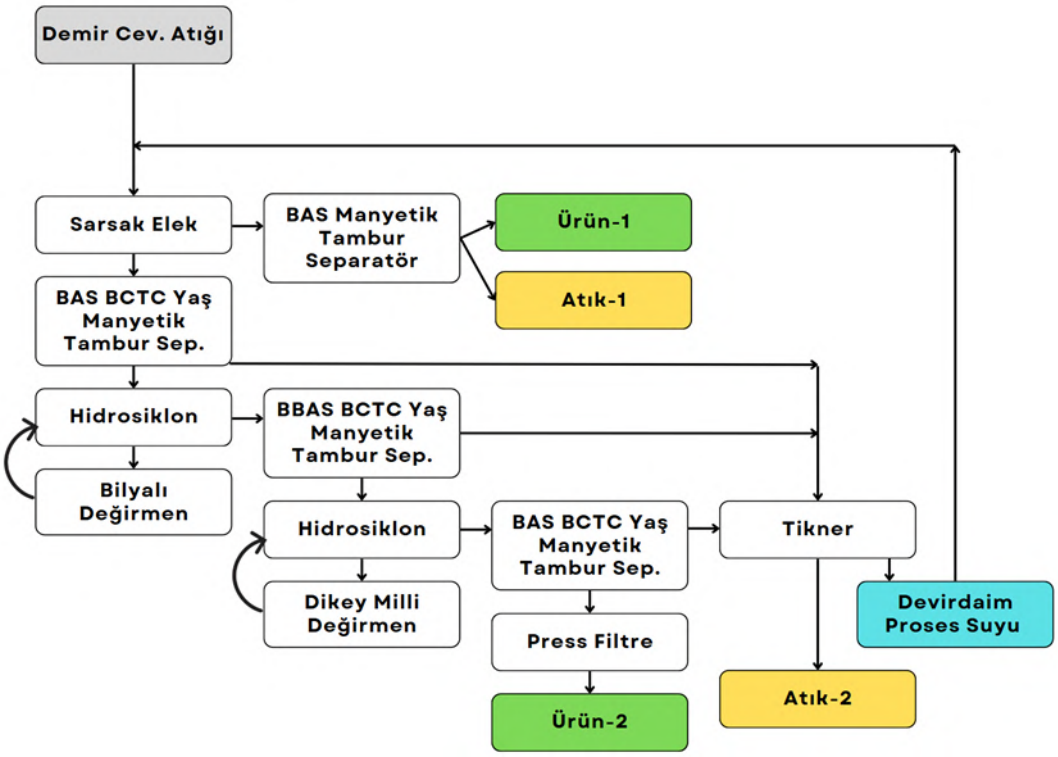
Tamamlanan deney setleri sonrasında elde edilen Nihai Manyetit Konsantreden homojen numuneler alınarak Davis Tube deneyi ve fraksiyonel kimyasal analiz saptanması amacıyla 3 fraksiyonda eleme yapılmıştır.

Yapılan Davis Tube deneyi sonucunda elde edilen konsantre ürününün tenörleri %69.83 Fe (%94.04 randımanla), %1.93 SiO_2 (%48.92 randımanla), %0.41 MgO (%48.96 randımanla) olmuştur.

Yapılan fraksiyonal kimyasal analiz çalışmasında da fraksiyonlar arasındaki tenör farklılıklarının çok az (±%1) miktarda olduğu gözlemlenmiştir.

3.3. Tesis ve BAS Ekipmanları

Tesisin ana prosesi, demir cevheri atığının bunkere beslenmesiyle başlar. Buradan vibro besleyici aracılığıyla yaş sarsak eleklere yönlendirilen malzeme, boyutuna göre sınıflandırılır. Elek-üstü malzeme doğrudan kuru manyetik tambur separatöre beslenirken, elek-altı malzeme karıştırmalı tanklarda homojenize edilir.



Şekil 1. Batı Afrika tesisinin proses akım şeması

Homojenizasyon işlemi tamamlanan malzeme, yaş manyetik tambur separatörlere yönlendirilerek manyetik minerallerin ayrılması sağlanır. Separatör çıkışında elde edilen atık Tiknere gönderilirken, zenginleştirilmiş ürün hidrosiklona beslenir. Hidrosiklonun alt akımı bilyalı değirmene giderek öğütme işlemi uygulanır ve değirmen çıkışı tekrar hidrosiklona yönlendirilerek kapalı devre bir sistem oluşturulur. Hidrosiklonun üst akımı ise yeniden yaş manyetik tambur separatörlere beslenerek bir ayrım daha

gerçekleştirilir. Burada da separatör çıkışında oluşan atık Tiknere gönderilirken, ürün hidrosiklona aktarılır. Hidrosiklonun alt akımı bu kez dikey milli değirmene yönlendirilir ve burada tekrar öğütülen malzeme, kapalı devre olarak yeniden hidrosiklona beslenir. Üst akım nihai yaş manyetik tambur separatörlere gönderilerek son bir ayrıştırma gerçekleştirilir. Separatör çıkışındaki atık Tiknere yönlendirilirken, ürün press filtreye beslenir. Son aşamada press filtreden elde edilen kek formundaki nihai ürünle birlikte proses tamamlanmış olur.

3.3.1. *BAS D900X1000x1 kuru manyetik tambur separatör*

D900x1000mm manyetik tambur, 1800 Gauss kuru manyetik separasyon yöntemi ve 4tph kapasitesi ile +3 mm üzeri ve %25-29 Fe içeriğine sahip elenen besleme malzemesinden %65 Fe içeriğine sahip yüksek tenörlü konsantre üretir (Şekil 3).

3.3.2. *BAS BCTC 1200X3600X3 kaba yaş manyetik tambur separatörleri*

D1200x3600mm üç unite manyetik tambur elenen besleme malzemesinden (D_{80} = 0.9 mm, Fe: %25–29) %42 Fe içeriğine sahip bir ara ürün elde eder. 1800 Gauss kaba yaş manyetik ayırma yöntemi kullanarak ve 356 tph kapasiteyle (hacimce %25 katı madde), verimli manyetit geri kazanımı sağlar (Şekil 3).

3.3.3. *BAS BCTC 1200X3000X1 temizleme yaş manyetik tambur separatör*

D1200x3000mm manyetik tambur, BCTC 1200x3600 ünitesinin öğütülmüş kaba ürününden (D_{80} = 0.15 mm, Fe: %42), %59 Fe içeriğine sahip bir ara ürün elde eder. 1400 Gauss temizleme yaş manyetik separasyon yöntemi kullanarak ve 140 tph kapasiteyle (hacimce %15 katı madde), verimli safsızlık uzaklaştırması ve demir zenginleştirmesi sağlar (Şekil 3).

3.3.4. *BAS Demanyetizer*

Final yaş manyetik separasyondan önce, çamur malzeme BAS demanyetizerından geçirilir, böylece manyetik aglomeralar dağıtılır ve çökelme engellenir, bu da optimum ayırma verimliliğini sağlar. Demanyetizer, alternatif bir manyetik alan oluşturarak kalıcı mıknatıslanmayı azaltır ve manyetik parçacıkların dağılmasını sağlar. Bu süreç, ayırma verimliliğini ve nihai ürünün saflığını artırır (Şekil 3).

3.3.5. *BAS BCTC 1200X3000X2 nihai yaş manyetik tambur separatörleri*

D1200x3000mm manyetik tambur, iki separasyon unitesiyle, BCTC 1200x3000 ünitesinin temizlenmiş ve öğütülmüş ürününü (D_{80} = 0.045 mm, Fe: %59) yüksek kaliteli bir nihai ürüne dönüştürür ve %67 Fe içeriği sağlar. 1200 Gauss ile çalışan nihai yaş manyetik separasyon yöntemiyle, 78 tph kapasiteyle (hacimce %14 katı madde), verimli safsızlık uzaklaştırması ve demir zenginleştirmesi gerçekleştirir (Şekil 3).

Şekil 2. Batı Afrika tesisindeki bazı BAS ekipmanları

4. SONUÇLAR

Batı Afrika'daki demir madeni atıklarından demir geri kazanımı amacıyla yapılan bu projede, 360 tph kapasiteyle yüksek verimli bir tesis kurulmuş ve başarılı bir şekilde devreye alınmıştır. Yapılan kimyasal analizler ve zenginleştirme çalışmaları sonucunda, %64 Fe içeren yüksek saflıkta demir konsantresi elde edilmiştir. Bu sonuç, manyetik ayırma zenginleştirme yöntemlerinin etkili bir şekilde uygulandığını ve demir madeni atıklarının ekonomik değere dönüştürülebileceğini göstermektedir. Tesisin tasarımı ve kullanılan ekipmanlar, yüksek proses kapasitesi ve düşük işletme maliyetleri sunarak, çevre dostu bir çözümle atıkların işlenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, tesisin performansı, demir cevheri atıklarının zenginleştirilmesinde kullanılan teknolojilerin etkinliğini bir kez daha kanıtlamıştır. Bu proje, düşük kaliteli demir cevherlerinin işlenmesinde uygulanan başarılı bir manyetik separasyon çözümü sunmakta olup, gelecekteki benzer projeler için örnek teşkil etmektedir.

KIYMETLİ MİNERALLERDEN NİKEL CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

BENEFICIATION OF NICKEL ORE FROM PRECIOUS MINERALS

Rahmi Kocaman, Birsen Kocaman
Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara

ÖZ: Mineraller, doğada bulunan, genellikle inorganik ve sabit kimyasal bileşimlere sahip, kristal yapılar oluşturan doğal maddelerdir. Her mineralin kendine özgü kimyasal formülü, kristal yapısı ve fiziksel özellikleri vardır. Kristal yapısında yani kendisini teşkil eden atomlar ve iyonlar, mineraloji ilminin kanunlarına uygun belirli kafes yapısı nizamında dizilmişlerdir. Kıymetli mineraller ise nadir bulunmalarından ve ekonomik değerlerinin yüksek olmasından dolayı bu kategoriye dahil edilir. Kıymetli mineraller 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren, düşük tenörlü ve ince dağılımlı kıymetli mineral içeren cevherlerin değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Kıymetli mineraller çoğunlukla kayaçlar içerisinde ince dağılımlı olarak bulunurlar. Kıymetli olan mineraller işletilen cevherin küçük bir yüzdesini teşkil etmekte ve bunların normal olarak özgül ağırlıkları gang minerallerinden fazla olmaktadır Kıymetli minerallerin ekonomideki yeri büyüktür. Takı ve mücevher sektöründe, sanayi kullanımında ve yatırım araçları olarak kullanılırlar. Altın, gümüş ve platin gibi mineraller tarih boyunca değerli mülkler olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, bu minerallerin çoğu bir ülkenin ekonomisini de önemli ölçüde etkiler. Altın rezervleri bir ülkenin ekonomik gücünün göstergesi olmaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte kıymetli minerallere olan ihtiyaçlarda artmıştır. Kıymetli minarelerin kullanım alanları artmıştır. Kıymetli minerallerin elde edilmesi de ayrı bir önem teşkil etmektedir. Kıymetli mineraller den olan nikelinde birçok kullanın alanı bulunmaktadır. Nikel cevheri de doğada kompleks yapıda olduğu için zenginleştirme işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Nikel cevherinin zenginleştirilmesi, endüstriyel süreçlerin önemli bir parçasıdır ve nikelin endüstriyel kullanımının artırılmasında kritik bir rol oynaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kıymetli Mineraller, Nikel, Zenginleştirme, Nikel Kazanımı

ABSTRACT: *Minerals are naturally occurring substances, typically inorganic, with a defined chemical composition and crystalline structure.*

Each mineral possesses a unique chemical formula, crystal structure, and distinct physical properties. In their crystalline structure, the constituent atoms and ions are arranged in a specific lattice configuration governed by the principles of mineralogy. Precious minerals are categorized as such due to their rarity and high economic value. Since the last quarter of the 20th century, the processing of low-grade and finely disseminated ores containing precious minerals has gained increasing importance. Precious minerals are usually found finely disseminated within rock matrices. These economically valuable components constitute only a small fraction of the total ore mass, and they generally have higher specific gravities than gangue minerals. The economic significance of precious minerals is considerable. They are utilized in the jewelry and ornament industry, various industrial applications, and as investment commodities. Minerals such as gold, silver, and platinum have historically been regarded as valuable assets. Furthermore, these minerals significantly influence national economies—gold reserves, for instance, are considered an indicator of a country's economic strength. With technological advancements, the demand for precious minerals has increased, as has the range of their applications. Therefore, the recovery of precious minerals has become increasingly important. Nickel, classified among precious minerals, also has a wide range of industrial applications. Due to its complex occurrence in nature, nickel ore must undergo a beneficiation process. The beneficiation of nickel ore is a critical component of industrial operations and plays a key role in enhancing the usability of nickel in various sectors.

Keywords: *Precious Minerals, Nickel, Beneficiation, Nickel Recovery*

1. GİRİŞ

Nikel, 1751 yılında İsveçli kimyager Baron Axel Fredrik Cronstedt tarafından keşfedilmiştir. Yerkabuğundaki belli başlı elementlerden olup, yüzyıldan fazla bir süredir endüstride kullanılmaktadır. Modern anlamda ilk nikel üretimi ise 1848 yılında Norveç'te gerçekleştirilmiş, 1889 yılında çelik endüstrisinde kullanılmaya başlanıp paslanmaz çelik üretimine geçilmesi ile nikel, kaplama ve döküm sektörleri için en önemli metallerden biri haline dönüşmüştür. Oksitlenme direnci göstermesinden dolayı günümüzde

alaşımların üretiminde yaygın olarak kullanılan nikelin değeri her geçen gün artmaktadır. Simgesi "Ni", atom numarası 28, atom kütlesi 58,69 g/mol, yoğunluğu 8,90 g/cm^3, ergime sıcaklığı 1455 ºC dir. Periyodik cetvelde geçiş metalleri arasında yer alır. Parlak gümüş beyazı renginde olup bakır, krom, alüminyum, kurşun, kobalt, altın ve gümüş gibi metallerle birlikte alaşımlarda kullanılır. Yerkabuğunun % 0,008 kadarını oluşturan nikel, çekirdeğin derin kısımlarında demir, oksijen, silis ve magnezyumdan sonra en bol bulunan beşinci elementtir. Doğada saf olarak bulunmaz, çoğunlukla demir ve kobalt ile birlikte oksitler, sülfitler ve silikatlar şeklinde oluşur. En önemli nikel mineralleri; nikelin (NiAs), kloantit ($NiAs_2$), pentlandit [(FeNi)S], millerit (NiS), anaberjit [$(Ni)_3(AsO_4)28H_2O$] ve garniyerit (Ni, $Mg)_3$ [$(NiMg)_3Si_2O_5(OH)_4$] dir. İki tür maden yatağından elde edilir. Bunlardan birincisi; ana mineralleri limonit ve garniyerit olan lateritik yataklar, ikincisi ise; ana minerali pentlandit olan sülfitik yataklardır. Dünya nikel rezervinin yaklaşık % 60'ı lateritik yataklarda, % 40'ı ise sülfitik yataklarda bulunur. Madencilikte nikelin işletilebilir limit tenörü; lateritik yataklar için %1, sülfit yataklar için %0,2 dir. Co/Ni oranının 1/30 olması durumunda aynı yataktan kobalt üretimi de yapılabileceğini belirtmişlerdir. Günümüzde nikel üretimi daha çok sülfitik yataklardan elde edilmekte olduğuna ulaşmışlardır (Eroğlu ve Akgök, 2018).

Nikel (Ni), doğada genellikle alaşım yaparak kullanılan ve endüstriyel alanda önemli bir yere sahip olan kıymetli bir metaldir. Nikel (Ni), demirli ve demirsiz metal özelliklerinin bir karışımını sergileyen bir geçiş elementidir. Hem siderofildir (yani demirle birleşir) hem de kalkofildir (yani kükürtle birleşir). Çıkarılan nikelin büyük kısmı iki tür cevher yatağından gelir. Ana cevher minerallerinin nikelli limonit [(Fe,Ni)O(OH)] ve garnierit (sulu bir nikel silikat) olduğu lateritler veya ana cevher mineralinin pentlandit [$(Ni,Fe)_9S_8$] olduğu magmatik sülfür yatakları. İki değerlikle

nikelin iyonik yarıçapı iki değerlikle demir ve magnezyumunkine yakındır ve bu üç elementin bazı silikatların ve oksitlerin kristal kafeslerinde birbirinin yerine geçmesine olanak tanımaktadır. Nikel sülfür yatakları genellikle ultrabazik adı verilen demir ve magnezyum açısından zengin kayalarla ilişkilidir ve hem volkanik hem de plütonik ortamlarda bulunabilir. Sülfür yataklarının çoğu büyük derinliklerde meydana gelir. Lateritler, ultrabazik kayaların aşınmasıyla oluşur ve yüzeye yakın bir olgudur. Nikel cevherlerinin zenginleştirilmesinde ise cevherlerin oluşum süreçlerindeki farklılıklar, yatakların mineralojik bileşim ve yapısını bütünüyle değiştirebilmekte, buda, hazırlama ve zenginleştirme aşamalarında, uygulanacak yöntemler bakımından belirleyici olmaktadır. Sülfürlü nikel cevherlerinde serbestleşme tane boyutuna inildikten sonra cevher, flotasyon veya manyetik ayırımla zenginleştirilirken, lateritik yataklarda genellikle aşındırma (scrubbing) işleminin ardından, cevherin mineralojik yapısına göre, hidrometalurjik, pirometalurjik veya her ikisinin birleştirildiği yöntemlerden biri tercih edilmektedir. Cevherin tenörüne bağlı olarak bakır, ya önemli bir yan üründür veya nikel gibi, doğrudan ürün niteliği taşımaktadır. Norilsk ve Sudbury yataklarında görüldüğü üzere, nikelin yanı sıra, sıklıkla altın, gümüş ve platin grubu mineraller (PGM) de kazanılmaktadır. Nikel, öncelikle rafine metal (katot, toz, briket, vb.) veya ferronikel olarak ilk kullanım için uç ürün elde edilerek katma değere dönüştürülerek ihraç edilir. Batı Dünyası'nda tüketilen nikelin yaklaşık %65'i ostenitik paslanmaz çelik yapmak için kullanılır. Bir diğer %12'si süper alaşımlara (örneğin Inconel 600) veya demir dışı alaşımlara (örneğin bakır nikel) gider. Her iki alaşım ailesi de korozyon dirençleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır. Havacılık endüstrisi, nikel bazlı süper alaşımların önde gelen tüketicisidir. Jet motorlarının türbin kanatları, diskleri ve diğer kritik parçaları süper alaşımlardan üretilir. Nikel bazlı süper alaşımlar ayrıca

elektrik üretim istasyonlarında bulunanlar gibi kara tabanlı yanma türbinlerinde de kullanılır. Tüketimin kalan %23'ü alaşımlı çelikler, şarj edilebilir piller, katalizörler ve diğer kimyasallar, madeni para, döküm ürünleri ve kaplama arasında bölünmüştür. Başlıca ticari kimyasallar karbonat ($NiCO_3$), klorür ($NiCl_2$), iki değerlikli oksit (NiO) ve sülfattır ($NiSO_4$). Sulu çözeltide, iki değerlikli nikel iyonu zümrüt yeşili bir renge sahiptir.

Ülkemizde MTA'nın kuruluşundan itibaren başlayan metalik maden arama faaliyetleri sonucunda hem lateritik hem de sülfit tip nikel cevherleşmeleri tespit edilmiştir. Jeolojik konumu nedeniyle nikel cevherleşmesine uygun olan Anadolu'nun çok farklı yerlerinde nikel rezerv tespiti yapılmıştır (MTA, 2018). En büyük nikel yatakları Manisa-Turgutlu-Çaldağ, Manisa-Gördes ve Eskişehir– Mihalıççık-Yunus Emre yörelerinde bulunur. Ayrıca; Uşak–Banaz, Bitlis–Pancarlı, Bursa–Orhaneli-Yapköydere, Sivas–Divriği-Gümüş, Bolu–Mudurnu-Akçaalan ve Hatay-Payas- Dörtyol'da nikel yatakları tespit edilmiştir (Öztürk, 2021).

Ülkemizde de yıllar itibari ile tüvenan nikel üretim çizelge 1 de verilmiştir. Çizelgedeki veriler incelendiğinde 2017 yılı ile 2023 yılları arası üretimin çok değişmediği görülmektedir.

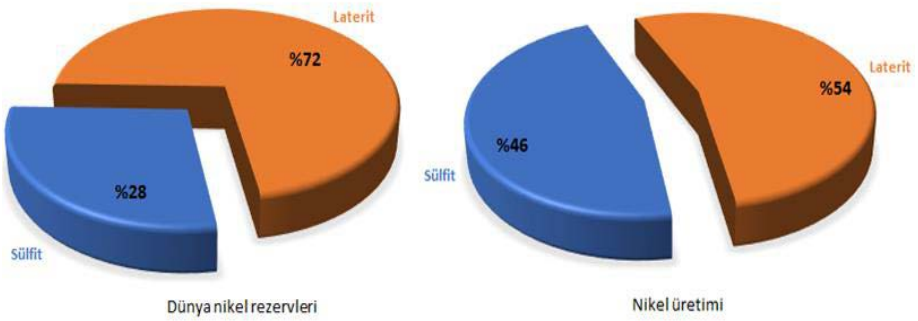
Çizelge 1. 2014-2023 yılları arası nikel üretimi (MAPEG, 2025)

Maden Adı	METALİK MADEN ÜRETİMLERİ (TON)				
Nikel (tüvenan)	2023	2022	2021	2020	2019
	1.627.271,76	1.286.313,98	1.030.670,00	1.787.714,66	419.659,36
	2018	2017	2016	2015	2014
	1.199.943,99	1.306.800,00	826.285,00	764.346,00	268.545,00

2. NİKEL YATAKLARININ OLUŞUMU

Yeryüzünde bulunan nikel genel olarak iki tip maden yatağında oluşmaktadır. Bunlar; lateritik nikel yatakları ve sülfitik nikel yataklarıdır. Sülfitik nikel yataklarda genellikle yeraltı madenciliği, lateritik nikel yataklarda ise açık ocak madenciliği ile nikel cevheri çıkarılmaktadır. Dünyada bilinen nikel yataklarının yaklaşık %72'si lateritik tipte, %28'i sülfitik tiptedir.

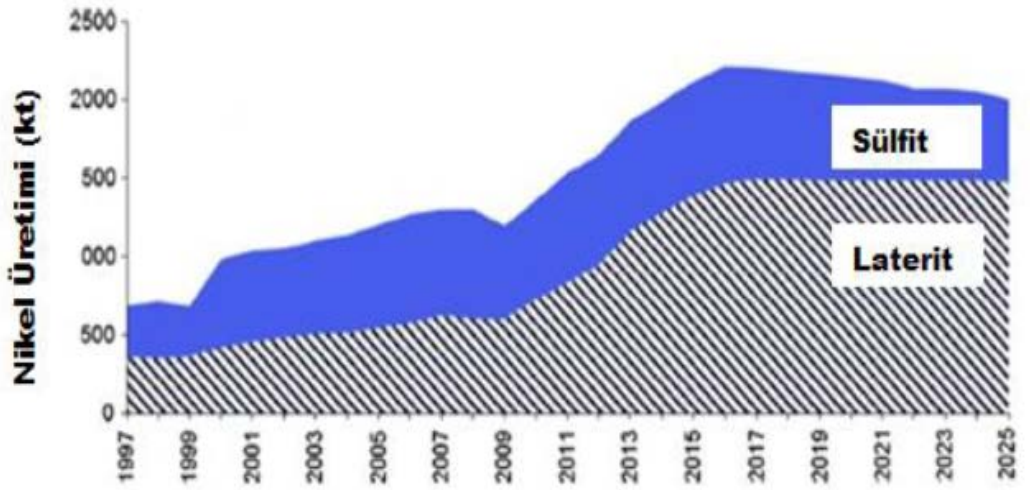
Nikel, laterit ve sülfit cevherlerinin içerisinde bulunabildiği gibi ayrıca derin deniz nodülleriyle ilişkili olarak da bulunabilmektedir. 2003'te dünya nikel kaynaklarının %72'sinin nikel lateritleri içerisinde olduğu tahmin edilmesine rağmen, dünya nikel üretiminin yaklaşık yarısı lateritlerden sağlanmaktadır. Dünya nikel kaynakları ve üretimdeki dağılımları Şekil 1'de verilmiştir (Parlak, 2017).



Şekil 1. Dünya nikel kaynakları ve üretimdeki dağılımları (Oxley, 2016).

Şekil 1'de ise nikel üretiminde kullanılacak cevhere göre dağılımı verilmektedir. Nikel sülfit madencileri, daha derin sondaj ihtiyacı, yüksek üretim maliyeti ve rezervlerin azalması durumuyla karşılaşmıştır. Nikele artan talep, dünya nikel kaynağının yaklaşık %30'unu oluşturan ve daha kolay ekstrakte edilebilir Ni-sülfit kaynaklarının azalmasına ve maden

endüstrisinin lateritik nikelin asit liçine yönlenmesine neden olmuştur. Nikel talebi 1950'de 200 ktpa'nın altındayken 2003'te 1200 ktpa'nın üzerinde olmuştur (Parlak, 2017).



Şekil 2. Nikel üretiminde kullanılacak cevhere göre geçmiş ve gelecek tahminleri (Oxley, 2016).

Laterit cevherlerinin gelişimini kısıtlayan temel ekonomik faktörlerden biri olarak, sülfit cevherlerine nazaran laterit proses enerji maliyetinin 2–3 kat daha yüksek olması ifade edilmiştir. Ayrıca sülfit cevherlerinin aksine, nikelin laterit cevheri içerisinde çok iyi bir biçimde dağıldığı ve bundan dolayı ince öğütme veya diğer fiziksel zenginleştirme metotları ile zenginleştirilemedikleri ifade edilmiştir (Zhu vd., 2012).

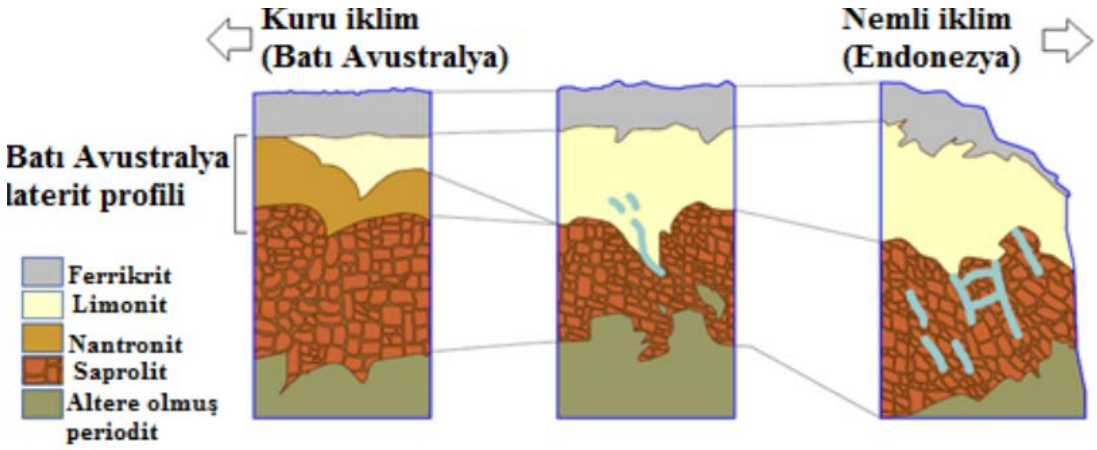
2.1. Lateritik Nikel Yatakları

Jeolojik dönemler boyunca tropik ve/veya subtropik iklim koşulları altında, aşırı yağış ve sıcaklık değişimlerine maruz kalan mağmatik kökenli kayaçların doğal ayrışması neticesinde ortaya çıkan kayaçlar lateritik kayaçlar olarak tanımlanır. Lateritleşme, madencilik teknolojisi açısından irdelendiğinde, yerinde doğal bir özütleme (liç) sürecidir. İçeriklerinde

genelde, % 0,1-0,3 nikel ve kobalt türü metaller bulunan ultramafik kökenli ana kayaların atmosferik ve hidrosferik olaylarla ayrışması sonucu lateritleşmesiyle, %1-3 tenörlü lateritik nikel cevher yatakları oluşur. Ana cevher mineralleri limonit ve garniyerittir. Lateritik yataklarda, nikelin yanı sıra kobalt da bulunur. Ni-laterit yatakları, ilk kez J.Garnier tarafından 1864 yılında Yeni Kaledonya'da keşfedilmiştir. Dünyanın en geniş lateritik nikel yatağı olarak kabul edilen Yeni Kaledonya Ni-lateritleri, 1875 yılında işletilmeye başlanmıştır ve halen ekonomik olarak işletilmektedir. Çoğu lateritik nikel yatakları, tektonik olarak aktif çarpışma zonları ve nemli tropikal iklim kuşaklarının egemen olduğu ülkelerde görüldüğü belirtilmiştir. (Tufan, 2014)

Lateritleşme, çözünme kabiliyeti olan K, Na, Mg, Ca, Si gibi elementlerin bozuşması ve az çözünebilen Fe, Al gibi elementlerin birikimine neden olan ve nemli-yağışlı tropikal iklimler altında oluşan bir ayrışma işlemidir. Lateritik nikel cevherleri dünyanın tropikal ve alt tropikal bölgelerde demir-magnezyum mineralleri (olivin, piroksen ve amfibol) içeren aşınmaya uğramış ultramafik kayaçlarda yer almaktadır. Ni-lateritler, yüksek Ni (~2000 ppm) ve Co (~110 ppm) içeriklerine sahip olan ve Paleozoyik'ten Tersiyer'e kadar farklı jeolojik ortamlarda oluşmuş dunit (olivin), peridotit (olivin, piroksen, hornblend), piroksenit (orto-klinopiroksen), hornblendit (hornblend) ve serpantinit türü kayaçlardan meydana gelen ultramafik kayaçların, tropikal iklim koşulları altında mekanik ve kimyasal olarak bozuşması ile oluşan kalıntı ürünlerdir ve ortalama %0,2-0,4 oranında Ni içermesi bakımından önemlidirler (Tufan, 2014). Serpantin, su bulunması durumda 200°C ve 500°C sıcaklık arasında hidrotermal olarak olivinin alternasyonuyla oluşur. Serpantinleşme esnasında nikel çözelti içerisinde hareket ederken geriye kalan nikel serpantin içerisinde veya serpantinleşmenin yan ürünü olan magnetitle

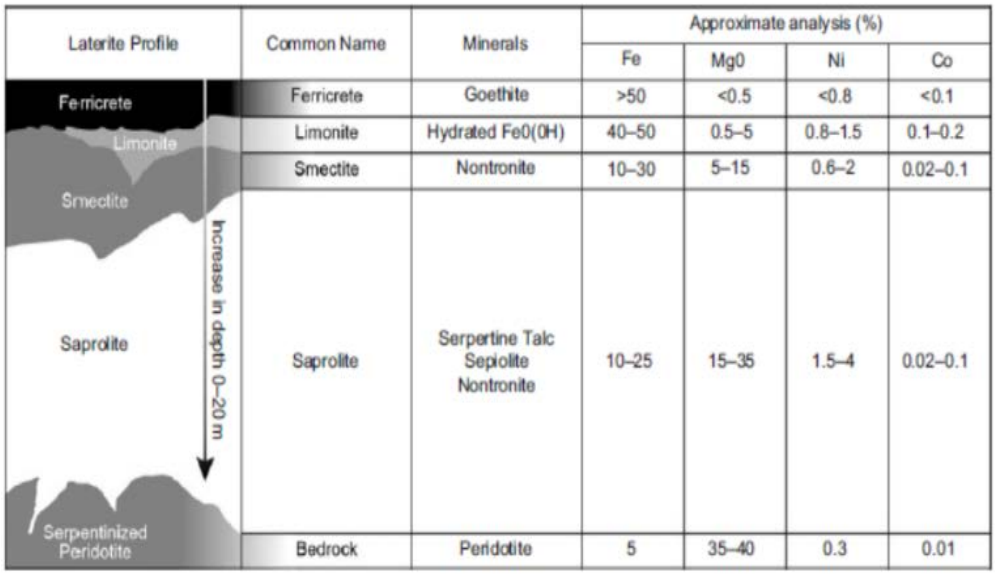
birleşir. Ultramafik kayaçların kimyası ve minerolojisi jeolojik zaman içerisinde meydana gelen yer kabuğundaki kalınlaşma, deniz seviyesindeki değişimler, deniz zemininde meydana gelen kaymalarla ile değişmiştir. Bakır, kurşun ve çinko gibi iz elementleri miktarsal olarak daha çok eski yaşlı ultramafiklerde bulunurlar. Lateritleşme esnasında en eski ve en fazla deformasyona uğramış ultramafik kayaçlar Avustralya ve Brezilya'da kambriyum öncesine ait komplekslerde bulunur. Küçük miktarda fakat yüksek derecede makaslama kuvvetine maruz kalmış inklüzyonlar Guetemalo, Kolombiya, Hindistan ve Burma'da oluşmuştur. Mesozoik adaların kıvrımlarına doğru Tersiyer ofiyolitlerin itilmesi ve kıtalarda çarpışma zonlarının oluşmasıyla Yeni Kaledonya, Küba, Endonezya ve Filipinler gibi plato, yükselti ve çökelti yer şekilleri oluşarak buralarda lateritleşme meydana gelmiştir. Lateritik nikel yatağının tipik kesit görünüşünü Şekil 3'de verilmiştir (Dalvi vd., 2004).



Şekil 3. Lateritik nikel yatağının tipik kesit görünüşü (Dalvi vd., 2004).

Lateritler genellikle Endonezya, Filipinler ve Küba gibi tropik bölgelerde bulunur ve içerisindeki nikel ve kobalt için madenciliği yapılır. Sülfitler daha çok Kanada ve Kuzey Sibirya'da bulunur. Laterit ve sülfit cevherlerinin her ikisinin de konsantrasyonları %1,3 Ni, %0,1 Co aştığı

zaman nikel ve kobalt için çıkarılırlar Lateritler yüzeye yakın yerde oluşurlar ve yüzey madenciliği metodu ile çıkarılır (Crundwell vd., 2011). Her ne kadar laterit cevherinin madenciliği, düşük maliyetli açık ocak tekniği olsa da laterit cevherinin işleme aşamalarının ve mineralojisinin karmaşıklığı nedeniyle laterit işlenmesi fazla enerji yoğunluğuna sahiptir (Khoo vd., 2017). Lateritler, tektonik güçler ile yukarı doğru itilen okyanus tabakasının bozunması ile oluşan kompleks cevherlerdir. Milyonlarca yıl süren bu bozunma, yüzeyden ana kayaya kadar farklı mineral profillerinin oluşması ile sonuçlanır. Laterit cevherleri, hidratlı demir oksitlerin ve bileşiminde su bulunan magnezyum silikatların heterojen karışımlarıdır. Bu çökeltiler, peridotit kayalarının bozunması ile oluşmuşlardır. Genellikle örtü tabakası olarak dikkate alınır ve nikel kobalt seviyesi ticari seviyenin oldukça altındadır. Gerçek cevher yapısında, durum daha karmaşıktır. Çeşitli bölgeler ya yoktur ya da birbiri içine karışmış halde olabilir. Nem ve kil minerallerinin yanı sıra bakır ve çinko da cevher yapısında bulunabilir. Laterit yatağının idealleştirilmiş profili Şekil 4'de gösterilmiştir (Crundwell vd., 2011).

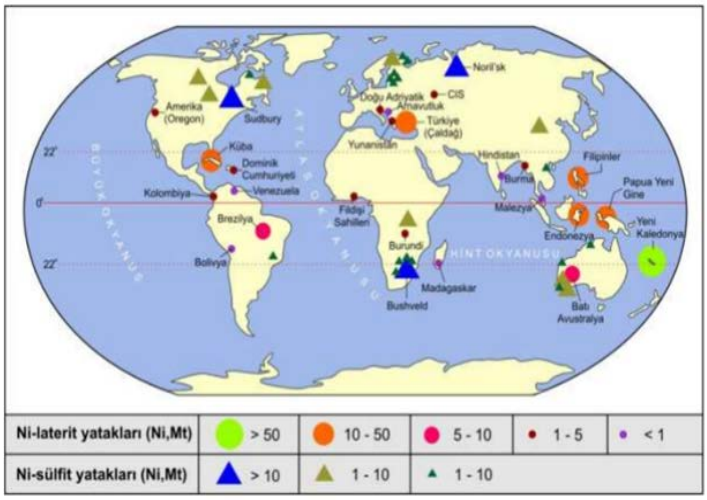


Laterite Profile	Common Name	Minerals	Approximate analysis (%)			
			Fe	MgO	Ni	Co
Ferricrete	Ferricrete	Goethite	>50	<0.5	<0.8	<0.1
Limonite	Limonite	Hydrated FeO(OH)	40–50	0.5–5	0.8–1.5	0.1–0.2
Smectite	Smectite	Nontronite	10–30	5–15	0.6–2	0.02–0.1
Saprolite	Saprolite	Serpentine Talc Sepiolite Nontronite	10–25	15–35	1.5–4	0.02–0.1
Serpentinized Peridotite	Bedrock	Peridotite	5	35–40	0.3	0.01

Şekil 4. Laterit maden yatağı profili (Crundwell vd., 2011)

2.2. Sülfitik Nikel Yatakları

Sülfürlü nikel yataklar ise ultra bazik ve bazik magmatik kayaçlarında gelişir. Bunlarda esas cevher minerali pentlandittir. Nikel sülfitler çoğunlukla ultramafik olarak adlandırılan demir ve magnezyumca zengin kayaçlarla ilişkilidir. Ayrıca, bu tip yataklarda bakır ve platin grubu minerallere de sıklıkla rastlanır. 20. Yüzyılın ortalarında Sudbury sülfit yataklarının keşfedilmesi ile araştırmalar Ni-sülfitler üzerine yoğunlaşmış, madencilik sektöründe geliştirilen yeni teknolojiler üretimin artmasını sağlamıştır. Nispeten yüksek tenörlerine karşın, çok küçük rezervleri olan ve daha az öneme sahip olan hidrotemal yataklar ise üçüncü tip olarak verilebilir. Ultramafik kayaçları kesen genç plütonik ve volkanik kayaçlar içinde meydana gelir. Hidrotermal çözeltilerin ultramafik kayaçlardan çözdükleri nikelin kırık ve çatlaklar boyunca yeniden çökelmeleri sonucu bu tip yataklar oluşurlar. Bunlara ek olarak, özellikle Pasifik ve Hint Okyanusu tabanında manganez kabukları ve nodülleri de önemli miktarlarda nikel içermektedir. Sülfit cevherleri çoğunlukla, kabuktan ergimiş magmanın, toprak kabuğuna intrizyonu ve ardışık katılaşma ve/veya hidrotermal liç ve çökelme ile yerel metalzengin sülfit cevher yapısının oluşması ile meydana gelmişlerdir. Bu cevher yapılarında sülfür kaynağı, magmanın kendisinden ya da sülfat olarak bulunan önceden mevcut kaya olmaktadır. Bu cevherler içerisinde en geçerli nikel minerali pentlandittir ($(Ni,Fe)_9S_8$). Pentlandit içerisinde nikelin demire atomik oranı 0,34 ile 2,45 arasında değişkenlik gösterir. Çoğu zaman bu 1-15'dir. Pentlandite eşlik eden mineraller pirotin (Fe_8S_9) ve kalkopirittir ($CuFeS_2$). Kobalt ve platin grubu elementlerde pentlandit içerisinde, çözünmüş ya da ayrı mineral olarak bulunmaktadır. Nikel ve kobalt için çıkarılan sülfür cevherleri tipik olarak %1,5 – %3 Ni ve %0,05 – 0%0,1 Co içermektedir (Crundwell vd., 2011).



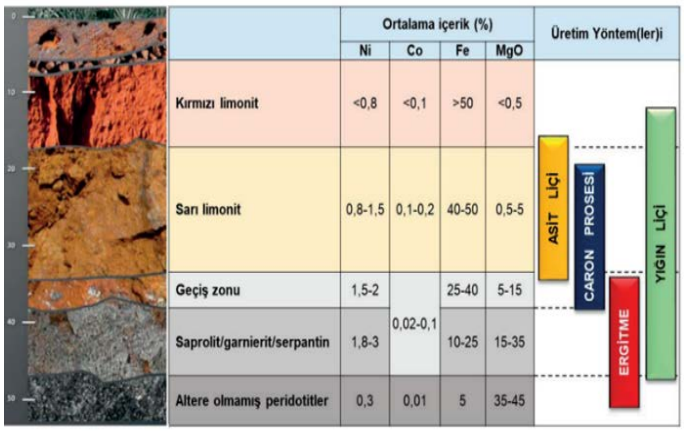
Şekil 5. Ni-laterit ve Ni-sülfit yataklarının dünyadaki dağılımı (Tufan, 2014).

3. NİKEL CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Cevher zenginleştirmede ilk adım, parçalama, yani kırma ve öğütme usulleriyle cevher içindeki mineralleri serbestleşmeye zorlamaktır. Daha sonraki ameliyelerin gayesi de serbestleşen gang mineral tanelerini kıymetli mineral tanelerinden en ekonomik ve randımanlı şekilde ayırmaktır. Pirometalürjik yöntemler ve fiziksel zenginleştirme ile kazanımın teknik açıdan zorluklar çıkarması ve maliyetleri yükseltmesi sebebiyle kimyasal zenginleştirme, endüstride daha geniş bir kullanım alanına sahiptir. Nikel, dünya çapında birçok endüstri alanında kullanılan değerli metallerden biridir. Çelik üretimi, enerji depolama sistemleri, elektrikli araçlar ve birçok başka uygulama, nikelin temel kullanım alanlarını oluşturmaktadır. Ancak nikelin çoğunlukla doğal halde bulunmamaktadır. Cevher biçiminde maden üretimi yapılmaktadır. Nikel cevherinin zenginleştirilmesi, cevherdeki nikel içeriğini artırmayı ve bu cevherin ticari olarak kullanılabilir hale gelmesini sağlamayı amaçlayan karmaşık bir işlem süreci bulunmaktadır. Nikel cevheri, genellikle yer kabuğunda bulunan silikat mineralleri, sülfür

mineralleri ve oksit minerallerinden oluşur. Bu minerallerin başlıcaları arasında lateritik cevherler ve sülfür cevherleri bulunur. Lateritik cevherler, tropikal bölgelerde yoğun olarak yer alırken, sülfür cevherleri daha soğuk iklimlerdeki bölgelerde bulunur (Çiftçi ve Atik, 2014).

Lateritik Cevherler; Yüksek demir ve nikel içeriği ile tanınır ve genellikle oksidasyon sürecine uğramış mineralleri içerir. Bu tip cevherler, nikelin su ve oksijenle reaksiyona girerek zenginleşmiş olduğu cevherlerdir. Lateritik cevherlerde genellikle indirgeyici kavurma işlemini takiben amonyak liçi veya doğrudan basınçlı asit liçi uygulanmaktadır (Yaylalı vd., 2020).



Şekil 6. Tipik lateritik profilindeki tabakaların metal içerikleri (%) ve cevherleşme türüne göre uygulanan üretim yöntemleri (Yaylalı vd., 2020).

Sülfür cevherleri, nikelin sülfür bileşenleri halinde bulunduğu ve genellikle daha yüksek yoğunlukta nikel içeren cevherlerdir. Sülfür cevherleri, daha derin yer altı yataklarında bulunur.

4. LATERİTİK CEVHERLERDEN NİKEL KAZANIMI

Lateritik nikel yatakları yüzeyde ya da yüzeye yakın seviyelerde bulunduğundan ve geniş alana yayıldıklarından açık işletme yöntemiyle

işletilirler. Buna karşın, sülfütik nikel yataklarının yüzeye yakın üst kısımları açık işletmeye uygun olsa da, çoğunlukla yeraltı madenciliği yöntemleriyle işletilir. Çıkarılan cevherden nikel zenginleştirmesi için, cevherin mineralojik yapısına ve yatağın tipine göre seçilen farklı yöntemler uygulanır. Lateritik yataklarda nikel zenginleştirmenin ana amacı, nikeli demir ve magnezyumdan ayırmaktır. Bu amaçla başlıca; hidrometalurjik yöntem, pirometalurjik yöntem veya Caron yöntemi uygulanır. Dünyada yaygın olarak kullanılan hidrometalurjik yöntem pirometalurjik yönteme göre daha ucuzdur bu nedenle nikel içeriği düşük olan lateritik yataklar için daha ekonomiktir (Erdoğan, 2021).

Pirometalurjik ve caron yöntemlerdeki cevheri kurutma ve kavurma aşamaları yüksek maliyetin en önemli nedeni olmaktadır. Sülfürlü nikel yataklar, hidrometalurjik ya da pirometalurjik işlemlerin doğrudan uygulanmasına uygun değildir. Bu nedenle sülfürlü nikel cevherlerinde öğütme sonrasında, flotasyon ve/veya manyetik ayırma yöntemlerinin kullanımı ile zenginleştirme işlemleri yapılmaktadır. Lateritik cevherlerden nikel kazanımı, magnezyum içeriği ve nikel/demir oranına bağlı olarak, hidrometalurjik, pirometalurjik ve hidrometalurjik-pirometalurjik yöntemlerin birlikte uygulanması olmak üzere üç farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Pirometalurjik yöntemler, genellikle düşük demir/nikel oranlı ve düşük rutubetli cevherler için tercih edilen yöntemlerdir. Elektrikli fırınlarda, nikel demirle birlikte indirgenip ferro-nikel alaşımı veya kükürt ilâvesiyle nikel matına ulaşılır. Başlıca döner fırınlarda kurutma, kalsinasyon, ön-indirgeme (kömür veya kokla) ve ark fırınında ergitme işlemlerini içerir. Ayrıca, üretilen alaşıma S ve P gibi elementlerden arıtma uygulanabilir. Elde edilen ferro-nikel adlı ürünün nikel içeriği %20 ile %50 arasında değişmektedir. Bu yöntemde, cürufun ergime noktasını kontrol edebilmek için cevher şarjının demir, magnezyum ve silika

içeriğinin belli oranlarda sabit tutulması çok önemlidir. Bu yöntem, genel olarak düşük nikel içerikli ve demir içeriği %25'den yüksek cevherler için kullanılmaz. (Karadeniz, 2012).

Pirometalurjik yöntemler için uygun olmayan lateritik nikel yatakları için de Caron, Yüksek basınçlı sülfürik asit özütlemesi (HPAL) ve Atmosferik özütleme (Yığın ve karıştırmalı tank özütlemesi) olarak üç tip hidrometalurjik yöntem vardır. Pirometalurjik, hidrometalurjik ve Caron prosesi. Enerji sarfiyatı yüksek olan pirometalurjik metot genellikle, lateritik cevherin saprolit kısmı içerdiğinde, nikel kazanımı için, ferro-nikel üretimi veya mat ergitme prosesi kullanılır. Hidrometalurjik metot genellikle, sülfürik asit ortamında, laterit cevherinin limonitik ve nontronit kısımlarındaki nikel ve kobaltın birlikte yüksek seçici çözünme özelliklerinden yararlanır. Caron prosesi ise metal kazanımı için pirometalurjik ve hidrometalurjik metotları birlikte kullanır (Kaya ve Topkaya, 2011) Genel olarak götit ve kil yapısı içerisinde bağlı olan nikel ve kobalt hidrometalurjik olarak işlenirken, silikatça zengin garniyerit cevherleri pirometalurjik proses ile yüksek karbon ferronikel (kriter:>%2,2 Ni, Fe/Ni oranı=5-6), düşük karbon ferro-nikel (kriter:>%1,5 Ni, Fe/Ni oranı 6-12, yüksek SiO_2) ya da mat (kriter: Fe/Ni oranı >6, SiO_2/MgO oranı 1,8-2,2) üretmek için uygundur **(**McDonald veWhittington, 2008).

4.1. Pirometalurjik Yöntemler

Saprolit cevherleri, düşük miktarda demir içerir (%15), bundan dolayı nikelce zengin ferronikel (%20 – 30 Ni) üretilir ve saprolit önemli miktarda MgO (%20) içerir, eğer sülfürik asit ile liç yapılırsa aşırı miktarda asit tüketir. Bu yüzden ergitme metodu kullanılır. Tipik olarak %30 Ni ve %70 Fe içeren ferronikel, paslanmaz çelik ve diğer demirli alaşımlarda kullanılmak için saprolitlerden genel olarak ergitilirler. Ferronikel içerisinde

kobalt çok düşük miktarlarda bulunur. Küçük miktarda saprolit cevheri, proses esnasında sülfür ekleyerek sülfit matına ergitilir. Bu matın çoğu, oksidasyon ve daha sonra redüksiyon kavurması ile alaşımlarda kullanılacak saflıkta nikel yapılır. Matın bir kısmı yüksek saflıkta nikel ve kobalt üretimi için hidrometalurjik olarak zenginleştirilir. Ferronikel üretimi için laterit cevherlerinin ergitilmesi iki prensibe dayanır.

4.2. Hidrometalurjik Yöntemler

Laterit hidrometalurjisi, sülfürik asit kullanılarak yüksek sıcaklıkta liç ile senede 100.000 ton yüksek saflıkta nikel ve 10.000 ton yüksek saflıkta kobalt üretiminin yapılmasını sağlar. Laterit hidrometalurjisi, limonit ve smektit cevherlerin liçine dayanır. Bu cevherler yüksek demir ve düşük MgO içeriğine sahiptir. Nikel, kobalt, demir ve magnezyum gibi elementleri kapsamlı bir şekilde kazanabilme avantajından dolayı, nikel laterit prosesi için asit liçi birincil teknoloji haline gelmiştir. Lateritik cevherlerden değerli metallerin kazanımı için asidik çözelti içerisinde mineral çözünürlük davranışını tespit etmenin önemli olduğu vurgulanmıştır. Hidrometalurjide H+'nın aktivitesi reaktiviteyi yönetir. Asit liçi sırasında, götit içerisindeki nikel bağı, asit atağı ile katı matriksten serbest bırakılır. Limonit cevherinde ise götit, sıcak sülfürik asit içerisinde etkili bir şekilde çözülür ve eğer sıcaklık yeteri kadar yüksekse cevherin yaklaşık %40'ını oluşturan demir, hematit ya da jarosit olarak çöker. Laterit cevherlerinin hidrometalurjik prosesinde genellikle yüksek basınç asit liçi (HPAL) teknolojisi uygulansa da bu tür projelerin artan maliyetleri şirketleri başka teknolojiler denemeye yönlendirmektedir. AL prosesi daha düşük yatırım maliyetine sahiptir. Nikel laterit cevherleri, yığın liçi (HL) prosesi ile de uygun maliyetli olarak işlenebileceği ifade edilmiştir. Fakat HL prosesi HPAL prosesine göre cevher mineralojisine daha duyarlıdır. Aynı maden ocağında olmalarına

rağmen benzer cevherler farklı yığın liçi performansı ve aynı mineralojik kompozisyona sahip olsalar da oldukça farklı atmosferik basınç liçi (AL) performansı gösterdikleri ifade edilmiştir (Wang vd., 2014). Örneğin bir çalışmada, beş farklı bölgeden temin ettikleri oksit tip lateritik nikel numunelerinde götiti ana faz olarak tespit etmişlerdir. Götitlerin çözünürlük hızları arasındaki farkın nedeni olarak, tane morfolojisi farklılığı, yapısal düzen ve çeşitli yer alan metaller (Al ve Cr) olabileceği ifade edilmiştir. Al ya da Cr içeren götitlerin çözünürlüklerinin düşük olmasını Fe3+-OH/O'ya nazaran M3+-OH/O (M=Al, Cr) bağ mukavemetinin daha yüksek olmasına dayandırmışlardır (Landers vd., 2009).

Hidrometalurji yöntemi ayrıca hurdadan nikel kazanımında da kullanılan bir yöntemdir. Dünyada metallere olan artan talep, metallerin düşük tenörlü cevherlerden ve/veya ikincil kaynaklardan elde edilmesi için yoğun çalışmalara neden olmuştur. Nikelin ikincil kaynaklardan ekstraksiyonu harcanmış katalizörlerden, uçucu külden, kazan külünden gerçekleştirilebilir. Abdel-Aal ve Rashad harcanmış katalizörü sülfürik asit ile liçini çalışarak nikel elde etmeye çalışmışlardır. -200+270 mesh tane boyut, 85°C sıcaklık, 150 dk liç süresi, %50 sülfürik asit konsantrasyonu ve katı sıvı oranı 1:20 g/mL koşullarında %94 verim elde edildiği belirtilmiştir. Nikel çözünme reaksiyonunu yüzey kimyasal kontrollü olarak belirtmişlerdir. Gharabaghi ve arkadaşları İran çinko tesisi atığından nikel eldesi üzerinde liç zamanı, sıcaklığı, H_2SO_4 konsantrasyonu, katı/sıvı oranı ve tane boyutu gibi parametreleri çalışmışlardır. Liç zamanının, sıcaklığın, asit konsantrasyonunun artmasıyla, katı/sıvı oranının ve partikül boyutunun düşürülmesi ile Ni veriminin arttığı ifade edilmiştir. -250 µm boyutundaki atığın hacimce %8 H_2SO_4 ile katı:sıvı oranı 0,10'da 30 dk. liçi ile %95 Ni verimi elde etmişlerdir. Reaksiyonun difüzyon kontrollü olduğunu bildirmişlerdir (Gharabaghi vd., 2013). Sheik arkadaşları ise harcanmış

katalizörden nikel eldesini nitrik asit kullanarak çalışmışlardır. 75 μm altındaki tane boyutu için, çözünme reaksiyonunun yüzey kontrollü olduğu, daha büyük tane boyutu için ise ürün tabakası nedeniyle reaksiyonun difüzyon kontrollü olduğunu belirtmişlerdir (Sheik vd., 2013).

4.3. Caron Yöntemi

Caron yöntemi, lateritik nikel cevherlerinden nikel ve kobalt üretiminde kullanılan pirometalurjik ve hidrometalurjik işlemleri içeren bir yöntemdir. Bu yöntemde öğütülmüş cevher, indirgen atmosferde kavrularak içeriğindeki nikel ve kobalt metale indirgenir. Daha sonra indirgenmiş cevher, amonyak ve amonyum karbonat içeren çözeltiyle düşük sıcaklık ve atmosferik basınç altında liç edilir. Bu aşamada nikel ve kobalt kompleks amin bileşikleri oluşturarak çözünürken, demir çökelir. Liç sonrası çözelti içerisindeki amonyak uzaklaştırılır ve nikel karbonat çökeltilir. Bu çökelti kalsine edilerek nikel okside dönüştürülür. Son aşamada, nikel oksit indirgenerek yaklaşık %99,5 saflıkta metalik nikel elde edilir.

Caron yöntemi; Yabulu (Avustralya), Nicaro ve Punta-Gorda (Küba) gibi tesislerde uygulanmaktadır (Karadeniz, 2012). Yöntemin en kritik basamağı, redüksiyon kavurmasıdır. Bu işlemde öğütülmüş cevher 700–850 °C'de kuvvetli indirgen ortamda yaklaşık 90 dakika kavrulur. Bu sıcaklıkta amorf magnezyum silikatlar yeniden kristallenerek forsterit (Mg_2SiO_4) oluşturur. Bu kristallenme sırasında nikelin indirgenmesi sınırlıdır. Limonitik cevherler 850 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda indirgenebilirken, garnieritik nikel silikatların indirgenmesi daha zordur. Bu işlem sırasında nikel ve kobalta ek olarak demirin de yaklaşık %10'u indirgenir. Soğutulan indirgenmiş cevher, amonyak çözeltisi içeren liç tanklarına alınır. pH=10 seviyesindeki bazik ortamda nikel ve kobalt amin kompleksleri oluşturarak çözünür; bu durum, hidrolizi önler. Demir ise ferrik

forma oksitlenerek hızla çökelir. Çözeltiden katı faz, ters akımlı çöktürücülerde ayrılır. Kobalt sülfür formunda çöktürülerek uzaklaştırılır. Ardından, nikel çözeltisinden buharla ısıtarak amonyak ve karbondioksit uzaklaştırılır, nikel karbonat çökeltilir. Elde edilen çökelti koyulaştırma ve filtreleme işlemleriyle ayrılır. Caron yöntemi yüksek enerji maliyetine sahip olmakla birlikte, özellikle MgO içeriği yüksek lateritik cevherlerin işlenmesine uygundur (Yıldırım, 2012).

4.3.1. *İndirgeme-kavurma, amonyak liçi*

Lateritik oksit cevherleri, nikel ve kobaltın önemli birincil kaynaklarından birisidir. Caron prosesi lateritik tip cevherlerden nikel ve kobalt ekstraksiyonu için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu proses, 1920'li yıllarda keşfedilmesine rağmen 1944 yılına kadar ticari olarak kullanılmamıştır. Caron prosesi, yüksek demir içeren limonitik cevherler ya da limonit ve saprolit karışımı cevherler için kullanılmaktadır. Kurutma ve öğütme, indirgeme-kavurma, amonyak liçi ve metal kazanımı aşamalarını kapsamaktadır. İlk olarak, cevherin su içeriğinin % 30-50'den % 2-3'e düşürülmesi için direkt olarak döner fırında kurutma işlemine tabi tutulur. Bu işlemin ardından, cevher değirmende yaklaşık 74 μm oluncaya kadar öğütülür. Öğütülen cevher sonra, kavurma işlemine tabii tutularak 850°C bir indirgeyici gaz veya fuel-oil ile indirgenir. Kavurma reaksiyonu Monhemius tarafından $NiO+ 2Fe_2O^3+3H_2 \rightarrow FeNi+Fe_3O^4+3H_2O$ olarak denklem haline getirilmiştir (Ağaçayak, 2008).

4.3.2. *Yüksek basınçlı asit liçi (High Pressure Asid Leaching - HPAL)*

Caron yöntemindeki yüksek enerji tüketen basamakları devre dışı bırakmak için geliştirilmiştir. Boyutlandırılmış cevher önce yüksek basınç ve sıcaklıkta sülfürik asitli ortamda çözülür ve çözünen demirin hematit

şeklinde çökmesi sağlanarak asit tüketimi kontrol altında tutulur. Daha sonra metallerle yüklü çözelti kireç taşı ile nötrleştirme ve demir çöktürme işlemine tabi tutulur. Çözeltiyi kirleten alüminyum, krom ve birinci arıtma aşamasında çöktürülemeyen demir kalsiyum hidroksitle ikinci aşamada çöktürülür. Arıtımış çözeltiden nikel ve kobalt magnezyum oksitle çöktürülerek nikel ve kobalt hidroksit (MHP) elde edilir. MHP üretimini çözeltiden manganezin çöktürülmesi işlemi takip eder. Eğer çöktürme işlemi hidrojen sülfür gazı ile yapılacak olursa nikel kobalt sülfür (MSP) elde edilir. Bu yöntem asit tüketimi yüksek cevherler için yaygın bir şekilde geçmişte kullanılmış, şu anda kullanılan ve gelecekte kullanılması plânlanan bir yöntemdir. Moa Bay (Küba), Murrin Murrin, Cawse ve Bulong, Ravensthorpe (Avustralya), Carol Bay (Filipinler), Goro (Yeni Kaledonya), Ramu (Papau Yeni Gine), Ambatovy (Madagaskar) bu yöntemin seçildiği önemli projelerdir (İMİB, 2020).

HPAL prosesi, 255°C sıcaklık ve 46 bar basınç altında titanyum alaşımlı otoklav reaktöründe nikel ve kobaltın seçimli çözünmesi için uygulanan son nesil bir teknolojidir. Limonit ve smektit cevherleri, genellikle yaklaşık 250°C sıcaklıkta 40 bar basınçta sıcak sülfürik asit ile liç edilir. Bu proses sıklıkla, yüksek basınç asit liçi ya da HPAL prosesi olarak adlandırılır. Büyük ölçekli bir üretimde, sıvı-katı oranının yüksek tutulması durumunda, kullanılan asit miktarı düşünüldüğünde, ekonomiklik bakımından yüksek oranların uygun olmayacağı düşünülmektedir. Bundan dolayı verimlerdeki bu minimal artış göz önünde bulundurulduğunda sıvı-katı oranı 30 ve 40 elimine edilmiştir. Sıvı-katı oranı 10'dan düşük oranlarda ise katı miktarının çok olmasından dolayı, homojen bir karışım yerine çamurlaşma meydana gelmekte, liç sisteminde yeterli karıştırma ve liç sonrası süzme işlemlerinde zorluklar yaşanmaktadır (Parlak, 2017).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemiz madencilik açısından zengin sayılabilecek ülkelerden biridir. Birçok maden çeşidi bulunduğu gibi, stratejik maden rezervleri de bulunmaktadır. MAPEG verilerine göre Üretimler incelendiğinde yıllar itibari ile nikel üretiminde 2017-2023 yıları arasında olağan üretim artışları gözlenmemiştir. Sınırlı bir üretim yaptığımız anlaşılmaktadır. Kaynaklarımızın en iyi şekilde değerlendirilmesi ve üretimlerimizin artırılması gerekmektedir. Nikel cevherinin en iyi şekilde değerlendirilmesi içinde zenginleştirme yöntemleri incelenerek uygun olanlar seçilmeli tüm ayrıntılar ele alınmalıdır.

Nikel madenciliği ve zenginleştirme yöntemleri, cevherin türüne ve mineralojik yapısına bağlı olarak farklı tekniklerle yapıldığı görülmüştür. Lateritik nikel yatakları genellikle açık işletme yöntemiyle çıkarıldığı, bu yataklar yüzeye yakın ve geniş alanlara yayıldığına ulaşılmıştır. Sülfürlü nikel yatakları ise çoğunlukla yeraltı madenciliğiyle işletildiği, bu yatakların üst kısımları bile açık işletmeye uygun olsa da, derin kısımlar yeraltı madenciliği yapılmaktadır. Lateritik yataklarda nikel zenginleştirmede amaç, nikeli demir ve magnezyumdan ayırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla üç ana yöntem kullanılır: hidrometalurjik yöntem, pirometalurjik yöntem ve Caron yöntemi. Hidrometalurjik yöntem, pirometalurjik yönteme göre daha düşük maliyetli olduğuna ulaşılmıştır. Bu da bize düşük nikel içeren yataklar için daha ekonomik bir seçenek sunmaktadır. Pirometalurjik ve Caron yöntemlerinde ise cevherin kurutulması ve kavrulması aşamaları yüksek maliyetli olduğu için bu yöntemler daha pahalı olmaktadır. Sülfürlü nikel yataklarında ise, direk olarak hidrometalurjik veya pirometalurjik işlemler yapılamaz. Bu sebepten dolayı, sülfürlü nikel cevherlerinde önce cevher öğütülür, ardından flotasyon ve/veya manyetik ayırma gibi yöntemlerle

zenginleştirme yapılabilmektedir. Nikel cevherinin zenginleştirilmesinde yeni teknolojik gelişmelerde kullanılmaktadır. Ülkemizde de yüksek basınçlı asit liçi (HPAL) ile de nikel elde edilmektedir.

Nikel cevherinin zenginleştirilmesi, nikelin endüstriyel kullanımının artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Gelecekte, daha çevre dostu ve enerji verimli zenginleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi beklenmektedir. Nanoteknolojik yenilikler, zenginleştirme süreçlerinde önemli avantajlar yaratabilir ve nikel üretiminde daha sürdürülebilir uygulamaların önünü açacağı aşikardır. Kıymetli minerallerden nikel cevherinin zenginleştirilmesi ile birçok kazanımlar elde edilmektedir. Bu kazanımlardan en önemlileri; Kompleks yapıya sahip düşük tenörlü cevherlerden zenginleştirme yapılarak nikel elde edilmektedir. Nikel üretimi esnasında kompleks yapının içinde yer alan diğer madenlerde değerlendirilerek artı kazanç elde edilmektedir.

Günümüzde elektrikli araçların kullanımı artığı için lityum batarya yapımında nikele olan ihtiyaç da artmıştır. Ülkemizde yerli elektrikli araçlar üretildiğinden dolayı nikel ihtiyacının yerli kaynaklarımızdan karşılanması dışa bağımlılığı azaltacağı gibi rekabet gücünü de artıracak, stratejik katkıda sağlayacaktır. Dünya genelinde nikele olan ihtiyaç sürekli artacağı için nikel üretimimizin artması ile ihraç edilerek ekonomik girdi de sağlanabilecektir. Nikelin kullanım alanları olarak otomotiv, çelik ve enerji sektörlerinde çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanıldığı, yerli nikel madenlerinin işletilmesi ülkemizin sanayi üretimine de katkı sağlayacaktır. Teknolojik araştırmalara imkân sunacaktır. Yerli üretimle beraber dışa olan bağımlılık azalmasıyla nikel olan ihtiyaç da tedarik zincirinde kopmalar yaşanmayacak ve dünya genelinde konulabilecek maden kotaların dan etkilenmeyecektir. Ülke ekonomimize katkı sağlamakta. Madencilik alanında nikel cevherine olan

ihtiyacımız karşılanmaktadır. Dışa olan bağımlılığımız azalmakta kendi madenlerimiz değerlendirilebilmektedir.

Nikel aynı zaman stratejik öneme sahip madenlerden sınıfında yer aldığı için en iyi şekilde değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Nikel cevherinin zenginleştirilmesi, sadece nikelin üretimini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bu değerli metalin çevresel etkilerini de azaltmaya yardımcı olacaktır. Bu süreçlerin iyileştirilmesi, sadece endüstriyel verimliliği değil, aynı zamanda çevre dostu üretim yöntemlerinin yaygınlaşmasını sağlayacaktır. Çevre sorunlarının azaltılmasına da katkı sağlayacaktır. Madencilik üzerinde de olumlu algı yaratacaktır.

KAYNAKLAR

Ağaçayak, T., 2008. Karaçam (Eskişehir) lateritik nikel cevherinin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle zenginleştirilmesi. Doktora Tezi Selçuk Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G., 2011. Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinumgroup metals. Elsevier Ltd., 1 – 610.

Çiftçi, H., Atik, S.,& Gürbüz, F., 2016. Lateritik nikel cevherinin asidofilik bakteriler ile biyoliçi. Pamukkale Üniv. Müh. Bilim Derg., 22(6), 546-552.

Çiftçi, H., & Atik, S., 2014. Lateritik cevherlerden nikel kazanımında biyoliç yöntemi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 30(4):275-284, Cilt 30, Sayı 4.

Dağlı, F., 2019. Altın cevheri zenginleştirme tesisindeki çöktürme havuzu artığının değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Bitirme Tezi, İzmir.

MTA, 2018. Dünyada ve Türkiye'de nikel. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Maden Tetkik Arama, Ankara.

ETKB, 2024. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. https://enerji.gov.tr/tabii-kaynaklar-nikel. Erişim tarihi: 30.12.2024.

Erdoğan, Y., 2021. Bataryaların vazgeçilmezi: nikel. Madencilik ve Yerbilimleri Dergisi, 99: 94-98.

Eroğlu, G., & Akgök, Y., Z., 2019. Dünyada ve Türkiye'de nikel. Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, MTA.

Gharabaghi, M., Irannajad, M., & Azadmehr, A. R., 2013. Leaching kinetics of nickel extraction from hazardous waste by sulphuric acid and optimization dissolution conditions. Chemical Engineering Research and Design, 91(2): 325-331.

İMİP, 2020. Nikel yataklarının durumu, işletmeciliği ve geleceği. İstanbul Maden İhracatçılar Birliği. https://imib.org.tr/wp-content/uploads/nikel.pdf Erişim tarihi: 27.04.2025.

Karadeniz, M., 2012. Nikel raporu. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, ISBN: 978-605-01-0430-1, Ankara.

Kasap, S., 2007. Amonyaklı çözeltilerden nikelin sıvı membran prosesiyle selektif olarak ayrılması ve zenginleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.

Kaya, Ş., & Topkaya, Y.A., 2011. High pressure acid leaching of a refractory lateritic nickel ore. Minerals Engineering, 24(11): 1188 – 1197.

Khoo, J. Z., Haque, N., & Bhattacharya, S., 2017. Process simulation and exergy analysis of two nickel laterite processing technologies. International Journal of Mineral Processing 161: 83 – 93.

Landers, M., Gilkes, R. J., & Wells, M., 2009. Dissolution kinetics of dehydroxylated nickeliferous goethite from limonitic lateritic nickel ore. Applied Clay Science, 42(3–4): 615 – 624.

MAPEG, 2025. Maden üretim değerleri, metalik maden üretimleri (ton), nikel üretimi(tüvenan). Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik Erişim tarihi: 27.04.2025.

McDonald, R.G., & Whittington, B.I., 2008. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review: Part I. Sulphuric acid technologies. Hydrometallurgy, 91(1– 4): 35-55.

USGS, 2025. National Minerals Information Center. https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information Erişim tarihi: 27.04.2025.

Oxley, A., Smith, M. E., & Caceres, O., 2016. Why heap leach nickel laterites? Minerals Engineering, 88:53–60.

Öztürk F., 2012. Havacılıkta nikel esaslı süper alaşımlar. Haber Airo, https://haber.aero/yazarlar/fahrettin-ozturk/havacilikta-nikel-esasli-super-alasimlar/ Erişim tarihi: 27.04.2025.

Parlak,. T. T., 2017. Lateritik nikel cevherinden nikel ve kobalt kazanım koşullarının geliştirilmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Sheik, A. R., Ghosh, M. K., Sanjay, K., Subbaiah, T., & Mishra, B. K., 2013. Dissolution kinetics of nickel from spent catalyst in nitric acid medium. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 44(1): 34-39.

Topkaya, Y., A., Büyükakıncı, E., & Köse, H., C., 2009. Lateritik nikel yataklarından nikel ekstraksiyonu, Proje No: 106M079, Ankara.

Tufan, E. A., 2014. Ni-Lateritlerin oluşumu ve özellikleri. BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi, Cilt 16(2) 68-78.

Wang, X., McDonald, R. G., Hart, R. D., Li, J., & Van Riessen, A., 2013. Acid resistance of goethite in nickel laterite ore from Western Australia. Part I. The relationship between goethite morphologies and acid leaching performance. Hydrometallurgy, 140: 48-58.

Yaylalı, B., Yazıcı, E., Y., Celep, O., & Deveci, H., 2020. Kritik metal konumundaki kobaltın birincil ve ikincil kaynaklardan üretimi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 59(1), 35-50.

Yıldırım. H., 2012. Yerel lateritik nikel cevherlerinden nikel pik demir (npd) üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Zhu, D. Q., Cui, Y., Vining, K., Hapugoda, S., Douglas, J., Pan, J., & Zheng, G. L., 2012. Upgrading low nickel content laterite ores using selective reduction followed by magnetic separation. International Journal of Mineral Processing, 106–109:1–7.

DEĞERLİ METAL MADENCİLİĞİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR KİMYASAL YÖNETİM SİSTEMLERİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE UYGULAMALAR

SUSTAINABLE CHEMICAL MANAGEMENT SYSTEMS IN PRECIOUS METAL MINING: CURRENT APPROACHES AND PRACTICES

Mehmet Osmanoğlu
Gümüştaş Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul

ÖZ: Bu derleme çalışması, değerli metal madenciliğinde sürdürülebilir kimyasal yönetim sistemlerini sistematik bir yaklaşımla incelemektedir. Madencilik sektöründe artan güvenlik gereksinimleri ve yasal düzenlemeler, kimyasal yönetim sistemlerinin kapsamlı bir şekilde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Çalışmada, değerli metal madenciliğinde kimyasal maddelerin güvenli yönetimi için gerekli olan temel sistemler ve uygulama prensipleri değerlendirilmiştir. Kimyasal maddelerin depolanması, taşınması ve kullanımı süreçlerindeki güvenlik protokolleri ve standartlar sistematik olarak incelenmiştir. Kimyasal yönetim sistemlerinin temel bileşenleri olan envanter kontrolü, güvenli depolama sistemleri, acil durum müdahale planları ve personel eğitimi konuları entegre bir yaklaşımla analiz edilmiştir. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında risk değerlendirme metodolojileri ve koruyucu önlemler detaylı olarak ele alınmıştır. Tehlikeli kimyasalların yönetiminde kritik rol oynayan dokümantasyon sistemleri, etiketleme standartları ve kişisel koruyucu donanım gereksinimleri çalışmanın önemli bileşenlerini oluşturmaktadır. Acil durum senaryoları ve müdahale yöntemleri, kimyasal madde kazalarına karşı hazırlıklı olunması bağlamında kapsamlı şekilde incelenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma değerli metal madenciliğinde kimyasal güvenliğin sağlanması için sistematik ve risk-bazlı bir yaklaşımın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Sunulan bilgiler, sektör profesyonellerine güvenli kimyasal yönetim sistemlerinin kurulması ve geliştirilmesi için temel bir referans kaynağı niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Değerli Metal Madenciliği, Kimyasal Yönetim Sistemleri, Risk Yönetimi, İş Güvenliği

ABSTRACT: *This review study examines sustainable chemical management systems in precious metal mining through a systematic approach. Increasing*

safety requirements and regulatory frameworks in the mining sector necessitate a comprehensive approach to chemical management systems. The study evaluates the fundamental systems and implementation principles required for the safe management of chemicals in precious metal mining. Safety protocols and standards in chemical storage, transportation, and usage processes have been systematically examined. The core components of chemical management systems, including inventory control, secure storage systems, emergency response plans, and personnel training, have been analyzed through an integrated approach. Risk assessment methodologies and protective measures within the scope of occupational health and safety have been addressed in detail. Documentation systems, labeling standards, and personal protective equipment requirements, which play critical roles in hazardous chemical management, constitute significant components of the study. Emergency scenarios and response methods have been comprehensively examined in the context of preparedness against chemical incidents. In conclusion, this study demonstrates the necessity of a systematic and risk-based approach to ensuring chemical safety in precious metal mining. The information presented serves as a fundamental reference source for industry professionals in establishing and developing safe chemical management systems.

Keywords: *Precious Metal Mining, Chemical Management Systems, Risk Management, Occupational Safety*

1. GİRİŞ

Değerli metal madenciliğinde kimyasal yönetim sistemleri, operasyonel sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluğun temelini oluşturmakla birlikte, endüstriyel güvenlik paradigmasının da kritik bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Sektörde kullanılan tehlikeli kimyasalların yönetimi, uluslararası standartlar ve iyi uygulama örnekleri ışığında sürekli gelişim göstermektedir (Anderson vd., 2023; ICMM, 2023). Ekstraksiyon proseslerinde kullanılan reaktiflerin güvenli yönetimi, çevresel etki değerlendirmesi ve risk minimizasyonu açısından sektörün öncelikli konuları arasında yer almaktadır (Thompson ve Roberts, 2023; WHO, 2023).

Madencilik operasyonlarında entegre risk yönetimi yaklaşımı, tehlikeli kimyasalların tedarik zincirinden nihai bertarafına kadar olan yaşam döngüsü boyunca sistematik değerlendirmeleri kapsamaktadır. Martinez ve arkadaşlarının (2022) gerçekleştirdiği çok merkezli araştırma, sistematik risk değerlendirmesi uygulayan tesislerde kimyasal kaynaklı olayların insidansında önemli bir azalma olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, risk değerlendirme metodolojilerinin standardizasyonu ve sürekli iyileştirme programlarının implementasyonu, sektörel güvenlik performansının optimizasyonunda kritik öneme sahiptir (NIOSH, 2023).

Uluslararası regülasyonlar perspektifinden değerlendirildiğinde, Küresel Uyumlaştırılmış Sistem (GHS) ve Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması (ADR) düzenlemeleri çerçevesinde şekillenen kimyasal yönetim uygulamaları, SEVESO III direktifleriyle entegre edilerek kapsamlı bir yönetim sistemi oluşturmaktadır (UN, 2023). Bu entegrasyon, operasyonel mükemmellik ve sürdürülebilir madencilik pratiklerinin geliştirilmesinde katalizör görevi görmektedir (Zhang ve Lee, 2023).

Tehlike iletişimi ve acil durum müdahale protokolleri bağlamında, NFPA 704 ve HMIS sistemlerinin implementasyonu, proaktif risk yönetimi stratejilerinin temelini oluşturmaktadır (Henderson vd., 2023). İş sağlığı ve güvenliği perspektifinden, kişisel koruyucu donanım seçimi ve kullanımı, EN 374, EN 166 ve EN 14387 gibi harmonize standartlara dayanmaktadır (ISO, 2018). Wilson ve Park'ın (2023) geliştirdiği risk bazlı KKD seçim metodolojisi, kimyasal karakterizasyonu, maruziyet senaryoları ve operasyonel parametreleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektedir.

Sürdürülebilir kimyasal yönetiminin operasyonel boyutunda, periyodik sistem auditleri, kök neden analizleri ve performans metriklerinin sürekli monitorizasyonu yer almaktadır (ILO, 2023). Rodriguez ve Chen'in

(2023) meta-analizi, bu sistemlerin implementasyonunun çevresel uyum oranlarını %92 seviyesine yükselttiğini ve operasyonel maliyetlerde %25'e varan optimizasyon sağladığını ortaya koymaktadır.

Kimyasal depolama altyapısının tasarımı ve yönetimi, uyumsuz kimyasalların segregasyonu, mikroklimatik parametrelerin kontrolü ve sekonder kontaminasyon bariyerlerini içeren multidisipliner bir yaklaşım gerektirmektedir (ECHA, 2023; MAC, 2023). HAZMAT ekiplerinin organizasyonu ve simülasyon bazlı tatbikat programları, acil durum müdahale kapasitesinin güçlendirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Bu çalışma, değerli metal madenciliğinde sürdürülebilir kimyasal yönetim sistemlerinin teorik çerçevesini, operasyonel uygulamalarını ve performans optimizasyonu stratejilerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma metodolojisi, sektördeki iyi uygulama örneklerinin sistematik analizini ve kanıta dayalı önerilerin geliştirilmesini hedeflemektedir. Çalışmanın sonuçlarının, kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğinin artırılmasına ve sürdürülebilir madencilik pratiklerinin geliştirilmesine katkı sağlaması öngörülmektedir.

2. MALZEME ve YÖNTEM

Bu araştırma, değerli metal madenciliğinde sürdürülebilir kimyasal yönetim sistemlerinin sistematik analizini amaçlayan çok aşamalı bir metodolojik yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın metodolojik çerçevesi, nitel ve nicel araştırma yöntemlerinin entegrasyonuna dayanan karma bir araştırma deseni üzerine kurgulanmıştır.

Araştırmanın ilk aşamasında literatür incelemesi yapılmıştır. Son 8 yılın indeksli akademik dergilerde yayımlanmış çalışmalar, sistematik

literatür taraması protokolü çerçevesinde incelenmiştir. Araştırmada 200'den fazla bilimsel yayın incelenmiş ve bulgularından yararlanılmıştır.

Araştırmanın ikinci fazında, ulusal ve uluslararası madencilik sektöründe uygulanan kimyasal yönetim sistemleri incelenmiştir. Bu kapsamda ulusal ve uluslararası değerli madencilik firmaları verileri üzerinde derleme ve görüşler toparlanmıştır. Bu veriler ve uygulamalar ışığında değerli metal madenciliğinde güvenli kimyasal yönetimi kurgusu yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Uluslararası standartlar ve endüstriyel iyi uygulama örnekleri referans alınarak oluşturulmuştur. Sistemin etkinliği, bileşenlerin entegrasyonu ve sürekli iyileştirme yaklaşımının benimsenmesi ile doğrudan ilişkilidir. Araştırma bulguları, bu sistematik yaklaşımın kimyasal yönetiminde operasyonel mükemmelliği ve sürdürülebilir performansı desteklediğini göstermektedir.

3.1. Yönetsel Organizasyon ve Dokümantasyon

3.1.1. *Politika ve prosedürlerin oluşturulması*

Kimyasal yönetim sistemlerinin temelini oluşturan politika ve prosedürler, organizasyonun stratejik hedefleri doğrultusunda geliştirilmelidir. Bu bağlamda, kimyasal yönetim politikası, organizasyonun çevresel sürdürülebilirlik, iş sağlığı ve güvenliği gibi alanlardaki taahhütlerini ve stratejik hedeflerini kapsamalıdır. Politika dokümanları, organizasyonun tüm seviyelerinde anlaşılır ve erişilebilir olmalıdır. Prosedürler ise, kimyasal maddelerin yaşam döngüsünün her aşamasını kapsayacak şekilde detaylandırılmalı ve operasyonel süreçlerin standardizasyonunu

sağlamalıdır. Örnek olarak aşağıdaki gibi konu başlıklarında politikaların oluşturulması fayda sağlayacaktır.

- ✓ Kimyasal Güvenlik Politikası
  - ❖ Kuruluşun kimyasal güvenlik konusundaki genel taahhütleri
  - ❖ Çevresel sürdürülebilirlik ve iş sağlığı ve güvenliği hedefleri
  - ❖ Yasal uyum ve etik standartlar
- ✓ Çevre Politikası
  - ❖ Çevresel etkilerin minimize edilmesi
  - ❖ Atık yönetimi ve geri dönüşüm stratejileri
  - ❖ Enerji ve kaynak verimliliği
- ✓ İş Sağlığı ve Güvenliği Politikası
  - ❖ Çalışanların sağlığını ve güvenliğini koruma taahhütleri
  - ❖ Risk değerlendirme ve kontrol önlemleri
  - ❖ Eğitim ve farkındalık programları

Tüm çalışanların politika ve prosedürleri bilmesi, uygulaması ve benimsemesi sağlanmalıdır. Çalışan katılımı ile doğru ve efektif şekilde sürdürülebilir bir kimyasal yönetimi söz konusu olacaktır.

3.1.2. *Görev, yetki ve sorumlulukların tanımlanması*

Organizasyonel yapı, kimyasal yönetim süreçlerinin etkinliğini doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu nedenle, organizasyon şeması, kimyasal yönetimle ilgili tüm görevlerin, yetkilerin ve sorumlulukların açıkça tanımlandığı bir yapıda olmalıdır. Her bir çalışanın rolü ve sorumlulukları net bir şekilde belirlenmeli ve bu bilgiler, organizasyonel iletişimi ve işbirliğini destekleyecek şekilde dokümante edilmelidir. Yetki matrisi, karar

alma süreçlerinde kimin hangi yetkilere sahip olduğunu belirlemeli ve bu yetkilerin sınırlarını açıkça tanımlamalıdır.

3.1.2.1 *Görev tanımları*

- ✓ Görev Tanımlama: Her bir pozisyon için detaylı görev tanımları oluşturulmalıdır. Bu tanımlar, çalışanların günlük iş akışlarını ve kimyasal yönetim süreçlerindeki rollerini açıkça belirtmelidir.
- ✓ İş Akışları: Kimyasal yönetimle ilgili süreçlerin iş akışları belirlenmeli ve bu akışlar, görev tanımlarıyla uyumlu olmalıdır. İş akışları, süreçlerin etkinliğini artırmak için optimize edilmelidir.

3.1.2.2 *Yetki tanımları*

- ✓ Yetki Matrisi: Kimyasal yönetim süreçlerinde karar alma yetkisine sahip kişilerin belirlenmesi için bir yetki matrisi oluşturulmalıdır. Bu matris, her bir pozisyonun hangi kararları alabileceğini ve hangi süreçlerde yetki sahibi olduğunu göstermelidir.
- ✓ Yetki Sınırları: Her bir pozisyonun yetki sınırları net bir şekilde tanımlanmalı ve bu sınırlar, organizasyonel hiyerarşi ve sorumluluklarla uyumlu olmalıdır.

3.1.2.3 *Sorumluluk tanımları*

- ✓ Sorumluluk Alanları: Her bir çalışanın kimyasal yönetim süreçlerindeki sorumluluk alanları belirlenmelidir. Bu sorumluluklar, çalışanların hangi görevlerden sorumlu olduğunu ve bu görevlerin sonuçlarından nasıl hesap vereceklerini içermelidir.
- ✓ Hesap Verebilirlik: Sorumluluk tanımları, çalışanların performans değerlendirmeleri ve hesap verebilirlik mekanizmaları ile

desteklenmelidir. Bu, çalışanların görevlerini yerine getirirken sorumluluk bilinciyle hareket etmelerini sağlar.

3.1.2.4 *İletişim ve koordinasyon*

- ✓ İletişim Kanalları: Görev, yetki ve sorumlulukların etkin bir şekilde yerine getirilmesi için açık iletişim kanalları oluşturulmalıdır. Bu kanallar, çalışanlar arasında bilgi akışını ve işbirliğini kolaylaştırmalıdır.
- ✓ Koordinasyon Mekanizmaları: Farklı departmanlar ve ekipler arasında koordinasyonu sağlamak için mekanizmalar geliştirilmelidir. Bu, kimyasal yönetim süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla yönetilmesine yardımcı olur.

3.1.2.5 *Eğitim ve farkındalık*

- ✓ Eğitim Programları: Çalışanların görev, yetki ve sorumluluklarını etkin bir şekilde yerine getirebilmeleri için düzenli eğitim programları düzenlenmelidir. Bu programlar, kimyasal yönetimle ilgili bilgi ve becerilerin geliştirilmesine odaklanmalıdır.
- ✓ Farkındalık Kampanyaları: Çalışanların sorumluluklarının farkında olmalarını sağlamak için farkındalık kampanyaları düzenlenmelidir. Bu kampanyalar, kimyasal güvenlik ve yönetim konularında bilinç düzeyini artırmayı hedefler.

3.1.3. *Yasal gerekliliklerin takibi ve uyum süreçleri*

Yasal uyum takibi, kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak için vazgeçilmez bir unsurdur. Ulusal ve uluslararası mevzuatların titizlikle takip edilmesi ve bu düzenlemelere uyum sağlanması, işletmelerin sadece yasal yükümlülüklerini yerine getirmelerini değil, aynı zamanda çevresel ve toplumsal sorumluluklarını da yerine

getirmelerini sağlar. Bu bağlamda, yasal uyum süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, kimyasal yönetim sistemlerinin başarısını ve güvenilirliğini artıran temel bir faktördür. Ulusal ve uluslararası bazı yasal düzenlemeler aşağıda verilmiştir.

3.1.3.1. *Kimyasal maddelerle çalışmalarda sağlık ve güvenlik önlemleri hakkında yönetmelik*

Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmeği, işyerlerinde kimyasal güvenliğin sağlanması için kapsamlı bir çerçeve sunar. Yönetmelik, işverenlerin ve çalışanların sorumluluklarını net bir şekilde tanımlayarak, kimyasal risklerin minimize edilmesine ve güvenli çalışma koşullarının sağlanmasına katkıda bulunur. Bu bağlamda, yönetmeliğin etkin bir şekilde uygulanması, iş sağlığı ve güvenliği kültürünün geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Yasal uyum süreçlerinin titizlikle yönetilmesi, işletmelerin sadece yasal yükümlülüklerini yerine getirmelerini değil, aynı zamanda çalışanlarının sağlığını ve güvenliğini korumalarını da sağlar. Temel unsurları başlık olarak;

Risk Değerlendirmesi

- İşverenler, kimyasal maddelerin kullanımıyla ilgili risk değerlendirmeleri yapmak zorundadır. Bu değerlendirmeler, kimyasalın türü, maruziyet süresi ve çalışanların sağlık durumları gibi faktörleri içermelidir.
- Risk değerlendirmesi sonuçlarına göre, uygun kontrol önlemleri alınmalıdır.

Kontrol Önlemleri

- Kimyasal riskleri minimize etmek için mühendislik kontrolleri, idari kontroller ve kişisel koruyucu ekipmanlar gibi önlemler uygulanmalıdır.

- Havalandırma sistemleri, kapalı sistemler ve otomasyon gibi teknik önlemler, kimyasal maruziyeti azaltmak için kullanılabilir.
- Gelişen teknolojilere uygun olarak kimyasal sızıntı dedektörlerinin kullanılması, kimyasal madde kaynaklı risklerin erken tespitine ve işyerinde sağlık ve güvenlik önlemlerinin etkinliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Eğitim ve Bilgilendirme

- Çalışanlar, kimyasal maddelerle güvenli çalışma konusunda düzenli olarak eğitilmelidir. Eğitimler, kimyasal tehlikeler, güvenlik prosedürleri ve acil durum müdahale yöntemlerini içermelidir.
- Güvenlik bilgi formları (GBF) ve etiketler aracılığıyla çalışanlar bilgilendirilmelidir.

Acil Durum Hazırlığı

- Kimyasal kazalara karşı acil durum planları hazırlanmalı ve bu planlar düzenli olarak tatbikatlarla test edilmelidir.
- Acil durum ekipleri oluşturulmalı ve bu ekipler, kimyasal kazalara müdahale konusunda eğitilmelidir.

Sağlık Gözetimi

- Kimyasal maddelere maruz kalan çalışanlar, düzenli sağlık gözetimine tabi tutulmalıdır. Bu gözetim, maruziyetin sağlık üzerindeki etkilerini izlemek amacıyla yapılır.

3.1.3.2. *BEKRA (Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması) kapsamında*

Dahili Acil Durum Eylem Planı

- Tesis içindeki olası acil durumlar için detaylı eylem planları hazırlanmalıdır.

- Bu planlar, acil durum ekiplerinin görevlerini ve müdahale prosedürlerini içermelidir.

Müdahale Kartları

- Her bir kimyasal madde için özel müdahale kartları hazırlanmalıdır. Bu kartlar, kimyasalın özelliklerini, potansiyel tehlikelerini ve acil durum müdahale yöntemlerini içermelidir.
- Müdahale kartları, acil durum ekipleri tarafından kolayca erişilebilir olmalıdır.

Risk Değerlendirme ve Kontrol

- Tehlikeli kimyasalların risk değerlendirmeleri düzenli olarak yapılmalı ve kontrol önlemleri uygulanmalıdır.
- Risk değerlendirme sonuçları, acil durum planlarının geliştirilmesinde kullanılmalıdır.

3.1.3.3. *Seveso direktifi kapsamında*

Güvenli Tesis Dizaynı

- Tesislerin tasarım aşamasında, tehlikeli maddelerin güvenli bir şekilde depolanması ve işlenmesi için gerekli mühendislik kontrolleri uygulanmalıdır.
- Patlama, yangın ve kimyasal sızıntı gibi riskleri minimize edecek yapısal ve teknik önlemler alınmalıdır.

Güvenlik Raporları

- Tesisin risk profili ve alınan güvenlik önlemlerini detaylandıran güvenlik raporları hazırlanmalıdır.
- Bu raporlar, düzenli olarak güncellenmeli ve yetkili otoritelerle paylaşılmalıdır.

Acil Durum Planları

- Olası kazalara karşı kapsamlı acil durum planları geliştirilmelidir.
- Bu planlar, düzenli tatbikatlarla test edilmeli ve gerektiğinde revize edilmelidir.

3.1.3.4. *ICMI (Uluslararası* Siyanür Yönetim Kodu) *kapsamında*

Sürdürülebilir Yönetim Anlayışı

- Siyanürün çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini minimize edecek sürdürülebilir yönetim stratejileri geliştirilmelidir.
- Siyanürün güvenli taşınması, depolanması ve bertarafı için çevresel etkileri azaltan yöntemler kullanılmalıdır.

Bağımsız Denetimler

- ICMI uyumunu sağlamak için düzenli bağımsız denetimler yapılmalı ve bu denetimlerin sonuçları kamuoyuyla paylaşılmalıdır.
- Denetim sonuçlarına göre sürekli iyileştirme süreçleri uygulanmalıdır.

Eğitim ve Farkındalık

- Çalışanlar, siyanür yönetimi konusunda düzenli olarak eğitilmeli ve farkındalıkları artırılmalıdır.
- Eğitim programları, sürdürülebilir yönetim uygulamalarını içermelidir.

3.1.3.5. *REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)*

Kayıt ve Değerlendirme

- Avrupa Birliği'nde üretilen veya ithal edilen kimyasal maddelerin REACH kapsamında kaydedilmesi zorunludur. Bu süreç, kimyasalın güvenli kullanımını sağlamak için gerekli bilgilerin toplanmasını ve değerlendirilmesini içerir.

- Kayıt süreci, kimyasalların insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmeyi amaçlar.

İzin ve Kısıtlama

- Belirli kimyasallar, insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel riskleri nedeniyle izne tabi olabilir veya kısıtlanabilir. İşletmeler, bu kimyasalların güvenli kullanımını sağlamak için gerekli izinleri almalı ve kısıtlamalara uymalıdır.

3.1.3.6. *GHS (Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)*

Sınıflandırma ve Etiketleme

- Kimyasal maddelerin tehlike sınıflarına göre sınıflandırılması ve uygun etiketlerle işaretlenmesi gerekmektedir. GHS, kimyasalların küresel düzeyde tutarlı bir şekilde sınıflandırılmasını ve etiketlenmesini sağlar.
- Bu sistem, kimyasal güvenlik bilgi formlarının (SDS) hazırlanmasını ve bu formların kullanıcılar için erişilebilir olmasını gerektirir.

3.1.3.7. *Basel sözleşmesi*

Tehlikeli Atıkların Yönetimi

- Tehlikeli atıkların sınır ötesi taşınması ve bertarafı, Basel Sözleşmesi kapsamında düzenlenmiştir. İşletmeler, tehlikeli atıkların güvenli taşınması ve bertarafı için sözleşme hükümlerine uymalıdır.
- Bildirim ve onay süreçleri, tehlikeli atıkların taşınması öncesinde ilgili ülkelerin yetkili otoritelerinden alınmalıdır.

3.1.3.8. *Yasal uyum takibi*

Kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliği, büyük ölçüde yasal gerekliliklerin doğru bir şekilde takip edilmesi ve bu gerekliliklere uyum

sağlanması ile ilişkilidir. Hem ulusal hem de uluslararası düzeyde çeşitli yasal düzenlemeler ve standartlar, kimyasal maddelerin güvenli yönetimini sağlamak ve olası riskleri en aza indirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu bağlamda, "Kimyasallarla Güvenli Çalışma Yönetmeliği", BEKRA, Seveso Direktifi, ICMI ve diğer uluslararası uygulamalar, kimyasal yönetim süreçlerinin yapılandırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Yasal uyum süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, işletmelerin sadece yasal yükümlülüklerini yerine getirmelerini değil, aynı zamanda çevresel ve toplumsal sorumluluklarını da yerine getirmelerini sağlar. Bu nedenle, yasal uyum takibi, kimyasal yönetim sistemlerinin başarısını ve güvenilirliğini artıran temel bir faktördür.

3.1.3.8.1. Risk değerlendirmesi ve yönetimi

Yasal uyum takibinin ilk adımı, kimyasal maddelerin kullanımıyla ilgili kapsamlı risk değerlendirmelerinin gerçekleştirilmesidir. Bu değerlendirmeler, kimyasalın türü, maruziyet süresi, çalışanların sağlık durumları ve çevresel etkiler gibi kritik faktörleri içermelidir. BEKRA ve Seveso Direktifi çerçevesinde, büyük endüstriyel kazaların önlenmesi amacıyla risk değerlendirmeleri yapılmalı ve bu değerlendirmeler, güvenlik raporları ile acil durum planlarının temelini oluşturmalıdır. ICMI kapsamında ise, siyanürün güvenli yönetimi için risk değerlendirmeleri yapılmalı ve çevresel etkileri minimize edecek stratejiler geliştirilmelidir.

3.1.3.8.2. Güvenlik ve kontrol önlemleri

Kimyasal risklerin minimize edilmesi için mühendislik kontrolleri, idari kontroller ve kişisel koruyucu ekipmanlar (KKE) gibi önlemler uygulanmalıdır. "Kimyasallarla Güvenli Çalışma Yönetmeliği", havalandırma sistemleri ve kapalı sistemler gibi teknik önlemlerin

kullanılmasını zorunlu kılar. BEKRA ve Seveso Direktifi kapsamında, tesislerin tasarımında güvenlik önlemleri alınmalı ve patlama, yangın gibi riskleri minimize edecek yapısal ve teknik önlemler uygulanmalıdır. ICMI ise, siyanürün taşınması, depolanması ve bertarafı için sıkı güvenlik standartlarının uygulanmasını gerektirir.

3.1.3.8.3. Eğitim ve bilgilendirme

Çalışanların kimyasal tehlikeler, güvenlik prosedürleri ve acil durum müdahale yöntemleri konusunda düzenli olarak eğitilmesi esastır. "Kimyasallarla Güvenli Çalışma Yönetmeliği", güvenlik bilgi formları (SDS) ve etiketler aracılığıyla bilgilendirme yapılmasını öngörür. BEKRA ve Seveso Direktifi kapsamında, acil durum ekipleri ve çalışanlar, kimyasal kazalara müdahale konusunda eğitilmelidir. ICMI çerçevesinde ise, çalışanlar, siyanür yönetimi ve çevresel etkiler konusunda eğitilmelidir.

3.1.3.8.4. Acil durum hazırlığı ve müdahale

Kimyasal kazalara karşı acil durum planları tesisin risk profiline uygun şekilde hazırlanmalı ve olası tüm senaryoları kapsayacak biçimde yapılandırılmalıdır. BEKRA ve Seveso Direktifleri uyarınca, bu planların belirli aralıklarla gözden geçirilmesi, güncellenmesi ve gerçekçi tatbikatlarla uygulanabilirliğinin test edilmesi zorunludur. Böylece, acil bir durumda organizasyonun hızlı ve etkili bir yanıt verme kapasitesi düzenli olarak değerlendirilebilir ve eksiklikler tespit edilerek iyileştirilebilir.

Acil durum müdahale kartları, her bir kimyasal madde veya senaryo için spesifik ve kolay ulaşılabilir şekilde hazırlanmalı, personelin bu kartları kullanarak doğru adımları atabilmesi sağlanmalıdır. Ayrıca, farklı vardiyalar ve birimler için sorumlulukları açıkça tanımlanmış, eğitimli acil durum

ekipleri oluşturulmalı ve bu ekiplerin periyodik aralıklarla uygulamalı tatbikatlara katılması sağlanmalıdır.

ICMI (Uluslararası Siyanür Yönetim Kodu) kapsamında ise özellikle siyanür kullanılan veya depolanan tesislerde, siyanürle ilgili özel senaryolara yönelik acil durum planları hazırlanmalı, tıbbi müdahale, bertaraf, çevresel koruma ve halkın bilgilendirilmesi gibi başlıklar özelinde detaylandırılmalı ve belirli sıklıklarla test edilerek güncel tutulmalıdır.

Tüm bu süreçlerde amaç, olası bir kimyasal kaza öncesi hazırlığı ve olası bir kaza anında etkili müdahaleyi garanti altına almak; insan sağlığı, çevre ve tesis güvenliğini en üst düzeyde korumaktır.

3.1.3.8.5. Denetim ve raporlama

Denetim Planının Oluşturulması

Yıllık veya dönemsel denetim takvimi belirlenir. Denetim kapsamı, kontrol edilecek mevzuatlar (BEKRA, Seveso, ICMI), süreçler ve ekipler netleştirilir.

Hazırlık ve Bilgilendirme

Denetime tabi birimler önceden bilgilendirilir; gerekli dokümanlar (güvenlik bilgi formları, eğitim kayıtları, risk değerlendirmeleri vb.) hazır bulundurulur.

Denetimlerin Gerçekleştirilmesi

İç denetimler: Kurumun kendi denetim ekipleri tarafından gerçekleştirilir ve mevcut uygulamalar gözden geçirilir.

Dış ve bağımsız denetimler: Akredite veya yetkili kuruluşlarca yapılır, özellikle büyük endüstriyel kazalara karşı önlemler ve yasal uyum incelenir.

Bulguların Raporlanması

Denetim sırasında tespit edilen uygunsuzluklar, eksiklikler veya gelişime açık alanlar raporlanır ve yönetime sunulur.

Aksiyon Planının Hazırlanması: Belirlenen bulgular için düzeltici ve önleyici faaliyetler ile sorumluluk ve süreler tanımlanır.

Şeffaflık ve Paydaş Bilgilendirmesi

Dış denetim sonuçları ilgili kamu kurumları ve gerektiğinde kamuoyu ile paylaşılır.

Sürekli İyileştirme

Denetim sonuçlarına göre süreçlerde revizyon, eğitim, teknik iyileştirme ve yeni kontrol önlemlerinin hayata geçirilmesi sağlanır. Uygulamanın etkinliği takip edilerek yeni denetim döngüsü başlatılır.

3.1.3.8.6. Yasal güncellemelerin takibi

Ulusal ve uluslararası düzenlemelerdeki değişiklikler sürekli olarak izlenmeli ve bu değişikliklere uyum sağlanmalıdır. İşletmeler, yasal gerekliliklerin güncel bir listesini tutmalı ve bu listeyi düzenli olarak güncellemelidir.

Bu düzenlemeler, kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğini artırmak ve sürdürülebilir bir güvenlik kültürü oluşturmak için kritik öneme sahiptir. Yasal uyum süreçlerinin titizlikle yönetilmesi, işletmelerin sadece yasal yükümlülüklerini yerine getirmelerini değil, aynı zamanda çevresel ve toplumsal sorumluluklarını da yerine getirmelerini sağlar.

Performans Göstergelerinin Belirlenmesi ve İzlenmesi: Performans göstergelerinin belirlenmesi ve izlenmesi, kimyasal yönetim sistemlerinin sürekli iyileştirilmesi için kritik bir süreçtir. Bu göstergeler, organizasyonun stratejik hedeflerine ulaşma düzeyini objektif bir şekilde değerlendirmeye olanak tanır. Raporlama ve izleme süreçleri, sistemin etkinliğini artırmak ve sürdürülebilir bir güvenlik kültürü oluşturmak için gerekli verileri sağlar. Bu bağlamda, performans göstergelerinin etkin bir şekilde yönetilmesi,

kimyasal yönetim sistemlerinin başarısını ve güvenilirliğini artıran temel bir faktördür.

3.1.3.9. *Anahtar performans göstergeleri (KPI)*

Kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğini ölçmek ve değerlendirmek amacıyla, belirli Anahtar Performans Göstergeleri (KPI) tanımlanmalıdır. Bu göstergeler, sistemin farklı yönlerini kapsayacak şekilde seçilmeli ve ölçülebilir olmalıdır. Örneğin, kimyasal kazaların sayısı, çalışanların kimyasal maruziyet seviyeleri, eğitim programlarına katılım oranları ve kimyasal atıkların yönetimi gibi metrikler, sistemin performansını değerlendirmek için kullanılabilir. KPI'lar, organizasyonun stratejik hedefleriyle uyumlu olmalı ve bu hedeflere ulaşma düzeyini objektif bir şekilde yansıtmalıdır.

3.1.3.10. *Raporlama ve izleme*

Performans göstergelerinin düzenli olarak izlenmesi ve raporlanması, kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğini değerlendirmek için esastır. Bu süreç, sistemin güçlü ve zayıf yönlerini belirlemeye yardımcı olur ve iyileştirme fırsatlarını ortaya çıkarır. Raporlama, üst yönetim için stratejik karar alma süreçlerinde önemli bir veri kaynağı sağlar. Düzenli raporlar, KPI'ların zaman içindeki eğilimlerini ve değişimlerini göstererek, sistemin genel performansını ve sürdürülebilirliğini değerlendirmeye olanak tanır. Ayrıca, bu raporlar, yasal uyum süreçlerinin etkinliğini ve organizasyonun çevresel ve toplumsal sorumluluklarını yerine getirme düzeyini de ortaya koyar.

Dokümantasyon Yönetimi: Bu iki bileşen, kimyasal yönetim sistemlerinin başarısını ve güvenilirliğini artıran temel unsurlar olarak kabul edilir. Etkin bir doküman kontrol sistemi ve kayıt tutma süreçleri, organizasyonun yasal

yükümlülüklerini yerine getirmesini ve operasyonel mükemmelliği sağlamasını destekler. Bu bağlamda, dokümantasyon yönetimi, organizasyonel bilgi yönetiminin merkezinde yer alır ve stratejik hedeflere ulaşmada kritik bir rol oynar.

3.1.3.11. *Doküman kontrol sistemi*

Kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla, tüm politika, prosedür ve diğer ilgili dokümanların güncel ve erişilebilir olmasını temin eden bir doküman kontrol sistemi oluşturulması gereklidir. Bu sistem, dokümanların versiyon kontrolünü ve dağıtımını içermelidir. Versiyon kontrolü, dokümanların en son ve doğru hallerinin kullanılmasını sağlarken, dağıtım mekanizması, ilgili tüm paydaşların bu dokümanlara zamanında erişimini garanti eder. Böylece, organizasyonel süreçlerin standardizasyonu ve yasal uyum süreçlerinin etkin yönetimi mümkün hale gelir. Doküman kontrol sistemi, aynı zamanda bilgi güvenliğini ve bütünlüğünü koruyarak, organizasyonel hafızanın sürekliliğini sağlar.

3.1.3.12. *Kayıtların tutulması*

Kimyasal yönetimle ilgili tüm faaliyetlerin kayıtlarının düzenli olarak tutulması ve arşivlenmesi, denetimler ve performans değerlendirmeleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Kayıtlar, geçmiş faaliyetlerin izlenebilirliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki stratejik kararlar için de önemli bir veri kaynağı oluşturur. Denetim süreçlerinde, bu kayıtlar, sistemin etkinliğini ve yasal uyum düzeyini değerlendirmek için kullanılır. Ayrıca, performans değerlendirmeleri sırasında, kayıtlar, sistemin güçlü ve zayıf yönlerini belirlemeye yardımcı olur ve sürekli iyileştirme

fırsatlarını ortaya çıkarır. Kayıtların düzenli ve sistematik bir şekilde tutulması, organizasyonun hesap verebilirliğini artırır ve şeffaflık sağlar.

3.2. Risk Değerlendirme ve Kontrol Mekanizmaları

Kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğini artırmak ve sürdürülebilir bir güvenlik kültürü oluşturmak için, risk değerlendirme ve kontrol mekanizmaları kritik bir rol oynamaktadır. Yasal uyum süreçlerinin titizlikle yönetilmesi, işletmelerin sadece yasal yükümlülüklerini yerine getirmelerini değil, aynı zamanda çevresel ve toplumsal sorumluluklarını da yerine getirmelerini sağlar. Bu bağlamda, sistematik risk değerlendirme metodolojileri, kontrol hiyerarşisi uygulamaları, maruziyet limitlerinin belirlenmesi ve izleme-ölçüm programları, kimyasal risklerin etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

3.2.3. *Sistematik risk değerlendirme metodolojisi*

Kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliğini sağlamak için, kimyasal risklerin tanımlanması, değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi amacıyla yapılandırılmış bir metodoloji benimsenmelidir. Bu süreç, BEKRA ve Seveso Direktifi gibi düzenlemeler kapsamında, büyük endüstriyel kazaların önlenmesi için kritik bir öneme sahiptir. Risk değerlendirme metodolojisi, kimyasal maddelerin tehlike potansiyelini, maruziyet senaryolarını ve olası sonuçlarını sistematik bir şekilde analiz etmeyi içerir. Bu analizler, güvenlik raporları ve acil durum planlarının temelini oluşturur ve organizasyonun risk yönetimi stratejilerini şekillendirir.

3.2.4. *Kontrol hiyerarşisinin uygulanması*

Kimyasal riskleri minimize etmek için, kontrol hiyerarşisi prensipleri doğrultusunda mühendislik kontrolleri, idari kontroller ve kişisel koruyucu

ekipman (KKE) gibi önlemler hiyerarşik bir şekilde uygulanmalıdır. "Kimyasallarla Güvenli Çalışma Yönetmeliği" ve uluslararası standartlar, bu kontrollerin etkin bir şekilde uygulanmasını zorunlu kılar. Mühendislik kontrolleri, riskleri kaynağında ortadan kaldırmayı hedeflerken, idari kontroller, çalışma prosedürlerini ve organizasyonel politikaları içerir. KKE ise, çalışanların doğrudan maruziyetini azaltmak için son savunma hattı olarak kullanılır.

3.2.5. *Maruziyet limitlerinin belirlenmesi*

Çalışanların kimyasallara maruziyet seviyeleri, ulusal ve uluslararası standartlar doğrultusunda belirlenmeli ve bu limitler aşılmamalıdır. Maruziyet limitleri, iş sağlığı ve güvenliği açısından kritik bir parametre olup, çalışanların sağlık risklerini minimize etmek için belirlenir. Bu limitler, düzenli sağlık gözetimi ve maruziyet izleme programları ile desteklenmelidir. Maruziyet limitlerinin aşılması durumunda, derhal düzeltici önlemler alınmalı ve maruziyetin kontrol altına alınması sağlanmalıdır.

3.2.6. *İzleme ve ölçüm programları*

Kimyasal maruziyet ve kontrol önlemlerinin etkinliği, düzenli izleme ve ölçüm programları aracılığıyla değerlendirilmelidir. Bu programlar, kimyasal yönetim sistemlerinin performansını sürekli olarak izlemeyi ve iyileştirme fırsatlarını belirlemeyi amaçlar. İzleme ve ölçüm sonuçları, denetim süreçlerinde ve performans değerlendirmelerinde kullanılmak üzere dokümante edilmelidir. Ayrıca, bu sonuçlar, yasal uyum süreçlerinin etkinliğini değerlendirmek ve organizasyonun stratejik hedeflerine ulaşma düzeyini ölçmek için kritik bir veri kaynağı sağlar

3.3. Operasyonel Kontrol Sistemleri

Kimyasal yönetim sistemleri, endüstriyel süreçlerin güvenliğini sağlamak ve çevresel etkileri minimize etmek amacıyla kritik öneme sahip olup, operasyonel kontrol sistemleri bu süreçlerin etkinliğini artırmak için temel bir yapı taşını oluşturmaktadır.

3.3.3. *Kimyasal madde envanteri yönetimi*

Merkezi Envanter Yönetim Sistemi: Maden işletmeleri, kullanılan kimyasalların (örneğin, reaktifler, asitler ve diğer işleme yardımcı maddeleri) envanterini merkezi bir yazılım aracılığıyla takip edebilir. Örneğin, bir altın madeni, tüm sahalarındaki kimyasal envanterini tek bir platformda yöneterek, stok seviyelerini optimize edebilir ve maliyetleri düşürebilir.

Düzenli Envanter Denetimleri: Maden işletmeleri, kimyasal envanterlerini düzenli olarak denetleyerek, kayıpları ve israfı minimize edebilir. Örneğin, her çeyrek sonunda yapılan envanter sayımları ile eksik veya fazla kimyasallar tespit edilip raporlanabilir.

3.3.4. *Depolama ve taşıma prosedürleri*

Güvenli Depolama Alanları: Maden işletmeleri, tehlikeli kimyasalların (örneğin, siyanür, asit) güvenli bir şekilde depolanması için özel alanlar oluşturmalıdır. Örneğin, bir bakır madeni, asitlerin depolandığı alanları çevreleyen güvenlik duvarları ve sızıntı önleyici sistemler ile donatılabilir.

Taşıma Protokolleri: Kimyasalların maden sahasına taşınması sırasında, uygun taşıma kapları ve etiketleme sistemleri kullanılmalıdır. Örneğin, bir maden işletmesi, tehlikeli kimyasalların taşınmasında özel araçlar ve eğitimli personel kullanarak güvenliği artırabilir.

3.3.5. *Proses güvenliği yönetimi*

Tehlike Analizleri ve Risk Değerlendirmeleri: Maden işletmeleri, kimyasal işlemler sırasında potansiyel tehlikeleri belirlemek için HAZOP ve FMEA gibi yöntemler kullanmalıdır. Örneğin, bir maden sahasında, siyanürle işleme sürecinde olası sızıntı ve maruz kalma riskleri analiz edilerek önlemler alınabilir.

Acil Durum Planları: Kimyasal sızıntı veya kaza durumunda uygulanacak acil durum planları hazırlanmalıdır. Örneğin, bir maden işletmesi, siyanür sızıntısı durumunda hızlı müdahale ekipleri ve tahliye planları oluşturabilir.

3.3.6. *Atık yönetimi protokolleri*

Atık Sınıflandırma ve Yönetimi: Maden işletmeleri, kimyasal atıkları (örneğin, atık su, tortu) türlerine göre sınıflandırmalı ve uygun bertaraf yöntemleri belirlemelidir. Örneğin, bir maden, asidik atıklarını nötralize ederek çevreye zarar vermeden bertaraf edebilir.

Sürdürülebilir Bertaraf Yöntemleri: Maden işletmeleri, atıkların çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi için sürdürülebilir yöntemler geliştirmelidir. Örneğin, bir maden işletmesi, atık su arıtma tesisleri kurarak, su kaynaklarını koruyabilir ve geri kazanım yapabilir

3.4. Acil Durum Yönetimi

Kimyasal maddelerle çalışma süreçlerinde karşılaşabilecekleri acil durumları etkili bir şekilde yönetmek için, Seveso Direktifi ve ISO 45001 gibi uluslararası standartlara dayanan kapsamlı acil durum yönetimi stratejileri geliştirmeli ve bu stratejileri sürekli iyileştirme prensipleri çerçevesinde uygulayarak hem çalışan güvenliğini hem de çevresel sürdürülebilirliği sağlamalıdır.

3.4.3. *Acil durum planlarının hazırlanması*

Olası kimyasal kazaların etkilerini minimize etmek amacıyla kapsamlı acil durum planları geliştirilmelidir. Bu planlar, kimyasal maddelerin doğası, potansiyel riskler ve olası kazaların senaryoları dikkate alınarak hazırlanmalı ve düzenli aralıklarla güncellenmelidir. Avrupa Birliği'nin Seveso Direktifi ve Türkiye'deki BEKRA (Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik) gibi mevzuatlar, bu tür planların hazırlanmasında önemli bir çerçeve sunmaktadır. Bu düzenlemeler, işletmelerin kimyasal riskleri değerlendirmesini ve acil durum planlarını oluşturmasını zorunlu kılmaktadır. Örneğin, siyanür sızıntısı gibi spesifik riskler için detaylı acil durum planları oluşturulmalı ve bu planların etkinliğini sağlamak için ilgili tüm paydaşlarla birlikte gözden geçirilmelidir.

3.4.4. *Müdahale ekiplerinin organizasyonu*

Acil durumlarda hızlı ve etkili müdahale sağlamak amacıyla, tesisin risk değerlendirmesine uygun olarak özel eğitimli ve yetkin müdahale ekipleri kurulmalıdır. Bu ekipler hem kurum içi personelden seçilmeli hem de ihtiyaç halinde dışarıdan profesyonel destek sağlayabilecek şekilde yapılandırılmalıdır. Müdahale ekiplerinin ekipmanları, tesis ortamında bulunan kimyasal maddelerin özellikleri ve olası tehlikeleri dikkate alınarak seçilmeli; ekipmanların kullanım talimatları ve bakımına ilişkin prosedürler oluşturulmalıdır. Örneğin, asidik, reaktif veya toksik kimyasallara karşı dayanıklı kişisel koruyucu donanımlar (KKD), sızıntı bariyerleri, absorbantlar ve portatif gaz dedektörleri gibi ekipmanın bulundurulması gerekmektedir.

Acil durum ekipleri, kimyasal maddelerle ilgili olası sızıntı, yangın, patlama veya maruziyet gibi senaryolara yönelik hem teorik hem de uygulamalı eğitim almalıdır. Bu kapsamda, kimyasallara özgü ilk yardım

prosedürleri, tahliye yöntemleri, yangın söndürme teknikleri ve çevresel etkilerin yönetilmesi gibi konulara odaklanılmalıdır. Ek olarak, dışarıdan (örneğin itfaiye, AFAD veya özel müdahale takımları) gelecek ekiplerin, sahada tehlike oluşturan kimyasal maddelerin türleri, miktarları, depolama koşulları ve muhtemel riskler hakkında önceden bilgilendirilmesi gerekir; bu amaçla güncel kimyasal envanterler ve güvenlik bilgi formları ilgili paydaşlarla paylaşılmalıdır.

Düzenli olarak gerçekleştirilecek tatbikatlar sayesinde, ekiplerin teorik bilgilerini pratiğe dökmesi, iletişim ve koordinasyon becerilerinin geliştirilmesi sağlanmalıdır. ISO 45001 ve benzeri uluslararası iş sağlığı ve güvenliği standartları, acil durum ekiplerinin oluşturulması, rolleri, sorumlulukların tanımlanması, eğitim ve liyakat süreçlerinin yönetilmesi ve tatbikatların planlanması konularında kapsamlı çerçeve sunar. Bu standartlara uygun şekilde sürdürülen sürekli eğitim ve değerlendirme faaliyetleri, acil müdahale kapasitesinin ve olaylara hazırlık düzeyinin yüksek kalmasını garanti altına alır.

Sonuç olarak tesislerde, kimyasala uygun kişisel koruyucu ekipman, güncel müdahale prosedürleri, iyi eğitimli ve yetkin ekipler ile düzenli tatbikatlar bütüncül bir yaklaşımla sağlanmalı; böylece olası kimyasal kazalarda insan sağlığı ve çevre üzerinde oluşabilecek zararların en aza indirilmesi hedeflenmelidir.

3.4.5. *Tatbikat programları*

Acil durum planlarının etkinliğini test etmek ve sürekli iyileştirme sağlamak amacıyla düzenli tatbikat programları gerçekleştirilmelidir. Bu tatbikatlar, gerçekçi senaryolar üzerinden yürütülmeli ve tüm personelin katılımı sağlanmalıdır. Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi (ISO 45001) ve OSHA (Occupational Safety and Health Administration) gibi

kuruluşlar, tatbikatların düzenlenmesi ve acil durum hazırlıklarının test edilmesi konusunda önerilerde bulunmaktadır. Örneğin, her yıl belirli aralıklarla kimyasal sızıntı tatbikatları düzenlenerek, çalışanların acil durum prosedürlerini uygulama becerileri geliştirilebilir ve olası eksiklikler tespit edilebilir.

3.4.6. *Kriz yönetimi prosedürleri*

Kriz durumlarında hızlı karar alınabilmesi ve etkili iletişimin sürdürülebilmesi için kuruluş bünyesinde kapsamlı ve entegre kriz yönetimi prosedürleri oluşturulmalıdır. Herhangi bir acil durumda liderlik edecek kriz yönetim ekibi ve bu ekibin yedek üyeleri, rol ve sorumluluklar net bir biçimde tanımlanarak önceden belirlenmelidir. Bu ekip, kriz senaryolarına uygun olarak sürekli eğitimlere ve tatbikatlara tabi tutulmalı, kriz yönetimi becerileri güncel tutulmalıdır.

Prosedürler, kriz anında hangi iletişim kanallarının kullanılacağını, bilgi akışının hangi hiyerarşiyle ve formatta sağlanacağını ve dahili (çalışanlar, yöneticiler) ile harici (medya, yerel otoriteler, acil müdahale ekipleri, tedarikçiler, topluluklar) tüm paydaşlara hangi bilgilendirmenin ne zaman ve hangi yöntemle yapılacağını ayrıntılı şekilde içermelidir. Özellikle kriz yönetimi sırasında yanlış bilgi akışını veya bilgi eksikliğini önlemek amacıyla, onaylı ve güncel iletişim protokolleri hazırlanmalıdır.

ISO 22301 gibi uluslararası standartlar, iş sürekliliği ve kriz yönetimi süreçlerinin yapılandırılması için kurumlara yol göstermekte; olay üssünün oluşturulmasından (Crisis Command Center) medya ile temas kuracak sözcülerin atanmasına, resmi açıklamaların hazırlanmasından yerel otoritelerle koordinasyona ve çalışanların güvenli biçimde tahliyesine kadar geniş bir prosedür yelpazesi oluşturulmasını teşvik etmektedir. Standartlar aynı zamanda bilgilendirme, izleme, karar alma, eylem planlama ve yeniden

yapılanma (recovery) adımlarında ayrıntılı rehberlik sunmaktadır. Acil bir durumda, örneğin büyük bir kimyasal kaza, yangın veya sızıntı meydana geldiğinde:

- Kriz yönetim ekibi hızlıca toplanmalı ve olayın ölçeğine uygun eylem planı devreye alınmalıdır.
- Olay hakkında ilk bilgiler derlenerek doğrulama yapılmalı; ardından medya ile hızlı ve doğru iletişim kurmak için belirlenen sözcü tarafından açıklama yapılmalıdır.
- Yerel otoritelerle (Valilik, AFAD, Emniyet, Sağlık ekipleri vb.) anlık bilgi paylaşımı ve işbirliği sağlanmalıdır.
- Çalışanların, ziyaretçilerin ve gerekirse çevre halkının güvenli bölgeye tahliyesi için net bir tahliye ve güvenlik yönetimi uygulanmalı, tahliye sonrası sayım ve durum raporlaması yapılmalıdır.
- Kriz süresince ve sonrasında tüm adımlar detaylı olarak kayıt altına alınmalı, kriz sona erdikten sonra ise süreç analizi (post-mortem/crisis review) ile iyileştirme alanları belirlenmelidir.

Tüm bu yapı ve uygulamalar sayesinde, kriz durumlarında hem kurum içi hem de paydaşlar arası koordinasyon ve yönetim etkinliği artırılarak, zararın en aza indirilmesi, iş sürekliliğinin sağlanması ve kurum itibarının korunması amaçlanır.

3.5. Eğitim ve Yetkinlik Geliştirme

Kimyasal güvenlik yönetimi, endüstriyel işletmelerin sürdürülebilirliğini sağlamak ve çalışanların sağlığını korumak için kritik bir öneme sahip olup, etkili acil durum yönetimi ve sürekli eğitim stratejileri ile desteklenmelidir.

3.5.3. *Temel kimyasal güvenlik eğitimleri*

Tüm çalışanlara kimyasal güvenlik konusunda temel eğitimler verilmesi, genel güvenlik kültürünü güçlendirmek için gereklidir. Bu eğitimler, kimyasal maddelerin özellikleri, tehlikeleri, güvenli kullanım yöntemleri ve acil durum prosedürleri hakkında bilgi sağlamalıdır. Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı (EU-OSHA) ve OSHA gibi uluslararası kuruluşlar, bu tür eğitimlerin düzenlenmesi ve uygulanması konusunda rehberlik sunmaktadır. Ayrıca, Türkiye'deki İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (6331 sayılı Kanun) ve Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması (REACH) Yönetmeliği, kimyasal güvenlik eğitimlerinin zorunlu olduğunu belirtmektedir. Eğitimlerin düzenli olarak güncellenmesi, çalışanların en son güvenlik standartları ve uygulamaları hakkında bilgi sahibi olmalarını sağlayacaktır. Sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) teknolojileri kullanılarak, çalışanların tehlikeli durumları simüle eden interaktif eğitimler alması sağlanabilir.

3.5.4. *Spesifik görev eğitimleri*

Belirli görevler için özel eğitim programları düzenlenmesi, çalışanların işlerini daha güvenli ve etkili bir şekilde yerine getirmelerini sağlar. Örneğin, kimyasal maddelerle doğrudan çalışan personel için, bu maddelerin işlenmesi, depolanması ve taşınması sırasında dikkat edilmesi gereken özel güvenlik önlemleri hakkında derinlemesine eğitimler verilmelidir. Bu tür eğitimler, iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri (ISO 45001) çerçevesinde, görev tanımlarına uygun olarak yapılandırılmalıdır. Ayrıca, iş yerinde uygulamalı eğitimler ve mentorluk programları ile deneyimli çalışanların yeni personeli eğitmesi teşvik edilmelidir. Bu uygulama, çalışanların bilgi ve becerilerini artırarak, iş güvenliğini sağlamada önemli bir rol oynamaktadır.

3.5.5. *Yetkinlik değerlendirme sistemleri*

Çalışanların yetkinliklerinin düzenli olarak değerlendirilmesi, kimyasal güvenlik uygulamalarının etkinliğini artırmak için önemlidir. Bu değerlendirmeler, çalışanların bilgi ve becerilerini ölçmek için çeşitli yöntemler (örneğin, yazılı sınavlar, pratik uygulamalar ve performans değerlendirmeleri) kullanılarak yapılmalıdır. Ayrıca, bu sistemler, çalışanların gelişim alanlarını belirlemeye ve gerekli eğitim ihtiyaçlarını tespit etmeye yardımcı olacaktır. ISO 9001 gibi kalite yönetim sistemleri, yetkinlik değerlendirme süreçlerinin yapılandırılmasına yönelik standartlar sunmaktadır. Çalışanların performansını izlemek için 360 derece geri bildirim sistemleri de kullanılabilir. Bu tür sistemler, çalışanların güçlü ve zayıf yönlerini belirleyerek, hedef odaklı gelişim planları oluşturulmasına olanak tanır.

3.5.6. *Sürekli gelişim programları*

Çalışanların bilgi ve becerilerini sürekli olarak geliştirmeleri teşvik edilmelidir. Bu amaçla, sürekli gelişim programları oluşturulmalı ve çalışanların katılımı teşvik edilmelidir. Örneğin, seminerler, atölye çalışmaları ve çevrimiçi eğitim platformları aracılığıyla güncel kimyasal güvenlik bilgileri ve en iyi uygulamalar paylaşılmalıdır. Ayrıca, çalışanların mesleki gelişimlerini desteklemek için kariyer planlaması ve mentorluk programları da uygulanabilir. Bu tür programlar, çalışanların motivasyonunu artırarak, işletmenin genel performansını olumlu yönde etkileyecektir. Endüstri konferanslarına katılım ve profesyonel sertifikasyon programları, çalışanların bilgi birikimlerini artırmalarına yardımcı olabilir. Ayrıca, Avrupa Birliği'nin REACH ve CLP (Sınıflandırma, Etiketleme ve Paketleme) Yönetmelikleri, kimyasal güvenlik konularında sürekli eğitim ve güncellemelerin önemini vurgulamaktadır.

3.6. İzleme ve Değerlendirme Mekanizmaları

Kimyasal yönetim sistemlerinin etkinliği, sadece yasal uyum sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına ve toplumda güvenilir bir imaj oluşturmalarına katkıda bulunmak için kritik öneme sahiptir; bu nedenle, izleme ve değerlendirme mekanizmalarının entegrasyonu ve sürekli iyileştirme yaklaşımı, kimyasal güvenlik uygulamalarının başarısını doğrudan etkilemektedir.

3.6.3. *Performans metriklerinin takibi*

Kimyasal yönetim sisteminin performansı, belirlenen metrikler aracılığıyla düzenli olarak izlenmeli ve değerlendirilmelidir. Bu metrikler, kimyasal güvenlik uygulamalarının etkinliğini ölçmek için kullanılacak göstergeleri içermelidir. Örneğin, kimyasal sızıntı olaylarının sayısı, çalışanların eğitim düzeyi, acil durum tatbikatlarının sonuçları ve çevresel etki raporları gibi veriler, sistemin genel performansını değerlendirmek için önemli göstergeler olarak kullanılabilir. Avrupa Birliği'nin REACH (Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması) Yönetmeliği, kimyasal maddelerin güvenliğini sağlamak için bu tür performans göstergelerinin izlenmesini teşvik etmektedir. Ayrıca, bu metriklerin zaman içinde izlenmesi, performans trendlerini belirlemeye ve gerekli iyileştirmeleri yapmaya olanak tanır.

3.6.4. *İç ve dış denetimler*

Sistematik iç ve dış denetimler, kimyasal yönetim sisteminin etkinliğini kontrol etmek için gereklidir. İç denetimler, işletmenin kendi iç süreçlerini değerlendirmesine olanak tanırken, dış denetimler bağımsız bir bakış açısı sunarak sistemin uyumunu ve etkinliğini değerlendirir. ISO 14001 (Çevre

Yönetim Sistemi) ve ISO 45001 (İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi) gibi uluslararası standartlar, denetim süreçlerinin yapılandırılmasına yönelik rehberlik sağlamaktadır. Bu standartlar, denetimlerin düzenli olarak gerçekleştirilmesini ve sonuçlarının analiz edilmesini zorunlu kılarak, kimyasal yönetim sisteminin sürekli iyileştirilmesine katkıda bulunur. Ayrıca, Türkiye'deki İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (6331 sayılı Kanun) ve BEKRA (Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik) gibi ulusal düzenlemeler, denetim süreçlerinin önemini vurgulamaktadır.

3.6.5. *Düzeltici ve önleyici faaliyetler*

Denetim ve izleme süreçleri sonucunda tespit edilen eksiklikler için düzeltici ve önleyici faaliyetler planlanmalı ve uygulanmalıdır. Düzeltici faaliyetler, mevcut sorunları çözmeye yönelik adımları içerirken, önleyici faaliyetler, gelecekte benzer sorunların ortaya çıkmasını engellemeye yönelik stratejileri kapsar. Bu süreçlerin etkin bir şekilde yönetilmesi, kimyasal yönetim sisteminin sürekli iyileştirilmesine katkıda bulunur. ISO 9001 (Kalite Yönetim Sistemi) gibi standartlar, düzeltici ve önleyici faaliyetlerin nasıl planlanacağı ve uygulanacağı konusunda rehberlik sunmaktadır. Ayrıca, bu faaliyetlerin izlenmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi, sistemin genel performansını artırmak için önemlidir.

3.6.6. *Yönetimin gözden geçirmesi*

Üst yönetim, kimyasal yönetim sisteminin etkinliğini düzenli olarak gözden geçirmelidir. Bu gözden geçirme, sistemin performansını değerlendirmek, hedeflerin gerçekleştirilmesini kontrol etmek ve gerekli stratejik değişiklikleri belirlemek için kritik bir fırsattır. Yönetim gözden geçirmeleri, işletmenin kimyasal güvenlik hedeflerine ulaşma konusundaki ilerlemesini

değerlendirmek ve sürekli iyileştirme fırsatlarını belirlemek için önemli bir mekanizma olarak işlev görmektedir. Uluslararası standartlar, yönetim gözden geçirmelerinin belirli aralıklarla yapılmasını ve sonuçlarının kayıt altına alınmasını önermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, değerli metal madenciliğinde sürdürülebilir kimyasal yönetim sistemlerinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Araştırma bulguları, etkin bir kimyasal yönetim sisteminin, sistematik bir yaklaşım ve çok boyutlu bir entegrasyon gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Literatür analizi ve saha araştırmalarından elde edilen veriler ışığında, başarılı bir kimyasal yönetim sisteminin temel gereklilikleri şu şekilde belirlenmiştir:

- Yönetsel organizasyon ve dokümantasyon sistemlerinin uluslararası standartlarla uyumlu olarak yapılandırılması
- Risk değerlendirme ve kontrol mekanizmalarının sistematik metodolojiler çerçevesinde uygulanması
- Operasyonel kontrol sistemlerinin sürekli izleme ve iyileştirme yaklaşımıyla yönetilmesi
- Acil durum yönetim sistemlerinin proaktif bir yaklaşımla geliştirilmesi
- Eğitim ve yetkinlik geliştirme programlarının sürdürülebilir kılınması

Uluslararası uygulamaların karşılaştırmalı analizi, bölgesel farklılıkların ve yerel gerekliliklerin kimyasal yönetim sistemlerinin yapılandırılmasında önemli rol oynadığını göstermektedir. Özellikle sektörde lider madencilik firmalarının uygulamalar, kapsamlı yasal düzenlemeler ve ileri teknoloji kullanımı ile öne çıkmaktadır.

Araştırma sonuçları, sürdürülebilir kimyasal yönetim sistemlerinin başarısında aşağıdaki faktörlerin kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır:

- ❖ Entegre Yönetim Yaklaşımı
  - Çevre, iş güvenliği ve kalite yönetim sistemleriyle entegrasyon
  - Paydaş katılımının sağlanması
  - Sürekli iyileştirme kültürünün yerleştirilmesi
- ❖ Risk Bazlı Yaklaşım
  - Sistematik risk değerlendirme metodolojilerinin uygulanması
  - Önleyici kontrol önlemlerinin geliştirilmesi
  - Performans izleme ve değerlendirme sistemlerinin kurulması
- ❖ Teknoloji ve İnovasyon
  - Modern izleme ve kontrol sistemlerinin implementasyonu
  - Dijital yönetim araçlarının kullanımı
  - Yenilikçi çözümlerin adaptasyonu

Bu çalışmanın sonuçları, değerli metal madenciliği sektöründe faaliyet gösteren işletmelere, sürdürülebilir kimyasal yönetim sistemlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi konusunda yol gösterici nitelikte bulgular sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, spesifik endüstriyel uygulamaların detaylı analizi ve performans değerlendirme metodolojilerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, sürdürülebilir kimyasal yönetim sistemlerinin başarısı, sistematik bir yaklaşım, güçlü bir organizasyonel yapı ve sürekli iyileştirme taahhüdü gerektirmektedir. Bu çalışmada sunulan bulgular ve öneriler, sektördeki işletmelerin kimyasal yönetim sistemlerini geliştirmelerine ve optimize etmelerine katkı sağlayacak niteliktedir.

KAYNAKLAR

Anderson, M. J., Smith, K. L., & Williams, R.T., 2023. Sustainable chemical management systems in mining operations: current trends and future perspectives. Journal of Cleaner Production, 375, 134-152.

European Chemicals Agency (ECHA), 2023. Guidance on chemical safety Assessment under REACH regulation. ECHA Technical Guidance Document.

Henderson, P. A., Johnson, M. B., & Davis, R. K., 2023. Emergency response protocols in mining operations: a longitudinal analysis of NFPA and HMIS Implementation. Safety Science, 158, 105-118, 2023.

International Council on Mining and Metals (ICMM), 2023. Good practice guidance on health risk assessment. ICMM Publications, London.

International Labour Organization (ILO), 2023. Safety and health in mining: ILO code of practice. ILO Publications, Geneva, 2023.

International Organization for Standardization (ISO), 2018. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems - requirements with guidance for use. ISO Standards, Geneva.

Martinez, C. R., Garcia, A.L., & Lopez, F. S., 2022. Systematic risk assessment in mining chemical management: a multi-center study. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 74, 224-236.

Mining Association of Canada (MAC), 2023. Towards sustainable mining: chemical management protocol. MAC Publications, Ottawa.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2023. Chemical management in mining operations: best practices guide. NIOSH Publications, Washington DC.

Rodriguez, E. M., & Chen, Y. H., 2023. Environmental compliance and cost optimization in mining chemical management: a meta-analysis. Resources Policy, 80, 102-115.

Thompson, B. K., & Roberts, S. M., 2023. Sustainable extraction processes in precious metal mining: environmental impact assessment and risk minimization. Mining Engineering Journal, 45(3), 78-92.

United Nations (UN), 2023. Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS). 9th Edition, UN Publications, New York.

Wilson, D. R., & Park, J. S., 2023. Risk-based selection of personal protective equipment in mining: an ıntegrated approach. Journal of Occupational Safety and Environmental Health, 22(2), 156-169.

World Health Organization (WHO), 2023. Chemical safety in mining operations. WHO Technical Report Series, Geneva.

Zhang, L. Q., & Lee, H. W., 2023. Integration of international regulations in mining chemical management: analysis of GHS, ADR and SEVESO III implementation. Journal of Environmental Management, 30(1), 45-58.

INVESTIGATION OF THE REAGENTS EFFECT ON THE CHALCOPYRITE FLOTATION IN TWO DIFFERENT PLANT

Adnan Ceylan, Gülay Bulut
Istanbul Technical University, Faculty of Mines, Mineral Processing Department, 34469, Maslak, Istanbul, Türkiye

ABSTRACT: *They are mainly heteropolar organic reagents that provide strength to the air bubbles to transport the collected hydrophobic particles as froth products. Froth structure and froth stability have a significant role in determining mineral grade and recovery, to this aim we investigated the relationship between bubble size, grade and recovery on flotation performance with two different copper plant ores. Frother and collector type and amounts were investigated for laboratory and plant scale. Laboratory tests showed that higher amount of frother caused the bubble size and copper grade decrease, while recovery increase. Increasing the amount of collector also caused the bubble size and copper grade to decrease, while recovery increase. In the plant scale, smaller bubble size and higher grade were obtained compared with the laboratory scale due to presence of cleaning circuit measurements. The size of bubbles is mainly determined by frothers which operate by preventing bubbles from coalescence. The frothers which are more efficient in reducing bubble size were also shown to more stable foams.*

Keywords: *Chalcopyrite Flotation, Froth, Collector, pH*

1. INTRODUCTION

Flotation performance is typically controlled by the addition of chemical reagents such as collectors and frothers. A frother has two main functions: generate and preserve small bubbles in the pulp phase; and provide stability to the froth phase. Three mechanisms of particle recovery into the froth have been proposed: by particle bubble attachment; by water entrainment; and by entrainment between attached particles (Wills and Finch, 2016)

Frothers are typically non ionic surfactants, commonly alcohols and polyglycols used in flotation to help reduce bubble size and stabilize froth, This action is related to modification of the air-water interfacial properties but there is no consensus on the mechanisms, particularly with regard to bubble size control (Machon et al., 1997; Grau and Laskowski, 2006; Finch et al., 2008). The observation is that the average bubble size decreases with increasing frother concentration to become approximately constant above a certain concentration (Klassen and Makrousov, 1963).

Surface active agents known as frothers play a critical role in most mineral flotation systems. The main functions of frothers are to reduce bubble size, to slow bubble rise velocity, and to stabilize froth, which together enhanced particle collection rate (Klimpel and Isherwood, 1991).

They are mainly heteropolar organic reagents that provide strength to the air bubbles to transport the collected hydrophobic particles as froth products. Froth structure and froth stability have a significant role in determining mineral grade and recovery. For a frother to be effective, it needs to form a thinner liquid film in a shorter time, allowing for bubbles and particles to collide and attach. However, the thinner liquid film can cause bubble-bubble coalescence because of enhanced bubble-particle attachment. Therefore, the balance between both processes must be achieved for the effectiveness of the frother (Gupta et al., 2006).

Frothers are mainly heteropolar organic reagents that provide strength to the air bubbles to transport the collected hydrophobic particles as the froth products. It is known that the surface tension of the solution decreases because of the heteropolar nature of the reagent when the frothers are added to water. As the surface tension of solution lowers, more stable froths are generated and bubble size coalescence is prevented in pulp phase (Klimpel and Hansen, 1988).

Flotation frothers are used to facilitate air dispersion into fine bubbles, and to stabilize the froth. According to Leja–Schulman's penetration theory (Leja and Schulman, 1954; Leja, 1956/57), frothers accumulate prefer entially at the air–water interface and interact with collector molecules adsorbed onto solid particles in the particle-to-bubble collision and attachment. The effect of frothers on bubble size has recently been extensively studied (Cho and Laskowski, 2002a,b; Laskowski et al., 2003a,b; Laskowski, 2003; Grau et al., 2005). It has been found that the effect of frothers on bubble size results from their ability to prevent bubble coalescence. The degree of bubble coalescence decreases with increasing frother concentration and at a particular concentration (known as critical coalescence concentration, CCC) for a frother, it reaches non-coalescence environment. Beyond the CCC, there is very little effect of the increase of frother concentration on the bubble size.

The size of bubbles is mainly determined by frothers which operate by preventing bubbles from coalescence. The frothers which are more efficient in reducing bubble size were also shown to more stable foams (Cho and Laskowski., 2002a.b).

Mineral particles report to the froth product either via selective attachment of hydrophobic particles to bubbles which carry them to the froth, or via the entrainment with the pulp water which is carried out to the froth by a swarm of bubbles, or via entrapment between particles in the froth attached to air bubbles (Sawassai et al., 1998). Generally, entrainment is insignificant for particles coarser than 50 μm (Smith and Warren., 1989), but the actual size of the entrained particles strongly depends on the froth properties. This is determined by frother concentration, but also by wettability of solid particles and thus also by collector concentration, particle size distribution and the content of particles.

Extensive research has confirmed that the frother and the collector can yield a synergistic effect on the bubble size, which is affected by the addition and performance of the frother and the collector. The mechanism of the synergistic effect of the frother and the collector requires further research to explore the best combination of the frother and the collector. In addition, the slurry viscosity increases with the increase in the addition of collector, preventing the deformation and coalescence of bubbles (Zhu et al., 2019).

It is known from flotation practice (Klimpel and Hansen., 1988) that while MIBC is very selective and appropriate for the flotation of fine particles, DF-250 and DF-1012 are much stronger frothers which can also be used to float coarse particles

A froth stability which is too low can, however, result in a loss in the recovery of valuable minerals and the inability to transfer material for further processing. The polyglycol ether range of frothers has strong surface activity, and their molecular weight (MW) and carbon chain-length determined their strength and performance (Bulatovic., 2007), with an increase in MW resulting in increased frothability, but lower selectivity

Collectors are usually add to slurry to mix with the mineral particles by the fluid turbulent flow to enhance the surface hydrophobicity of valuable minerals. Moreover, a fluid turbulent flow is utilized to keep the mineral particles in suspension. Air is then introduced or forced into the flotation cell to form fine bubbles under the effect of turbulence, and the frothers are added to the slurry to inhibit the coalescence of bubbles and keep the bubbles stable. Subsequently, bubbles collide with the mineral particles in the flotation cell, and hydrophobic particles adhere to the bubbles, rising to form a froth layer, whereas the hydrophilic particles sink to the bottom of cell to form a tailing (Wang et al., 2019; Mesa and Brito-Parada, 2019; Rosa and Rubio, 2018).

The main function of a collector is to selectively adsorb on a mineral surface, altering its hydrophobicity such that bubble particle aggregation can take place for minerals which are not readily floatable in the absence of collector addition. A number of recent studies investigating the influence of collectors on flotation hydrodynamics have shown that amine and many oxhydryl collectors exhibit frother like properties (Espinosa Gomez et al., 1988; Laskowski, 1993; El-Shall et al., 2000; Atrafi et al., 2012; Ravichandran et al., 2013; Corona-Arroyo et al., 2015).

It is evident from the foregoing that pulp alkalinity plays a very important, though very complex, role in flotation, and, in practice, selectivity in complex separations is dependent on a delicate balance between reagent concentrations and pH. Flotation where possible is carried out in an alkaline medium, as most collectors, including xanthates, are stable under these conditions, and corrosion of cells, pipework etc., is minimized. Alkalinity is controlled by the addition of lime, sodium carbonate (soda ash), and to a lesser extent sodium hydroxide or ammonia. Sulphuric or sulphurous acids are used where a decrease in pH is required. These chemicals are often used in very significant amounts in almost all flotation operations. Although they are cheaper than collectors and frothers (Fee and Klimpel., 1986).

Numerous studies on the effect of collectors on solid's wettability and flotation have led to a well established conclusion that the major role of the collector is to render a treated mineral hydrophobic. The role of frother is not so clear; it is believed that it provides finer bubbles, stabilizes the froth and according to the Schulman Leja penetration theory (Leja and Schulman, 1954; Leja, 1956/57) enhances particle-to-bubble attachment.

The froth flotation process is a physicochemical separation process, which commonly requires a large variety of flotation reagents. Collectors and frothers are considered as important reagents. Collectors render the

valuable minerals hydrophobic. Frothers are used for froth generation and also to facilitate the air dispersion into fine bubbles. According to Leja-Schulman's penetration theory (Leja and Schulman, 1954; Leja, 1956/57) frothers accumulate preferentially at the air–water interface and interact with collector molecules adsorbed onto solid particles in the particle-to-bubble collision and attachment.

The aim of this study is to examine the effect of reagents type and amounts on flotation in bubble size, copper grade and recovery were monitored in both laboratory and plant scale experiments.

2. MATERIAL AND EXPERIMENTAL METHOD

2.1. Material

This study focuses on two different copper ores that were investigated in laboratory scale One of the copper ores is situated in Etibakır Siirt-Madenköy, While other is located in Kastamonu-Hanönü districts in Turkey. The sample were taken homogeneously ant initially crushed below 2 mm using a combination of a jaw, cone and roll crusher, and the homogenized and divided for Chemical- mineralogical analyses and flotation tests. Chemical analyses of ores given in Table 1

The mineralogical analyses of the samples were performed on polished section samples with optical microscopy. According to mineralogical studies, the main sülfür minerals in both ores were chalcopyrite and pyrite. In the polishing samples of the Madenköy ore, chalcopyrite was observed both in coarse grains consisting of mostly chalcopyrite, and in small formations filling pyrite yoids and cracks, For the Madenköy ore, it was determined that the libration size on gangue minerals

was below 100 μm, while the sulfide minerals among themselves were below 53 μm.

In Hanönü ore, the main components was pyrite whıch was mostly sterile in terms of ore minerals. The cracks of some pyrites were filled with chalcopyrite as veinlets. Rarely chalcopyrite was accompanied by few sphalerites of size -20 μm. The grain sizes of chalcopyrite minerals filling the pyrite cracks varied between 5 and 200 μm. When the chemical analysis and mineralogical analysis results are evaluated together, it can be said that Madenköy ore contains more pyrite than Hanönü ore, while Hanönü ore contains more silicate minerals,

Table 1. Chemical analysis of Etibakır Siirt-Madenköy and Kastamonu-Hanönü ore sample

Element	Madenköy Ore (%)	Hanönü Ore (%)
Cu	1.52	1.09
Pb	0.08	0.03
Zn	0.21	0.22
Fe	30.78	19.71
S	26.07	21.18
SiO_2	18.42	40.70

Etibakır Siirt-Madenköy copper plant ore content is around 1.5% Cu and a concentrate has been produced with 20%Cu by selective flotation. 1.670.000 tons of ore are processed annually and 100.000 tons of copper concentrate is obtained. Kastamonu-Hanönü copper plant ore content is around 1.1% Cu and a concentrate has been produced with 20-21%Cu by selective flotation. 2.000.000 tons of ore are processed annually and 120.000 tons of copper concentrate is obtained.

2.2. Bubble Size Measurement

2.2.1. *Manually bubble size measurement*

Bubble size measurements were performed manually on laboratory scale and Madenköy copper plant taking the ımages of the bubbles from the top of the flotation cell. The bubble sizes from these images were measured using the image J program (version 1.8.0). The Image J analysis program has recently found wide fields of study in various sciences (Uslu and Tafakhori, 2013). During the experiments conducted on the laboratory scale, the photos of the bubbles were taken from the top of the flotation cell. The bubble sizes from these photos were measured using the Image J analysis measurement program Approximately 30 bubbles were measured for each condition. For these experiments, the experimental setup and procedure defined in a recent publication (Güven et al., 2020; Batjargal et al., 2021, Ceylan et al,.2021). were commonly used in the field. First, a ruler was placed on the flotation cell and the images taken wıth a camera, before bubble size measurements, a certain length on the image was defined as the reference in the Image J program, Afterwards, the average bubble size was measured with ımage J program. Figure 1 shows the bubble size measurement method, and Figure 2-4 shows the images from the measurements with different reagents with manually Image J program and automate Frothsense system.

On the laboratory scale, bubble size were measured. The flotation reagents were planned to be investigated with Madenköy and Hanönü ores. In laboratory scale bubble measurements were carried out by taking images from the rougher flotation circuit.

Also, the bubble size measurements were made in Etibakır Siirt Madenköy copper plant and Kastamonu-Hanönü plant ore were performed with bubble images obtained rougher and cleaning circuit. In Madenköy copper plant, bubble size manually determined with the Image J program

processing the bubble ımages taken from the top of the flotation cells. However, in Hanönü copper plant, the bubble size measurement was automotically achieved using Frothsense system in different circuit.

2.2.2. *Automate bubble size measurement*

Frothsense system measures several essential froth properties, including speed, direction, bubble size, stability, and color. It also provides statistical data related to these variables. The combination of measured properties and online analysers assays allows user to develop efficient and robust Strategies for advanced flotation process control. Metso-Outotec Frothsense also provides high quality live video streams from the froth cameras directly to the control room. A typical Frothsense installation has several froth imagers mounted on top of flotation machines. The imagers feature an advanced Power over Ethernet (PoE) solution that makes it possible to transmit all data and power for both the camera and the LED lights with just one standart Ethernet cable.

In Hanönü copper mine plant, bubble size was measured with a bubble measuring device (Froth sense) automatically at three minute intervals. The measurements in this study were conducted in the first cell of the rough circuit in the plant. Evaluations were made in line with the data received from the measuring device.

2.3. Flotation Test

2.3.1. *Laboratory conditions*

Flotation tests were carried out in the Denver flotation machine at 1300 rpm in a 2.5 L cell in laboratory scale tests, both ores were ground before flotation tests. While d80 size of the ground Hanönü 28 μm, d80 size of the ground Madenköy ore was determined as 65 μm. All laboratory scale tests were

performed on rougher circuits of chalcopyrite seperation. The tap water was used in grinding flotation, and preparing reagents. pH was adjusted by lime and measured pH meter, the flotation experiments for Madenköy tests were applied at pH 12, while Hanönü tests at pH 8.5. The reagents were added as two stages in the rougher circuit. Both the conditions time for the collector and the flotation time were 5 min for each stage. All flotation tests were performed in duplicates. MIBC (Metil isobutyl carbinol),aliphatic alcohol type frother, was used as the most common frother, OREPREP F-549 (polypropylene glycols methyl ether), a polypropylene glycol-type frother, was also produced by SOLVAY and designed to be stronger than alcohol, while being more selective than a pure polyglycol (Cytec, 2010), ın addition, Aerophine 3418 A (Sodıum isobutyl dithiphpsphine) and KAX (Potassium amyl xanthate) were used as collectors

2.3.2. *Plant conditions*

In the Etibakır Siirt-Madenköy copper plant,the ore was ground to below approximately 100 μm and rougher chalcopyrite concentrate was obtained by flotation. This concentrate was reground below 53 μm and chalcoyrite was floated in Cleaning circuits. 20 m^3 Outotec tank cells were used in the rougher circuit while 10 m^3 Outotec tank cells in cleaner circuit. After ore was ground, pyrite was depressed at pH 12 by the addition of lime and relevant reagents, Aerophine 3418 A as a collector and MIBC as a frother were added to obtain rougher concentrate, the final concentrate was produced by passing through three Cleaning stages.

In Hanönü Copper plant, the ore was ground to below approximately 20 μm and Chalcopyrite was floated in Outotec Floatforce tank cells of 50 m^3 in the rougher flotation circuit and tank cells 20 m^3 and 10 m^3 in the Cleaning circuits. KAX and Aero 3894 as a collector and OREPREP F-549

as a frother were used in the plant and pH was adjusted by lime in the rougher circuit to pH 8.5 in the rougher circuits, while in the cleaning circuits to pH 10.5.

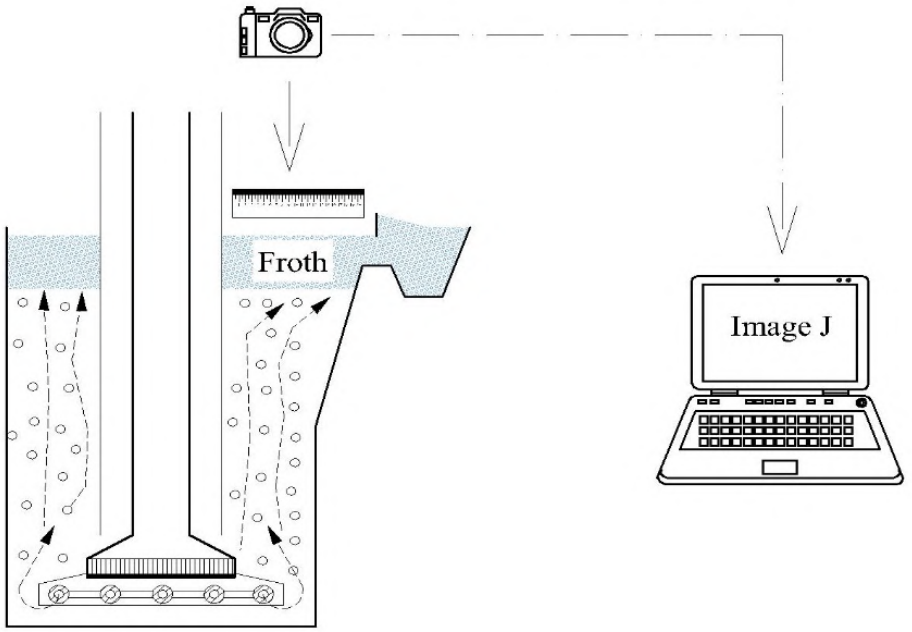
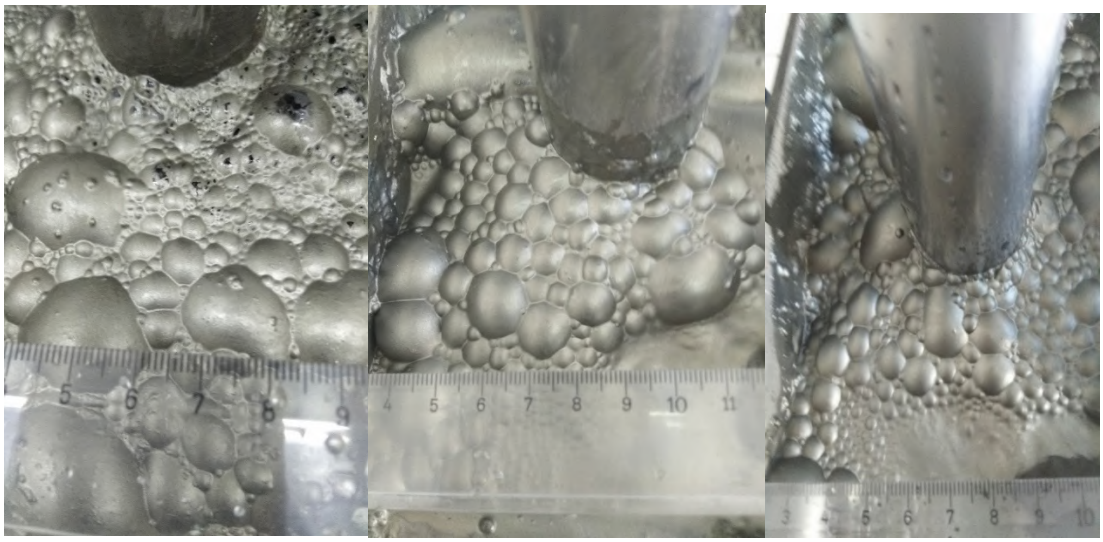


Figure 1. Schematic presentation of bubble-size measurement

30 g/t MIBC 40 g/t MIBC 50 g/t MIBC

Figure 2. Effect of frother MIBC amounts on bubble size for Madenköy ore, collector 3418 A



30 g/t F-549 40 g/t F-549 50 g/t F-549

Figure 3. Effect of frother F-549 amounts on bubble size for Hanönü ore, collector KAX

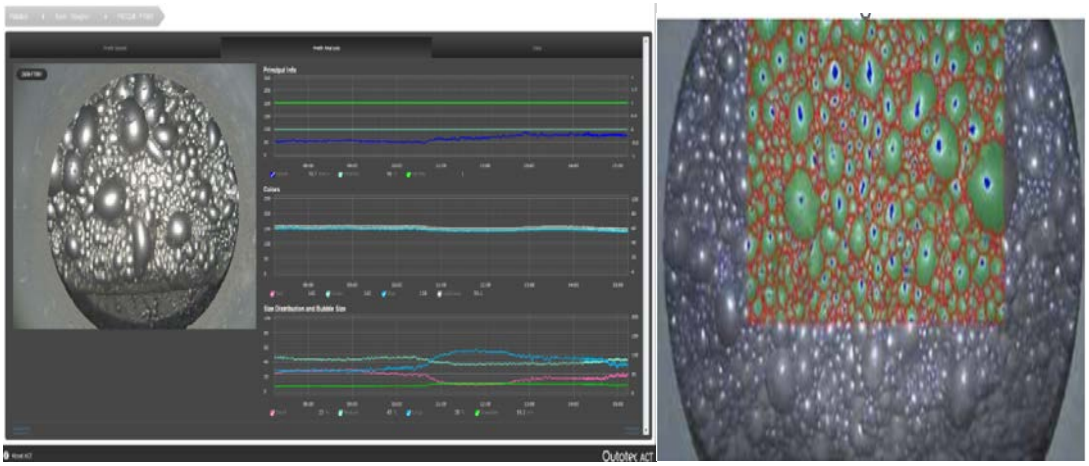


Figure 4. Automate bubble size measurements with Frothsense systems for Hanönönü ore

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1. Effect of Bubble Size on Frother Amounts

The results of flotation tests were carried out at the laboratory scale using reagents in the plants. In these experiments, the amounts of frother effect on bubble size, concentrate grade and recovery were examined. The result was given Table 2 and shown in Figure 5-6.

In these tests, increasing the amount of frothers led to changes in the bubble size, copper grade, and recovery. Flotation tests were performed by adding frothers of 30 (15+15),40 (20+20), and 50 (25+25) g/t for two stages, However, 3418 A for Madenköy ore and KAX for Hanönü ore were used at the amount of 50 (25+25) g/t as collector.

As seen in Table 2, the average bubble size decrease as the amount of frother increased. When the amount of frother is increased bubble size and copper grade to decrease while copper recoveries increased. The bubble size of Hanönü ore is almost double the bubble size of Madenköy ore. This difference comes from the ore type, particle size, froth type and pH levels. Altough there is no concensus in the field, whether solids have an affect on the bubble size (Zhang et al., 2014). Therefore different results were obtained on both ore with smaller bubbles, the collision probability between copper mineral particles increased causing entrainment of gangue minerals, leading to low copper grade and high recovery.

The type and amount of frother, particle hydrophobicity, particle size, quality of process water, gas dispersion, and particle contact angle influence froth stability (Schwarz and Grano., 2005; Farrokhpay, 2011).

Table 2. The effect of the amount of frothers on Madenköy and Hanönü Ores

Experimental Medium	Frother Amounts, (g/t)	Bubble Size, (cm)	Concentrate Grade, (% Cu)	Concentrate Recovery (%)
Madenköy MIBC	30	0,579	6,46	88,07
	40	0,386	6,39	90,87
	50	0,341	6,10 Feed 1.52	91,72
Hanönü F549	30	1,018	3,87	80,35
	40	0,779	3,64	82,77
	50	0,665	3,35	84,80
			Feed 1.09	

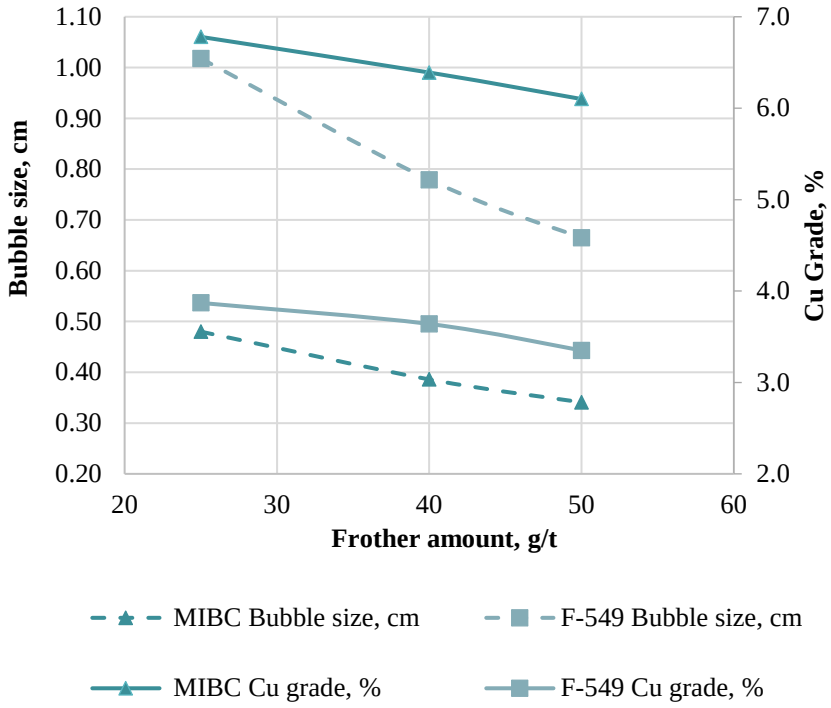


Figure 5. Effect of frother amounts on bubble size and copper grade for Madenköy ore with MIBC at pH 12 and Hanönü ore with F-549 at pH 8.5

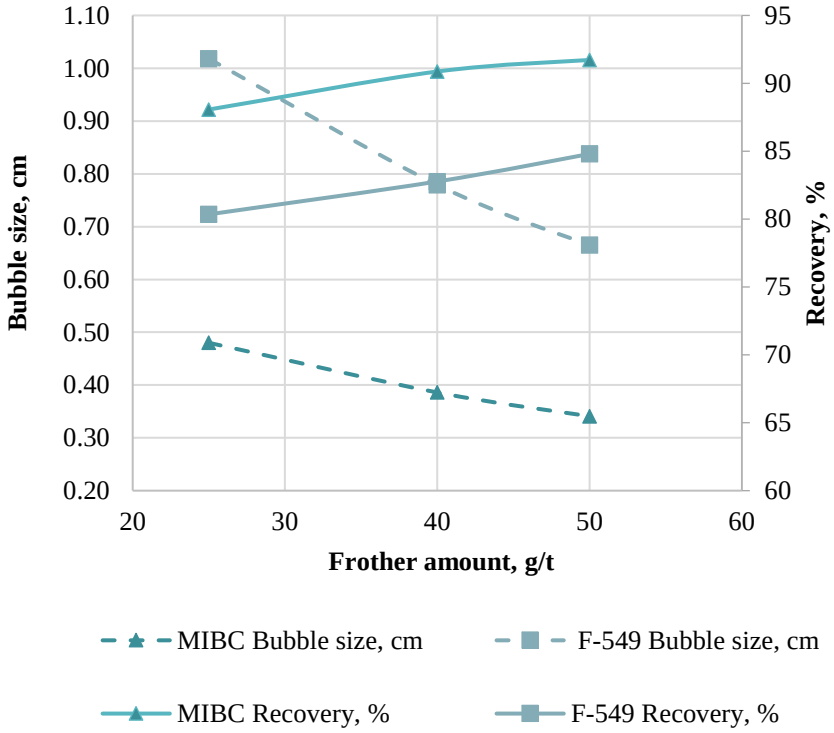


Figure 6. Effect of frother amounts on bubble size and recovery for Madenköy ore with MIBC at pH 12 and Hanönü ore with F-549 at pH 8.5

Flotation reagents include collectors and surface modifiers, frothers, and pH-regulators controlling physical and chemical conditions of solid, air, and liquid phases, respectively. The importance of frothers in flotation is widely acknowledged, particularly in terms of their role with respect to bubble size, and the stability and mobility of the froth phase. These factors play a significant role in the kinetic viability of the process, and the overall recovery and the grade that can be achieved from a flotation cell or circuit (Comley et al., 2002).

3.2. Effect of Bubble Size on Collector Amounts

In these experiments, the amounts of collector effect on bubble size, concentrate grade and recovery were examined. The result was given Table 3 and shown in Figure 7-8. We investigated the effect of collector amount on bubble size using 3418 A and KAX at 50,75,100 g/t amount with Madenköy ore and Hanönü ore, respectively. The tests were performed with MIBC of 30 g/t at pH 12 for Madenköy ore and F-549 of 30 g/t at pH 8.5 for Hanönü ore. The results revealed that collector amount was inversely related to the bubble size and copper grades and recovery in both ores. As seen in Table 3, the average bubble size decrease as the amount of collector increased. When the amount of collector is increased bubble size and copper grade to decrease while copper recoveries increased. The bubble size of Hanönü ore is almost double the bubble size of Madenköy ore.

The increase of collector amount improved copper recoveries in both ores, However, İn Madenköy ore, where 3418 A was used as a collector, both copper grade and copper recoveries were higher than Hanönü ore. Also, smaller bubble sizes were measured with Madenköy ore compared to Hanönü ore. These results showed that ores properties, pH, and reagent composition impact bubble sizes during flotation, Because of the fine

liberation sizes of Hanönü ore, flotation was carried out in finer sizes (below 20 µm) compared to Madenköy ore, also, Hanönü ore consisted of more silicates than Madenköy ore According to the literature, the presence of fine silica in the feed increased the flotation rate of water and the entrainment of this silica in the froth product significantly (Melo et al., 2006).

Table 3. The effect of the amount of collectors on Madenköy and Hanönü Ores

Experimental Medium	Collector amounts, (g/t)	Bubble Size, (cm)	Concentrate Grade, (%Cu)	Concentrate Recovery (%)
Madenköy 3418A	50	0,579	6,46	85,8
	75	0,484	5,89	87,2
	100	0,414	5,41 Feed 1.52	89,5
Hanönü KAX	50	1,018	3,87	80,35
	75	0,839	3,56	82,15
	100	0,731	3,28	84,33
			Feed 1.10	

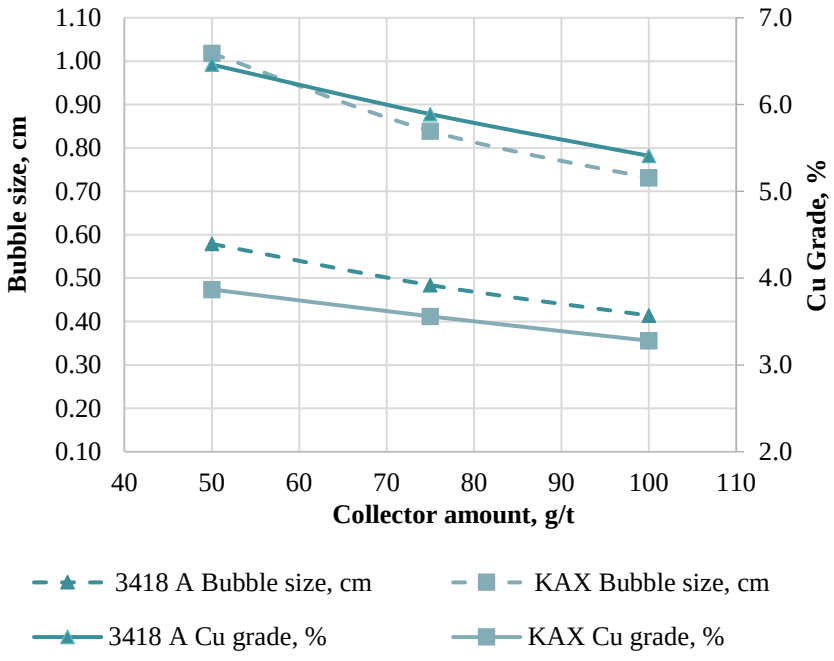


Figure 7. Effect of collector amounts on bubble size and copper grade for Madenköy ore with 3418 A at pH 12 and Hanönü ore with KAX at pH 8.5

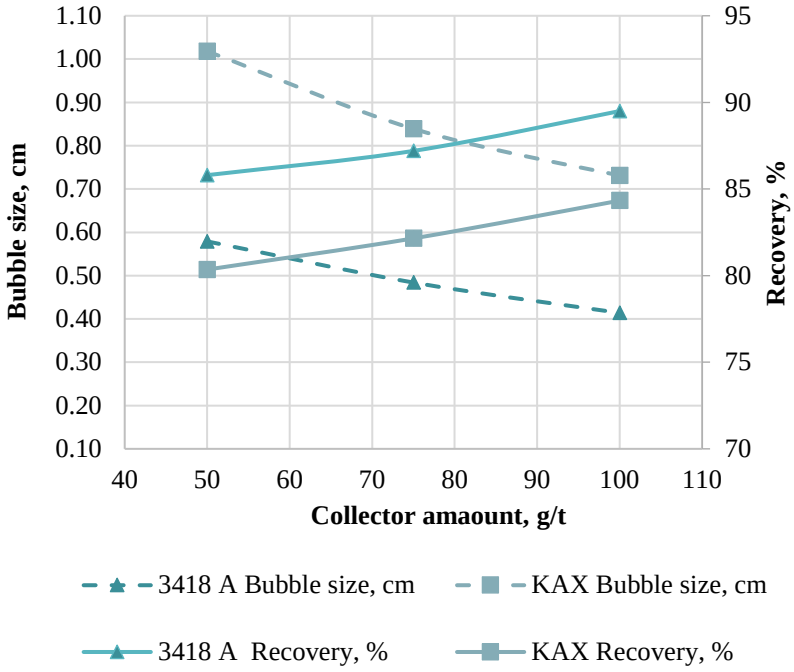


Figure 8. Effect of collector amounts on bubble size and recovery for Madenköy ore with 3418 A at pH 12 and Hanönü ore with KAX at pH 8.5

The collector is usually added to the slurry to enhance the surface hydrophobicity of the mineral particles, and the addition of this may also affect the bubble size. If a small amount of collector is present in the slurry, the collector molecules are easily adsorbed to the non-polar groups of the frother molecules, increasing the hydrophobic capacity of these, which makes these easier to adsorb at the gas-liquid interface and enhances the surface activity (Zhu et al., 2019).

Increasing the amount of collector led to a decrease in bubble diameter in both ores, As the collector amount increases the copper grades decrease and copper recoveries increase because wıth smaller bubbles the collision probability between copper mineral particles increases and also causes entrainment of gangue minerals, leading to low copper grade and high recovery (Ceylan et al., 2024).

4. CONCLUSION

In this study, increasing frothers amount changed the bubble size. Whereas smaller bubble size and lower grades were obtained with high frothers dosages, recoveries were higher. The bubble size of Hanönü ore is almost double the bubble size of Madenköy ore because of ore type, particle size, frother type and pH levels. The effect of collector amount on bubble size is also investigated that İncreasing the amount of collector led to a decrease in bubble sizes in both ores. As the collector amount increases the copper grades decrease and copper recoveries increase because with smaller bubbles the collision probability between copper mineral particles increases and also causes entrainment of gangue minerals, leading to low copper grade and high recovery, In plant measurements similar to laboratory scale tests, smaller bubble sizes were obtained with Madenköy ore, higher copper grades and recoveries are achieved wıth this ore

REFERENCES

Atrafi, A., Gomez, C. O., Finch, J.A., & Pawlik, M., 2012. Frothing behavior of aqueous solutions of oleic acid. Miner. Eng. 36–38, 138–144.

Batjargal, K., Güven, O., Özdemir, O., Karakashev, S., Grozev, N., Boylu, F., & Çelik, M. S., 2021. Adsorption kinetic of varius frothers on rising bubbles of different sizes under flotation conditions. Minerals, 11,324, 1-16.

Bulatovic, S.M., 2007. Handbook of flotation reagents. Chemistry, Theory and Practice, Flotation of Sulfide ores, Vol. 1. Elsevier.

Ceylan, A., & Bulut, G., 2021. Investigation of the frother effect in two and three phases systems on bubble size, surface tension, recovery and grade in chalcopyrite flotation, Physicochem. Probl. Miner. Process. 57 (6), 23–35, 2021.

Ceylan, A., Aydın, Ş. B., Göktepe, F., & Bulut, G., 2024. Relation of bubble size, grade and recovery in the copper flotation systems. Colloids and Surfaces A; Physicochemical and Engineering aspects,692,133929.

Cho, Y. S., & Laskowski, J. S., 2002a. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. Int. J. Miner. Process. 64, 69–80.

Cho, Y. S., Laskowski, & J. S., 2002b. Bubble coalescence and its effect on dynamic foamability. Can. J. Chem. Eng. 80, 299–305.

Comley, B. A., Harris, P. J., Bradshaw, D. J., & Harris, M. C., 2002. Frother characterization using dynamic surface tension measurements. Int. J. Miner. Process. vol. 64, pp. 81-100.

Corona-Arroyo, M. A., Lopez-Valdiviesco, A., Laskowski, J. S., & Encinas-Oropesa, A., 2015. Effect of frothers and dodecylamine on bubble size and gas holdup in a downflow column. Miner. Eng. 81, 109–115.

Cytec, 2010. Mining chemicals handbook, flotation reagent fundamentals.

El-Shall, H., Abdel-Khalek, N. A., & Svoronos, S., 2000. Collector-frother interaction in column flotation of Florida phosphate. Int. J. Miner. Process. 58, 187–199.

Espinosa-Gomez., R., Finch, J. A., & Bernert, W., 1988. Coalescence and froth collapse in the presence of fatty acids. Colloids Surf. 32 (3/4), 197–209.

Farrokhpay, S., 2011. The significance of froth stability in mineral flotation: A review [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 166(1−2): 1−7. DOI: 10.1016/j.cis. 2011.03.001.

Fee, B. S., & Klimpel, R. R.,1986. pH regulators ın Chemical reagents in the Mineral Industry ed. D. Malhotra and W.F.Riggs. SME Inc.,Littleton, 119.

Finch, J. A., Nesset, J. E., & Acuna, C., 2008. Role of Frother in bubble production and behaviour in flotation. Miner. Eng. 21, 949–957.

Grau, R. A., Laskowski, J. S., & Heiskanen, K., 2005. Effect of frothers on bubble size. Int. J. Miner. Process. 76 (8), 225–233.

Grau, R. A., & Laskowski, J. S., 2006. Role of frothers in bubble generation and coalescence in a mechanical flotation cell. Can. J. Chem. Eng. 84, 170–182.

Gupta, A. K., Banerjee, P. K., & Mıshra, A., 2007. Effect of alcohol and polyglycol ether frothers on foam stability, bubble size and coal flotation [J]. International Journal of Mineral Processing, 82(3): 126−137. DOI: 10.1016/j. minpro.2006.09.002.

Güven, O., Batjargal, K., Özdemir, O., Karakashev, S., Grozev, N., Boylu, F., & Çelik, M. S., 2020. Experimental procedure for the determination of the critical coalescence (CCC) of simple frothers. Minerals, 10(7), 617,1-12.

Klassen, V., & Mokroussov, V., 1963. In: Leja, J., Poling, G. (Eds.), An Introduction to the Theory of Flotation. Butterworths, London, pp. 378–381.

Klimpel, R. R., & Isherwood, S., 1991. Some industrial implications of changing frother chemical structure. Int. J. Miner. Process. 33 (1–4), 369–381.

Klimpel, R. R., & Hansen, R. D., 1988. Frothers. In: Somasundaran, P., Moudgil, B. (Eds.), Reagents in Mineral Technology. Marcel Dekker, New York, pp. 385 – 409.

Laskowski, J. S., 1993. Frothers and flotation froth. Miner. Process. Extract. Metall. Rev.: Int. J. 12 (1), 61–89.

Laskowski, J. S., 2003. Fundamental properties of flotation frothers. In: Lorenzen, L., Bradshaw, D.J. (Eds.), Proc. 22nd Int. Mineral Processing Congress, vol. 2. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town, pp. 788–797.

Laskowski, J. S., Cho, Y.S., & Ding, K., 2003a. Effect of frothers on bubble size and foam stability in potash ore flotation systems. Can. J. Chem. Eng. 81, 63–69.

Laskowski, J. S., Tlhone, T., Williams, P., & Ding, K., 2003b. Fundamental properties of polyoxypropylene alkyl ether flotation frothers. Int. J. Miner. Process. 72, 289–299.

Leja, J., & Schulman, J. H., 1954. Flotation theory: molecular interactions between frothers and collectors at solid–liquid–air interfaces. Trans. AIME 199, 221–228.

Leja, J., 1956/57. Mechanism of collector adsorption and dynamic attachment of particles to air bubbles as derived from surface chemical studies. Trans. IMM 66, 425–437.

Machon, V., Pacek, A. W., & Nienow, A. W., 1997. Bubble sizes in electrolyte and alcohol solutions in a turbulent stirred vessel. Chem. Eng. Res. Des. 75 (A3), 339–348.

Melo, F., & Laskowski, J. S., 2006. Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation, Miner. Eng. 19, 766–773.

Mesa, D., & Brito-Parada., P. R., 2019. Scale-up in froth flotation a state of the art review. Sep. Purif. Technol. 210, 950-962.

Ravichandran, V., Eswaraiah, C., Sakthivel, R., Biswal, S. K., & Manisankar, P., 2013. Gas dispersion characteristics of flotation reagents. Powder Technol. 235, 329–335

Rosa, A. F., & Rubio, J., 2018. On the role of nanobubbles in particle-bubble adhesion for the flotation of quartz and apatitic minerals. Miner. Eng. 127, 178-184.

Sawassai, O. N., Alexander, D. J., Franzidis, J. P., & Manlapig, E. V., 1998. An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. Miner. Eng. 11, 243–256.

Schwarz, S,, & Grano, S., 2005. Effect of particle hydrophobicity on particle and water transport across a flotation froth [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 256(2−3): 157−164. DOI: 10.1016/j.colsurfa. 2005.01.010

Smith, P. G., & Warren, L. J., 1989. Entrainment of particles into flotation froths. In: Laskowski, J.S. (Ed.), Frothing in Flotation. Gordon and Breach, New York, pp. 123–145.

Uslu, I., & Tafakhori, F., 2013. Image J program.

Wang, H., Zhu, H., Zhu, J., Shao, S., Huang, D., Liu, J., & Li, T., 2019. Effect of energy consumption on dispersion and recovery of coal slimes in a mechanical flotation cell. Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environ. Effects 42, 1882-1990.

Wills, B. A., & Finch, J. A., 2016. Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. eighth ed. Butterworth-Heinemann.

Zhang, W., & Finch, J. A., 2014. Effect of solids on pulp and froth properties in flotation, J. Cent. South Univ. (21), 1461–1469, https://doi.org/10.1007/ s1177101420861.

Zhu, H., Zhu, J., Valdivieso, L. A., Min, F., Wang, H., Xu, W,. & Li, M., 2019. Effect of reagent blend on characteristics and dispersion of bubbles in a flotation column. J. China Coal Soc. 44, 1586–1592.

METALİK MADENLERİN JEOMEKANİK AÇIDAN İNCELENMESİ

GEOMECHANICAL INVESTIGATION OF METALLIC MINES

Kadir Karaman, Ercan Şahinoğlu, Yunus İskender
Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

Hasan Kolaylı
Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Trabzon

ÖZ: Sağlam bir kayanın jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi madencilik ve tünelcilik gibi jeoteknik uygulamalarda çok önemlidir. Madencilikte üretim yönteminin seçiminde, tahkimat tasarımında, kırma ve öğütme devrelerinin seçiminde cevher ve yan kayacın jeomekanik özelliklerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Kayaçların jeomekanik özellikleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Kayaçların en önemli tasarım parametrelerinden biri olan tek eksenli basınç dayanımını (UCS) parametresini etkileyen kayaç özellikleri genel olarak bilinmektedir. Öte yandan cevher içeren kayaçlara yönelik kaya mekaniği çalışmaları oldukça azdır. Farklı cevherleşme içeren örneklerde dayanım parametresini etkileyen özelliklerin, kayaçların dayanım parametresini etkileyen özelliklerden farklı olabileceği düşünülmüştür. Bu çalışmanın amacı, metalik madenlerdeki cevher miktarının jeomekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu nedenle, bu çalışmada söz konusu etkiyi daha iyi anlayabilmek için aynı maden yatağına ait masif ve ağsal cevher örnekleri seçilmiştir. Cevher örneklerinin parlak kesit analizleri yapılarak mineral yüzdeleri bulunmuştur. Her bir örnek için UCS, nokta yükü dayanım indeksi (PLI), endirekt çekme dayanım deneyi (BTS), ultrasonik P dalga hızı (UPV), yoğunluk ve gözeneklilik değerleri belirlenmiştir. Masif ve ağsal cevher örneklerinin mekanik özellikleri birbirine yakın olmasına rağmen, düşük değerler % fark değerlerini artırmıştır. Öte yandan, iki cevher türü arasındaki farklar fiziksel özelliklerde daha net gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cevherleşme, Jeomekanik Özellikler, Dayanım

ABSTRACT: *Determination of the geomechanical properties of an intact rock is very critical in geotechnical applications such as mining and tunnelling. It is important to know the geomechanical properties of the ore and host rock in the selection of the production method of mines, in the*

design of supports, and in the selection of crushing and grinding processes. Many studies have been carried out on the geomechanical properties of rocks. Rock properties affecting the uniaxial compressive strength (UCS) parameter, which is one of the most important design parameters of rocks, are generally known. On the other hand, rock mechanics studies on ore-bearing rocks are very limited. It is considered that the properties affecting the strength parameter in samples containing different mineralisation may be different from the properties affecting the strength parameter of rocks. The aim of this study is to investigate the effects of ore content on geomechanical properties in metallic mines. Therefore, in this study, massive and stockwork ore samples from the same mine deposit were selected to better understand this effect. Mineral percentages were determined by polished cross-sectional analyses of the ore samples. UCS, point load strength index (PLI), indirect tensile test (ITS), ultrasonic P wave velocity (UPV), density, and porosity values were determined for each sample. Although the mechanical properties of massive and stockwork ore samples were close to each other, lower values increased the % difference values. On the other hand, the differences between the two ore types were more clearly observed in physical properties.

Keywords: *Ore Mineralisation, Geomechanical Properties, Strength*

1. GİRİŞ

Kayaçların jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi ve davranışlarının öngörülmesi, güvenli, sürdürülebilir ve ekonomik mühendislik çözümleri üretmek, doğal kaynakları etkin bir şekilde kullanmak ve doğal tehlikelere karşı hazırlıklı olmak için temel bir gerekliliktir. Kayaçların kullanım yeri ve amacına uygun olarak çeşitli jeomekanik özellikleri taşıması, belirlenen sınıflamalara uygun olması beklenmektedir. Bu nedenle kaya malzemelerinde jeomekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmaktadır. Doğal taşların agrega, dolgu malzemesi, döşeme ve dekoratif eşya olarak kullanımında kalitesinin belirlenmesinde; metalik madenler, kömür, tuz gibi madenlerin yeraltı üretiminde uygulanan topuklu

yöntemlerde topuk hesabında, karayolu ve hidroelektrik tünellerinde; üretim, nakliyat ve havalandırma amacıyla oluşturulan yeraltı açıklıklarının tahkimatında kayaçların jeomekanik özelliklerden faydalanılmaktadır (Karaman, 2024).

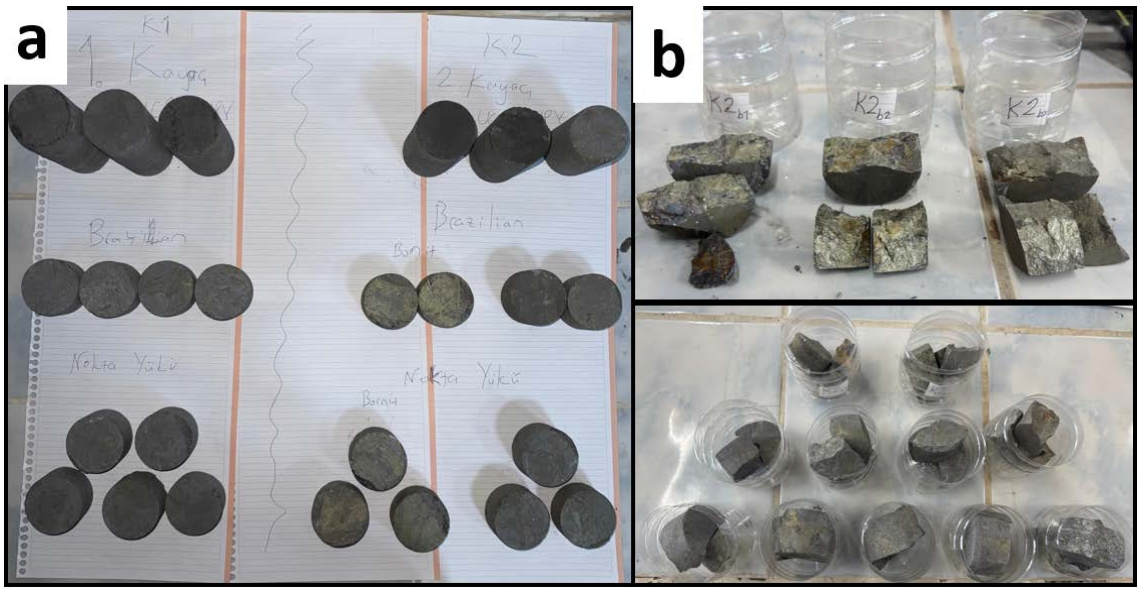
Literatürde çok sayıda araştırmacı çalışmalarında farklı kaya ve kömür malzemelerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirmiş, ihtiyaç duydukları bazı jeomekanik özellikleri (tek eksenli basınç dayanımı (UCS), nokta yükü dayanım indeksi (PLI), endirekt çekme dayanımı (BTS), görünür porozite, gözeneklilik, kuru birim hacim ağırlık (KBHA), doygun birim hacim ağırlık (DBHA), ultrasonik P dalga hızı (UPV), vb.) araştırmışlardır (Bieniawski, 1973; Kahraman vd., 2005; Cevizci ve Şentürk, 2011; Karaman ve Kesimal, 2012; Karaman vd., 2015; Mallı vd., 2017; Özkan vd., 2018; Yetkin, 2022; İskender, 2024; Karaman vd., 2024). Bununla beraber, söz konusu deneyler oldukça sınırlı sayıda metalik maden örneklerinde uygulama alanı bulmuştur. Yetkin (2022) yaptığı çalışmada oda topuk yöntemiyle üretim yapılan bir kurşun çinko madeninin farklı topuk boyutlarında tavan ve tabanda meydana gelen düşey gerilmeyi modelleyerek hesaplamıştır. Mallı vd. (2017) yaptıkları çalışmada metalik bir madende yeraltındaki açıklık alanı ve topuk boyutlarının belirlenmesinde kaya malzemesinin jeomekanik özelliklerinden faydalanmıştır.

Kayaçların önemli bir jeomekanik özelliği olan tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) için standart ölçümler ideal karot örnekleri gerektirirken, araştırmacılar nokta yükü dayanım indeksi (PLI) ve indirekt çekme dayanımı (BTS) gibi pratik yöntemlerle UCS'yi tahmin etmek amacıyla dönüşüm faktörleri (k=UCS/PLI ve R=UCS/BTS) geliştirmişlerdir (Tahir ve Karaman, 2021; Karaman vd., 2024; Karaman, 2024). Özellikle doğal taşlar ve kömür için bu faktörler yaygın olarak çalışılmış olsa da, metalik madenlerdeki çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu çalışmanın amacı farklı

cevherleşme içeren örneklerin (masif ve ağsal cevher) dayanımını etkileyen parametrelerin irdelenmesidir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

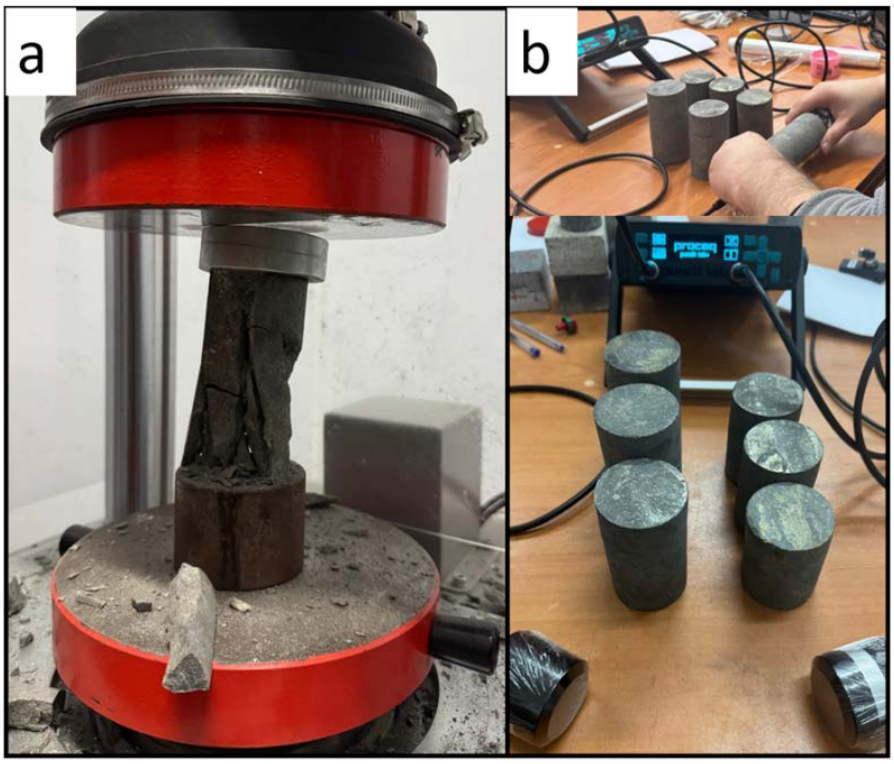
Bu çalışmada; Karadeniz Bölgesi'ndeki bir bakır madeninden alınan masif (C1) ve ağsal (C2) cevher örnekleri kullanılmıştır. Cevher bloklarından hazırlanan karot örneklere UCS, PLI, BTS, UPV, yoğunluk ve görünür gözeneklilik deneyleri yapılmıştır (Şekil 1a,b).



Şekil 1. Hazırlanan silindirik karot örnekleri (a), PLI ve BTS sonrası kırılan silindirik karot örnekleri (b)

UCS deneylerinde kullanılacak karotların boy/çap oranını (L/D) ASTM (1986) 2–2.5 önerirken, ISRM (2007) ise 2.5–3 önermektedir (Özkan vd., 2018). Bu çalışmada, NX karotiyerle alınan çapı 54.7 mm ve boy/çap oranı 2 olan silindirik karot numuneleri, 300 tonluk hidrolik bir pres kullanılarak saniyede 0.5 ile 1 MPa arasında değişen bir yükleme hızıyla test edilmiştir (Şekil 2a).

UCS deneyi öncesinde aynı silindirik karot örnekleriyle örselemesiz bir işlem olan ultrasonik P dalga hızı ölçümü yapılmıştır. Bu deneyle eksenel yayılımda olan P dalga hızının ölçülmesi sağlanmıştır (Şekil 2b). Ölçümlerden önce numunelerin uç yüzeyleri, iyi bir bağlantı için yeterince pürüzsüz ve düz bir düzlem oluşturacak şekilde parlatılmıştır.



Şekil 2. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi yapılışı (a), ultrasonik P dalga hızı deneyinin yapılışı (b)

Nokta yükleme deneyi çapları 54.7 mm, L/D oranları yaklaşık 0.5 olan silindirik örneklerle eksenel olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a). Nokta yükü dayanım indeksi aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır (ISRM, 1985).

$$Is = P/(De^2) \quad (1)$$

$$F = (De\ /A)^{0.45} \quad (2)$$

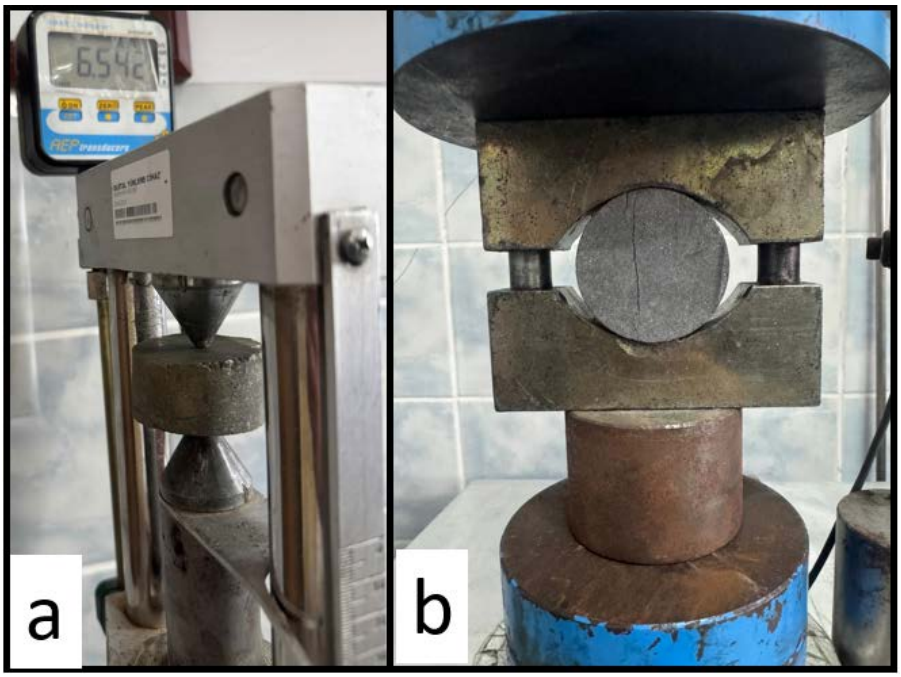
$$Is_{(50)} = F \times I_S \quad (3)$$

Eşitlikte; P: Uygulanan yük (kN), F: Boyut düzeltme faktörü, $Is_{(50)}$: 50 mm çaplı karota göre düzeltilmiş nokta yük dayanımı (MPa), De: eşdeğer karot çapını ifade etmektedir (mm).

Endirekt çekme dayanımı deneyi çapları 54.7 mm, L/D oranları yaklaşık 0.5 olan silindirik örneklerle 5 ton kapasiteli hidrolik preste 0.2 MPa/sn yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney yapılışında ISRM (1981) esas alınmıştır (Şekil 4b). Çekme dayanımı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t = 2P/\pi DL \quad (4)$$

Eşitlikte; σ_t: Endirekt çekme dayanımı (MPa), P: Uygulanan yük (kN), D: Numune çapı (cm) ve L: Numune kalınlığını temsil etmektedir (cm).

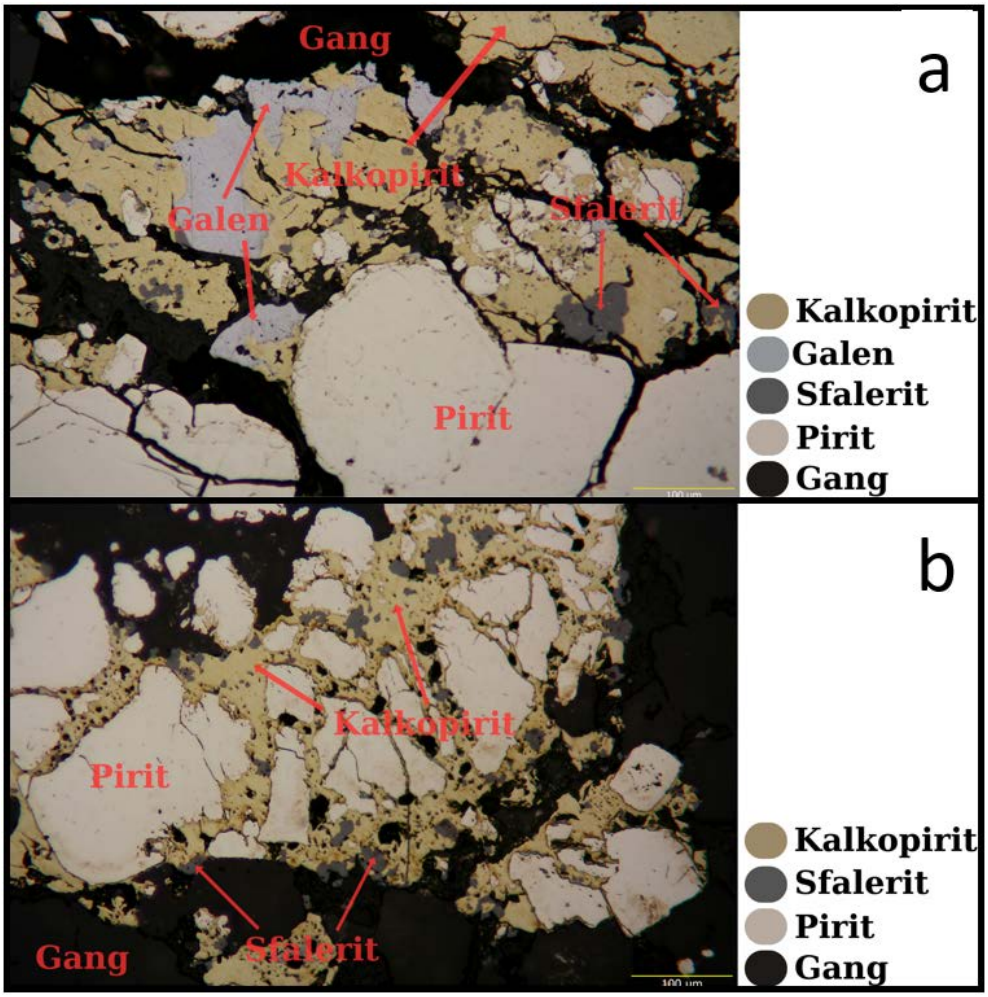


Şekil 3. Nokta yükü dayanım deneyi (a), Endirekt çekme dayanımı deneyi(b)

TS EN 1936 (2010) temel alınarak gerçekleştirilen yoğunluk ve gözeneklilik testlerinde, PLI ve BTS testlerinde kırılan numuneler kaplara

koyularak suya doyurulması amacıyla 48 saat bekletilmiştir. Suya doygun örnekler yüzeyleri kurulanarak tartılmış ve etüve bırakılmıştır. Örnekler 24 saat boyunca 105 °C'de ± 1 °C kurutulmuş olup ardından tartılmıştır. Mezür (dereceli silindir) kullanılarak hacimleri hesaplanan örneklerin DBHA, KBHA ve gözeneklilik tayini yapılmıştır.

Ayrıca, C1 ve C2 cevher örneklerinden parlak kesitler hazırlanmıştır. Parlak kesit görüntüleri incelenerek kaya bloklarının cevher ve gang içerikleri belirlenmiştir. C1 kodlu cevher içeriği fazla olan örnek için Şekil 4a, C2 kodlu cevher içeriği düşük olan örnek için ise Şekil 4b'de parlak kesit görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4. C1 kodlu örneğin parlak kesit görüntüsü (a), C2 kodlu örneğin parlak kesit görüntüsü (b)

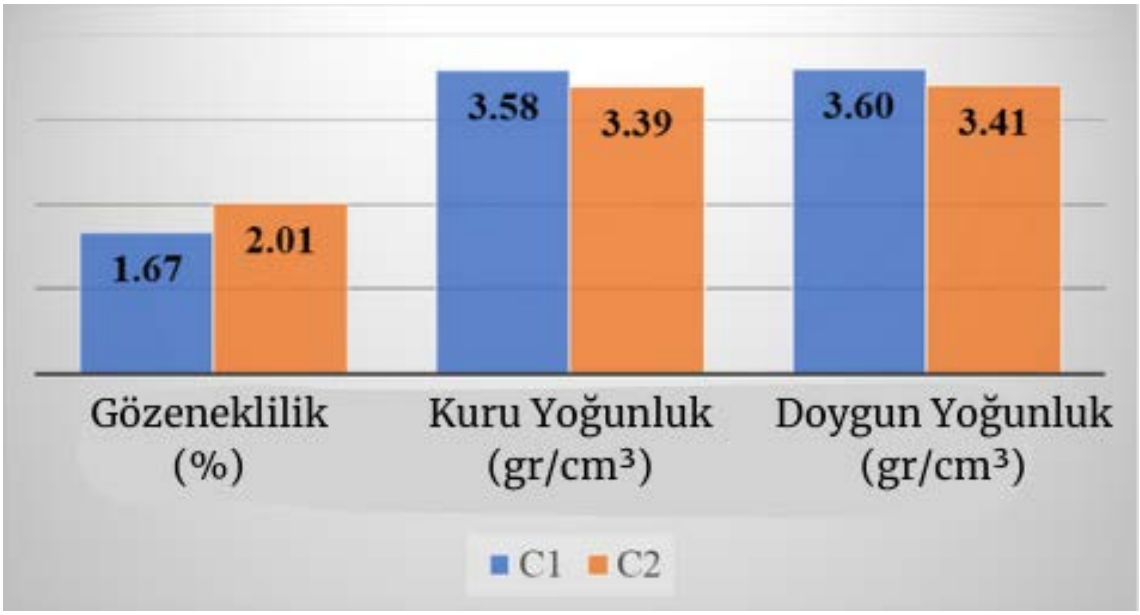
Elde edilen sonuçlar her bir deney için ortalamalar alınarak Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel çalışma sonuçları

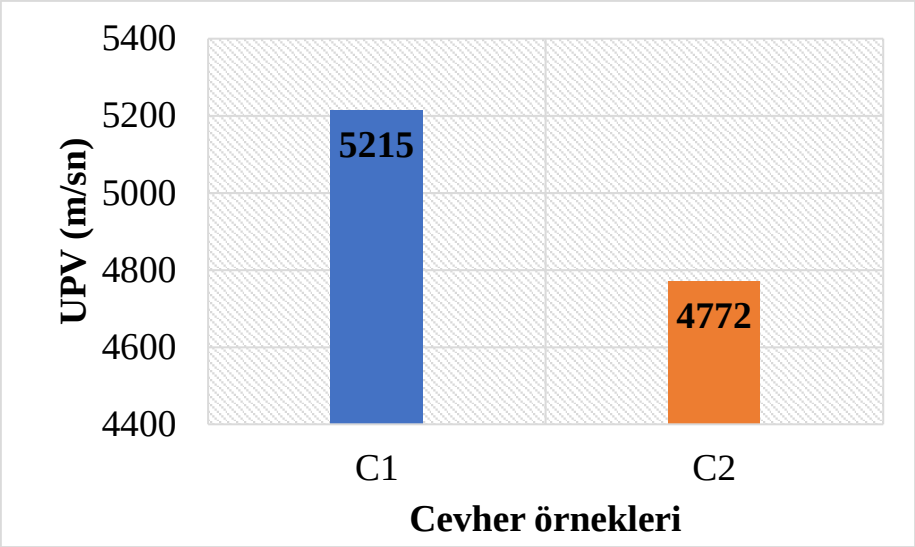
Kod	Gözeneklilik (%)	Kuru Yoğunluk (gr/cm^3)	Doygun Yoğunluk (gr/cm^3)	PLI (MPa)	BTS (MPa)	UCS (MPa)	UPV (m/s)
C1	1.67	3.58	3.60	6.48	8.80	95.34	5215
C2	2.01	3.39	3.41	7.21	9.04	99.20	4772

3. BULGULAR VE İRDELEME

Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde C1 (masif) bloğundan alınan örneklerde C2 (ağsal) bloğuna göre yoğunluğun fazla, gözenekliliğin ise %20.4 daha düşük bir değere sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5). Gözenekliliği az ve birim hacim ağırlığı fazla olan C1 karot örneklerinde UPV değeri C2 bloğundan %9.3 fazla ölçülmüştür (Şekil 6).

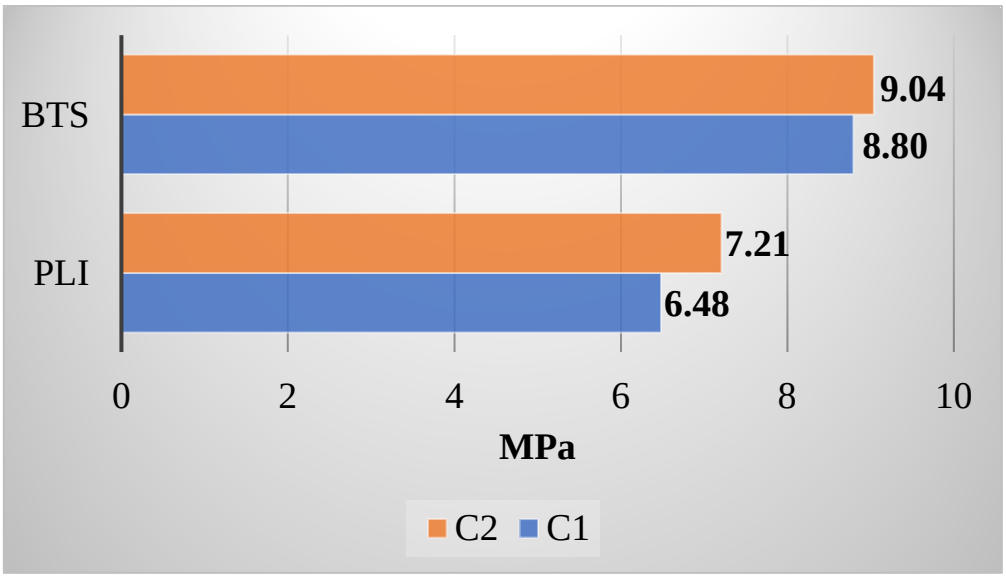


Şekil 5. Gözeneklilik ve yoğunluk deneyi sonuçları

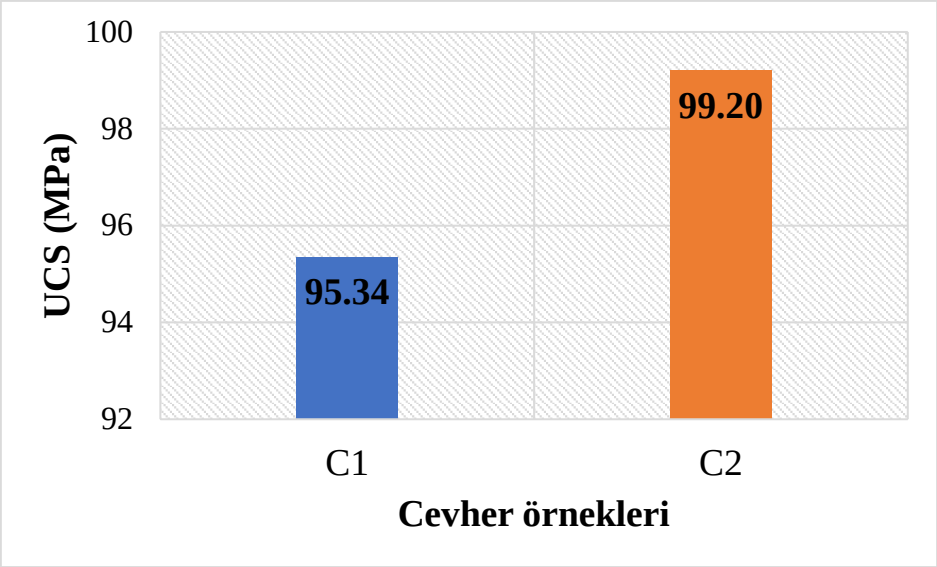


Şekil 6. UPV deney sonuçları

Cevher bloklarının dayanım parametrelerinde ise C2 bloğundan alınan örneklerin C1 bloğu örneklerine oranla BTS, PLI ve UCS değerleri sırasıyla %2.7, %11.2, %4 fazla ölçülmüştür (Şekil 7-8). Bununla beraber, her iki tür cevherin mekanik özelliklerinin birbirine nispeten yakın olduğu görülmektedir. Her ne kadar cevherleşme özellikleri farklı olsa da aynı maden yatağına ait olmaları nedeniyle deneysel sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 7. PLI ve BTS deney sonuçları



Şekil 8. UCS deney sonuçları

Mallı vd. (2017) çalışmalarında kompleks (kurşun, çinko) bir metalik kaya bloğunda UCS değeri ölçümünü 80.32 MPa olarak gerçekleştirmiştir. Yetkin (2022) çalışmasında aynı (kurşun, çinko) kompleks cevherde birim hacim ağırlığı 3.4 gr/cm^3 olarak ölçmüştür. Tahir ve Karaman (2021) UCS dayanımları 71.13 ila 182 MPa arasında değişen 5 farklı bazaltta dönüşüm faktörü k değerini ortalama 17.1 olarak hesaplamıştır. (Şahin vd., 2020) çalışmalarında UCS dayanımları 16.98 ila 111.04 MPa arasında değişen 12 farklı tip kayaçta PLI ile UCS dayanımı korelasyonunu araştırmış ve kayaçların ortalama k değerini 14.2-14.9 olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmadaki masif ve ağsal cevherin (bakır, kurşun, çinko) k değeri ortalama 14.23 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 2).

Literatür, kayaçların tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmek için çekme dayanımı (doğrudan ve/veya dolaylı) ile pratik korelasyonlar sunmaktadır. Genel bir kabul, UCS'nin çekme dayanımının yaklaşık 10 katı olduğu yönündedir. Ancak, UCS/BTS oranı kayaç türüne göre geniş bir aralıkta (10-50, sağlam kayaçlarda 4-25, homojen/izotropik kayaçlarda 8-12) önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir (Sheorey, 1997; Ramamurthy,

2001; Kahraman vd., 2012). Çizelge 2'de bu çalışmadan elde edilen dayanım oranları ayrı ayrı ve maden yatağı için ortalama olarak yer almaktadır. Literatürdeki kayaç çalışmalarının sonuçlarıyla uyumlu olarak, bu çalışmada da cevher numunelerinin tek eksenli basınç dayanımları, çekme dayanımlarına kıyasla yaklaşık on kat daha yüksek bulunmuştur.

Çizelge 2. Dayanım dönüşüm faktörü (k) ve dayanım oranı (R)

Kod	UCS (MPa)	PLI (MPa)	BTS (MPa)	UCS/PLI (k)	UCS/BTS (R)
C1	95.34	6.48	8.80	14.71	10.84
C2	99.20	7.21	9.04	13.76	10.97
			Ortalama:	**14.23**	**10.91**

4. SONUÇLAR

Bu araştırma kapsamında, bir metalik maden yatağından alınan masif ve ağsal dokuya sahip cevher örneklerinin bazı jeomekanik davranışları laboratuvar ortamında tespit edilmiş, bu davranışlar arasındaki farklılıklar ortaya konulmuş ve UCS değerinin pratik yollarla öngörülmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Metalik madenlerin dayanımına yönelik elde edilen k ve R katsayıları genel olarak kayaçlardan elde edilen değerlerle uyumlu çıkmıştır.

Cevher örneklerinin mekanik davranışları benzerlik gösterse de, düşük çekme ve nokta yük dayanımı değerleri iki örnek arasındaki ufak farkların daha belirgin algılanmasına yol açmıştır. Söz konusu farkların görünür gözeneklilik, P dalga hızı ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklerde daha belirgin olduğu anlaşılmıştır. Metalik madenlerin jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi ve analizine yönelik yapılan çalışmalar madencilik

faaliyetlerinin güvenli, verimli ve ekonomik bir şekilde yürütülmesi için kritik öneme sahiptir. Bu sebeple, metalik maden numunelerinin jeomekanik karakterizasyonuna odaklanan bilimsel araştırmaların artırılması büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

ASTM, 1986. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens, report D 2938, pp. 390-391.

Bieniawski, Z. T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. Volume 15, pp. 335-344.

Cevizci, H., & Şentürk, A., 2011. Denizli pembesi ve Muğla leylağı mermerlerinin jeomekanik özelliklerin belirlenmesi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 26, ss. 99-107.

ISRM, 1981. ISRM suggested methods: rock characterization, testing and monitoring. E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 s.

ISRM, 1985. Suggested method for determining point load strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 22, 53- 60.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006, Ulusay, R. and Hudson, J. A. (Editors), ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628p.

İskender, Y., 2024. TTK Kozlu ve Üzülmez müesseselerindeki kömür ve yan kayacın jeomekanik özelliklerinin incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Trabzon, Türkiye.

Kahraman, S., Günaydın, O., & Fener, M., 2005. The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 42:584–589.

Kahraman, S., Fener, M., & Kozman, E., 2012. Predicting the compressive and tensile strength of rocks from indentation hardness ındex. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112, 331–339.

Karaman, K., & Kesimal, A., 2012. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı tahmininde nokta yükü deney yöntemleri ve porozitenin değerlendirilmesi. Madencilik Maden Mühendisleri Odası Dergisi, vol.51, no.4, pp.3-14.

Karaman, K., Kesimal, A., & Ersoy, H., 2015. A comparative assessment of indirect methods for estimating the uniaxial compressive and tensile strength of rocks. Arabian Journal of Geosciences, Volume 8(4), 2393– 2403. https://doi.org/10.1007/s12517-014-1384-0.

Karaman, K., 2024. Farklı dayanıma sahip kireçtaşlarında dönüşüm faktörünün gözeneklilikle ilişkisi. 3. Bilsel Internatıonal Aspendos Scientifıc Researches Congress, Antalya, Türkiye, ss. 381-387.

Karaman, K., Şahinoğlu, E., & İskender, Y., 2024. Kömür dayanımının tahmininde dönüşüm faktörü ve dayanım oranının kullanımının araştırılması. Türkiye 23. Uluslararası Kömür Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, Zonguldak, Türkiye, pp.199-209.

Mallı, T., Yetkin, M. E., Özfırat, M. K., & Kahraman, B., 2017. Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine. Journal of African Earth Sciences. Volume 134, Pages 365-372.

Özkan, İ., Mesutoğlu, M., & Kızıltaş, Z., 2018. Stress-strain-electrical resistance behavior of Kars-Kağızman rock salt under uniaxial compressive. 12th Regional Rock Mechanics Symposium, pp. 49-58.

Ramamurthy, T., 2001. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Volume 38, pp. 683–697.

Sheorey, P. R., 1997. Empirical rock failure criteria. Ed. 1, A. A., Balkema, Rotterdam.

Şahin, M., Ulusay, R., & Karakul, H., 2020. Point load strength ındex of half-cut core specimens and correlation with uniaxial compressive strength. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 53(8), pp. 3745–3760.

TS EN 1936, 2010. Natural stone test methods- Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Yetkin, M. E., 2022. Metalik madenlerde topuk boyutlarındaki değişimin gerilme dağılımına etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. Sayı 22, ss. 1459-1468.

Tahir, Y. M. O., & Karaman, K., 2021. Dönüşüm faktörünü kullanarak nokta yükü dayanım indeksinden bazaltların tek eksenli basınç dayanımının tahmini. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Türkiye, Cilt 11, Sayı 4, ss.1242-1249. DOI: 10.17714/gumusfenbil.937826.

METALİK MADENLERİN MİNERAL KARAKTERİZASYONU

MINERAL CHARACTERISATION OF METALLIC MINES

Ercan Şahinoğlu, Kadir Karaman, Yunus İskender
Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

Hasan Kolaylı
Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Trabzon

ÖZ: Bu çalışmada, Volkanojenik Masif Sülfid (VMS) yatağına ait masif ve ağsal cevher örneklerinin mineralojik ve dokusal özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, cevher örnekleri X-ışını difraktometresi (XRD) ve parlak kesit analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca, güncel bir analiz tekniği olan alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılmıştır. XRD analizleri, her iki cevher tipinde de kalkopirit, pirit, sfalerit ve galen gibi sülfür minerallerinin baskın olduğunu ve kuvars ile dolomitin gang mineralleri olarak bulunduğunu göstermiştir. Parlak kesit incelemeleri, minerallerin tane boyutları, şekilleri ve birbirleriyle olan ilişkileri hakkında detaylı bilgiler sunmuştur. FE-SEM analizleri ve elementel haritalamaları ise, masif cevherde metal elementlerinin (Cu, Pb, Zn) yaygın ve iç içe geçmiş bir dağılım sergilediğini, ağsal cevherde ise bu elementlerin ana kayaç içerisindeki damarlar ve çatlak dolguları boyunca yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Çalışma, kullanılan ileri karakterizasyon yöntemlerinin VMS yataklarının mineralojik ve dokusal özelliklerinin anlaşılmasında ve madencilik süreçlerinin optimizasyonu açısından belirleyici bir etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: XRD, Parlak Kesit, Cevher Mineralojisi, FE-SEM

ABSTRACT: *In this study, the mineralogical and textural properties of massive and stockwork ore samples from the Volcanogenic Massive Sulphide (VMS) deposit were analyzed in detail. In this context, the ore samples were analysed by X-ray diffractometer (XRD) and polished section analyses. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), an up-to-date analytical technique, was also used. XRD analyses showed that both ore types are dominated by sulphide minerals such as chalcopyrite, pyrite, sphalerite and galena, with quartz and dolomite as gangue minerals. Polished cross-sectional analyses provided detailed information on the grain size, shape*

and interrelationships of the minerals. FE-SEM analyses and elemental mapping revealed that metal elements (Cu, Pb, Zn) exhibit a widespread and interbedded distribution in the massive ore, while in the stockwork ore, these elements are concentrated along veins and fracture fills in the host rock. The study emphasises that the advanced characterisation methods used have a decisive impact on the understanding of the mineralogical and textural characteristics of VMS deposits and the optimisation of mining processes.

Keywords: *XRD, Polished Section, Ore Mineralogy, FE-SEM*

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, yeni ve farklı malzemelere duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu durum, minerallerin daha detaylı incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Günümüzde pek çok mineral türü bilinmekte olup, her yıl yenileri keşfedilmektedir (Ali vd., 2023). Madenlerde bulunan minerallerin türlerini ve miktarlarını doğru bir şekilde belirlemek, yer altı kaynaklarının daha iyi anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır (Tombal ve Kurşun, 2024). Böylece, yer altı kaynaklarının özellikleri ve yapıları hakkında daha fazla bilgi edinmek mümkün olmaktadır. Minerallerin belirlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Cevher mikroskobu ve elektron mikroskopları bu süreçte en yaygın kullanılan araçlardır. Cevher mikroskopları genel incelemeler için oldukça kullanışlı olsa da, çok küçük yapıları ve detayları görüntüleme konusunda sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık, elektron mikroskopları elektron kullanarak daha yüksek büyütme sağlaması sayesinde nanometre ölçeğindeki detayları bile ortaya çıkarabilmektedir Kısaca, genel incelemelerde cevher mikroskopları tercih edilirken, daha küçük detayların analizi için elektron mikroskopları kullanılmaktadır (Ali vd., 2023).

Madencilikte cevherin içerdiği minerallerin belirlenmesinde X-ışını difraktometresi (XRD), cevher mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır (Karaman vd., 2017). Bununla birlikte yakın zamanda alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) mineralojik incelemeler için kullanılmaya başlanmıştır (Prabhu vd., 2021). En önemli nicel analiz yöntemlerinden biri olan XRD, mineraller, polimerler, plastikler, metaller, yarı iletkenler ve seramikler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeleri incelemek için yaygın olarak kullanılabilen tahribatsız bir test tekniğidir. Bu yöntem, minerallerin içeriğini kırınım yoğunluğu ile ilişkilendirerek numunedeki minerallerin tanımlanmasına ve miktarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Ali vd., 2022). Cevherin içerdiği minerallerin tespit edilmesiyle, cevherlerin daha verimli bir şekilde işlenmesi ve değerli minerallerin daha etkin bir şekilde geri kazanılması sağlanabilmektedir (Temizkalb, 2023). Jeoloji ve maden mühendisleri, bilimsel araştırmalarda cevher mikroskoplarından sıklıkla faydalanmaktadır. Bu mikroskoplar, petrografik analizlerin gerçekleştirilmesi ve cevher minerallerinin belirlenmesi için sıkça kullanılan cihazlardır. Ayrıca, minerallerin türü, dokusu, tane boyutları ve birbirleriyle olan ilişkileri hakkında bilgi sağlamaktadırlar (Karaman vd., 2017). Öte yandan FE-SEM, ışık yerine elektronlarla çalışan bir mikroskoptur. Bu elektronlar bir alan emisyon kaynağı tarafından serbest bırakılmaktadır. Nesne, elektronlar tarafından bir zig-zag desenine göre taranmaktadır. FE-SEM, düşük hızlandırma voltajlarında ve küçük çalışma mesafelerinde ultra yüksek görüntüleme sağlamaktadır. Söz konusu yöntem, mineraloji, seramik, polimer, metalurji, elektronik cihaz, kimya, fizik gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Ürettikleri yüksek çözünürlüklü, üç boyutlu, ayrıntılı görüntüler sayesinde bilim alanında yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. FE-SEM malzemenin en üst yüzeyindeki ince

detayları, nano ölçekte bile, olağanüstü bir çözünürlükle incelenmesine olanak sağlar. Geleneksel elektron mikroskoplarında, iletken olmayan malzemelerin (yalıtkanlar) incelenmesi için özel bir iletken kaplama yapılması gerekir. Ancak FE-SEM, iletken olmayan malzemeleri kaplamaya gerek kalmadan inceleyebilir. FE-SEM, yüksek kalitede, net, detaylı ve üç boyutlu görüntüler sunarak malzemelerin morfolojisini anlamada kritik bir araçtır (Prabhu vd., 2021).

Cevherlerin mineralojik yapılarının ve kimyasal içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan ileri karakterizasyon yöntemleri, madencilik süreçleri için çok değerlidir. Cevher karakterizasyonu, yüksek tenörlü ve verimli konsantre ürünlerin elde edilmesinde kilit bir rol oynamaktadır (Temizkalb, 2023). Bu nedenle, maden yataklarının mineralojik ve kimyasal özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Metal açısından zengin sülfürlü cevherleşmeler içeren Volkanojenik Masif Sülfid (VMS) yatakları, denizaltı volkanik bölgelerde hidrotermal konveksiyon etkisiyle oluşan cevherlerdir. Bu yataklar, yoğun sülfürlü kütleler ve bunların altında ağsal veya dağınık sülfürlü cevherleşmeler içermektedir (Akbulut, 2020). VMS yatakları, ekonomik ve endüstriyel öneme sahip bakır (Cu), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) başta olmak üzere çeşitli değerli metallerin önemli bir kaynağını temsil etmektedir (Gisbert vd., 2022). Metalik madenlerin mineral karakterizasyonu, madenlerin etkin ve sürdürülebilir bir şekilde işletilmesi için vazgeçilmez bir süreçtir. Doğru ve detaylı bir karakterizasyon, uygun zenginleştirme yöntemlerinin seçilmesi, proses optimizasyonu ve çevresel etkilerin minimize edilmesi için temel teşkil eder (Can ve Çelik, 2009).

VMS yataklarının detaylı olarak incelenmesi, madencilik süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. XRD, FE-SEM ve cevher mikroskobu gibi analiz teknikleri, cevherlerin mineralojik

yapılarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tekniklerin kullanımı, madencilik faaliyetlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesine katkı sağlarken, doğal kaynakların daha iyi anlaşılmasına da yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada, bir VMS yatağından elde edilen cevher örneklerinin mineralojik ve dokusal özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu tür yatakların analizi, bölgenin maden potansiyelinin anlaşılması ve sürdürülebilir madencilik uygulamalarının geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Araştırmada, cevher örneklerinin incelenmesinde parlak kesit ve XRD analizlerinin yanı sıra güncel bir analiz tekniği olan FE-SEM kullanılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme

Bu çalışmada, Karadeniz Bölgesi'nde yer alan bir VMS yatağından temin edilen masif ve ağsal cevher numuneleri kullanılmıştır. Mineralojik analizler için, yatak karakteristiğini temsil edecek şekilde seçilmiş makroskopik numuneler ayrılmıştır (Şekil 1). Numune hazırlığı aşamasında, ilk olarak çeneli ve merdaneli kırıcılardan yararlanılarak numune boyutları 5 mm'nin altına indirilmiştir. Ardından, örnek bölücü kullanılarak, ana numuneyi temsil eden alt numuneler elde edilmiştir. Bu temsili numuneler, halkalı öğütücüde ince toz haline getirilerek, analiz çalışmalarına uygun tane boyutuna getirilmiştir. Öğütme işlemi sonrasında, numuneler hava geçirmez poşetlere koyularak laboratuvar koşullarında muhafaza edilmiştir. Hazırlanan numunelerin, XRD analizleri Bruker D8 Advance x-ışını difraktometresi ile yapılmıştır. Parlak kesit analizlerinde ise, trinoküler polarizan araştırma mikroskobu kullanılmıştır. FE-SEM analizleri Thermo

Scientific Apreo 2S, 10-500 Pa aralığında ayarlanabilen basınç değerleriyle çalışabilen bir elektron mikroskobunda yapılmıştır.

Şekil 1. Masif (a) ve ağsal (b) cevherlere ait örnekler

Alınan numunelerin detaylı analizleri, maden yatağının çeşitlilik gösteren bir dokuya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sülfit ana kütlesi içerisinde, farklı kimyasal içeriklere sahip sülfit mineral parçacıkları bulunmaktadır. Bu parçacıklar, köşeleri yuvarlatılmış (yuvarlaklaşmış), kısmen belirgin kristal şekilleri olan (yarı-öz şekilli) ve hiç belirgin kristal formu göstermeyen (öz şekilsiz) taneler halinde gözlemlenmektedir. Her bir sülfit mineralinin tane büyüklüğü, mikroskobik ölçeklerden (mikrometre) santimetre ölçeğine kadar geniş bir aralıkta değişiklik göstermektedir. Gözle görülebilir boyutlardaki bu sülfit mineralleri genellikle pirit (FeS_2), kalkopirit ($CuFeS_2$), sfalerit (ZnS) ve galen (PbS) minerallerinden oluşmaktadır.

2.2. Yöntem

Cevher numunesi, XRD analizinin gerektirdiği uygun tane boyutunu sağlamak amacıyla halkalı öğütücüde öğütülerek -25 μm getirilmiştir. Bu

tane boyutunda cevher numunesinin XRD analizleri yapılmıştır. Mineralojik incelemeler için, temsili cevher örnekleri ayrı ayrı özel kalıplara yerleştirilerek parlak kesitler hazırlanmıştır. Parlak kesitlerin hazırlanması sürecinde, parça cevher numunelerinin kalıplardan kolayca ayrılabilmesi amacıyla kalıp iç yüzeylerine vazelin uygulanmıştır. Ardından, epoksi reçinesi kullanılarak numuneler bu kalıplar içinde sabitlenmiş ve sertleştirilmiştir. Yüzeyin ilk düzeltilmesi için 180 numaralı zımpara kullanılmış, sonraki aşamalarda ise otomatik bir parlatma cihazında sırasıyla 320, 600, 800 ve 1000 numaralı daha ince zımparalarla pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 2). Hazırlanan bu parlak kesitler, mikroskop altında detaylı mineralojik analizlere tabi tutulmuştur. Cevher numunelerinin FE-SEM analizleri, makro ölçekte masif ve ağsal cevher örnekleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2. Çalışmada kullanılan parlak kesit örnekleri

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

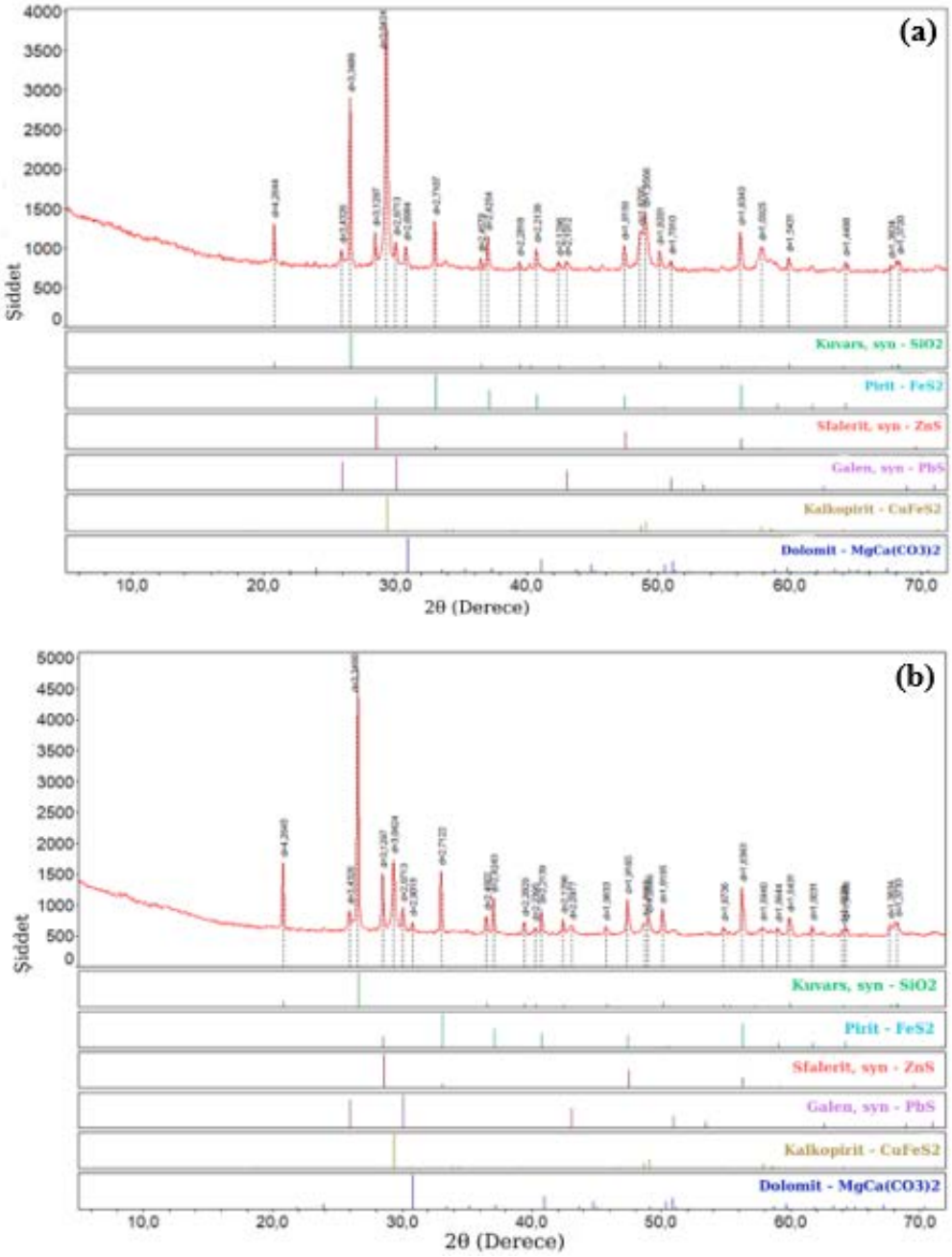
Çalışmada kullanılan masif ve ağsal cevher örneklerinin XRD analizi sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Masif cevheri oluşturan cevher mineralleri bolluk sırasına göre kalkopirit ($FeCuS_2$), pirit (FeS_2), sfalerit

(ZnS) ve galen (PbS)' dir. Gang mineralleri ise kuvars (SiO_2) ve dolomit ($CaMg(CO_3)_2$)'dir. Ağsal cevheri oluşturan cevher minerallerinin bolluk sırası ise kalkopirit ($FeCuS_2$), pirit (FeS_2), sfalerit (ZnS) ve galen (PbS), dir. Gang mineralleri ise kuvars (SiO_2) ve dolomit ($CaMg(CO_3)_2$)'dir.

XRD analizinin verileri, masif cevherin baskın olarak kalkopirit ve kuvars içeren, ancak aynı zamanda önemli miktarda pirit, sfalerit ve galen ile daha az miktarda dolomit içeren polimetalik bir mineralizasyona sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 3a). Ağsal cevherin analiz sonuçlarına göre ise, baskın cevher mineralleri kalkopirit ve sfalerit iken, içeriğindeki ana gang minerali kuvarsdır (Şekil 3b).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan masif ve ağsal cevher örneklerinin XRD analizi sonuçları

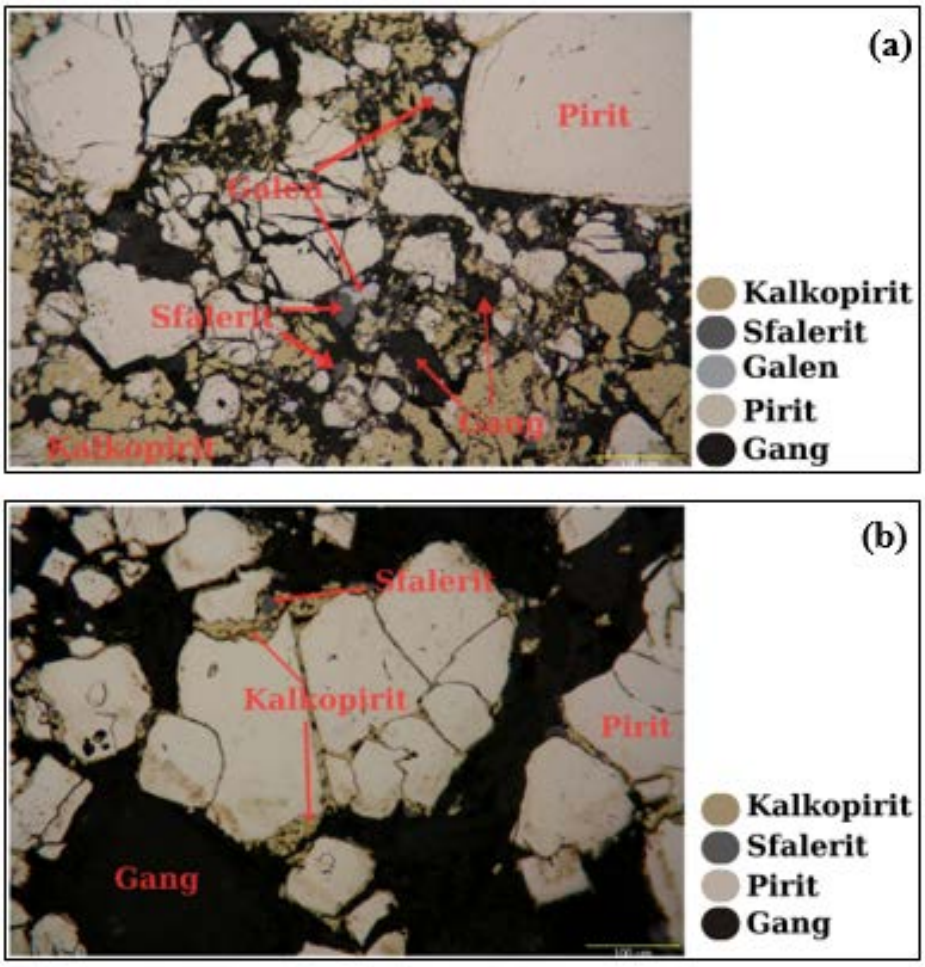
Mineraller	Masif cevher	Ağsal cevher
	Ağırlıkça yüzde (Wt%)	Ağırlıkça yüzde (Wt%)
Kalkopirit	45,78	14,30
Sfalerit	6,58	11,24
Galen	4,71	4,88
Pirit	8,65	13,03
Kuvars	30,90	54,60
Dolomit	3,38	1,95
Toplam	100	100



Şekil 3. Masif (a) ve ağsal (b) cevherlere ait XRD grafikleri

Masif cevherin parlak kesit örneği Şekil 4a'da, ağsal cevherin ise parlak kesit örneği Şekil 4b'de görülmektedir. Parlak kesit incelemelerine göre; piritler, öz şekilli, yarı öz şekilli ve öz şekilsiz çok farklı tane boyutlarına sahip saçılmış taneler halindedir. Bazı örneklerde piritler kalkopiritler tarafından ağsal biçimde ornatılmıştır. Kalkopiritler ise

özellikle ağsal cevherde pirit mineralleri içerisinde ve çevresinde kılcal çatlaklar boyunca yerleşim göstermiştir. Sfaleritler yer yer kalkopiritler içerisinde kapanım halinde görülmektedir. Özellikle masif cevher dokusunda, sfalerit ve galen minerallerinin yer yer iç içe geçmiş taneler halinde bulunduğu gözlemlenmektedir. Benzer şekilde, kalkopirit ve pirit ile kalkopirit ve galen mineralleri de yer yer birbirine bağlı yapılar sergilemektedir. Sfaleritler bazı yerlerde kalkopiritler içinde kapanımlar şeklindedir. Sfalerit minerallerinin, pirit ve kalkopirit mineralleri ile karşılıklı olarak birbirlerinin yerini aldıkları (ornattıkları) tespit edilmiştir. Ayrıca, bazı yerlerde pirit ve kalkopirit mineralleri içerisinde çeşitli boyutlarda sfalerit mnerallerinin bulunduğu görülmüştür (Şekil 4).



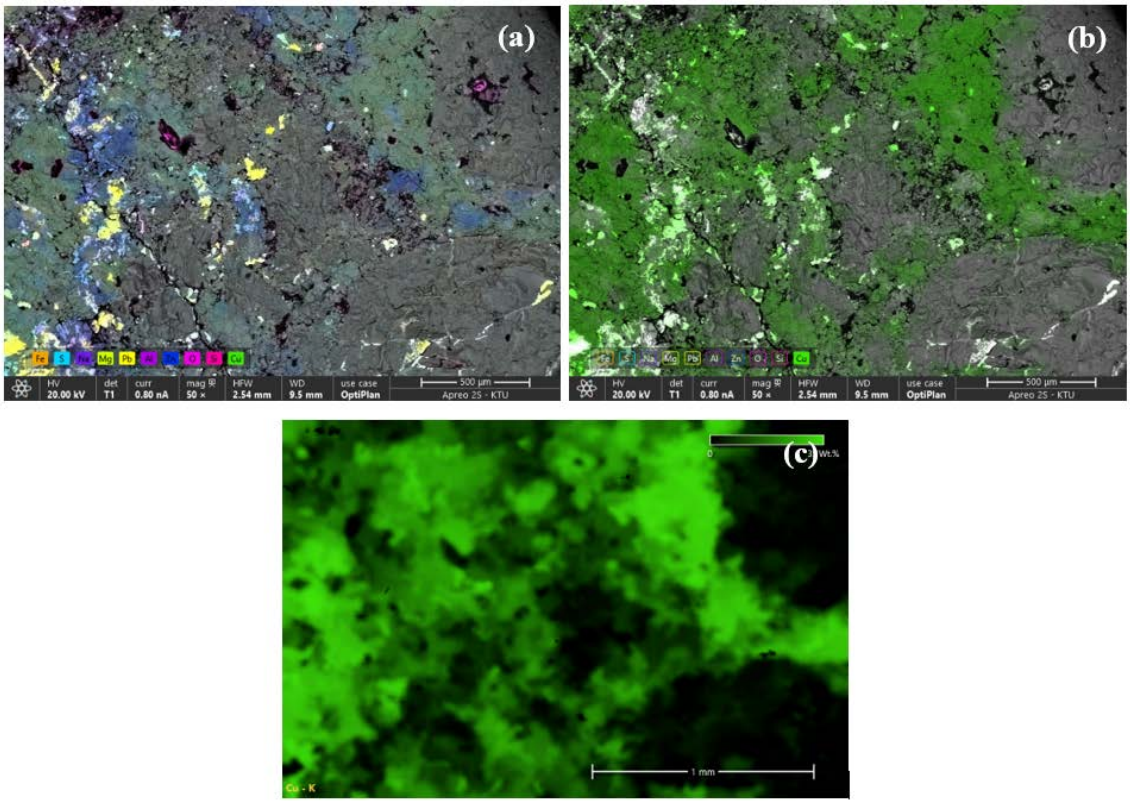
Şekil 4. Masif (a) ve ağsal (b) cevherlere ait parlak kesit görüntüleri

Farklı cevherleşme tiplerini temsil eden iki ayrı örneğin (masif ve ağsal cevher) FE-SEM ile elde edilen elementel haritalamaları incelenerek, bu cevherlerin mikroskobik dokusal özellikleri ve elementel dağılımları karşılaştırılmıştır. Elde edilen görsel veriler, farklı jeolojik süreçlerle oluşan bu cevher türlerinin ayırt edici özelliklerini ortaya koymaktadır.

Şekil 5a, masif cevher örneğinin yüzey morfolojisini ve element dağılımını göstermektedir. Görüntüde kullanılan farklı renkler, Enerji Dispersif X-ışını Spektroskopisi (EDS) ile elde edilen element haritalamasını temsil etmektedir. Bu haritalama, belirli elementlerin örnek üzerindeki dağılımını görsel olarak sunmaktadır. Örneğin, belirli bir rengin yoğunlaştığı bölgeler, o elementin baskın olduğu alanları işaret ederken, farklı renklerin bir arada bulunduğu bölgeler ise farklı elementlerin etkileşimini veya bir arada bulunduğunu gösterir. Şekil 5b görüntüsü, Şekil 5a'da haritalanan belirli bir elementin bakır (Cu) dağılımını vurgulamaktadır. Bu, söz konusu elementin malzemenin yüzeyindeki homojenliğini veya heterojenliğini görselleştirmemize yardımcı olur. Yoğun yeşil bölgeler, bu elementin yüksek konsantrasyonunu gösterirken, daha soluk veya yeşil olmayan bölgeler ise düşük konsantrasyonunu veya yokluğunu işaret eder. Bu tür bir haritalama, elementin malzemenin mikroyapısıyla nasıl ilişkili olduğunu anlamak için kritik öneme sahiptir. Şekil 5c ise malzemenin yüzeyinin çok daha yüksek bir büyütmede alınmış bir FESEM görüntüsüdür. Bu yüksek büyütme, yüzeydeki ince detayları, örneğin tanecik boyutlarını, şekillerini, gözenekleri veya diğer mikro yapısal özellikleri açıkça ortaya koymaktadır.

Masif cevher örneğinin FE-SEM elementel haritalaması, bu örnekte çeşitli elementlerin karmaşık ve iç içe geçmiş bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Özellikle bakır (Cu), kurşun (Pb) ve Çinko (Zn) gibi ekonomik öneme sahip metal elementlerinin geniş alanlara yayıldığı ve

birbirleriyle yakın ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, bu elementleri içeren sülfür minerallerinin (örneğin kalkopirit, pirit, galen) ince taneli ve birbirine kenetlenmiş bir doku oluşturduğunu düşündürmektedir. Genel olarak, masif cevher görüntüsü, ekonomik öneme sahip metal elementlerinin baskın olduğu, yoğun ve yaygın bir mineralizasyon zonunu karakterize etmektedir.

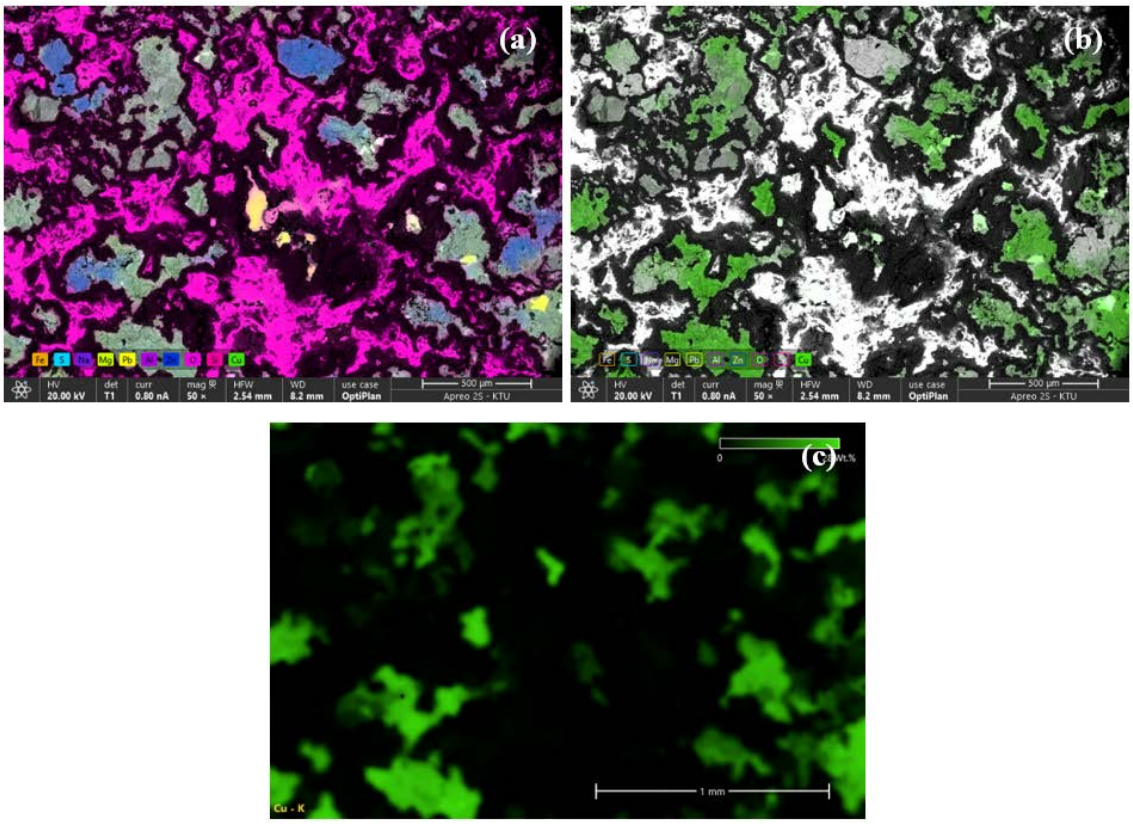


Şekil 5. Masif cevher örneğinin FE-SEM görüntüleri (a-c)

Şekil 6a, ağsal cevher örneğinin yüzey morfolojisini ve element dağılımını göstermektedir. EDS analizi sonucu elde edilen bu elementel haritalama, masif cevher örneğinden farklı olarak, elementlerin daha ağsı veya damarlı bir şekilde dağıldığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle ekonomik öneme sahip metal elementlerinin yoğunlaştığı bölgeler, ana kayaç içerisinde bir ağ gibi yayılan ince damarlar veya çatlak dolguları

şeklinde görülmektedir. Bu durum, mineralizasyonun öncelikle mevcut kırık sistemleri ve boşluklar boyunca gerçekleştiğini düşündürmektedir.

Şekil 6b'deki yeşil bölgeler, haritalanan bakır (Cu) elementinin nerede bulunduğunu ve ne şekilde dağıldığını göstermektedir. Yoğun yeşil alanlar, bakır içeren minerallerin (örneğin kalkopirit) öncelikle ince damarlar veya çatlak dolguları boyunca yoğunlaştığını göstermektedir. Bu ağsı dağılım, mineral taşıyan hidrotermal sıvıların kayaç içerisindeki zayıf zonlar boyunca hareket ederek çökeldiğini desteklemektedir. Daha soluk veya yeşil olmayan bölgeler ise bakır konsantrasyonunun düşük olduğu veya bakır içermeyen minerallerin bulunduğu alanları temsil etmektedir.



Şekil 6. Ağsal cevher örneğinin FE-SEM görüntüleri (a-c)

Şekil 6c FESEM görüntüsü, ağsal yapıyı oluşturan mineral damarlarının ve ana kayaç ile olan sınırlarının daha detaylı bir şekilde

incelenmesine olanak tanımaktadır. Görüntüde, mineral damarlarının kalınlığı, içindeki tanelerin boyutu ve şekli, olası boşluklar veya gözeneklilik gibi mikro yapısal özellikler açıkça görülebilir.

Ağsal cevherin FE-SEM görüntüsü, masif cevherden belirgin şekilde farklı bir doku sunmaktadır. Yoğunlaşmış silisyum (Si) ve oksijen (O) içeren lineer, damar benzeri yapılar dikkat çekmektedir, bu da kuvars gibi silikat minerallerinin ana kayaç çatlaklarını doldurarak damarlar oluşturduğunu düşündürmektedir. Ekonomik metaller (Cu, Pb, Zn) bu silikat damarları içinde veya kenarlarında sınırlı ve bantlı bir dağılım gösterir. Bu durum, sülfür minerallerinin hidrotermal çözeltilerle taşınarak ana kayaç zayıflık zonlarında damarlaşma şeklinde çökeldiğini işaret eder.

FE-SEM, yüksek çözünürlüklü görüntüleme yeteneği sayesinde cevher numunelerinin mikron ve hatta nanometre ölçeğindeki dokusal özelliklerini detaylı bir şekilde ortaya çıkarır. Bu, farklı minerallerin birbirleriyle olan ilişkilerini, tane boyutlarını, şekillerini, sınırlarını ve boşluklarını gözlemlememizi sağlar. Elementel haritalama özelliği ise, bu mikroskobik yapıların üzerindeki farklı elementlerin dağılımını görsel olarak sunar. Her bir element, genellikle farklı bir renkle kodlanarak, hangi mineral fazının hangi elementlerden oluştuğu ve bu elementlerin numune içindeki dağılım paterni açıkça görülebilir hale gelir. FE-SEM elementel haritalamaları, cevherlerin mikroskobik dünyasına eşsiz bir bakış sunarak, hem cevherlerin oluşum süreçlerinin anlaşılmasına hem de daha verimli ve çevreye duyarlı cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlar.

Masif ve ağsal tipteki sülfürlü cevherlerin FE-SEM ile incelenmesi, bu cevherlerin mikroskobik dokusal ve elementel özelliklerinin detaylı bir şekilde karakterize edilmesini sağlayarak önemli avantajlar sunmaktadır. Elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler ve elementel haritalamalar,

cevher oluşum süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına, farklı mineral fazlarının ayırt edilmesine, mineral serbestleşme derecesinin belirlenmesine ve potansiyel zenginleştirme stratejilerinin geliştirilmesine değerli katkılar sağlamaktadır. Bu nedenle, FE-SEM analizleri, benzer mineralojik içeriğe sahip ancak farklı oluşum özelliklerine sahip cevher yataklarının ekonomik ve verimli bir şekilde değerlendirilmesi için vazgeçilmez bir araçtır.

Sonuç olarak, masif sülfit yataklarının oluşumu, mineralojisi ve jeokimyasal gelişiminin kapsamlı bir şekilde anlaşılması için XRD, FE-SEM ve parlak kesit analizleri birbirini tamamlayan ve vazgeçilmez analitik araçlardır. XRD, yatağın genel mineralojik kompozisyonunu ve mineral bolluklarını belirlerken, FE-SEM mikro ölçekteki dokusal özellikleri ve mineral kimyasını detaylı bir şekilde ortaya koyar. Parlak kesit analizleri ise makroskobik ve mikroskobik dokusal ilişkileri görselleştirerek mineral parajenezini anlamamıza yardımcı olur. Bu üç yöntemin entegre bir şekilde kullanılması, cevherin mineralojik ve dokusal özelliklerinin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesini sağlar. Bu sayede maden işletmeleri, uygun cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemlerini seçebilir, metal kazanımını optimize edebilir ve ürün kalitesini kontrol edebilir. Ayrıca atık yönetimini etkin bir şekilde planlayabilir ve cevher yatağının potansiyelini daha doğru bir şekilde değerlendirebilirler. Bu nedenle, masif sülfit yatakları üzerine yapılacak araştırmalarda bu analitik tekniklerin etkin bir şekilde kullanılması büyük önem taşımaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu araştırmada, bir VMS yatağından alınan masif ve ağsal cevher örneklerinin mineralojik ve dokusal özellikleri XRD, FE-SEM, parlak kesit analizleriyle detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, her iki cevher örneğinin de benzer metal sülfür minerallerini içerdiğini, ancak bu minerallerin mikroskobik ölçekteki yayılımlarının dikkat çekici biçimde ayrı olduğunu göstermiştir.

Masif cevherde, ekonomik öneme sahip metal elementleri olan bakır (Cu), kurşun (Pb) ve çinkonun (Zn) geniş alanlara yayıldığı ve birbirleriyle yakın ilişkili olduğu yoğun bir mineralizasyon zonu sergilediği belirlenmiştir.

Ağsal cevherde ise metal elementleri, ana kayaç içerisindeki ince damarlar ve çatlak dolguları boyunca yoğunlaşmıştır. FE-SEM elementel haritalamaları, bakır içeren minerallerin (örneğin kalkopirit) öncelikle bu damarlar boyunca biriktiğini göstermiştir. Silisyum ve oksijen içeren damar benzeri yapılar, kuvars gibi silikat minerallerinin çatlakları doldurduğunu düşündürmektedir.

XRD, FE-SEM ve parlak kesit analizlerinin entegre kullanımı, VMS yataklarının mineralojik ve dokusal özelliklerinin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesini sağlamıştır. FE-SEM'in yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve elementel haritalama yetenekleri, cevherlerin mikroskobik düzeydeki detaylarını ortaya çıkararak, oluşum süreçlerinin anlaşılmasına ve zenginleştirme stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Akbulut, M., 2020. Murgul ve Lahanos Volkanojenik Masif Sülfür (VMS) cevherleşmelerinin cevher mineralojisi (KD Türkiye): Doğu Pontidlerin zıt uçlarında yer alan iki cevherleşmenin karşılaştırması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22(64), 117-136.

Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M., 2022. X-ray diffraction techniques for mineral characterization: a review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions. Minerals, 12, 205.

Ali, A., Zhang, N., & Santos, R. M., 2023. Mineral characterization using scanning electron microscopy (SEM): a review of the fundamentals, advancements, and research directions. Applied Sciences, 13, 12600.

Can, N. M., & Çelik, İ. B., 2009. Proses mineralojisi: cevher hazırlamadaki önemi, ölçüm yöntem ve araçları-Bölüm I. Madencilik, 48(1), 43-53.

Karaman, K., Şahinoğlu, E., Alp, İ., Kesimal, A., & Yılmaz, A. O., 2017. İleri mikroskopi yöntemleri ile parlak kesit analizleri. Nature Sciences, 12 (4), 1-8.

Prabhu, R. S., Priyanka, R., Vijay, M., & Vikashini, G. R. K., 2021. Field emission scanning electron microscopy (Fesem) with a very big future in pharmaceutical research. International Journal of Pharmacy and Biological Sciences, 11 (2), 183-187.

Temizkalb, A., 2023. Bilgisayarlı tomografi (μCT) ve mla (mineral liberation analyzer) verilerinin korelasyonu ve mineral karakterizasyonunda kullanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, s. 176.

Tombal, T. D., & Kurşun, İ., 2024. Investigation of Zn recovery from Balıkesir Balya Pb-Zn ore by hydrometallurgical methods. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 39(3), 1541-1553.

METALİK MADENLERE İLİŞKİN DÜZENLEMELER VE DAHA İYİ BİR MADEN YARGILAMASI

REGULATIONS ON METALLIC MINERALS AND A BETTER MINING JUDICIARY

Mustafa Topaloğlu
Özyeğin Üniversitesi, İstanbul

ÖZ: Madencilik sektörü, niteliği itibariyle birçok hukuki çerçeve ile yakın ilişki içindedir. Bu ilişkilerden doğan uyuşmazlıklar inter/sektörel bir hukuk branşı olan maden hukukunu oluşturur. Maden hukuku endüstriyel bir hukuk alanı olduğundan bu alanda uzmanlaşmış hakimler ve özel bir yargılama tekniği gerektirir. Bu anlamda madencilik sektörüne ilişkin ihtisaslaşmış mahkemeler ve özel madencilik mahkemelerinin kurulması çok büyük yarar sağlayacaktır. Aynı zamanda birçok madencilik uyuşmazlığı tahkime elverişlidir. Uzman hakemlerden oluşan Madencilik Tahkimi yararlı bir alternatif olarak dikkate alınmalıdır. Bu çalışma da kısaca metalik madenlere ilişkin yasal değişikliklere yer verildikten sonra maden hukukunda uzmanlaşmış mahkemelerin önemi, uluslararası uygulama ve Türk hukuku açısından yasal alt yapı gereklilikleri üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Madencilik İhtisas Mahkemeleri, Tahkim, Adil Yargılama

ABSTRACT: *The mining sector is in close relationship with many legal frameworks due to its nature. Disputes arising from these relations constitute mining law, which is an inter/industrial branch of law. Since mining law is an industrial area of law, it requires specialized judges and special trial techniques. In this sense, the establishment of specialized courts and special mining courts for the mining sector would be of immense benefit. At the same time, many mining disputes are arbitrable. Mining Arbitration consisting of expert arbitrators should be considered as a viable alternative. In this study, after a brief review of the legal amendments regarding metallic minerals, the importance of specialized courts in mining law, international practice and the legal infrastructure requirements in terms of Turkish law are elaborated.*

Keywords: *Mining Specialized Courts, Arbitration, Fair Trial*

1. GİRİŞ

6309 sayılı Maden Kanunu'nu ilga ederek 1985 tarihinde yürürlüğe giren 3213 sayılı Maden Kanunu ile madencilik faaliyetlerine hız, yön ve verimlilik getirmek amaçlanmıştı. Bu tarihten sonra 3213 sayılı Maden Kanunu sürekli değişikliklere uğramıştır. Bunlar arasında 05.06.2004 tarihinde yürürlüğe giren 5177 sayılı Kanun ile taşocağı malzemeleri ve doğal taşlar Maden Kanunu kapsamına alınmış ve madenler gruplara ayrılmıştır.

Anayasa Mahkemesinin ve Danıştay Sekizinci Dairesinin izinlerle ilgili iptal kararlarını karşılamak için 24.06.2010 tarihinde çıkarılan 5995 sayılı Kanunla ruhsat başvurularında başvuru sahibinin belirli teknik ve mali kriterlere sahip olması şartının aranması gibi önemli yenilikler getirilmiştir.

2010'lu yıllar maden mevzuatında oldukça fazla sayıda kanuni değişikliklerin yapıldığı yıllar olmuştur. Bu bağlamda 18.02.2015 tarih ve 29271 sayılı Resmi Gazete' de yayımlanarak yürürlüğe giren 6592 Kanunla ruhsat iptalleri ve teminat iratları yaptırımlarının yerine idari para cezaları öngörülerek ruhsat güvencesi açısından önemli adımlar atılmıştır. Buna karşılık 6592 sayılı Kanunla Devlet haklarını artıracak yeni standartlar ve mekanizmalar getirilmiştir. Yine, işletme ruhsat süreleri yeniden belirlenerek ve çevre ile can güvenliğine ilişkin hükümlerde değişikliğe gidilerek yetkilendirilmiş tüzel kişilik kavramı getirilmiştir.

2016 yılında 3213 sayılı Maden Kanunu'na ilaveler yapılmaya devam edilmiş ve Kanun ile TÜVEK olan Yerbilimleri Veri ve Karot Bilgi Bankası ile de kısa adı UMREK olan Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu kurulmuştur.

27 Mayıs 2017 tarihinde yürürlüğe giren 7020 sayılı Kanunla maden ruhsatlarının kısıtlanması, birleştirilmesi, taşınması, iptali ve ihale

edilmesiyle, maden bölgelerinin oluşturulması, bu bölgelerde komisyon kurulması ve rödövans sözleşmeleriyle ilgili önemli hükümler getirilmiştir. 3213 sayılı Maden Kanunu'nda 2017 yılında yapılan son değişiklik ise, 05.12.2017 tarihinde yürürlüğe giren 7061 sayılı Kanunla sektörde olumsuz eleştirilere konu olan orman arazi izin bedelleri düşürülmüş ve uç ürün üreten maden işletmeleri teşvik edilmek istenmiş ve maden sahalarının atıl kalmasını önlemek için ruhsat iptalleri yeniden düzenlenmiştir.

Maden Kanunu'nda 2018 yılında da değişiklikler devam etmiştir. 27.03.2018 tarihinde yürürlüğe giren 7103 sayılı Kanunla işletme izni dışında veya Bakanlıkça izin verilmiş rödövans sözleşmesi olmadan maden üretimine hapis ve adli para cezaları getirilmiş ve ihalede alıcı çıkmayan maden sahalarının aramalara açık hale getirileceği öngörülmüştür.

2019 yılında da esas itibariyle Devlet hakkının artırılması ile ilgili iki yasal düzenlemenin yapıldığını görüyoruz. 28.02.2019 tarihinde yürürlüğe giren 7164 sayılı Kanunla MAPEG'in merkezi idareden ayrılarak ayrı bir kamu tüzel kişiliğe sahip olmasından kaynaklanan yetki genişlemesine ilişkin hükümlere yer verilmiştir. 7164 sayılı Kanunla bir taraftan madenciler yararına uygulama kolaylığı getirilen hükümler getirilirken diğer yandan Devlet hakkıyla ilgili artışa gidilmiş ve problem yaratacak yeni hükümler oluşturulmuştur.

Kanunlar değiştirilirken en önemli sorunlardan biri intikal hükümleri dediğimiz kanunların zaman bakımından uygulanması, kazanılmış haklara saygı ve kanunların geriye yürümemesi ilkesini yansıtan hükümleri titizlikle geçici madde olarak kanuna eklenmesidir. Maalesef bu hususa 7164 sayılı Kanun yürürlüğe girerken pek dikkat edilmediğinden 12.06. 2019 tarihinde yürürlüğe giren 7176 sayılı torba Kanun ile Devlet hakkı oranları ile ilgili yapılan değişikliklerin 2018 yılına uygulanmayacağı öngörülmüştür.

7176 sayılı Kanunla birlikte 3213 sayılı Maden Kanunu, yürürlüğe girdiği 15.06.1985 tarihinden bu yana dördü köklü olmak üzere 25 kez değişikliğe uğramıştır. Şu anda da yeni bir maden kanunu hazırlama çalışmaları devam etmektedir. Bu arada Maden Kanunu'ndan başka maden hukukunu ilgilendiren Çevre ve Orman, mera, patlayıcı maddeler, Başbakanlık ve Cumhurbaşkanlığı izinleri ve ilgili diğer mevzuatlarda da değişiklikler olmuştur.

Türkiye'de MAPEG'in taraf olduğu ve halen Devlet yargısında görüle maden uyuşmazlığı sayısı beş binden fazladır. Bu rakama madencilikle ilgili Çevre ve Orman idareleri ile diğer kamu kurumlarını eklenirse rakam iki katına çıkacaktır. Ayrıca maden ruhsat sahipleri ile özel gerçek ve tüzel kişiler arasındaki başta rödovans olmak üzere özel hukuktan kaynaklanan davalar da eklenirse bu rakamın daha da büyüyeceği açıktır. İşte böylesine çok fazla uyuşmazlığa neden olan madencilik sektörünün uzman hakimler veya hakemler aracılığı ile çözüme kavuşturulmasının sosyal barışa ve adalete katkısının çok olacağını açıklamaya gerek bile yoktur.

2. MADENCİLİK İHTİSAS MAHKEMELERİ KAVRAMI

Belirli kişiler arasında çıkan uyuşmazlıklara veya belirli türdeki uyuşmazlıklara bakmak üzere kanunlarla kurulmuş mahkemelere özel görevli mahkemeler veya ihtisas mahkemeleri denmektedir. Özel görevli mahkemeler ilk derece mahkemesidir. Hukuk yargısı bağlamında görev yapan özel görevli mahkemelerin, kararlarının denetim mercii Yargıtay'dır. İcra Mahkemesi, iş mahkemesi, kadastro mahkemesi, tüketici mahkemesi, fikri ve sınai haklar hukuk mahkemesi, aile mahkemesi, denizcilik ihtisas mahkemesi medeni yargı alanındaki özel görevli mahkemeleri teşkil eder.

İhtisas mahkemelerinin kuruluş amacının anlaşılabilmesi açısından uzman ve uzmanlık kavramına da değinmek gerekir. Uzman, belli bir konuda, belli bir işte, bilgi, görüş ve becerisi çok olan kimse anlamına gelmektedir. Uzmanlık ise belli bir konuda özel bilgiye sahip olmak anlamına gelir. İhtisas ile uzmanlık eş anlamlıdır. Bu manada ihtisas mahkemelerine, uzmanlık mahkemesi de denmektedir. Uzmanlık kavramı gelişen bilim alanlarıyla hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Temel bilim dallarının bilhassa son yarım yüzyıldır hızlı bir biçimde gelişmesi ve genişlemesiyle yeni yeni uzmanlık alanları ortaya çıkmaya başlamıştır. Özellikle teknik alandaki gelişme hızına yetişmek mümkün olmayınca bilim dallarında yeni uzmanlık alanları türemeye başlamıştır. Tüm bilimsel gelişmelere paralel olarak hukukun da sosyal bir bilim dalı olarak bu gelişmelerden ayrı kalması, yerinde sayması düşünülemez. Özellikle küreselleşme ile birlikte diğer hukuk sistemleri ile etkileşim içine girilerek yurtdışındaki uygulamaların yansıması ülkemizde de görülmeye başlanmıştır. AB'ye uyum sürecinde müktesebatın uyumlaştırılması çalışmalarının da yeni kurumlar ve uygulamaların gelişmesinde büyük payı vardır. Bu gelişmeler ışığında hukukun uygulayıcıları konumunda mahkemelerin uzmanlaşması son yıllarda gündeme gelmiştir. Hukuk alanlarının çoğalması her hukukçunun her konuda detaylı bilgi sahibi olmasını imkânsız kılmaktadır. Nasıl ki, pratisyen bir hekim mütehassıs bir doktor gibi teşhis-tedavi veya ameliyat yapamaz ise buna benzer bir şekilde her hâkimin hukukun her alanında önüne gelen uyuşmazlıkları aynı derecede yetkinlikle çözmesi beklenemez. Bu anlamda, özel görevli mahkemeler, genel görevli mahkemelerin karşıtı, genel görevli mahkemeler dışında, uzmanlık gerektiren bir konu ile uğraşan, özel bazı uyuşmazlıkların çözümü için kurulan mahkemeler olarak tanımlanmaktadır.

3. MADENCİLİK İHTİSAS MAHKEMELERİNİN YARARLARI VE ULUSLARARASI UYGULAMA

Özel görevli mahkemelerin kurulmasının temelinde toplum düzenindeki gelişmeye paralel olarak artan ve ayrı bir uzmanlık gerektiren uyuşmazlıkların çözülmesi ihtiyacı yatmaktadır. Bu mahkemeler, teknik bilgi gerektiren uyuşmazlıkların çözümünde uzmanlık sağlar. Yatırımcı güvenini artırır. Çevresel ve toplumsal etkilerle ilgili sorunların etkin çözümünde madencilik alanında uzmanlaşmış mahkemelerin işlevinin çok büyük olacağı ifade edilmektedir. Uluslararası deneyimler, uygulamalar ve örnekler madencilik sektörüyle ilgili konularda uzmanlaşmış mahkemelerin başarısını göstermektedir.

Uluslarararası uygulamalara baklıdığında; Avustralya, maden uyuşmazlıkları için Arazi ve Çevre Mahkemeleri *(Land and Environment Court*) kurulmuş, Kanada'nın bazı eyaletlerinde çevre ve doğal kaynaklarla ilgili davalara bakan özel mahkemeler mevcut olup, Almanya'da, çevre mahkemeleri (*Umweltgerichte)* özel bir mahkeme türü olarak değil ancak uzmanlaşmış hakimlerden oluşur ve madene de bakmaktadır. Afrika'nın maden zengini ülkesi Zambiya'da 2022 maden kaynaklarından doğan uyuşmazlıklar için ihtisas mahkemeleri kurulmuştur. Bu ülkede sadece madencilikten kaynaklanan vergi uyuşmazlıkları genel mahkemelerde görülmektedir.

Türkiye'de Adalet Bakanlığının 2008 yılında yayımlamış olduğu Yargı Reformu Stratejisi Taslağının "Yargının Verimliliği ve Etkinliğinin Artırılması" adlı üçüncü başlığında iyi ve hızlı işleyen, etkili ve verimli bir yargı sisteminin varlığının hukuk devleti olmanın ve yargı sistemine güven duyulması için olmazsa olmaz birer koşul olduğu belirtilmiştir. Bu başlığa bağlı yedinci hedefte, bölgenin coğrafi durumu ve mahkemelere gelen iş

sayısı göz önünde bulundurularak ihtiyaç duyulan uzmanlık mahkemelerinin yaygınlaştırılmasına devam edileceği vurgulanmıştır. Yargı Reformu Stratejisi Taslağının devamı niteliğinde olan ve 2009 yılında yayımlanan Yargı Reformu Strateji Taslağı'nda da aynı görüşler tekrarlanmıştır. Yine Devlet Planlama Teşkilatı'nın Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı'nda yukarıdaki görüşe paralel olarak uzmanlık mahkemelerinin kurulmasının, yargılamanın hızlandırılması ve etkinliğin sağlanması için gerekli olduğu ve İhtiyaç bulunan alanlarda yeni ihtisas mahkemelerinin kurulması yönünde gerekli çalışmaların yapılacağı ifade edilmektedir.

4. TÜRK HUKUK MEVZUATI BAĞLAMINDA MADENCİLİK İHTİSAS MAHKEMELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Özel yada ihtisaslaşmış mahkemelerle genel görevli mahkemeler arasındaki ilişki görev ilişkisidir. Özel görevli mahkemelerin görevi genel görevli mahkemelerin görevinden önceliklidir ve özel görevli mahkemelerin görev ve yetkileri kanunlarla düzenlenmiştir. Anayasa'nın 142. maddesinde mahkemelerin görevlerinin kanunla düzenleneceği öngörülmüştür. 6100 sayılı Hukuk Muhakemeleri Kanunu 1-24 ve 5235 sayılı Kanun genel görevli mahkemelerin görev ve yetkilerini düzenlerken, özel görevli mahkemelerin görev ve yetkileri ilgili özel kanunlarca düzenlenmiştir. Özel görevli mahkeme ve genel görevli mahkeme arasındaki ve özel görevli mahkemelerin birbirleriyle olan görev ayrımında söz konusu kanuni düzenlemeler esas alınacaktır.

Özel görevli mahkemeler, Anayasa'da öngörülen "tabii hakim ilkesi" ile de bağdaşmaktadır. Belirli kişiler arasındaki uyuşmazlıklara veya belli tür uyuşmazlıklara bakmak üzere kurulmuş olan özel görevli mahkemelerin her biri, gerek öz ve gerekse biçim olarak Anayasa'nın 37. maddesine ve "tabii

hakim ilkesi" ne uygun olarak kurulan olağan mahkemelerdir. Tabii hakim ilkesi ve bu ilkeyi koyan Anayasanın 37. maddesi "*Hiç kimse kanunen tâbi olduğu mahkemeden başka bir mercii önüne çıkarılamaz.*" hükmü genel mahkemelerin yanında ayrı Özel Görevli Mahkemelerin kurulmasına engel teşkil etmemektedir. İlgili madde hükmü tabii hâkim ilkesini ifade eder. "Tabii hâkim" ilkesi, uyuşmazlıkların meydana geldikleri anda yürürlükte bulunan kanun hükümlerine göre kurulmuş olan mahkemeler tarafından yargılanmayı gerektirir. Yukarıda anıldığı üzere, Anayasa'nın 142. maddesi uyarınca, özel görevli mahkemelerin mutlaka ayrı bir kanun ile kurulması gerekir. Bu doğrultuda özel görevli mahkemelerin kuruluşu mutlaka ayrı bir kanun hükmü ile düzenlenir. Ancak bu şekilde, özel görevli mahkemelerin kuruluşu, tabii hâkim ilkesine aykırı düşmez. Ayrıca bir yerde ayrı bir özel görevli mahkeme kurulmaması halinde o özel görevli mahkemenin işlerine de genel görevli mahkemelerce bakılıyor olması da özel görevli mahkemelerin Anayasa'nın 37. maddesine aykırı olmadığını göstermektedir.

Nitekim, bu yasal düzenleme çalışmaları olumlu sonuç vermiş ve 6460 sayılı Hukuk Mahkemeleri Kanunu ve Diğer Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun'un 4.maddesi ve 10.maddesi ile idare ve vergi mahkemeleri ile hukuk mahkemeleri arasında ihtisas mahkemelerinin kurulmasının yasal zemini hazırlanmıştır. 6460 sayılı Kanun'un ilgili maddeleri şu şekildedir:

*"**MADDE 4 –** 6/1/1982 tarihli ve 2576 sayılı Bölge İdare Mahkemeleri, İdare Mahkemeleri ve Vergi Mahkemelerinin Kuruluşu ve Görevleri Hakkında Kanunun 2 nci maddesinin (4) numaralı fıkrası aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir.*

"4. Aynı yargı çevresinde birden fazla idare veya vergi mahkemesinin faaliyet gösterdiği hâllerde, özel kanunlarda başkaca hüküm bulunmadığı

takdirde, ihtisaslaşmanın sağlanması amacıyla, gelen işlerin yoğunluğu ve niteliği dikkate alınarak, mahkemeler arasındaki iş bölümü Hâkimler ve Savcılar Yüksek Kurulu tarafından belirlenebilir. Bu kararlar Resmî Gazete'de yayımlanır. Mahkemeler, tevzi edilen davalara bakmak zorundadır."

MADDE 10 – *26/9/2004 tarihli ve 5235 sayılı Adlî Yargı İlk Derece Mahkemeleri ile Bölge Adliye Mahkemelerinin Kuruluş, Görev ve Yetkileri Hakkında Kanunun 5 inci maddesinin beşinci fıkrası aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir.*

"İş durumunun gerekli kıldığı yerlerde hukuk mahkemelerinin birden fazla dairesi oluşturulabilir. Bu daireler numaralandırılır. Özel kanunlarda başkaca hüküm bulunmadığı takdirde, ihtisaslaşmanın sağlanması amacıyla, gelen işlerin yoğunluğu ve niteliği dikkate alınarak, daireler arasındaki iş dağılımı Hâkimler ve Savcılar Yüksek Kurulu tarafından belirlenebilir. Bu kararlar Resmî Gazete'de yayımlanır. Daireler, tevzi edilen davalara bakmak zorundadır."

Hukuk doktrininde, teknik, karmaşık ve ekonomik boyutları dikkate alınarak, maden hukukuna ilişkin tüm hukukî uyuşmazlıkların yalnızca bir mahkeme tarafından çözüme kavuşturulması gerektiği, bu yargı yerinin gerçekten madencilikten anlayan uzman hâkimlerin (endüstriyel hukukçuların) görev yaptığı bir uzmanlık yargı yeri (özel mahkeme, ihtisas mahkemesi) biçiminde örgütlenmesi gerektiği hususu dile getirilmekte ve madenciliğe ilişkin sorunları çözüme kavuşturmadaki yetersizliği sebebiyle, uzmanlık yargı yerlerinin oluşumuna ilişkin yasal düzenlemede, genel usul

kurallarından sapma gösteren, madenciliğe özgü özel usul hükümlerine yer verilmesi gerektiğine işaret edilmektedir.

Bazı hukuk yazarları tarafından maden ihtisas mahkemelerine ihtiyaç olmadığı yönünde görüşler ileri sürülmüşse de 6460 sayılı Kanun ile getirilen ihtisaslaşmayı imkan sağlayan yeni düzenleme karşısında bu görüşün hukuki değeri kalmamıştır (Tanrıver, 2010).

Gerçekten de madencilik sektörü büyük bir gelişme göstermekte ve milli gelirin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. 2012 yılında madencilik sektörü Türk Lirası bazında %10 gelişme göstermiştir. Madencilik sektörünün 2012 yılında ocak üretimi bazında gayri safi yurt içi hasıladaki payı %1,5 olmuştur. Demir çelik, çimento ve seramik gibi maden işleme tesisleri dikkate alındığında madenciliğin GSMH'daki payı %15'lere yaklaşmaktadır. Görüldüğü gibi madencilik sektörü, yarattığı gelir ve istihdam ile Türk ekonomisinin lokomotif ve vazgeçilmez sektörlerinden birisidir.

Böylesine önemli bir sektörle ilgili olan gibi maden hukukundan kaynaklanan uyuşmazlıkların çözümü özel teknik bir bilginin yanında bu hukuk dalının yeterince kavranılmasını gerekli kılmaktadır. Her şeyden önce madenler Anayasanın 168.maddesine göre milli servetler arasında yer alır ve 3213 sayılı Maden Kanunun 4.maddesine göre Devletin kamusal mülkiyetinde bulunmaktadır. Devlet kendi kamusal mülkiyeti altında bulunan madenlerin bir kısmını kamu kuruluşları aracılığıyla işletmekte, bir kısmının işletmesini özel hukuk kişilerine bırakmaktadır.3213 sayılı Maden Kanun'un 24.maddesine göre özel kişilere verilen maden işletme ruhsatları idare hukuku açısından idari izin niteliğindedir. Türkiye'de 31 Aralık 2012 itibariyle 12.945 adet maden arama ruhsatı ve 13.068 adet maden işletme ruhsatı bulunmaktadır. Söz konusu maden arama ve işletme ruhsatlarının verilmesi ihale edilmesi, süresinin uzatılması, harç ve teminata bağlanması,

raporlanması, geçici olarak tatil edilmesi, teminatının irad kaydedilmesi, faaliyetin durdurulması, idari para cezası verilmesi, ruhsatın iptal edilmesi gibi hususlar başlı başına özel uzmanlık gerektiren idare mahkemelerinin görevine giren uyuşmazlıklardır. 6460 sayılı Kanun'un 4.maddesine göre birden fazla idare mahkemesinden birisinin madencilik ihtisas idare mahkemesi olarak görevlendirilmesi, idare mahkemesi başkan ve üyelerinin maden hukukundan doğan bu karmaşık idari sorunların çözümünde uzmanlaşmalarına ve hukuka uygun daha isabetli kararlar verilmesine neden olacaktır.

Aynı şekilde maden hukukunun vergi hukukuyla da yakından ilişkisi bulunmaktadır. Maden işletmeciliğinden 3213 sayılı Maden Kanunu'nun 14.maddesinde öngörülen maden grubuna göre ve kullanım şekline göre değişen oranlarda Devlet hakkı alınmaktadır. Vergi benzeri bir kamu alacağı olan Devlet hakkının tarh ve tahsilinin ihtisaslaşmış bir vergi mahkemesinin kontrolü altında gerçekleşmesinin çok adil sonuçlar doğuracağı açıktır. Yine aynı durum maden ruhsat harçları için de geçerlidir.

İdare ve vergi mahkemeleri dışında adliye mahkemeleri olarak örgütlenen sulh hukuk, asliye hukuk, asliye ticaret ve iş mahkemelerinin konusuna giren madencilikle ilgili oldukça fazla sayıda uyuşmazlık yaşanmaktadır. Bu konuda madenciliğe emsal sektörler olması bakımından uygulamaya geçen denizcilik ihtisas mahkemeleri ve fikri ve sınai haklar mahkemeleri Türk hukuk yargılamasında gayet başarılı sonuçlar vermiştir.

Madencilik faaliyetlerinden kaynaklı olarak gerek iç ticarette gerekse uluslararası ticarette büyük ticari uyuşmazlıklar ortaya çıkmaktadır. Bu uyuşmazlıkları çözmekle görevli asliye ticaret mahkemelerinin bu uyuşmazlıklarla ilgili olarak ihtisas mahkemeleri olarak örgütlenmeleri gerekir.

Madencilik faaliyetleri sırasında madenin bulunduğu arazi sahipleri ile madenciler sık sık karşı karşıya gelmektedirler. Zira Türk sisteminde madenler içinde bulundukları arzın mülkiyetine tabi değildirler. Taşınmaza tecavüzler, kamulaştırmadan kaynaklanan uyuşmazlıklar, maden zararları denilen maden faaliyetleri nedeniyle civarda bulunan taşınmazlarda meydana gelen göçük ve çatlamalar ihtisaslaşmış asliye hukuk mahkemelerince çözümü gereken tipik maden uyuşmazlıklarıdır.

3213 sayılı Maden Kanunu faaliyetinin kamu hukukuyla ilgili kısmını maden ruhsatlarının verilmesini, işletilmesini ve sona ermesini düzenlemektedir. Bunun dışında özel hukuktan doğan maden ruhsat sahiplerinin birbiriyle veya kendi alt işletmecileriyle yaptıkları hukuki ilişkilerden doğan hukuki uyuşmazlıklar hakkında özel yasal düzenleme mevcut değildir.

Bu yasa boşluğu mahkeme içtihatları ile doldurulmaya çalışılmaktadır. Madencilik uygulamasından doğan bu tür uyuşmazlıkların en önemlilerinden birisi rödovans sözleşmeleridir. Yargıtay maden ruhsatının işletilmesinin rödovans denilen kira ücreti benzeri bir bedel karşılığında işletilmesinin bırakılmasını hasılat kirasına ait hükümlerin uygulanacağı görüşündedir. 6100 sayılı HMK m. 4/a hükmü gereği bütün kira sözleşmeleri sulh hukuk mahkemelerinin görevine girdiğinden, maden kirası ya da rödovans sözleşmelerine bakmaya görevli bir ihtisaslaşmış sulh hukuk mahkemesinin belirlenmesi çok uygun olacaktır.

Madencilik sektörü emek yoğun sektörlerden birisidir. Maden iş kolu Türk çalışma ilişkilerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Madenciliğin büyük çoğunluğu yeraltında geçen, tehlikeli ve insan sağlığını olumsuz etkileyen bir iş kolu olması nedeniyle diğer iş kollarından farklı bir şekilde düzenlenmiştir. Yine maden iş kazaları ve grizu patlamaları Türkiye'yi sarsan boyutta son derece ağır ve elem kayıplara neden

olmaktadır. Bu bakımdan iş mahkemelerinin de madencilik koluna özgü olarak ihtisaslaşmasında son derece yarar vardır.

Türkiye maden zengini bir ülke olmasına rağmen madenler ülkenin her yerine eşit dağılmamıştır. Ayrıca bazı bölgelerde maden uyuşmazlıkları daha yoğun olarak yaşanmaktadır. Maden ruhsat sayısı ve maden uyuşmazlıkları bakımından bölgesel olarak öne çıkan iller şu şekilde sıralanabilir: Antalya, Balıkesir, Sivas, Erzincan, Kayseri, Burdur, Ankara, Konya, Muğla Manisa, Eskişehir, Bursa, Zonguldak, Afyon, İzmir, Denizli, Isparta, Mersin, Kütahya, Çanakkale, Bilecik, Kahramanmaraş, Adana, Erzurum, İstanbul, Kocaeli, Kırklareli, Edirne.

Sayılan illerde il düzeyinde yetkili tüm hukuk mahkemelerinin görevini üstlenecek özel görevli madencilik ihtisas mahkemelerinin kurulması yerinde olur. Bu iller dışında da Hâkim Savcılar Kurulu tarafından iş yoğunluğuna göre bir veya daha fazla asliye ticaret mahkemesinin, asliye hukuk mahkemesinin, sulh hukuk mahkemesinin ve iş mahkemesinin madencilikle ilgili uyuşmazlığı çözmekle ilgili işbölümüyle yetkilendirilmesi yerinde olur.

Yine idari yargıda da bir veya birden fazla idare ve vergi mahkemesinin madencilik işleriyle ilgili olarak işbölümüyle Hakim ve Savcılar Yüksek Kurulu tarafından yetkilendirilmesi özel veya ihtisas mahkemelerinden beklenen yararı sağlayacaktır.

Madencilik ihtisas mahkemelerinin kurulması ve buna ilaveten mahkemelerin maden işi ile ilgili işbölümüyle yetkilendirilmesi, madencilik sektörünün hem yurt içinde Türk ekonomisine daha fazla katma değer yaratmasını sağlayacağı gibi, öngörülen ihracat hedefine ulaşılmasına önemli katkısı olacaktır.

5. MADENCİLİKTE TAHKİM

5.1. Genel Olarak Tahkim

Tahkim, mahkeme dışında alternatif bir ticari uyuşmazlık çözüm metodudur. Tahkim usulünde tek hakem veya yerine göre birden çok hakemden oluşan hakem kurulu, hukuki uyuşmazlıkları bağlayıcı ve kesin bir şekilde çözmektedirler. Tahkim mahkemesi tarafından verilen karar, aynen Devlet mahkemesi tarafından verilen karar gibi icrası ve yabancı hakem kararı olması halinde tenfizinin istenebilmesi mümkündür.

Genel olarak dünyada tahkim prosedürleri *ad hoc (arizi)* tahkim ve kurumsal tahkim olarak iki ana grupta toplanabilir. *Ad hoc* tahkimde tahkim prosedürleri, bizzat taraflarca kaleme alınan ya da atıfta bulundukları belirli kural veya yasalar uyarınca veya tarafların verdiği yetkiye dayanarak hakemlerin kontrolünde gerçekleşir. *Ad hoc* tahkim, daha çok tahkimin yapıldığı yer (Türkiye) kanunları veya UNCITRAL Tahkim Kurallarına göre gerçekleşir.

Taraflar muhtemel uyuşmazlıkları ve çözüm usullerini kendileri belirlemek yerine tahkim prosedürlerini yürütecek teknik ve idari organizasyonlara sahip kurumlardaki hakem mahkemelerini tercih edebilirler. Bu şekilde kurumsal tahkimi seçen taraflar, tahkim yargılamasını ayrıntılı düzenleyen önceden öngörülebilen kurallara tabi olurlar. Kurumsal tahkimde, hakem seçimi, hakemlerin reddi, yargılama masrafları ve benzeri diğer durumlarda tahkim kurumu içinde yer alan tahkim divanı sağlıklı bir yargılama için gerekli desteği verir. Böylece tahkim yargılamasında belirsizlikler önlenerek tahkim yargılamasının uzaması engellenmiş olur.

5.2. Tahkimin Devlet Yargısına Göre Avantajları

Tahkim, devlet mahkemelerine göre daha hızlı işlemektedir. Uyuşmazlıklar tahkim usulünde altı ay ve bir yıl gibi kısa süre içinde çözüme kavuşturulmaktadır. Hakemlerden en az birisi uyuşmazlık konusunda uzman kişilerden seçildiğinden, genellikle tahkimde bilirkişiye başvurmaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun sonucu olarak devlet yargısında yargılamanın uzamasına sebep olan bilirkişi seçimi, bilirkişi incelemesi ve bilirkişiye itiraz için geçecek süreler tahkimde söz konusu olmamaktadır. Ayrıca içlerinden en az birisi konusunda uzman hatta bazen de üniversite öğretim üyelerinden seçilen hakemler tarafından yürütülen tahkim yargılamasında, genel olarak birçok konuya bakmak durumunda olan ve çok fazla davaya bakmak durumunda olan Devlet yargılamasındaki hakimlerden daha hızlı karar verilebilmektedir. Konusunda uzman hakemlerin uyuşmazlığın çözümü hakkında daha adil ve daha isabetli kararlar verdiklerini söylemek mümkündür.

Tahkimde yargılama masrafları ve avukatlık ücretleri Devlet yargısına göre daha ucuzdur. Zira bilirkişi incelemesi ve keşif delili çok fazla gerek duyulmadıkça tahkim yargılamasında kullanılmadığından, bunlar için harcanacak masraflardan tasarruf edilmektedir. Ayrıca tahkim yargılamasında taraflardan hakem ücreti alınmaktaysa da bu ücret, davalarda ödenecek yargı harçlarına göre genellikle daha düşük kalmaktadır.

Tahkimde gizlilik esastır ve genellikle aleniyet yoktur. Tahkim dava dosyasına giren ticari defter ve belgeler ile ticari sırlara üçüncü kişiler erişememektedir. Buna karşılık devlet yargılamasında dava dosyası kapsamındaki söz konusu bilgi ve belgeler daha sonra ulaşmak mümkün olabilmektedir.

5.3. Tahkim Sözleşmesi ve Maden Uyuşmazlıklarının Tahkime Elverişliliği

Yalnızca tarafların iradesine tabi uyuşmazlıklarda tahkime gidilebilir. Bu nedenle ticari uyuşmazlıkların neredeyse tamamı tahkime elverişlidir. Ticari olsun olmasın, kira tespit davaları hariç, kira sözleşmesinden kaynaklanan bütün uyuşmazlıklar tahkime elverişlidir. Kural olarak istisna (eser) sözleşmesinden kaynaklanan uyuşmazlıklar da tahkim yoluyla çözülebilir. Buna karşılık tapu sicili, maden sicili ve patent sicili gibi resmi sicillerde hakem kararı ile değişiklik yapılamaz. Bu nedenle kat karşılığı inşaat sözleşmesi, marka ve patent tescillerine ilişkin uyuşmazlık konularında tahkime başvurulamaz. Şirketler hukuku açısından hakem kararlarının ticaret sicilinde tescil edilip edilmeyeceği tartışmalı olmakla birlikte, çoğunluk doktrin görüşü ve Yargıtay, şirket genel kurul hükümsüzlüğü davalarında tahkime gidilemeyeceğini kabul etmektedir (Topaloğlu, 2025).

Yeni 6502 sayılı Tüketicinin Korunması Hakkındaki Kanun değişikliğinden sonra tüketici işlemelerinde de tahkim şartı konabileceği kabul edilmektedir. Yargıtay'ın da tüketici hukuku bakımından bu değişiklikten sonra tahkime olumlu baktığı söylenebilir. Bireysel iş hukukundan kaynaklanan davalarda iş mahkemelerin görevi kamu düzeninden sayıldığı için tahkime gidilemeyeceği Yargıtay içtihatları ile netleştirilmiştir. Ancak İş Kanunu m. 20 uyarınca işe iade davalarının iş sözleşmesinin feshinden sonra işçi ile işverenin anlaşarak tahkime götürmeleri mümkündür.

Tahkime elverişlilikten başka tarafların tahkime gidebilmeleri için aralarında bir tahkim anlaşmasının bulunması gerekir. Tahkim anlaşması, taraflar arasındaki sözleşmenin bir şartı veya hükmü olabileceği gibi, ayrı bir sözleşme de olabilir. Tahkim sözleşmesinin yazılı şekilde yapılması geçerlilik şartıdır. Yazılılık şartının yerine getirilmiş sayılması için, tahkim

sözleşmesinin taraflarca imzalanmış yazılı bir belgeye veya taraflar arasında teati edilen mektup ve faks gibi bir iletişim aracına veya elektronik ortama geçirilmiş olması ya da dava dilekçesinde yazılı bir tahkim sözleşmesinin varlığının iddia edilmesine davalının verdiği cevap dilekçesinde itiraz edilmemiş olması yeterlidir.

Tahkim sözleşmesi ancak belirlenebilir uyuşmazlıklar için yapılabilir. Yargıtay kararlarına göre tahkim iradesinin tahkim şartında kesin ve açık olarak belirtilmesi gerekir. Bu nedenle tahkim şartında uyuşmazlığın mahkemede veya tahkimde çözüleceğine yönelik ifadeler tahkim şartını geçersiz kılar. Tahkim şartı veya sözleşmesinin geçersizliği sorunu ile karşılaşmamak için tahkim kurumlarının hazırladığı matbu metinlerin kullanılmasında yarar vardır. Taraflar anlaşarak Devlet yargısında dava devam ederken de tahkim sözleşmesi akdedebilirler. Aynı zamanda tahkim sözleşmesi bulunsa bile tahkime başvurmadan icra takibi yapılabileceği kabul edilmektedir. Madencilikte gelişmiş ülkelerde devlet kendisi veya kamu kurumları aracılığıyla uluslararası büyük maden şirketleriyle joint-venture anlaşmalarına girerek yaptıkları anlaşmalar uyuşmazlıkların tahkim yoluyla çözülmesi şartını koymaktadırlar. Özellikle maden bürokrasisinin takdir hakkının geniş olduğu hukuk sistemleri için uluslararası seviyede tahkim ve arabuluculuk sistemine başvurulması önerilmektedir. Türk Hukuku açısından idari uyuşmazlık niteliğindeki maden bürokrasisinin işlem ve kararlarına karşı tahkime gidilmesine Yüksek Mahkeme (Danıştay) izin vermemektedir (Topaloğlu, 2021).

Yapılacak Anayasa değişikliği ile Maden Hukuku uygulamasında Anayasanın 125. maddesinde öngörülen kamu hizmetlerinde uluslararası tahkime izin veren hükmün kapsamının genişletilerek maden uyuşmazlıklarında da tahkim yolunun açılması, ruhsat güvencesinin yerleşmesinde katkısı büyük olacaktır. Buna karşılık mevcut hukuki

düzenlemeler çerçevesinde, madencilik sektöründe yabancı yatırımcılar ve Devlet arasında; ICSID yatırım tahkimine başvurulabileceği gibi, ruhsat sahibi ile rödovansçı veya tedarik zincirinde sözleşme ilişkilerinde tahkim yolunun kullanılması mümkündür.

6. SONUÇ

Her sektör gibi belki de daha fazla oranda madencilik sektörü hukuki uygulamalardan çok etkilenmektedir. Endüstriyel hukuku kavramış uzman hukukçular tarafından işletilen adli yargılamaların sektörün önünü açacağı yadsınamaz bir gerçektir. Bu anlamda madencilik ihtisas mahkemelerinin kurulması veya bazı mahkemelerin özel mahkeme olarak görevlendirilmesi yoluyla uzmanlaşmanın önü açılabilir. Türk hukukunda Hakimler ve Savcılar Kurulu tarafından birden fazla mahkeme olan yerlerde bazı mahkemelerin madencilik işleri ile ilgili özel olarak görevlendirilmesinin yasal dayanağı mevcuttur. Madencilik sektöründe özel hukuktan kaynaklanan uyuşmazlıklarda tahkim yolunun kullanılması yararlı bir seçenek olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Tanrıver, S., 2010. Madencilik alanında bir ihtisas mahkemesinin oluşturulmasına gerek olup olmadığı üzerine bazı düşünceler. Ankara Barosu Dergisi, 68: 4.

Topaloğlu, M., 2021. Maden hukukuyla ilgili makaleler. Vedat Kitapçılık, 2. Baskı, İstanbul, s.697.

Topaloğlu, İ., 2025. Merkeziyetsiz tahkim - blok zincire dayalı uyuşmazlık çözüm yöntemi. Vedat Kitapçılık, İstanbul, s.146.

YERALTI METALİK MADEN OCAKLARINDA TAHKİMAT UYGULAMALARI, DEMİR-BAKIR OCAĞI ÖRNEĞİ

GROUND SUPPORT APPLICATIONS IN UNDERGROUND METALLIC MINES: A CASE STUDY OF AN IRON-COPPER MINE

Yunus Karaca, Ali Osman Adsız, Turan Durna, Cihat Gül
Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti., Gaziantep

Özen Kılıç, Ahmet Mahmut Kılıç
Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

ÖZ: Yer altı madenciliğinde üretimin güvenli, sürdürülebilir ve ekonomik olarak devam ettirilebilmesi için tahkimat sistemlerinin doğru ve etkin kullanımı büyük önem arz etmektedir. Özellikle demir ve bakır gibi metal madenlerinin çıkarıldığı derin ve zorlayıcı jeolojik ortamlarda açılan boşlukların (galeri) duraylılığını sağlamak için çeşitli tahkimat türleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti. uhdesinde bulunan Gaziantep İli, Şahinbey İlçesi, Ortaklar Köyü sınırları içerisinde bulunan saha'da açılmış yeraltı demir-bakır ocağı ana galerileri ve üretim galerilerinde kullanılan tahkimat malzemeleri, tahkimat uygulamaları, uygulama koşulları ve karşılaşılan zorluklar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı Demir-Bakır Ocağı, Tahkimat Malzemeleri, Tahkimat Uygulamaları

ABSTRACT: *The correct and effective implementation of ground support systems is of critical importance for ensuring the safe, sustainable, and economically viable continuation of production in underground mining operations. In particular, various types of support systems are employed to ensure the stability of underground openings (galleries) developed in deep and geologically challenging environments, such as those encountered during the extraction of metal ores like iron and copper. In this study, the support materials used, support methods applied, application conditions, and the challenges encountered in the main and production galleries of the underground iron-copper mine located within the boundaries of Ortaklar Village, Şahinbey District, Gaziantep Province, operated by Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti., have been examined.*

Keywords: *Iron-Copper Underground Mine, Ground Support Materials, Ground Support Applications*

1. GİRİŞ

Tahkimat, yeraltı maden işletmelerinde, kazı sonrası oluşan boşlukların çökmesini engellemek, iş güvenliğini sağlamak ve üretimin sürdürülebilirliğini sağlamak amacı ile yapılan tüm destekleme işlemleridir.

Yeraltı maden işletmelerinde genellikle yüksek zemin basınçları, gaz çıkışları, su baskınları vb. riskler oluşabilmekte; uygulanan hazırlık ve üretim çalışmalarında kullanılan yöntemlere bağlı olarak kazı sonrası oluşan boşlukların çökmesini engellemek, iş güvenliğini sağlamak ve üretimin sürdürülebilirliğini sağlamak amacı ile etkili bir tahkimat sistemi uygulanması gerekmektedir. Tahkimat sistemi olarak ahşap tahkimat, çelik tahkimat, betonarme tahkimat (shotcrete), kaya saplama (bulon) ve ankraj sistemleri uygulamaları yapılabilmektedir.

Yeraltı üretim yöntemleri ile metalik maden yataklarından üretim genellikle yerin derinliğinin fazla olduğu alanlarda yapıldığından süreksizlikleri fazla formasyonlarda, hazırlık işleri ve üretim için açılan boşluklar yüksek zemin basıncına maruz kalır ve kısmen veya tamamen özel tahkimat sistemlerinin uygulanması gerekir (Brady ve Brown, 2006; Birön ve Arıoğlu, 1999).

Etkili bir tahkimat sistemi uygulaması yapılabilmesi için uygulanılacak tahkimat tipini belirlemek amacı ile;

- ✓ Jeolojik yapının detaylı bir şekilde incelenmesi ve çevre kayanın etüdünün yapılması, galeri genişliği, üretim hızı ve ekipman trafiğinin incelenmesi,

- ✓ İş güvenliği için boşluk çevresinde yer alan çevre kayanın periyodik kontrolünün yapılması,
- ✓ Uzun vadede maliyeti azaltacak ama güvenliği ihmal etmeyecek çözümler seçilmesi önem arz etmektedir.

Maden işletmelerinin derinleşmesi yüksek üretim hedefleri, belirsizliklerin ve bu da hataların artmasına sebebiyet verebilir. Buna engel olmak için yeraltı açıklıklarında kullanılan tahkimat uygulamalarının başarısı denetlenmeli ve bu denetlemeler sonucunda elde edilen verilerden hareket ederek gerekli revizyonlar yapılmalıdır. Tahkimat uygulamalarının yeterlilikleri ve başarısının denetlenmesi için sahada yapılabilecek gözlem ve ölçümler farklılık arz etmektedir. Öncelikle sahada yapılacak rutin kontrollerle sorunlu bölgeler ve sorunlu imalatlar tespit edilmeli ve bu bölgelerde yenileme uygulamaları yapılmalıdır (Öztürk vd., 2021).

Yapılan çalışma kapsamında bir yeraltı demir-bakır ocağında kullanılan tahkimat yöntemleri, tahkimat uygulamaları, uygulama koşulları ve karşılaşılan zorluklar incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışma kapsamında Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti. uhdesinde bulunan yeraltı demir-bakır ocağı'nda kullanılan tahkimat yöntemleri, tahkimat uygulamaları ve uygulama koşulları incelenmiştir.

3. YERALTI DEMİR-BAKIR OCAĞI

Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti. uhdesinde bulunan IV. Grup Demir-Bakır Ocağı, Gaziantep İli, Şahinbey İlçesi, Ortaklar Köyü sınırları içerisinde bulunmakta ve 1/25.000'lik haritada Gaziantep N38d4 Paftasında

yer almaktadır. Maden Sahası, Şahinbey ve Nurdağı ilçeleri arasında, şehir merkezine yaklaşık 38 kilometre uzaklıkta yer almaktadır. Maden alanına en yakın yerleşim yeri, alanın kuzey bölgesinde 1.026 m mesafede yer alan Ortaklar Mahallesi'dir.

3.1. Maden Sahası Jeolojisi

Güneydoğu Anadolu Orojenik Kuşağı'nda bulunan Ortaklar Volkanik Masif Sülfid yatağı, kuzeyde Toros kuşağı ile güneyde Arap platformu arasında bulunan Neotetis'in güney kolunun kapanması sırasında oluşmuştur. Bu kapanma sırasında, Üst Triyas-Geç Kretase yaşlı Koçali Kompleksi/Karmaşığı altındaki Karadut Kompleksi ile birlikte Arap Platformu üzerine bindirmiştir. Koçali Karmaşığı üzerine ise tektonik dokanakla Ofiyolit Napı gelmektedir. Karadut Karmaşığı ile Koçali Karmaşığı ve Ofiyolit Napı, bazı çalışmalarda Ofiyolitik birimler (Mof) olarak birlikte değerlendirilmiştir.

Arap Platformu'nun Üst Maestrihtiyen-Alt Miyosen yaşlı transgresif çökelleri, çalışma alanı çevresinde diğer birimler üzerine uyumsuz olarak gelen örtü birimlerini oluşturmaktadır. Buna göre, Ortaklar maden ocağı Koçali Kompleksi ile Ofiyolitik Nap birimi dokanağına yakın bir lokasyonda bulunmaktadır.

IV. Grup Demir-Bakır Ocağı bulunan bölgede Mesozoyik yaşlı ofiyolitik birimler ile Mesozoik yaşlı kireçtaşları yer almaktadır. Mesozoik yaşlı Ofiyolitik Melanj (Mof) Melanj, silisifiye kireçtaşı, radyolarit, silisli şeyl, çörtlü kireçtaşı, killi kireçtaşı, tabakalı çörtler, kumtaşı ve volkanitlerle bunların içinde farklı yaşlarda kireçtaşı ve serpantinit bloklarından oluşmakta olup, karmaşık bir yapı sunmaktadır. Ayrıca, koyu kahve-boz renkli aglomera ve lav akıntılar, kırmızı renkli, oldukça kıvrımlı, yer yer manganezli radyolarit ve silisli şeyller, kırmızı renkli, ince tabakalı, çörtlü

kireçtaşları az oranda izlenmektedir. Karmaşık içinde, peridodit, gabro ve diyabazdan oluşan allokton birim de yer almaktadır. Ayrıca sahada yapılan çalışmalarda, koyu yeşil renkli, ayrışma yüzeyi kızıl, kırmızı-bej renkli olan serpantinleşmiş harzburjit, lokal olarak dunit, verlit, lerzolit ve peridotit ara seviyelerini kapsadığı belirlenmiştir. Yerel olarak dar bölgelerde bulunan Mesozoyik yaşlı kireçtaşları, sık dolomitik veya kısmen dolomitik kireçtaşları, seyrek marn ve şeyl ara seviyelerinden oluşmaktadır. Gri renkli, laminalı, ince-orta-kalın ve yer yer masif tabakalı bu kayaçlar, çamur çatlakları, algli stromatolitler, dalga izli tabakalar ve oksidasyon zonlarını kapsamaktadır. Proje sahası ve civarında yer alan kireçtaşları mostraları birbirinden bağımsız olup ofiyolitlerin üzerinde şapka şeklinde yer almaktadır.

3.2. Cevherleşme

IV. Grup Demir-Bakır Ocağı'nda cevherleşme, çamurtaşı-radyolaritler ve spilitik bazalt-yastık lav dizileri içinde merceksi veya tabular gövdelerde meydana gelmektedir. Cevherleşme doğu-batı yönündedir ve kuzeye doğru 60 ila 75 derece arasında eğimlidir.

3.3. Depremsellik

Türkiye Diri Fay Haritası'na göre 200610415 Ruhsat Numaralı Saha, Ölü Deniz Fay Zonu'na ait Yesemek Segmenti'ne 18 km, Sakçagöz Segmenti'ne 16 km ve Narlı Segmenti'ne 16 km mesafede yer almaktadır.

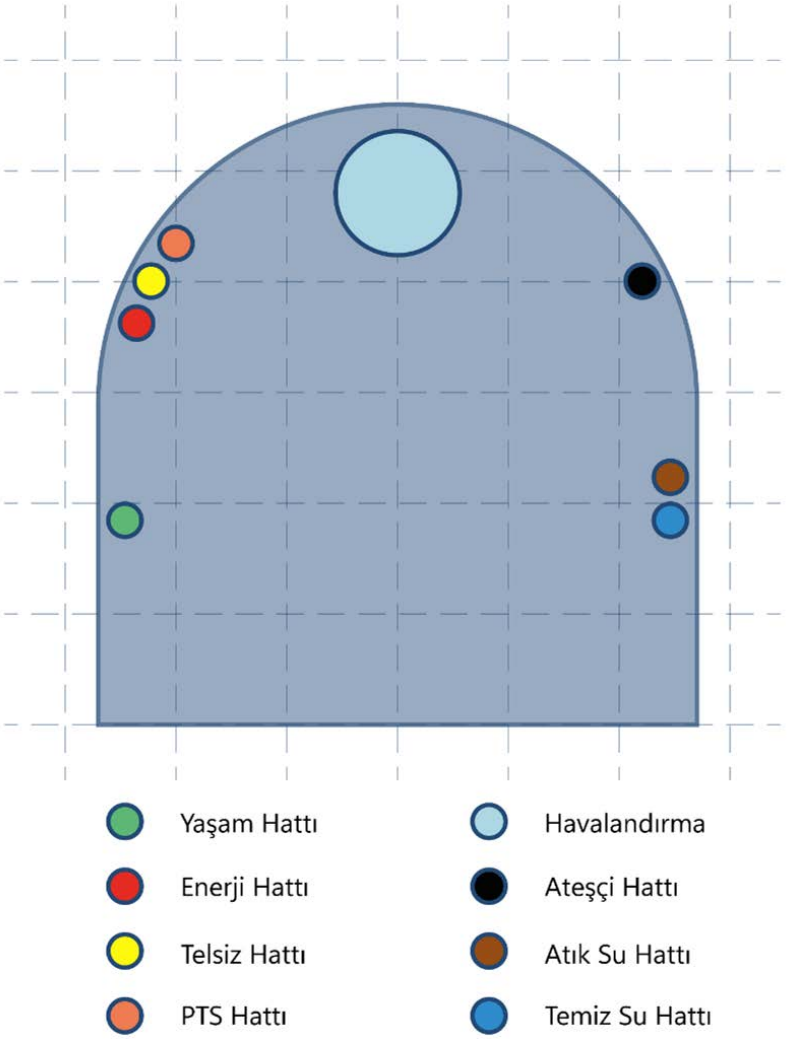
IV. Grup Demir-Bakır Ocağı bulunan bölge ve yakın çevresinin 475 Yıl Tekrarlanma Periyodu için en büyük yer ivmesi değeri (PGA 475) Türkiye Deprem Tehlike Haritası'nda 0,306 g'dir.

3.4. Yeraltı Demir-Bakır Ocağı Hakkında Bilgi

Yeraltı üretim yöntemleri cevherin ve yan kayacın sertliği, yataklanma tipi, cevherin eğimi gibi birçok özelliğe bağlıdır. Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti. uhdesinde bulunan IV. Grup Demir-Bakır Ocağı'nda 3 ayrı Galeri girişi (Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3) bulunmaktadır. Galeriler 5400–5600 mm boyutunda at nalı şeklinde %7–12 eğimli olarak açılmıştır (Foto 1). Ocak'a giriş galeriler (ana rampa (spiral)) ile sağlanmaktadır. Galerilerde yaşam hattı sol duvarda (zeminden 120 cm yukarıda), güç hattı, radyo hattı ve PTS hattı sol omuzda, havalandırma üstte yön boyunca, patlatma hattı sağ omuzda, atık su hattı ve temiz su hattı sağ duvarda yer almaktadır (Şekil 1).

Demir-Bakır Ocağı'nda kes-doldur yöntemi ve ara katlı göçertme yöntemi uygulanmaktadır. Üretimi biten boşluklar ise doldurulmaktadır.

Foto 1. Ocak içi ana galerilerden (spiral) görünüm



Şekil 1. Ana galeri kesitleri

3.5. Yeraltı Demir-Bakır Ocağı'nda Kullanılan Ana Tahkimat Elemanları

Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti.'ye ait Yeraltı Demir-Bakır Ocağı'nda kullanılan ana tahkimat elemanları; püskürtme beton, çelik hasırlar, cıvatalar (boltlar) ve çelik kuşaklar vb. olarak sınıflandırılmıştır (Miryıldız Madencilik Gaziantep Yeraltı İşletmesi Tahkimat Yönergesi).

3.5.1. *Püskürtme beton*

Yeraltında bütün galerilerde püskürtme beton uygulanmaktadır. Üretim galerileri ve havalandırma kuyuları hariç yeni sürülen galeriler ve tamirat

yapılan galeriler de dahil olmak üzere bütün galerilerde çelik tel donatılı ve/veya çelik fibersiz püskürtme beton uygulanmaktadır. Üretim galerileri, ana rampa, kros katlar, pasa dolgu ve çimentolu pasa dolgu barikatları ile havalandırma kuyularında ise olumsuz bir durum olmadığı sürece normal püskürtme beton uygulanmaktadır.

Püskürtme beton uygulanmadan önce kavlak kontrolü yapılmakta ve kavlak varsa temizlendikten sonra püskürtme işlemi uygulanmaktadır.

Gerekli görülen bölgelerde püskürtme beton uygulandıktan en az 2 saat sonra cıvata ile delmeye, çelik hasır bağlanmaya veya tahkimatlı bölgeden tahkimatsız bölgeye doğru Swellex (civata) çakma işlemine başlanabilmektedir.

3.5.1.1. *Robot ile yaş püskürtme beton*

Taban taşı ve tavan taşında sürülen ana rampa, kros katlar, doğu-batı cevher nakliye galerileri, birincil-ikincil üretim galerileri, havalandırma galerileri, havuzlar, sığınma istasyonları, araştırma galerileri ve diğer bütün ceplerde yaş püskürtme beton uygulanmaktadır. Ayrıca, pasa ve çimentolu pasa dolgu barikatlarında da yaş püskürtme beton uygulanmaktadır.

1 m^3'lük yaş püskürtme betonda; çimento, kum, su, silika füme, akışkanlaştırıcı, slump ve priz hızlandırıcı karışımı kullanılmaktadır. 1 m^3'lük çelik tel donatılı püskürtme betonda ise; çimento, kum, su, çelik tel donatı/plastik fiber donatı, silika füme, akışkanlaştırıcı, slump ve priz hızlandırıcı karışımı kullanılmaktadır. Püskürtme beton kalınlığı minimum 7 cm olacak şekilde uygulanmaktadır. Çelik hasır üstüne uygulanan püskürtme beton ise çelik hasırları kapatana kadar uygulanmaktadır. 1 m ilerleme için ortalama 3,5 m^3 shotcrete uygulaması yapılmaktadır. Kullanılacak shotcrete miktarı pasa aynalarında 7 m^3 ve cevher aynalarında 9 m^3'tür.

3.5.1.2. *Kuru püskürtme beton*

Kuru püskürtme beton, tamirat amaçlı uygulanmaktadır. Kaya durumu, duraylılık, kuru püskürtme beton uygulanabilecek bölgeleri kısıtlayabilmektedir.

1 m³'lük püskürtme beton karışımında çimento, 0-9 mm agrega ve priz hızlandırıcı bulunmaktadır. Çelik tel donatı kullanılmamaktadır. Robotla uygulanacak yaş püskürtme beton standartları, kuru püskürtme beton için de geçerlidir. Püskürtme işlemi hortum vasıtasıyla elle yapılmaktadır.

3.5.2. *Civatalar*

Yeraltında uygulanacak civatalar split set, swellex, reçineli rebar, çimentolu rebar, kablolu civata, kendinden delmeli cıvata, süren ve paraşüt rebar olarak belirlenmiştir.

Civataların delme işlemine, püskürtme beton vurulduktan en az 2 saat sonra başlanmaktadır. Swellex, yerleştirme işlemine püskürtme beton vurulduktan sonra 4 saat sonra başlanmaktadır.

Split set ve swellex tipi civatalar, yeraltında 6 aydan fazla açık kalacak galerilerde kullanılmamaktadır. Civata çakma sırası, tahkimatlı bölgeden tahkimatsız bölgeye doğru olacaktır. Çalışanlar, civatasız bölgede çalışma yapmamaktadır.

Paraşüt enjeksiyonlu rebar yerleştirildikten en az 4 saat sonra yük almış olmakta ve uygulama yapılan bölgeye 4 saat sonra işçi girerek çalışma yapmaktadır. Son civata sırası, aynadan en fazla 60 cm geride olacak şekilde uygulama yapılmaktadır.

Aşırı bozuk zeminlerde, atım yapılan galerinin civataları çakılmadan bir sonraki atıma müsaade edilmemektedir.

3.5.3. *Galvanizli split set*

Sadece 6 aydan kısa süreli açık kalacak birincil-ikincil üretim galerilerinde ve havalandırma kuyularında galvanizli split set kullanılmaktadır.

Swellex ya da paraşüt rebar tipi boltların kullanılmasında sorun yaşanırsa split set içine enjeksiyon yapılarak split set uygulanır. Çalışma süresi 6 ayı geçen bölgelere yeniden split set uygulanır.

33 mm çapında delik delinirken zeminin çok yumuşak olması nedeniyle delik çapında büyüme olup, split setler sürtünme yaratmadığı durumlarda (deliğin içine çok rahat girdiği durumlarda) split set yerine swellex ya da paraşüt rebar tipi cıvatalar kullanılmaktadır.

3.5.4. *Swellex*

Sadece birincil-ikincil üretim galerilerinde kullanılmaktadır. Cevherde sürülen üretim galerilerinde, split setlerin çalışmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Çalışma süresi 6 ayı geçen bölgelere yeniden Swellex uygulanmaktadır.

33 mm çapında delik delinirken zeminin çok yumuşak olması nedeni ile delik çapında büyüme olup, swellexler şişirilmesine rağmen sürtünme yaratmadığı durumlarda paraşüt rebar kullanılmaktadır.

3.5.5. *Çimentolu reb*ar

Tabantaşı ve tavantaşında sürülen ana rampa, kros katlar, doğu-batı cevher nakliye galerileri, havalandırma galerileri, havuzlar, sığınma istasyonları, araştırma galerileri ve diğer bütün ceplerde çimentolu veya reçineli rebar uygulanmaktadır. Fan asmak için, pastefill (dolgu malzemesi) hatlarını asmak için ve havalandırma kapıları için çimentolu rebar kullanılmaktadır.

Üretim galerilerinde sadece swellexlerin delik büyümesi nedeniyle çalışmadığı durumlarda ve 6 aydan fazla açık kalacak galerilerde

uygulanmaktadır. Tamirat çalışmalarında da çimentolu veya reçineli rebar kullanılmaktadır.

3.5.6. *Reçineli rebar*

Tabantaşı ve tavantaşında sürülen ana rampa, kros katlar, doğu-batı cevher nakliye galerileri, havalandırma galerileri, havuzlar, sığınma istasyonları, araştırma galerileri ve diğer bütün ceplerde öncelikle enjeksiyonlu rebar yoksa reçineli rebar uygulanmaktadır. 6 aydan fazla açık kalacak üretim galerilerinde, ve tüm galerilerde ve yapılan tamirat çalışmalarında da çimentolu veya reçineli rebar uygulanmaktadır.

3.5.7. *Cable bolt (kablolu civata)*

Tabantaşı ve tavantaşında sürülen ana rampa, kros katlar, doğu-batı cevher nakliye galerileri, havalandırma galerileri, havuzlar, sığınma istasyonları, araştırma galerileri ve diğer bütün ceplerde 9 m boyunda çift sırmalı kablolu civata kullanılmaktadır.

1 yıldan fazla açık kalacak üretim galerilerinde de standart olarak uygulanmaktadır. Ayrıca zemini çok zayıf olan üretim galerilerinde de uygulanabilmektedir. Kablolu c,vatalar, katlar arasında veya topuklarda gerdirme amaçlı da kullanılmaktadır.

3.5.8. *Kendinden delmeli civata*

Yeni ilerleyen bütün galerilerde ve bütün tamirat çalışmalarında zemin çok kırıklı ise, yani jumbo, simba veya boltec ile delinen delikler göçüyorsa kendinden delmeli cıvata (işebek-ibobolt) kullanılmaktadır. Kendinden delmeli cıvatalar R32N tipinde ve uzunluğu 4 m olmaktadır.

3.5.9. *Süren*

Yeni ilerleyen bütün galerilerde zemin çok zayıf, kırıklı ise ve göçmesi ihtimali varsa süren uygulaması yapılmaktadır. Süren olarak kendinden delmeli cıvatalar ya da 4 m uzunluğunda ve 32 mm çapında TSE BÇ-III-A nervürlü çelik demir rebarlar kullanılmaktadır.

3.5.10. *Paraşüt rebar*

Cevher içinde ya da pasada ilerleyen tüm aynalarda, split set, swellex, çimentolu rebar ve reçineli rebar yapılması gereken yerlerde kullanılmaktadır. Paraşüt rebar her tür zeminde uygulanabilmektedir. Püskürtme beton yapılmış bölgenin üstüne boltec ile delinip çakılmaktadır. Paraşüt rebarların pasada ve cevher içinde çakma aralığı 1,2 x 1,2 m ve tamirat amaçlı çakılanların ise 2,0 x 2,0 m'dir.

3.5.11. *CT-Bolt*

Cevher içinde ya da pasada ilerleyen tüm aynalarda, paraşüt rebar yapılamayan (boltec arızalı olduğunda) yerlerde CT-M20 standardına uygun en az 140 kN kopma ve en fazla 170 kN çekme yüküne sahip CT-bolt uygulanır. CT-bolt çapı 20 mm olup, uzunluğu 2,4 m olacaktır. CT-boltun pasada ve cevher içinde çakma aralığı 1,2 x 1,2 m ve tamirat amaçlı çakılanların ise 2,0 x 2,0 m'dir.

3.5.12. *Çelik hasırlar*

Havalandırma kuyularının tahkimatında split set'lerle birlikte kullanılacaktır. Tavantaşı ve tabantaşındaki doğu-batı cevher nakliye galerilerinin tahkimatında püskürtme beton ile birlikte kullanılmaktadır. Macun dolgu ve çimentolu kaya dolgu ise barikatlarında kullanılmaktadır.

Havalandırma galerilerinde, doğu-batı cevher nakliye galerilerinde, çimentolu kaya dolgu barikatlarında ve püskürtme betonlu pasa ya da çimentolu pasa dolgu barikatlarında kullanılacak çelik hasırlar 7,0 mm çubuk çapına, 5,00 x 2,15 m ebatlara ve 15 x 15 cm göz aralığına sahiptir. Çelik hasır uygulaması için aynanın uygun şekilde püskürtme beton uygulamasının yapılmış ve üzerinden en az 2 saat geçmiş olması gerekmektedir.

3.5.13. *Hasır kemer (Hasır strap*)

Hasır Kemer (Hasır Strap) katlar arası üretime geçilmeden önce alt ve üst galeri girişlerine kesme kablolu civatalar ile kullanılmaktadır.

Katlar arası üretime geçmeden önce kesme kablolu civatalar ile kullanılacak hasır kemerler, 3,5 m boyunda 30 cm genişliğinde 10 x 10 cm göz aralığında hasırlardan yapılmaktadır.

4. YERALTI DEMİR-BAKIR OCAĞI'NDA YAPILAN İNCELEME VE DEĞERLENDİRMELER

Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti. uhdesinde bulunan IV. Grup Ruhsatlı Saha'da açılmış Demir-Bakır Ocağı'na 5400–5600 mm boyutunda at nalı şeklinde %7–12 eğimli olarak açılmış galeriler (Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3) ile girilmektedir. Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3 Galerileri ve yakın çevrelerinde yerinde yapılan incelemelerde formasyonlarda süreksizliklerin oldukça fazla olduğu, yer yer farklı genişliklerde ayrışma zonlarının olduğu ve Mesozoyik yaşlı Ofiyolitik Nap birimine ait seviyeler (serpantinleşmiş dünit ve harzburzitler) ile Mesozoik yaşlı Koçali Karmaşığı (ince tabakalı, aşırı deforme olmuş, çatlaklı ve faylı, kırmızımsı kahve renkli, çamurtaşı, radyolarit ve pelajik kireçtaşları)'na ait birimler bulunduğu görülmüştür.

Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3 Galerileri ve yakın çevrelerinde tektonik dokanak ile bir araya gelmiş olan Ofiyolitik Nap birimine ait seviyler ile Koçali Karmaşığı'na ait birimler bulunmaktadır. Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3 Galerileri bu iki birimin faylı dokanağına çok yakın olacak şekilde açılmıştır. Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3 Galerilerinin Koçali Karmaşığı'na ait ince tabakalı, aşırı deforme olmuş, çatlaklı ve faylı, kırmızımsı kahve renkli, çamurtaşı, radyolarit ve pelajik kireçtaşları içerisinde açıldığı görülmüştür (Foto 2).

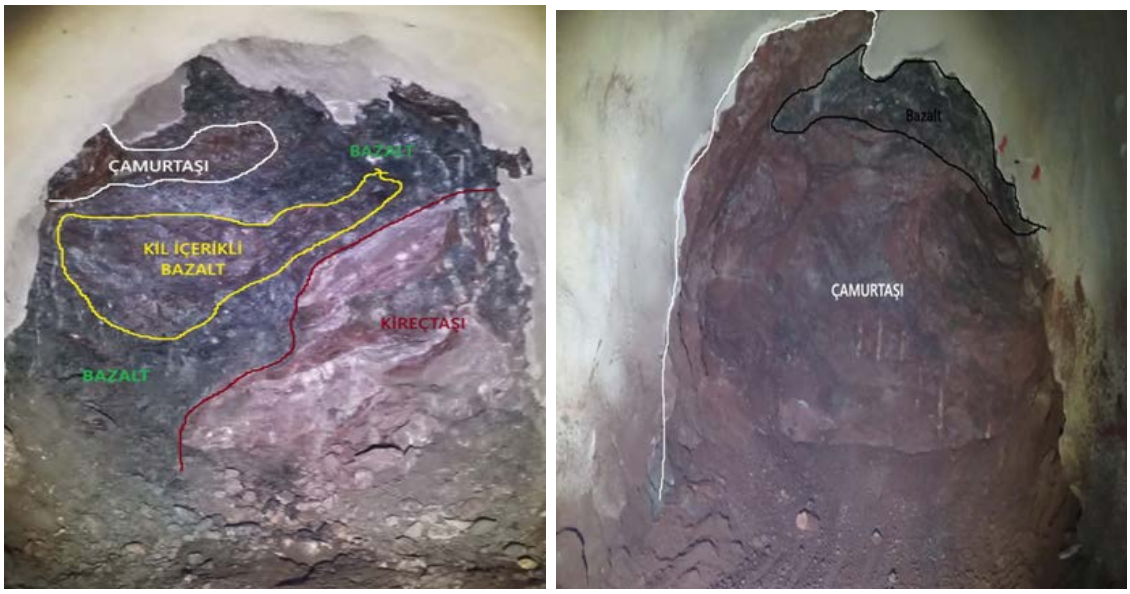


Foto 2. Galeri açılan formasyonlardan görünüm

Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3 Galerilerinde açıklıkları kontrol amacıyla "Tahkimat (Destek)" sistemlerinin "Çelik İksa, Çelik Hasır, Kaya Saplama (Split Set) ve Püskürtme Beton" uygulandığı görülmüştür (Şekil 2), (Foto 3-5).

Demir-Bakır Ocağı Galerilerinde ilerleme yapılırken formasyonun çatlaklı kırıklı ve bloklu durumuna göre galeri kesitinde daralma ya da genişlemeler olabilmektedir buna bağlı olarak galeri kesiti çok büyük çapta olmasa da farklı şekilde boyut alabilmektedir. Yoğun olarak eklem sıklığının

arttığı bölgelerde ve faylı kısımlarda yantaş ve tavanı güçlendirmek ve olası tehlikeleri önlemek amacıyla yoğun bir şekilde tahkimat uygulandığı görülmüştür. Bu alanlarda yapılan incelemelerde tehlikeli durumlar görülmemiştir.

Şekil 2. Galeri kesitinde tahkimat uygulamalarının kesit görünümü

Foto 3. Galeri kesitinde tahkimat uygulamaları (çelik iksa+çelik hasır+püskürtme beton)

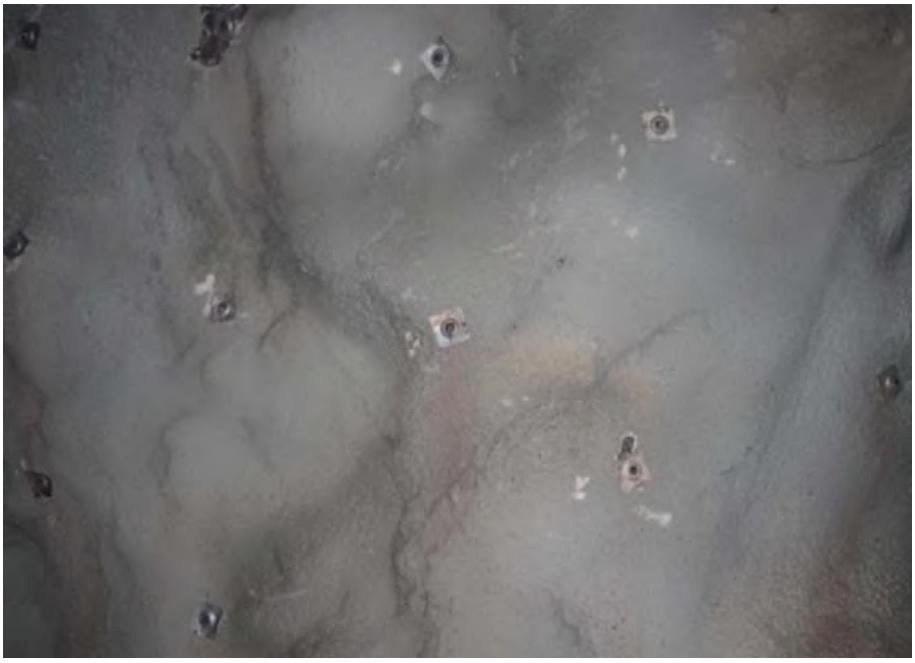


Foto 4. Splitset uygulaması

Foto 5. Bulon uygulaması

Demir-Bakır Ocağı galerileri içerisinde ve üretim yapılan galeri aynalarında yerinde yapılan incelemelerde koyu kahverengi renkli, kırmızımsı ve gri kireçtaşı ile çamurtaşı birimlerine rastlanmıştır. Bu birim

içerisindeki süreksizliklerde yer yer kalsit dolgular yer almaktadır. Bazı süreksizliklerin ise kapalı ve dolgusuz olduğu gözlemlenmiştir. Cevherleşmenin pirit ve kalkopiritler şeklinde oluştuğu gözlenmiştir. Herhangi bir su gelirine rastlanmamış olup süreksizlik yüzeylerinin yer yer nemli olduğu görülmüştür.

Hazırlık ve üretim galerilerinin durabilitesinin (kalabilirliğinin) sağlanması amacıyla zayıf ve tehlikeli görülen yerlerde Çelik İksa yerleştirildiği + Çelik Hasır monte edildiği + Püskürtme Beton uygulaması yapıldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra ek tahkimat olarak gerekli görülen bölgelerde (anayol, kavşak, dönüşler ve uzun süre ayakta kalacak olan bölgeler) kayaç formasyonun teknik verileri incelendikten sonra Kaya Saplama (Split Set) yapıldığı da görülmüştür.

Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3 Galerileri ve üretim galerilerinde yapılan incelemelerde tahkimatların bakım ve onarımlarının yapıldığı, aktif olarak çalışır durumda olduğu ve açılan boşlukların kesit geometrilerinin korunduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Demir ve bakır ocakları gibi yüksek riskli alanlarda uygun tahkimat sistemlerinin seçimi, iş güvenliği ve üretimin sürekliliği açısından hayati öneme sahiptir. Farklı tahkimat yöntemlerinin kombine şekilde kullanılması, yeraltı koşullarına en iyi uyumu sağlar. Jeoteknik analizler ve saha deneyimi, uygulanan tahkimat sistemlerinin başarısını doğrudan etkilemektedir.

Mir Yıldız Müh. İnş. İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti. uhdesinde bulunan IV. Grup Ruhsatlı Saha'da açılmış Demir-Bakır Ocağı Yıldız 1, Yıldız 2 ve Yıldız 3 Galerileri ve üretim galerilerinde yapılan incelemelerde Çelik İksa, Çelik Hasır, Kaya Saplama (Split Set) ve Püskürtme Beton tahkimat

uygulamalarının yapıldığı ve tahkimatların bakım ve onarımlarının düzenli olduğu, aktif olarak çalışır durumda olduğu ve açılan boşlukların kesit geometrilerinin korunduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

AFAD Deprem Tehlike Haritası, 2018. https://tdth.afad.gov.tr/

Birön, C., & Arıoğlu, E., 1999. Madenlerde tahkimat işleri ve tasarımı. Birsen Yayınevi.

Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 2006. Rock mechanics: for underground mining. Springer, Berlin.

Miryıldız Madencilik Gaziantep yeraltı işletmesi tahkimat yönergesi (yayınlanmamış).

Öztürk, C. A., Aslan, D., & Doğan, E., 2021. Yeraltı madenciliğinde arazi kontrolü ve uygulamaları. Yeraltı Kaynakları Dergisi (MT Bilimsel), Sayı 19, S1-10.

BİR YERALTI MADEN İŞLETMESİNİN GALERİ PATLATMALARINDA ELEKTRONİK ATEŞLEME SİSTEMİ KULLANILARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

IMPROVING AN UNDERGROUND MINE BY IMPLEMENTING THE ELECTRONIC BLASTING SYSTEMS AT DEVELOPMENT BLASTS

Ö. Görkem İlik
Kapeks Kimya Sanayi A. Ş., Adana

ÖZ: Patlatmalı kazı uygulamalarında, patlatma verimini etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi gecikme süreleridir. Kaya özelliklerine uygun gecikme aralıklarının ve sürelerinin kullanılması, kayacın ötelenmesi ve kesme uygulamaları için radyal çatlakların oluşmasında büyük önem taşımaktadır. Belirlenen gecikme sürelerinin doğru ve tutarlı bir şekilde uygulanması elektronik ateşleme sistemleri ile mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, bir yeraltı maden işletmesinin galeri patlatmalarında, patlatma sonucu oluşan doğrusal ilerleme miktarının %17.7 oranda arttığı ve fazla kazının (overbreak) azaldığı (%18.3) saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektronik Ateşleme Sisteme, Patlatma, İlerleme ve Cidar Kontrolü

ABSTRACT: Delay time is one of the most important parameters affecting the blast efficiency in rock blasting applications. Depending on the rock properties, the use of appropriate delay intervals and delay times for generating the radial cracks is very important for rock displacement and perimeter control applications. Accurate and consistent application of the specified delay times has become possible with the electronic initiation systems. In this study, 17.7% increase in the advance rate and reduction in the overbreak (18.3%) were obtained at an underground mine’s development blasts.

Keywords: *Electronic İnitiation Systems, Blasting, Progress And Wall Control*

1. GİRİŞ

Bilindiği üzere, Patlatma tasarımında ateşleme tasarımı ve özgül şarj hesaplaması patlatma performansını doğrudan etkileyen en önemli parametrelerdir. Uygun olmayan patlatma tasarımlarında, fazla kazı, az kazı (overbreak, underbreak), örselenmiş ve durağanlığını kaybetmiş yan cidarlar gibi sonuçlar meydana geldiği sıkça görülmektedir. Bu husus doğrultusunda delikler arasındaki gecikme süresi, ayna yüzeyinde homojen bir enerji dağılımının gerçekleştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Günümüz patlatma operasyonlarında en sık kullanılan ateşleme sistemleri elektriksiz ateşleme sistemleridir. Bu sistemler belirli bir gecikme süresi, bu gecikme sürelerinin uzun periyotlu olması ve ayrıca bu sürelerinin yüksek sapma oranlarına sahip olması, patlayıcının oluşturduğu enerjinin kontrol altına alınmasını zorlaştırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında bir yeraltı maden ocağının hazırlık kazı patlatmalarında 1 adet elektriksiz ve 2 adet elektronik ateşleme sistemi kullanılarak patlatmalar yapılmış, gecikme düzeninin patlatma performansına etkisi irdelenmiş ve sonuçlar CMS (Cavity Monitoring System) ile doğrusal ve hacimsel ilerleme kayıt altına alınmıştır.

2. ATEŞLEME SİSTEMLERİ

Patlatma ile kazı uygulamalarında ateşleme sırası, gecikme süresi patlatma performansını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Bu yüzden kullanılan ateşleme sistemlerinin verebileceği gecikme süresinin çeşitliliği, doğruluğu ve tutarlılığı çok önemlidir.

2.1. Elektriksiz Ateşleme Sistemi

Elektriksiz Ateşleme sistemlerinde (Nonel) gecikme süreleri, kapsül içerisinde yer alan piroteknik gecikme elemanın uzunluğuna bağlı olarak belirli bir gecikme süresi ile üretilmektedir ve gecikme elemanının uzunluğu kimyasal özelliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Sekil 1).

Her bir piroteknik gecikme elemanının yanma hızlarının farklılık göstermesi, gecikme süresinde çeşitli oranlarda sapmalar yaratmaktadır. Bu sapmaların oranı arttıkça patlatma sonucu verim olumsuz etkilenmektedir. Nonel kapsüller uzun periyot ve kısa periyot olmak üzere iki türde üretilmekte olup, yer altı patlatmalarında uzun periyotlu kapsüller kullanılmaktadır. Uzun periotlu kapsüller üretici firmalara göre değişkenlik göstermekte genel olarak 0 ms den 7500 ms ye kadar 23 seri olarak üretilmektedirler. Seriler kendi aralarında 100'er, 200'er ve 500'er ms artarak devam etmekte, seri numarası arttıkça gecikme süreside artmaktadır. Uzun periyot kapsüller için üretici firmalar tarafından kabul edilebilir sapma oranları, yaklaşık %±5.0-6.0 civarında olmakla beraber bu oran %10 kadar çıkabilmektedir. Bu orana bağlı olarak gecikme süresi arttıkça sapma miktarı da artmaktadır.

Şekil 1. Nonel kapsül kesiti

2.2. Elektronik Ateşleme Sistemi

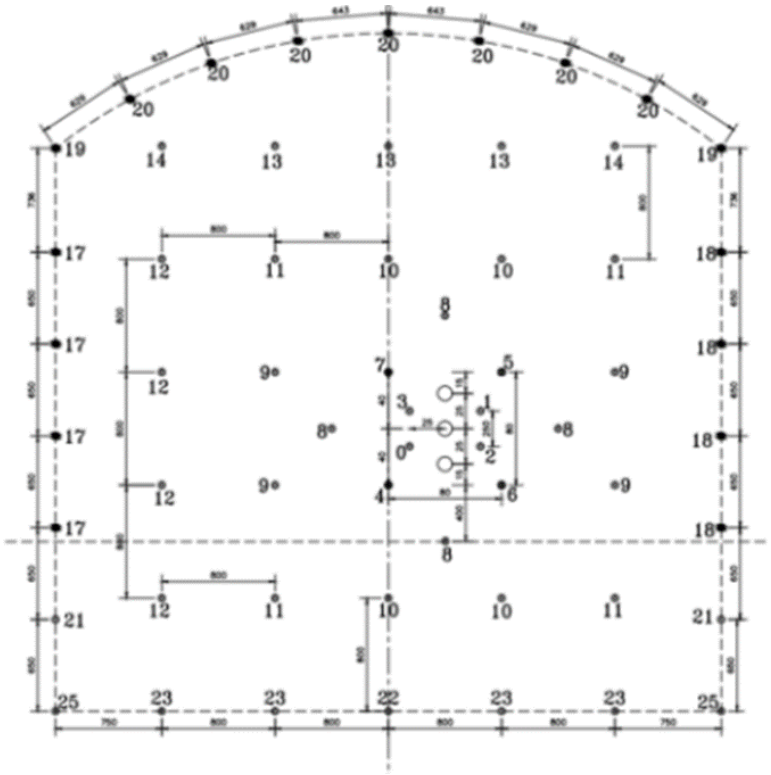
Nonel kapsüller ile elektronik kapsüllerin çalışma prensibi birbirinden tamamen farklılık göstermektedir. Elektronik kapsüllerde (Şekil 2) sistemin ateşlenmesi, her kapsül içerisinde bulunan mikroçipe belirli bir elektriksel akım ile gönderilen algoritmik kod ile gerçekleştirilmektedir. Elektronik ateşleme sisteminde verilebilecek gecikme süresi aralığı üretici firmalara göre değişkenlik göstermekle beraber 0'dan 14.000ms kadar 1 ms hassasiyetle gecikme süresi tayin edilebilmektedir. Elektronik ateşleme sistemlerinde gecikme süresi tayini mikroçip ile dijital olarak yapılabildiğinden sapma oranları nonel kapsüllere göre oldukça düşüktür. Bu değer yine üreticilere göre değişkenlik göstermekle beraber yaklaşık %0.050 civarındadır. Bu sapma oranı nonel kapsüllere göre ihmal edilebilecek ölçüdedir.

Şekil 2. Elektronik kapsül kesiti

3. PATLATMA PARAMETRELERİ

İyileştirme çalışmasının yapıldığı hazırlık galerisinin jeolojik yapısı tektonizma geçirmiş koyu renkli bazalt ve gabro diyorit kayaç yapılarıdır. Bu jeolojik yapı içerisinde gerçekleştirilen delme patlatma ile kazı işleminde delgi tasarımı olarak Paralel Kesme (Burn Cut) yöntemi uygulanmaktadır.

Çizelge 1'de ayna delgi parametreleri; Şekil 3' de ayna kesiti, delgi tasarımı ve gecikme düzeni görünmektedir.



Şekil 3. Ayna kesit ve delgi tasarımı

Çizelge 1. Delgi parametreleri

Kesit Alanı	(m^2)	20
Boş Delik Çapı	(mm)	102
Üretim Delik Çapı	(mm)	45
Delik Boyu	(m)	3.8
Boş Delik Sayısı	(Adet)	3
Kesme Delikleri Sayısı	(Adet)	8
Tarama Delikleri Sayısı	(Adet)	27
Çevre Duvar Delikleri Sayısı	(Adet)	12
Tavan Delikleri Sayısı	(Adet)	7
Taban Delikleri Sayısı	(Adet)	7

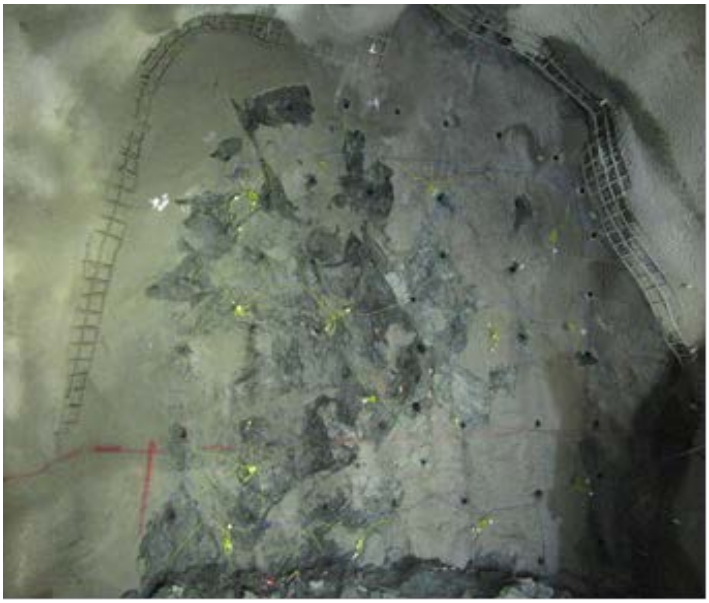
Üretim deliklerinde ana patlayıcı olarak yemlemeye duyarlı patlayıcı ANFO, yemleyici olarak (36x420) ebatlarında Kapsüle Duyarlı Emülsiyon patlayıcılar kullanılmaktadır. Son kesme uygulaması için ise çevre duvar ve tavan deliklerine (19x750) kapsüle duyarlı kontur patlayıcılar kullanılmaktadır.

4. SAHA UYGULAMASI

Yapılan çalışma doğrultusunda biri Elektriksiz ateşleme sistemi (Nonel) diğer ikisi ise Elektronik Ateşleme Sistemi olarak kullanılmak üzere 3 adet patlatma gerçekleştirilmiştir. Bu patlatmalarda delgi düzeni, delik şarj miktarı gibi parametrelerde bir değişiklik yapılmadan sadece ateşleme sırası ve gecikme süreleri değiştirilmiştir.

4.1. Nonel Uygulaması

Nonel ateşleme sistemi kullanılarak mevcut delgi ve delik şarj miktarları ile atım gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’ de atım öncesi aynanın kesit görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4. Ayna kesit görüntüsü

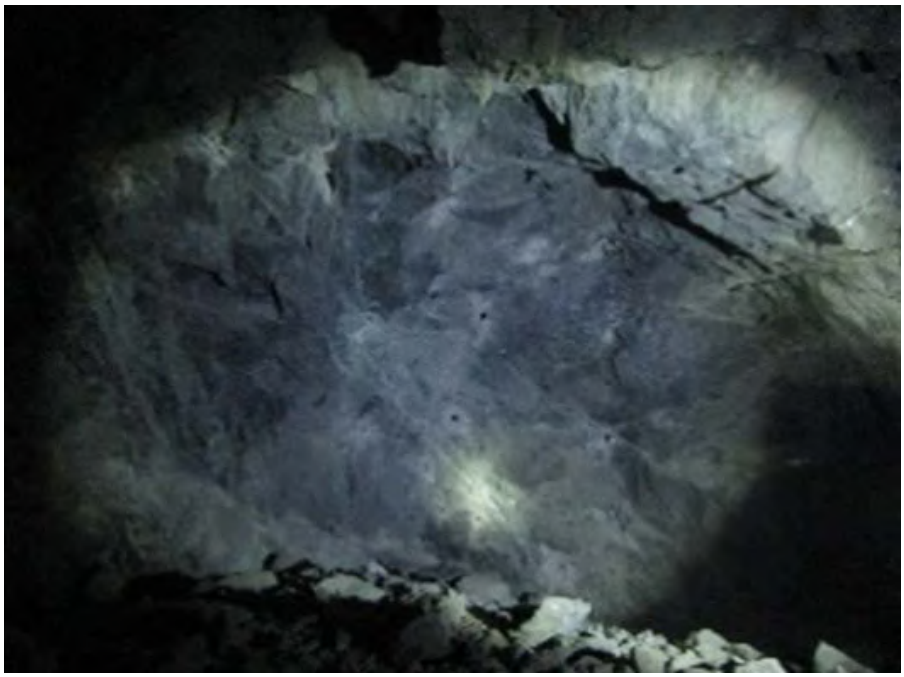
Atım bölgelerine göre delikler arası gecikme sürelere aralıkları, min ve max gecikme süreleri Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 2. Atım bölgelerine göre gecikme süreleri

Ayna Bölgelerine Göre Delik Türleri	**Delikler Arası Gecikme Süreleri (ms)**	**Min.- Max Gecikme Süresi (ms)**
Kesme Delikleri	100	100 - 1000
Tarama Delikleri	200	1200-3000
Çevre Duvar Delikleri	200	4000-4500
Tavan Delikleri	500	5000-5500
Taban Delikleri	500	6000-7500

4.1.1. Patlatma sonucu

Gerçekleştirilen patlatma sonrası çevre görüntüsü Şekil 5'de görülmektedir.



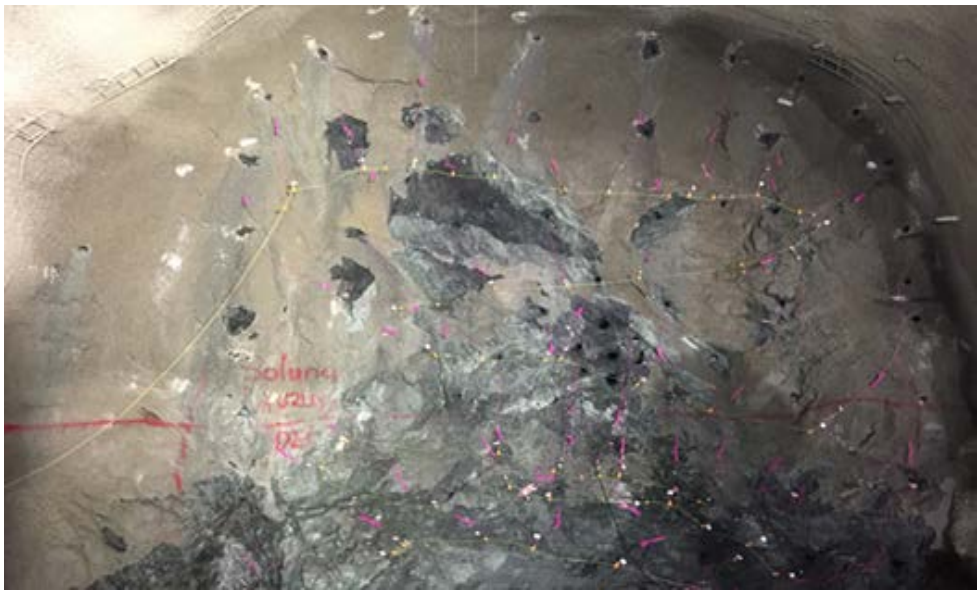
Şekil 5. Çevre görüntüsü

Patlatma sonrası kesit alanın 24.20 m^2 olduğu hacimsel üretimin 75.20 m^3 ve doğrusal ilerlemenin 3.1 m olduğu CSM sistemi ile ölçülerek kayıt

altına alınmıştır. Galeri kesit alanının da ki artış (overbreak), örselenmiş yan cidar gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Ayrıca, patlatma sonrası yığın içerisinde patlamamış kapsüle duyarlı kontur patlayıcılara rastlanmıştır, bu problem uzun gecikme aralıkları ile gerçekleşen patlatmanın bir sonraki delik içerisindeki şarj kolon sürekliliğinin bozulduğu ve patlayıcı enerji dağılımının homojenliğini yitirdiği yorumu yapılabilmektedir. Gerçekleştirilen atım 7,5 s'de tamamlanırken bu süreyi elektronik kapsüllerle kısaltmak mümkün hale gelmektedir.

4.2. Birinci Elektronik Uygulama

Elektronik ateşleme sistemi kullanılarak mevcut delgi ve delik şarj miktarları ile atım gerçekleştirilmiştir. Şekil 7' de atım öncesi aynanın kesit görüntüsü görülmektedir.



Şekil 7. Ayna kesit görüntüsü

Kesme bölgesindeki deliklere 200 ms, tarama bölgesindeki deliklere 30 ms, çevre ve taban deliklerine 4 ms, arttırarak gecikmeler belirlenmiştir. Ek 1'de deliklere ait gecikme süreleri detaylı bir şekilde görülmektedir.

4.2.1. *Patlatma sonucu*

Gerçekleştirilen patlatma sonrası çevre görüntüsü Şekil 8'de görülebilmektedir.

Şekil 8. Çevre görüntüsü

Patlatma sonrası 19.26 m^2 kesit alanı, 69.36 m^3 hacimsel üretim ve 3.6 m doğrusal ilerleme gerçekleştirilmiştir. Patlatmanın seri gerçekleşmesi serili bir yığın formu oluşturmuş bunu önlemek adına 2. Elektronik denemesinde üretim deliklerin gecikme aralığı artırılarak değiştirilmiştir.

4.3. İkinci Elektronik Uygulama

2. Elektronik ateşleme sistemi kullanılarak yapılan patlatmada kesme bölgesi Jumbo operatörü tarafından aynanın sol tarafına delinmiştir. Yapılan bu değişikliğin gecikme düzenin değiştireceğinden bölgeler çizilerek

işaretlenmiş ve delik konumları belirlenmiştir. Şekil 9'da atım öncesi aynanın kesit görüntüsü görülmektedir.

Şekil 9. Ayna kesit görüntüsü

Kesme bölgesindeki deliklere 200 ms, 2. Elektronik patlatmasında yığın formunun fazla serili olmasından dolayı tarama delik ve taban deliklerinin 40 ms, çevre deliklerine ise 4 ms, arttırarak gecikmeler belirlenmiştir. Ek 2'de deliklere ait gecikme süreleri detaylı bir şekilde görülmektedir.

4.3.1 *Patlatma sonucu*

Gerçekleştirilen patlatma sonrası çevre görüntüsü Şekil 10'da görülmektedir.

Şekil 10. Çevre görüntüsü

Patlatma sonrası 20.27 m^2 kesit alanı, 3.7 m doğrusal ilerleme ile 75.00 m^3 hacimsel üretim gerçekleştirilmiştir.

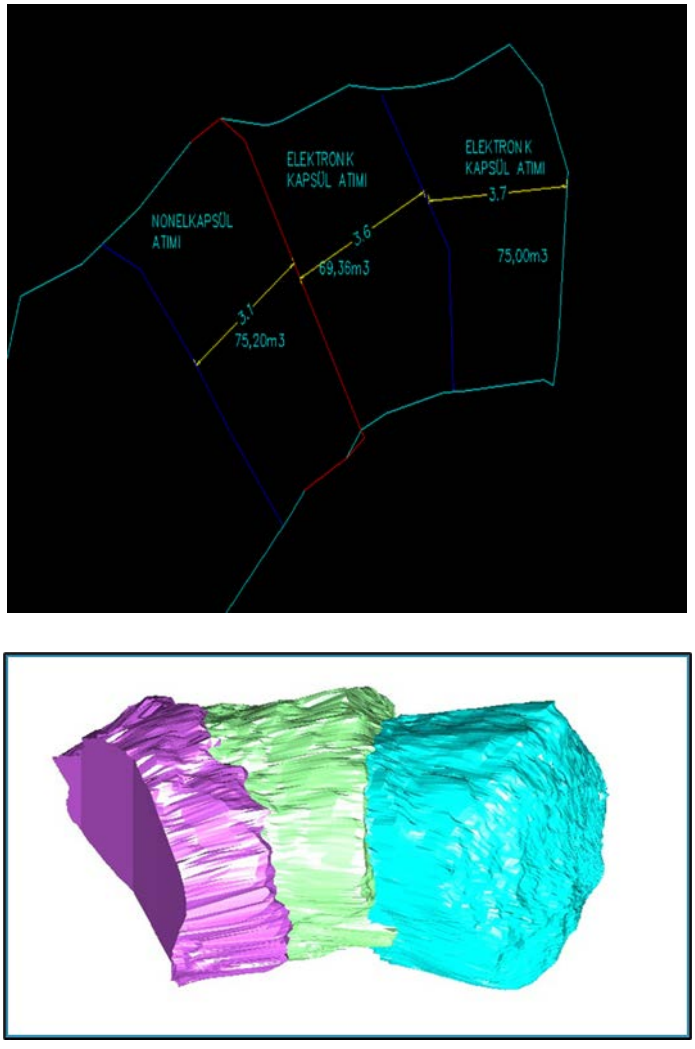
5. UYGULAMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Yapılan patlatmalara ait alınan CSM ölçümleri doğrultusunda elektronik ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen atımlarda fazla kazı (overbreak) olmadığı (elekronik patlatma kesit alanının nonel'e göre %18.3 azaldığı) ve ilerlemenin elektriksiz ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen atımdan daha fazla (%17.7) gerçekleştiği Şekil 11'de yer alan karşılaştırılmalı doğrusal

ilerleme ve kazı hacmi ölçümünde görülmektedir. Gerçekleştirilen patlatmalara ait doğrusal ilerleme, hacimsel üretim ve kesit alanı verileri Çizelge 3'de karşılaştırmalı olarak yer almaktadır.

Çizelge 3. Patlatmalara ait doğrusal ilerleme, hacimsel üretim ve kesit alanı verileri

Atım İsimleri	Doğrusal İlerleme (m)	Hacimsel Üretim (m^3)	Kesit Alanı (m^2)
Elektriksiz	3.1	75.20	24.20
Elektronik 1	3.6	69.36	19.26
Elektronik 2	3.7	75.00	20.27



Şekil 11. Doğrusal ilerleme ve kazı hacmi ölçümü

6. SONUÇLAR

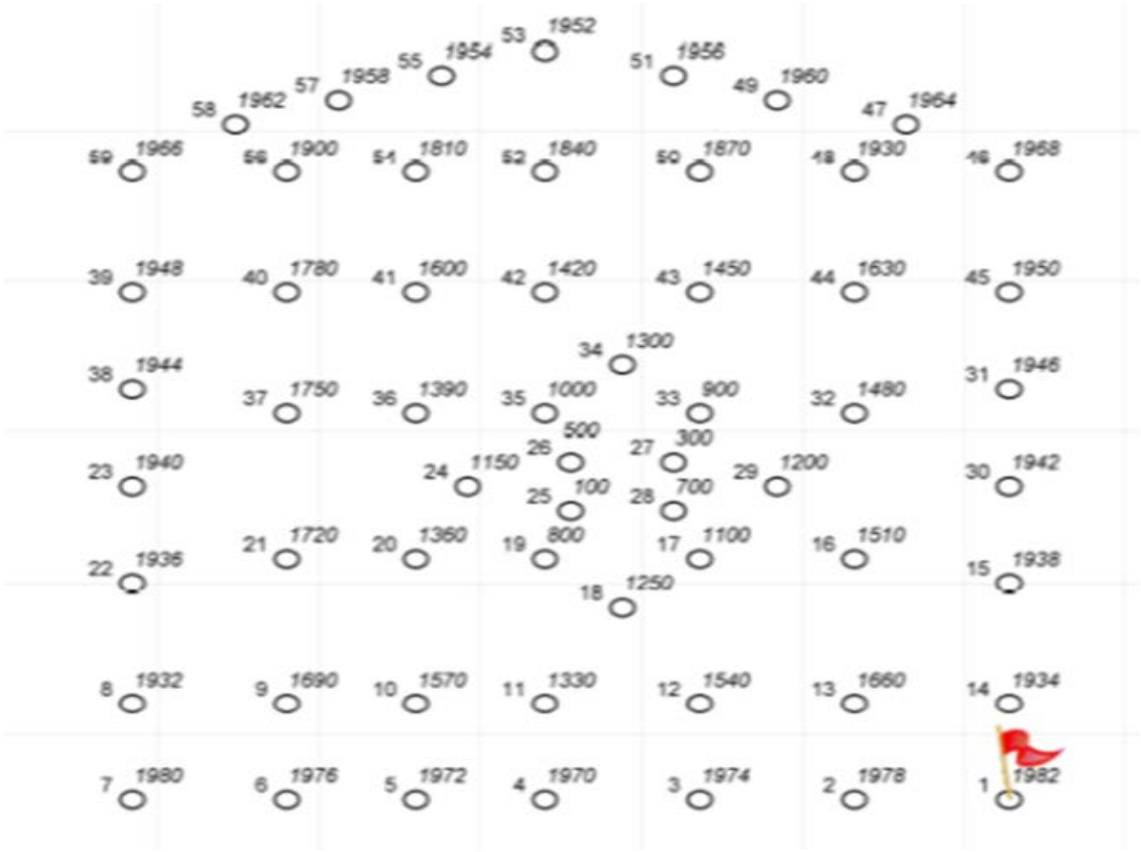
Yapılan çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda patlatma enerjisinin, gecikme süresi ile kontrol altına alınması sonucu doğrusal ilerleme miktarının arttığı (%17.7) ve fazla kazının (overbreak) azaldığı (%18.3) görülmektedir. Bu husus doğrultusunda elde edilen verilerin toplam proje veya işletme maliyetine olan etkileri aşağıda belirtilmiştir;

- İlerleme hızının artması;
- fazla kazı (overbreak) azalması;
- Destekleme birim tüketimlerinin azalması; ve
- Homojen ve uygun tane boyu dağılımı ile yükleme, taşıma maliyetlerinin azalması.

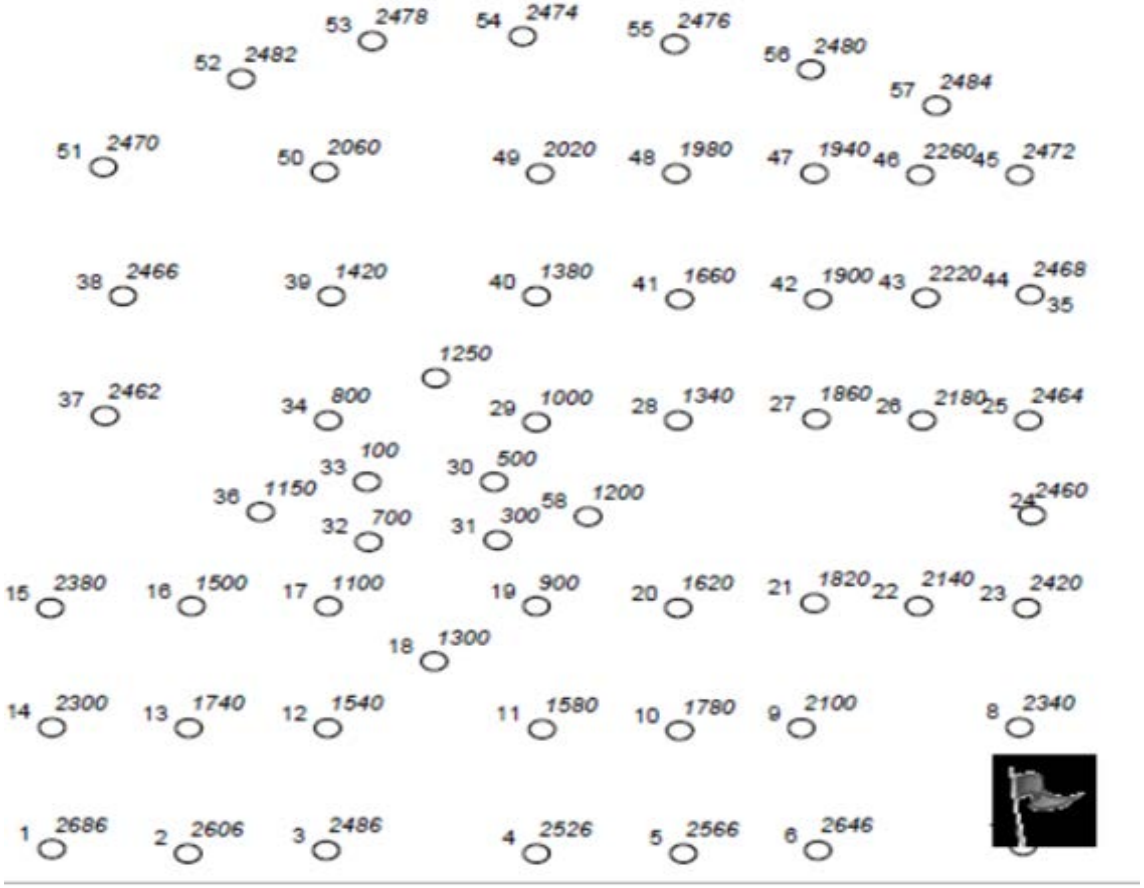
KAYNAKLAR

Düzgün, Ö., & İlik, Ö. G., 2017. Elektriksiz ile elektronik ateşleme sistemlerinde belirlenen gecikme sürelerinin doğruluklarının irdelenmesi. IX. Uluslararası Delme Patlatma Sempozyumu, s.136-137.

EK 1. BİRİNCİ ELEKTRONİK DELİKLERE AİT DETAY GECİKME SÜRELERİ



EK 2. İKİNCİ ELEKTRONİK DELİKLERE AİT DETAY GECİKME SÜRELERİ



FOSİL YAKITLARDA %80 DIŞA BAĞIMLI OLAN TÜRKİYE'NİN YEŞİL ENERJİ GELECEĞİ

THE GREEN ENERGY FUTURE OF TÜRKİYE WHICH 80% DEPENDENT ON FOSSIL FUELS

Muhterem Köse
Altın Madencileri Derneği, Ankara

ÖZ: Yenilenebilir enerji yatırımlarındaki gelişme, yeşil enerji üretiminde kullanılan metallerin talebinde ve tüketiminde hızlı bir artışa yol açmıştır. Günümüzde yıllık yaklaşık 30.000 TWh olan elektrik arzının, 2050 yılında 100.000 TWh üzerine çıkacağı tahmin edilmektedir. Söz konusu bu enerji ihtiyacı, fosil yakıtlar yerine, karbondan arındırılmış yenilebilir yeşil enerji kaynaklarından nasıl karşılanabileceğine ilişkin çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Dünya enerji üretiminde yaklaşık %80 paya sahip olan fosil yakıtların payının %80'den %17'ye düşürülmesi, yenilenebilir enerjilerin payının ise %12'den %71'e yükselmesi hedeflenmektedir. Ancak bu hedefe sınırda karbon vergisi koyarak ulaşılıp ulaşılamayacağını veya nasıl ulaşılacağı bilinmemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın "Sıfır Emisyon Yol Haritası Senaryosuna" göre 2050 yılında sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için, enerji üretiminde fosil yakıtlardan (petrol, doğal gaz, kömür, biyokütle) yenilenebilir enerjilere (güneş, rüzgar, hidro, vb.) geçişin sağlanması için ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Yeni enerji teknolojileri, elektrikli araçlar, pil ve bataryalar alanındaki gelişmeler, bir avuç ülkenin hakim olduğu, oldukça yoğun tedarik zincirlerine emanet edilemeyecek kadar önemli olup, ülkelerin ekonomik ve stratejik önceliğinde önemli bir yere sahiptir. Yeni enerji teknolojilerinde kullanılan metallerin tedarikinde geri kalmanın ve bu alandaki yatırımları zamanında yapmamanın bedeli, yüksek enerji ithalatı ve faturası olarak karşımıza çıkacaktır. Enerjide dışa bağımlı kalmak dün olduğu gibi, gelecekte de ülkemiz ve ekonomimiz için çok önemli sorunlara ve dış ticaret açığına neden olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Enerji, Fosil Yakıtlar, Yeşil Enerji Teknolojileri, Sıfır Emisyon, Metal Talebi

ABSTRACT: *The increase in renewable energy investments has led to a sharp rise in the demand for and consumption of metals used in green energy production. Today, the annual electricity supply is approximately 30,000 TWh, and it is estimated to exceed 100,000 TWh by 2050. Various studies*

are being conducted on how this energy demand can be met through decarbonized, renewable green energy sources instead of fossil fuels. It is aimed to reduce the share of fossil fuels—which currently account for approximately 80% of global energy production—to 17%, while increasing the share of renewable energy sources from 12% to 71%. However, it remains unclear whether this target can be achieved, or how it can be achieved, through the implementation of carbon border taxes. According to the International Energy Agency's "Net Zero Emissions by 2050 Roadmap" scenario, in order to reach the net zero emissions target by 2050, significant investments are being made to transition from fossil fuels (such as oil, natural gas, coal, and biomass) to renewable energy sources (such as solar, wind, hydro, etc.) in energy production. Developments in the field of new energy technologies, electric vehicles and batteries are too important to be entrusted to very intense supply chains dominated by a handful of countries, and has an important place in the economic and strategic priority of countries. The cost of falling behind in the supply of metals used in new energy technologies and failing to invest in this field in a timely manner will manifest itself as high energy imports and bills. Just as it did in the past, remaining dependent on foreign energy will continue to cause significant problems for our country and economy in the future, leading to a trade deficit.

Keywords: *Green Energy, Fossil Fuels, Green Energy Technologies, Zero Emissions, Metal Demand*

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, elektrikli araçlar, bataryalar, piller ve yeni enerji teknolojileri alanlarında başarı için ilk adım, temiz enerji teknolojilerinin girdi tedariğinde yani metal madenciliğinde güçlü bir konumda olmayı gerekmektedir. Temiz enerji sistemini inşa etmek için lityum, kobalt, bakır, nikel, alüminyum, çelik, neodymium, (silikon), (grafit), gümüş, manganez, fosfat, titanyum, telliryum, germenyum, kadmiyum, kalay, molibden, krom ve nadir toprak elementlerinin (NTE) tedarik edilmelidir. Bu malzemelerin tedariki, büyük ölçekli metal

madenciliği yatırımları, geri dönüşüm ve rafineri yatırımları, pil ve batarya üretimi kapasitelerinin hızla arttırılmasını gündeme getirmiştir.

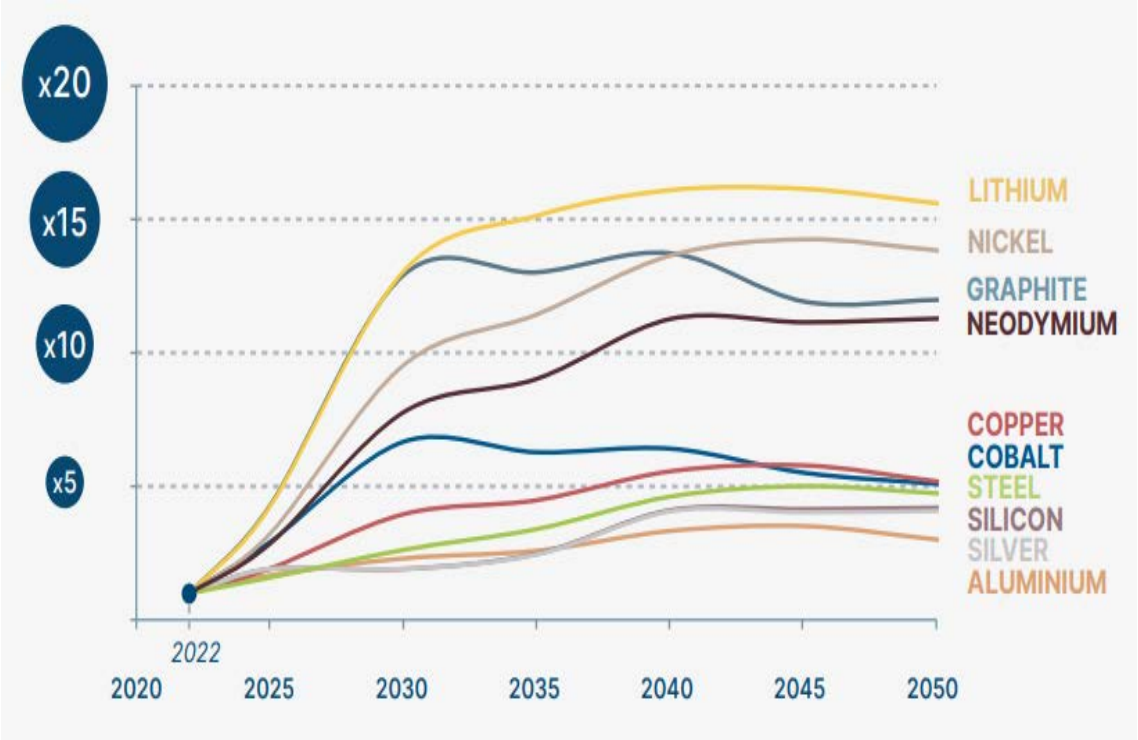
2050 yıllına kadar elektrik üretimi ve karayolu taşımacılığı sektörlerinde karbonsuzlaştırma hedefine ulaşabilmek için temiz enerji yatırımlarında ciddi gelişmeler yaşanmaktadır. Çin, elektrikli araç sektörünün büyümesi için 2009-2023 yılları arasında 231 milyar dolar yatırım yaparak tüm tedarik zincirinin halkalarına teşvikler vermiş ve maden arama, üretim, izabe ve rafinasyon teknolojileri gibi dikey entegre modellerini desteklemiştir (Otomobil Sektör Raporu, 2025).

2. TEMİZ ENERJİ İÇİN GEREKLİ OLAN METALLER

2.1. Yenilenebilir Enerji ve Metal Talebi

Yeşil enerjiye geçiş için 5 milyar ton çelik, 950 milyon ton alüminyum, 650 milyon ton bakır, 170 milyon ton grafit, 100 milyon ton nikel, 65 milyon ton silikon, 20 milyon ton lityum ve 6 milyon ton kobalt metali yanında daha az miktarlarda gümüş, platin, palladyum, neodymiuma ihtiyaç duyulacağı tahmin edilmektedir (BP, 2022; BP, 2025). İhtiyaç duyulan bu metalleri karşılayacak kadar yeterli maden rezervleri yoktur. Aramalara ciddi risk sermayesi harcayarak yatırım yapacak firmalar ve ülkeler gelecekte çok şanslı bir konuma sahip olacağından politika yapıcılara ve karar vericilere ciddi sorumluluklar düşmektedir.

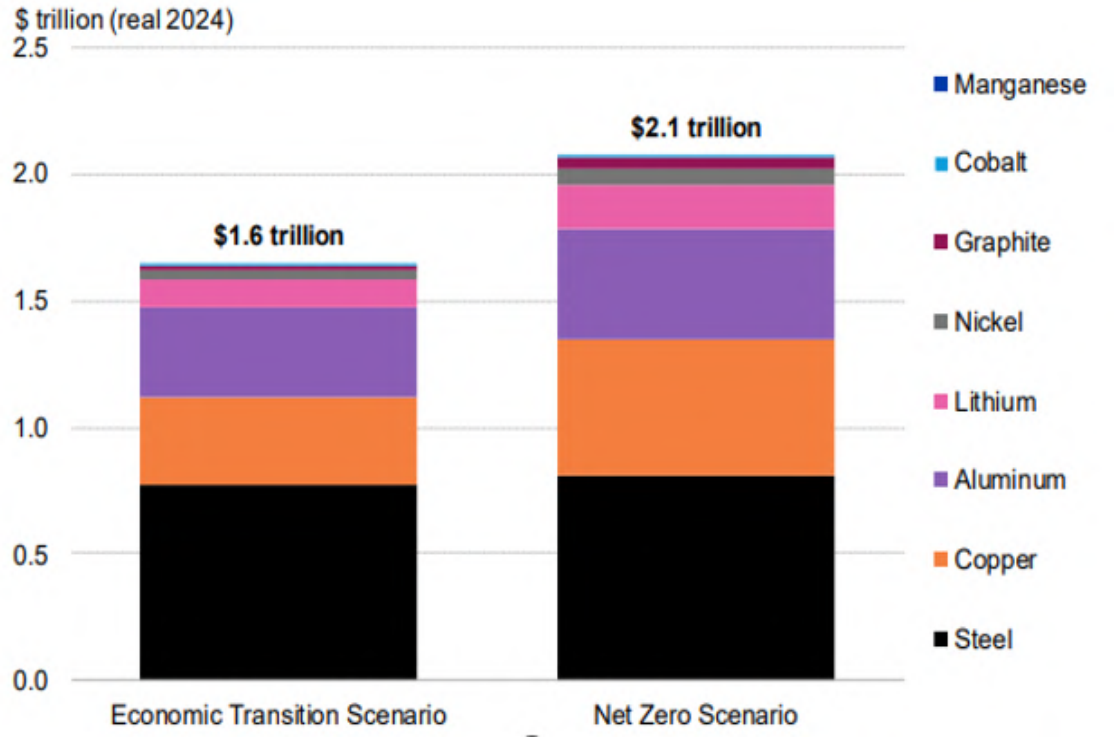
Metaller, düşük karbonlu bir ekonomiye küresel geçişi destekleyecek teknolojinin temelini oluşturmaktadır. Şekil 1'de 2025-2050 yıları arasında yenilenebilir temiz enerji tedarikinde kullanılan metallerin talebinde nasıl bir artış yaşanacağı gösterilmiştir (IRENA, 2021; UNEP, 2024).



Şekil 1. Yenilebilir enerji için metal talebindeki artışlar (IRENA, 2021; UNEP, 2024)

Yeşil enerji deyince akla gelen rüzgar türbinlerinden güneş enerjisine, elektrikli araçlardan elektrik şebekelerine ve elektrolizörlerden bataryalara kadar her şey metaller sayesinde mümkün olmaktadır.

Bloomberg NEF'in araştırmalarına göre, 2024-2050 yılları arasında net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek amacıyla ne kadar maden çıkarılacağı, ne kadar yatırım yapılacağı araştırılmıştır (Şekil 2). Bu araştırmaya göre temiz enerji üretimi için gerekli olacak metal taleplerini karşılayabilmek için 6 milyar ton maden çıkarılacağı ve metal madenciliğine "Economic Transition Senaryo" çalışmasına göre 1,6 trilyon $, "Net Zero Senaryo" çalışmasına göre ise 2,1 trilyon dolarlık yatırım yapılması gerekeceği tahmin edilmektedir (TMO, 2024; Bloomberg NEF, 2025). Yapılacak yeni yatırımlarda ise ilk 3 sırada yaklaşık 750 milyar $ ile çelik ilk sırada yer alırken, bunu yaklaşık 300 milyar $ ile bakır, 250 milyar $ ile alüminyum takip etmektedir.



Şekil 2. Enerji dönüşümü için yapılacak metal yatırımları (2024-2050), (TMO, 2024; Bloomberg NEF, 2025)

2.1.1. *Artan metal talebi nasıl karşılanacak?*

Yeşil enerji teknolojilerinin inşası için madencilik sektörü maden aramalarına daha çok risk sermayesi bulmak ve yatırım yapmak zorunda. Önümüzdeki yirmi beş yıl boyunca arzdaki büyümeye rağmen, özellikle 2050 yılına kadar net sıfır emisyona giden süreçte, artan talebi karşılamak için yeterli metal olacak mı? Metal talepleri karşılanamaz ise temiz enerji teknolojilerinin benimsenmesini olumsuz etkiler mi?

Uzun süreli bir metal açığı tehdidi yaşanırsa bu durum metal fiyatlarında yüksek artışlara yol açabilir. Böyle bir olumsuzluk yaşanması temiz enerji teknolojilerinin maliyetini arttırıcı bir rol oynayabilir. Azalan mineral rezervlerini yenilemek için daha fazla maden keşfi gerekecek. Halihazırda bakır, nikel ve kobalt gibi metallere olan artan talebi karşılamak için yeterli rezerv olmadığı görülmektedir.

Dünya bir enerji devriminin eşiğinde; rüzgar, su, dalga, güneş ve jeotermal enerjinin gücünden yararlanan bir dizi kanıtlanmış ve uygun maliyetli yenilenebilir enerji teknolojisi hızla devreye alınıyor. Yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 2011 ile 2023 arasında beş kat arttı. Güneş panelleri, rüzgar tribünleri, elektrikli araçlar, bataryalar, yüksek gerilim hatları, jeotermal güç sistemleri, enerji depolama sistemleri yatırımlarında kullanılan metallere talep önümüzdeki yıllarda hızla artmaya devam edecektir.

Yenilenebilir elektrik üretiminin verimliliği son yıllarda önemli ölçüde arttı ve yenilenebilir enerjileri birçok ülkede uygulanabilir birincil enerji kaynağı haline getirdi.

3. ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNÜN MADENCİLİĞE ETKİSİ

3.1. Yeşil Enerji Yatırımlarındaki Artış

Yenilenebilir enerji sistemleri sayesinde fosil yakıtların çıkarılması ve yakılması azalacak. Net sıfır emisyona doğru ilerleme sürecinde, şu anda çıkarılandan daha az fosil yakıta ihtiyaç duyacağız. 2022 yılında fosil yakıt olarak yaklaşık 4,5 milyar ton petrol (Enerdata, 2024), 8 milyar ton kömür (Rigzone, 2023) ve 4 trilyon metreküp doğal gaz üretilmiştir (EIA, 2023).

2022 yılında fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz, biyoyakıt) parasal değeri yaklaşık 5,5 trilyon $. Dolayısıyla dünyada yıllık yaklaşık 6 trilyon dolarlık bir enerji pazarı söz konusu. Bundan sonra yenilenebilir enerjiler, fosil yakıtların yerini aldığı ölçüde, yer altından daha az kömür, petrol ve doğal gaz çıkarılacak. Fosil yakıtlara ödenen para yenilebilir temiz enerji teknolojilerine kayacaktır. Öte yandan, yenilenebilir enerjinin üretiminde, kullanımında ve dağıtımında kullanılan metallere çok daha fazla ihtiyaç duyulacaktır.

Örneğin tipik bir elektrikli otomobilin üretiminde 200 kilogramdan fazla enerji geçiş minerali (başlıca bakır, lityum, nikel, manganez, kobalt, *grafit* ve çinko) kullanılmaktadır. Bu, geleneksel bir otomobilin yapımında kullanılan 35 kilogram bakır ve nikelin altı katından fazladır.

Batarya dünyası, LFP yoğun LFP-NMC karışımından önce daha çok LFP yoğun, sonra da bunlara alternatif olarak elektrikli araçlarda katı hal pillerine, enerji depolamada da sodyum iyon pillerine doğru gidiyor. Bu değişikler, 10 ila 20 yıl içinde gerçekleşecektir. Hidrojen, ağır araçlar dışında, bu karışımın içine girebilecekmiş gibi gözükmemektedir.

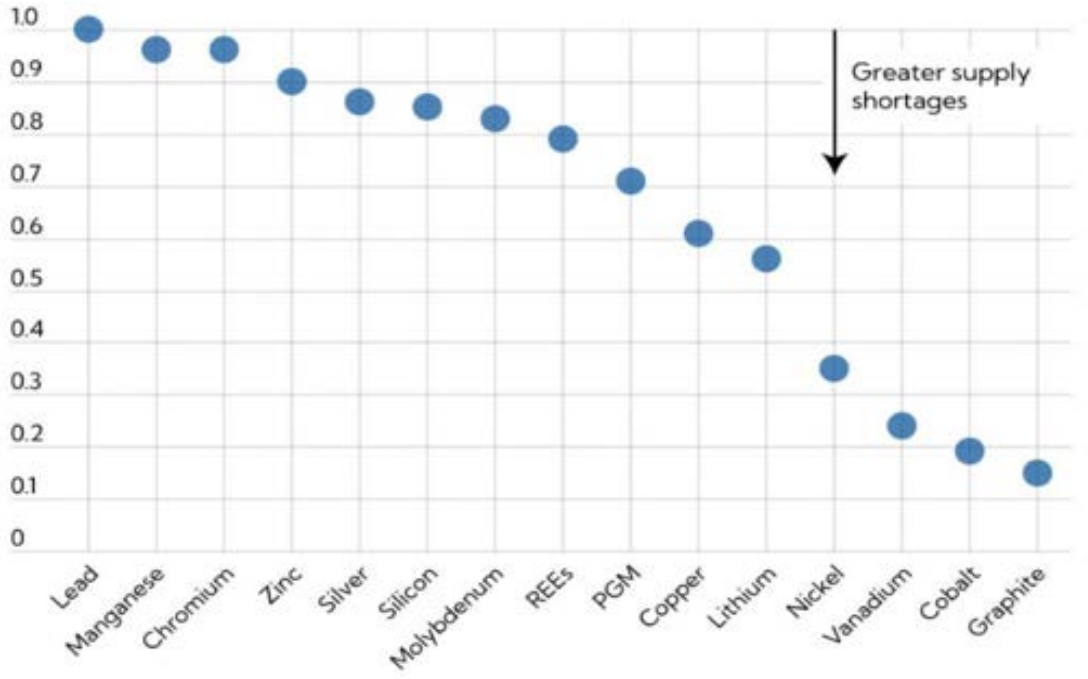
Bir kara rüzgar santrali, üretilen enerji birimi başına gazla çalışan bir elektrik santralinden dokuz kat daha fazla mineral ve metale ihtiyaç duyulmaktadır. Bir açık deniz rüzgar santrali, kara rüzgar santralinden yaklaşık yüzde 50 daha fazla mineral ve metale ihtiyaç duymaktadır.

Elektrikli araç satışları 2022'de %60 artarak 10 milyonu aştı (IEA, 2023). Güneş fotovoltaik tesisleri ve rüzgar enerjisi tesisleri hızla artmaya devam ediyor. Enerji sektöründen gelen artan talep, lityuma yönelik genel talebin üç katına çıkmasına, kobalta yönelik talebin %70 ve nikele yönelik talebin %40 artmasına yol açtı. Aynı minerallerin çoğunun yeni dijital ekonomiyi güçlendiren akıllı telefonlarda ve veri depolama alanlarında kullanıldığı göz önüne alındığında, bu mineraller yirmi birinci yüzyılda ekonomiler için giderek daha önemli hale geldi.

Düşük karbonlu enerjiye yatırımın son yıllarda çok hızlı bir şekilde büyüdüğü, 2019'dan bu yana yaklaşık %50 artarak 2023'te yaklaşık 1,9 trilyon dolara ulaştığı tahmin ediliyor. Merak edilen soru mevcut metal üretimlerinin yeşil enerjiye geçiş için ihtiyacı karşılamada ne kadar yeterli veya yetersiz olacağıdır.

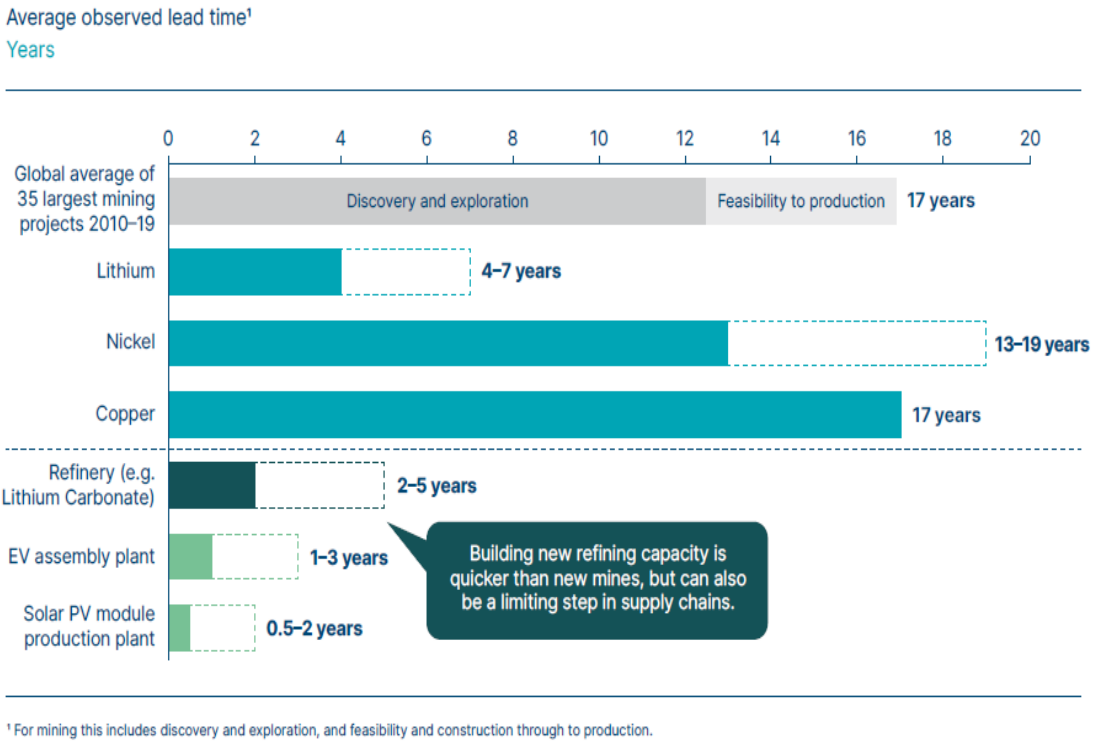
3.2. Net Sıfır Karbon Emisyonunda Metallerin Arz Talep Oranları

Net sıfır senaryosuna göre 2050'ye kadar metal tüketiminde öngörülen artış göz önüne alındığında, grafit, kobalt, vanadyum, nikel, lityum, bakır taleplerini karşılamak için yetersiz kalabileceği görünüyor (IMF, 2021).



Şekil 3. Yenilenebilir enerji metallerinde arz talep oranları

Metal madenciliğinde aramadan üretime geçiş süreci yaklaşık 15-17 seneyi bulmaktadır. Şekil 4'de dünyada büyük projelerin hayata geçmesi süresinin ortalama 17 yılı bulduğu görülmektedir (ETC, 2023). Bu nedenle metal madenciliğinde bugün alınan bir yatırım kararının sonuçlarını 15-20 sene sonra göre görebilirsiniz. Madencilikte 15-20 yıl sürecek bir projeyi yönetebilecek öngörülebilir bir yatırım ortamı yaratmadan bu alana kurumsal yatırımcıların yatırım yapmasını beklemek doğru olmayacaktır. Politika yapıcılara ve karar vericilere tarihi bir sorumluluk düşmektedir.



Şekil 4. Metal madenciliğinde aramadan üretime geçiş süresi (ETC, 2023)

Yenilenebilir enerji üretiminde pek çok metal kullanılmaktadır. Cizelge 1'de hangi metallerin hangi yenilenebilir teknoloji tedariğinde kullanıldığı özetlenmiştir (TMO, 2024).

Çizelge1. Metaller hangi yenilenebilir enerji üretiminde kullanılıyor?

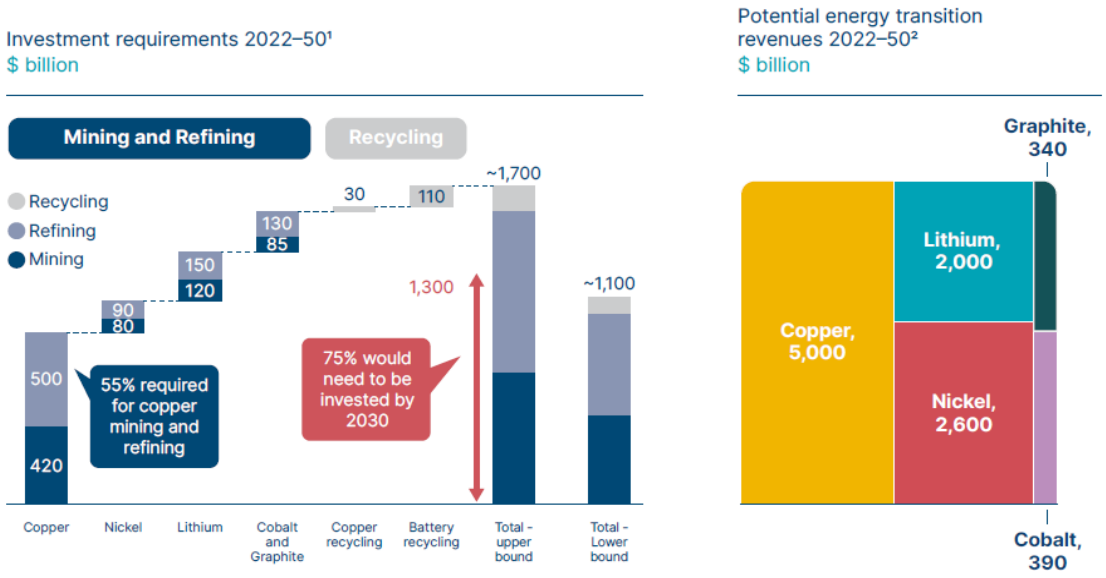
Yenilenebilir Enerji Teknolojileri	**Gerekli Metallar**
Güneş Enerjisi	Al, Cd, Cu, Ga, Ge, Au, Ir, Pb, Mo, Ni, Ag, Zn
Rüzgar Enerjisi	Al, B, Cr, Co, Cu, Ga, Mn, Ag, Mo, Ni, REE's silikon, Zn
Hidrolik	Cd, Cu, Pb, Mn, Mo, Ni, V, Zn
Jeotermal	Al, Cr, Mn, Mo, Ni, REE's silikon, Ag, V, Zn
Elektrikli Araçlar	Al, B, Co, Cu, Ga, Ge, Au, Ir, Pb, Li, Mn, Ni, REE's silikon, Ag, V, Zn
Batarya-Piller	Li, Fe, Ni, Mn, Co, Ni, Fofat, Na
Yüksek Gerilim Hatları	Al, Cu, Ga, V, Zn

4. YEŞİL ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNDE FIRSATLAR

4.1. Enerji Dönüşümü ve Yarattığı Yeni Ekonomik Fırsatlar

Ukrayna'daki ve Orta Doğuda'ki savaşlar, enerji güvenliğinin ne kadar önemli olduğunu Avrupa'ya gösterdi. Avrupa'da bu nedenle yeşil enerji yatırımlarına hız verildi. Düşük karbonlu enerji yatırımlarının son yıllarda çok hızlı bir şekilde büyüdüğü, 2019'dan bu yana yaklaşık %50 artarak 2023'te yaklaşık 1,9 trilyon dolara ulaştığı tahmin ediliyor.

Yeşil enerji yatırımları büyük ölçüde gelişmiş ekonomilerde ve Çin'de yoğunlaşmış durumdadır. Elektrikli araçların sayısı hızla arttı ve satışlar 2019'da iki milyon araçtan 2023'te yaklaşık 14 milyona çıktı. Bu büyüme özellikle Çin, AB ve ABD'de araç emisyon düzenlemeleriyle desteklenmektedir.



Şekil 6. Küresel yenilenebilir enerji yatırımları ve getirileri (2020-2050), (ETC, 2023)

Madencilik, rafineri ve geri dönüşüm tesislerini genişletmek için yapılacak 1,7 trilyon dolarlık yatırımlar toplam 10 trilyon dolarlık bir pazar

fırsatının kilidini açacak. Şekil 6'da görüldüğü gibi; 2022-2050 yılları arasında yaklaşık 5 trilyon $ bakır, 2 trilyon $ lityum, 2 trilyon $ nikel, 390 milyar $ bir kobalt pazarından bahsedilmektedir (ETC, 2023).

Şekil 6 incelendiğinde; yatırım gereksinimleri yalnızca enerji geçişinden gelen malzeme talebine ve madencilik, rafineri ve geri dönüşüm projeleri için ortalama sermaye harcamalarına dayanmaktadır. Pazar büyüklüğü yalnızca enerji geçişinden gelen kümülatif malzeme talebine dayanmaktadır (Bakır = 600 Mt, Lityum = 20 Mt, Nikel = 100 Mt, Grafit 170 Mt, Kobalt = 6 Mt) ve tarihsel verilere dayalı tahmini ortalama fiyatlar (Bakır = ton başına 8.500 $, Lityum = ton başına 100.000 $, Nikel = ton başına 26.000 $, Grafit = ton başına 2.000 $, Kobalt = ton başına 65.000 $)

4.2. Türkiye'nin Enerji ve Metallerde Dışa Bağımlılığı

Türkiye 2024 yılında enerji ithalatına 65,7 milyar $, altın ithalatına 17,1 milyar $, demir çelik ithalatına 23,7 milyar $, alüminyum ve ara malları ithalatına 6,1 milyar $, bakır ve ara malları ithalatına 6 milyar dolar, çinko ve ara malları ithalatına 0,9 milyar $ olmak üzere 6 kalemde toplam 119,4 milyar dolar ödenmiştir (Trademap, 2024).

Türkiye başta demir-çelik, alüminyum, bakır, nikel, kurşun, çinko, kobalt, lityum gibi yeşil enerji için gereksinim duyulan metallerde %70-90-100 oranlarında dışa bağımlı bir ülke konumundadır.

Küresel enerji talebinin karşılanmasında yeni bir döneme girilmiştir. Bu dönem enerjinin fosil yakıtlar yerine yenilebilir temiz enerji kaynaklarından karşılanmasına geçiştir. Önümüzdeki süreçte yeşil enerjinin girdi tedarikini sağlayacak olan metal madenciliğinde, izabe ve rafinasyon yatırımlarında, metallerin geri dönüşüm teknolojilerinde ve yeni nesil pil ve batarya yatırımlarında devasa yatırımların önü açılmıştır.

Temiz çevre ve temiz bir enerji sistemi için gerekli olan malzeme ve mineralleri çıkarmanın olumsuz küresel ve yerel çevresel etkilerinin en aza indirilmesinde sorumlu ve güvenli madencilik dönemi yaşanacaktır.

Metal madenciliğinin iklim değişikliğine etkisi, fosil yakıtların çıkarılması ve kullanılmasıyla ortaya çıkan etkilerden çok daha azdır. Sürekli olarak çıkarılması gereken tüketilebilir fosil yakıtların kullanımından, yeniden kullanılabilen ve geri dönüştürülebilen dayanıklı metallerin kullanımına geçilmesi, temelde daha sürdürülebilir bir enerji sistemi yaratacaktır. Metallerin geri dönüşümlerle yeniden kullanımı, ileride daha az maden talebine yol açacaktır. Mineral çıkarma ve rafine etme yerel çevreler ve topluluklar üzerinde önemli etkilere sahiptir. Ancak, bunlar güçlü düzenlemelerle ve zorunlu kılınması gereken mevcut en iyi teknoloji uygulamaları ile kısacası sürdürülebilir ve sorumlu madencilik kültürü ile en aza indirilebilir.

5. SONUÇ

Türkiye'nin birincil enerji arzında iklim kirliliğine neden olan fosil yakıtların (petrol, doğal gaz, kömür) payı yaklaşık %83'dür. Doğal gazda %98,5, petrolde %93, kömürde %40 dışa bağımlıyız. Türkiye yeşil enerji üretiminde kullanılan metallerde ise bakırda %70, çelik ürünlerinde %78, alüminyumda %95, çinkoda %100 oranlarında dışa bağımlıdır. Bu durumu değiştirecek yatırımlar yapılamaz ise Türkiye fosil yakıtlarda olduğu gibi, yeşil enerjide de dışa bağımlı olmaya mahkum kalacaktır.

Küresel enerji dönüşümü dünyada metal madenciliğinde çok önemli fırsatlara yol açmışken, ülkemizde madencilik çevre ve doğa düşmanı bir faaliyet olarak gösterilerek, itibarsızlaştırılmaya ve yasaklanmaya

çalışılmaktadır. Bu durumu görmemezlikten gelen kamu otoritesi de, her geçen yıl madenciliği kısıtlamaya yönelik mevzuat düzenlemeleri yapılmaktadır. Böylesi bir ortamda madenciler ülkemizde, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, elektrikli otomobiller, diğer araçlar, bataryalar ve pillerin yapımında kullanılan metalleri nerede arayanacak, nasıl üretilecek?

MAPEG'in verilerine baktığımızda maden arama faaliyetlerinin her geçen yıl artacağı yerde, giderek azaldığı görülmektedir. Sektöre sermaye girişi artacağı yerde, her geçen yıl azalmaktadır. Ülkemizde madenciliği kısıtlamaya veya yasaklamaya yönelik faaliyetler ve düzenlemelerle aslında otomobil, inşaat, beyaz eşya, demir çelik, savunma, ulaşım, tarım, elektrik elektronik, kuyumculuk, kimya sanayilerinin hammadde, ara mal ve metal ihtiyacını kendi maden kaynaklarımızdan karşılanmasını tehlikeye attığımızın, farkında mıyız? Yasaklanmaya çalışılan madenciliğin iklim krizine çözüm üretmede ne kadar önemli olduğunu görebiliyor muyuz?

KAYNAKLAR

BloombergNEF, 2025. https://about.bnef.com/energy-transition-investment.

BP, 2022. Statistical Review of World Energy 2022. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf

BP, 2025. Energy Outlook, 2024. https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html.

Enerdata, 2024. https://yearbook.enerdata.net/crude-oil/world-production-statistics.html

ETC, 2023. Energy Transitions Commission. https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/07/ETC-Material-and-Resource-Requirements_vF.pdf

IEA, 2023 https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars

IMF, 2021. https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2021/12/08/metals-demand-from-energy-transition-may-top-current-global-supply

IRENA, 2021. https://www.irena.org/News/expertinsights/2021/Oct/Materials-shortage-will-not-stop-the-energy-transition?ref=axion.zone

Otomobil Sektör Raporu, 2025. https://automobilemagazine.com.tr/allianz-otomotiv-sektoru-raporu-2025.

Rigzone, 2023. https://www.rigzone.com/news/who produced the most natural gas in 2022

TMO, 2024. Transition Metals Outlook, https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/202410BNEFTransitionMetalsOutlook2024.pdf

Trademap, 2024. https://www.trademap.org/Product_SelCountry_TS.aspx?nvpm

UNEP, 2024. Critical transition working paper UN environ. programme. https://www.unep.org/resources/publication/critical-transitions-circularity-equity-and-responsibility-quest-energy.

AFŞİN ELBİSTAN KÖMÜRLERİNİN NADİR TOPRAK ELEMENT POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF RARE EARTH ELEMENT POTENTIAL OF AFŞİN ELBİSTAN COALS

Abdulkadir Ürünveren, Suphi Ural
Çukurova Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

ÖZ: Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak özellikle elektronik endüstrisinde Nadir Toprak Elementlerinin (NTE) kullanımı oldukça hızlı bir şekilde artmaktadır. Nadir toprak elementlerinin kullanımı, ürün kalitesinde gözle görülür bir artış sağlamaktadır. Özellikle elektronik sanayinde nadir toprak elementlerinin kullanımı hem boyut küçülmesi hem de işlevsellik bakımından oldukça önemli yarar sağlamaktadır. Buna örnek olarak cep telefonlarında 8 adet nadir toprak elementi kullanılmaktadır. Nadir toprak elementleri element, konsantre, ara ürün, oksitleri metal ve alaşımları olarak da ticari bir değere sahiptirler. Kimyasal olarak aktif element grubunda olduklarından demir ve çelik içerisindeki nitrojen, oksijen, sülfür vb. elementleri uzaklaştırabilmektedir. Ayrıca, dökme demirde sülfür ve grafitin yapısını etkileyerek dökme demir matrisini düzenlemekte ve daha mukavemetli demir üretimini kolaylaştırmaktadır. Katkı maddesi olarak NTE'leri içeren malzemeler kararlı, yüksek sıcak ve korozyona dayanıklı hafif malzemelerdir. Bu özellikleriyle NTE'leri bilgisayar, hibrit araçlar, şarj edilebilir piller, cep telefonları, düz televizyon ekranları, dizüstü bilgisayarları, rüzgâr türbinleri, tıbbi görüntüleme cihazları, radar sistemleri, katalitik çeviriciler, korozyona daha dayanıklı metal alaşımları, uçak motorları, tıp, seramik, cam üretiminde, petrol arıtmada kullanılmaktadır.

Türkiye linyit kömür rezervlerinin büyük bir çoğunluğu termik santrallerde yakılarak elektrik üretilmektedir. Taş kömürleri de demir çelik endüstrisinde değerlendirilmektedir. Yakılan bu kömürlerden arta kalan ve kül diye adlandırılan atık malzemelerin içinde bulunan nadir toprak elementi varlığı dünya ortalamalarının üzerinde değerlerdedir. Bunun yanında termik santrallere yakılan kömürlerden arta kalan küllerin değerlendirilmesi açısından da oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında Elbistan'da bulunan çeşitli santralden temin edilen numunelerin analizleri ve üretim miktarlarından rezerv durumları ortaya çıkarılmış olup ekonomik açıdan değerlendirilebilirliği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kömür, NTE, Teknoloji, Ekonomik Değerlendirme, Rezerv

ABSTRACT: *Today, in parallel with the development of technology, the use of Rare Earth Elements (REE) is increasing rapidly, especially in the electronics industry. The use of rare earth elements provides a noticeable increase in product quality. The use of rare earth elements, especially in the electronics industry, provides significant benefits in terms of both size reduction and functionality. For example, 8 rare earth elements are used in mobile phones. Rare earth elements have commercial value as elements, concentrates, intermediates, oxides, metals and alloys. Since they are in the chemically active element group, nitrogen, oxygen, sulfur, etc. in iron and steel. can remove elements. In addition, it affects the structure of sulfur and graphite in cast iron, regulating the cast iron matrix and facilitating the production of stronger iron. Materials containing REEs as additives are stable, high temperature and corrosion resistant lightweight materials. With these features, REEs can be used in computers, hybrid vehicles, rechargeable batteries, mobile phones, flat television screens, laptop computers, wind turbines, medical imaging devices, radar systems, catalytic converters, corrosion resistant metal alloys, aircraft engines, medicine, ceramics, etc. It is used in glass production, oil refining.*

The majority of Türkiye's lignite coal reserves are burned in thermal power plants to produce electricity. Hard coals are also evaluated in the iron and steel industry. The rare earth element presence in the waste materials called ash remaining from these burned coals is above the world averages. In addition, it is also very important in terms of the evaluation of the ash remaining from the coals burned in thermal power plants. Within the scope of this study, the analysis of the samples obtained from various power plants in Elbistan and their reserve status were revealed from the production amounts and their economic evaluation was examined.

Keywords: *Coal, REE, Technology, Economic Evaluation, Reserve*

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak elektronik, iletişim, bilişim ve enerji teknolojileri alanında da çok hızlı bir değişim yaşanmaktadır. Bu alanlarda kullanılan hammaddelere talep de gün geçtikçe artmaktadır. Söz konusu

ihtiyacın karşılanması için de çok daha fazla üretime gereksinim olmaktadır. Teknolojide uç ürün olarak kullanılan Nadir Toprak Elementleri (NTE) doğada nabit halde bulunmamaları ve düşük konsantrasyonlarda çok geniş alanlara yayılmaları nedeniyle temin edilmelerinde bazı güçlükler yaşanmaktadır. Elektronik sektörü ve diğer sektörlerde kullanılan nadir toprak elementlerine olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu amaçla nadir toprak elementleri (NTE) kaynakları araştırılarak kullanıma alınmaları için çalışmalar yapılmaktadır. Fosil yakıt olarak kullanılan kömürler de bu kaynakların önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Afşin-Elbistan sahası genç yaşlı linyit sahası olarak yaklaşık 4,5 milyar tonluk bir rezerve sahiptir. Sahada örtü tabakası, kömür tabakası ve taban kili bakımından ele alındığında NTE açısından büyük bir rezerve sahiptir. Özellikle termik santralde yakılan kömürlerden arta kalan küllerin içinde bulunan NTE'nin ekonomik değerlerinin belirlenerek işlenmesi ülke ekonomisi bakımından önem arz etmektedir.

NTE 17 elementten oluşan bir grup olarak karşımıza çıkmaktadır. Kimyasal olarak skandiyum ve itriyum ve lantanitler olarak bilinen bu elementler; Lantan (La), Sezyum (Ce), Prosedium (Pr), Neodimyum (Nd), Promedyum (Pm), Samaryum (Sm), Evropiyum (Eu), Gadolinyum (Gd), Terbiyum (Tb), Disprozyum (Dy), Holmiyum (Ho), Erbiyum (Er), Tulyum (Tm), İterbiyum (Yb), Lutesyum (Lu), İtriyum (Y) ve Skandiyum (Sc) şeklinde sıralanmaktadır. Ergime notaları 798 ile 1663 °C arasında bu elementlerin atom numaraları 57-71 arasında değişen Lantanitler, atom numarası 21 olan skandiyum ve atom numarası 39 olan itriyum şeklindedir.

Elementlerin litosferdeki ortalama konsantrasyonlarını Amerikalı Jeokimyacı Clark ilk defa 1889 yılında hesapladığı için Clark'a ithafen elementlerin kayaç grubundaki konsantrasyonuna o elementin clarkı olarak tanımlanmaktadır. Kömür ve kömür küllerinde yapılan jeokimyasal

çalışmalarda NTE açısından clarke değerleri oldukça belirleyici sonuçlar vermektedir. NTE'ler bu açıdan değerlendirildiğinde 3 sınıfa ayrılabilmektedir; Ağır, orta ve hafif NTE. Franus ve arkadaşlarının sınıflamasına göre hafif NTE (Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm ve Sm), Orta NTE (Eu, Gd, Tb, Dy ve Y) ve ağır NTE (Ho, Er, Lu, Tm ve Yb) olarak tanımlanmıştır. Seredin ekonomiklik açısından NTE'leri değerlendirmiş ve değerlendirme sonunda kritik (Dy, Nd, Eu, Er, Tb ve Y), kritik olmayan (La, Pr, Sm ve Gd)ve arz talep bakımından aşırı (Ce, Ho, Lu, Tm ve Yb) olarak sınıflamıştır.

Açık ocak yöntemiyle işletilen kömür ve kömür üzerinde bulunan örtü tabakaları NTE kaynakları bakımından oldukça zengin olabilmektedir. Litosferde bulunan elementlerin ortalama konsantrasyonları değeri olarak alınan Clark değeri açısından değerlendirildiğinde bu tür yataklar oldukça verimli olabilmektedir.

Afşin-Elbistan kömür sahası Türkiye'nin en büyük genç linyit kömürü rezervine sahasıdır. Termik santralde elektrik üretimi için yakılan bu düşük kalorili kömürlerin kül oranı oldukça yüksektir. Dünyada benzer uygulamalara paralel olarak Türkiye'de de elektrik üretiminde kömür kullanımı oldukça yaygındır. Termik santrallerde yakılan kömürlerden arta kalan uçucu küllerin birçok kullanım alanı vardır. Özellikle çimento üretim sanayii ve yol yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Afşin-Elbistan sahasında yıllık ortalama 20 milyon ton kömür üretilmektedir. Söz konusu kömürün üretimi için de yaklaşık 60 milyon ton dekapaj yapılmaktadır. Kurulu termik santrallerde üretilen kömürler yakılmakta ve ortalama 4 milyon ton kül ortaya çıkmaktadır. Termik santral atığı bu küllerin kimyasal yapıları nedeniyle yaklaşık %10'luk bir kısmı kullanılabilmektedir. Tehlikeli atık sınıfında değerlendirilen bu atıkların uygun biçimde değerlendirilmesi ve ekonomiye kazandırılması oldukça önemlidir.

Son yıllarda teknolojinin gelişimine paralel olarak teknolojide uç ürün olarak kullanılan nadir toprak elementlerinin de önemi artmıştır. Kömürün sahalarında yapılan çalışmalarda örtü tabakası, kömür damarları ve tabanda biriken belli bir miktar nadir toprak elementi olduğu görülmüştür. Özellikle de Afşin-Elbistan gibi kül miktarı ve üretim miktarının bu kadar fazla olması düşünüldüğünde bunların değerlendirilmesi daha da önem kazanmaktadır. Termik santraller için kazılmış malzemelerin değerlendirilmesinde ekonomik bakımdan kazı maliyetinin olmaması da bir başka avantaj olarak sayılabilmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yang ve ark. (2019) Illinois Havzası Kömüründen Nadir Toprak elementlerinin ayrıştırılması adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma ile kömürde bulunan NTE'lerini üç farklı yolla denemişlerdir. 75 ° C'de bir 1,2 mol/L sülfürik asit çözeltisi kullanılarak liç yöntemi denenmiş olup %60 civarında bir geri kazanım sağlanmıştır. 0,1 mol/L (NH4) $2S0_4$ kullanıldığında 8 mol/L NaOH çözeltisi kullanarak ön işlemle kavurma veya kimyasal aktivasyon yoluyla termal aktivasyon denenmiş olup hafif NTE'lerde başarılı olunmuştur. Bir diğer yöntem olarak boyut küçültme sonrası süzme işlemi denenmiş olup katmanlara göre ayrım yapıldığında partikül kazanımı sağlanmıştır.

Qian ve ark. (2019) Bir triblok kopolimer kullanarak ince kuvars kaplamanın florit flotasyonunda azaltılması konulu bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, mineral flotasyonunu iyileştirmek için ince kaplamanın azaltılması için yeni bir fikir incelenmiştir. Pluit triblok kopolimer F-127 (PEO100PPO65PEO100), florit flotasyonundaki ince kuvars kaplamayı azaltmak için seçildi. Daha sonra, florit yüzeyindeki ince

kuvars kaplamanın F-127 ile azaltılmasının temelini oluşturan mekanizma ve F-127'nin kuvars ve florit yüzeylerinde kollektör sodyum oleat ile etkileşimi incelenmiştir. F-127'nin hem kuvars hem de florit yüzeylerinde adsorbe edildiği ve dolayısıyla sterik itme yoluyla florit yüzeyinde ince kuvars kaplamayı hafiflettiği bulunmuştur

Wang ve ark. (2019) Luzhou santralinden kömür külü içerisinde nadir toprak elementleri ve itriyum: Konsantrasyon, karakterizasyon ve optimize ekstraksiyonu adlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada besleme malzemesi olarak kullanılan kömür numunelerinin kimyasal ve minerolojik özellikleri incelenmiş olup NTE'lerinin zenginleştirilmesi yoluna gidilmiştir. Besleme kömürlerinin mineralojik bileşimlerine kaolinit ve illit / smektit (I / S) karışık tabakaları, ardından kalsit, siderit, ankerit ve az miktarda anataz ve jarosit içeren karbonat mineralleri hakimdir. Ağır NTE uçucu külde daha zengindir. Ekstraksiyon etkinliği, çeşitli kaynaklardan gelen farklı kömür külleri arasında değişebilse de, gelecekteki kullanım için uçucu külden tam bir NTE ekstraksiyon işlemi önerilmektedir.

Mondal ve ark. (2019) TEHDGA kullanılarak reçine emdirilmiş uçucu küllerinden NTE kazanımı konusunda bir çalışma yapmışlardır. Hindistan'ın farklı enerji santrallerinden kömür uçucu kül örnekleri toplanmış ve nadir toprak muhtevası ve geri kazanımı için çalışılmıştır. Nadir toprağın kütlesinin matris elemanlarından ayrılması, TEHDGA (N, N, N N, N′-tetrakis-2-etilheksildiglikolamid) emprenye edilmiş XAD-7 reçinesi kullanılarak gerçekleştirildi. Nadir toprağın niceliksel olarak ayrılması, ana elementlerin alımı olmadan elde edildi. Reçine 10 kez geri dönüştürüldü ve ekstraksiyon ve elüsyon özelliklerini koruduğu görüldü.

Wood ve ark. (2019) Nadir toprak elementi minerallerinin demir oksit-silikat bakımından zengin atıklardan geri kazanılması - Bölüm 1: Manyetik ayırma adlı bir çalışma yapmışlardır. Atıkların Taramalı Elektron

Mikroskopisi (TEM) ile Kantitatif Olarak Değerlendirilmesi yoluyla detaylı mineralojik karakterizasyon, düşük dereceli (ağırlıkça <% 1 NTE), ince boyutlu NTE minerallerinin varlığını ortaya koydu.

Smith ve ark. (2019) Nadir Toprak Elementlerinin Sıvı Membran Prosesleri Kullanarak Kömür Uçucu Kül Sızıntılarından Seçici Geri Kazanımı konulu bir çalışma yapmışlardır. Kömür yakma artıkları ve diğer jeolojik atık maddeler, nadir toprak elementleri için kaynak olarak önerilmiştir (NTE'ler, burada 14 kararlı lantanit, itriyum ve skandiyum olarak tanımlanmaktadır). NTE'lerin artıklardan ekstraksiyonu, NTE'leri, sızıntı sularındaki diğer büyük çözünen iyonlardan geri kazanmak için yüksek düzeyde seçici ayırma yöntemleri gerektiren asitlenmiş sızıntı suları üretir. Toplamda, bu sonuçlar geri kazanım sürecinde, gelecekteki çalışmaların NTE geri kazanımı için ölçeklendirilebilir sıvı membran ayırmalarının geliştirilmesinde hedeflenmesi gereken özel adımların belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Thompson ve ark. (2018) yaptıkları araştırmada lazerle ablasyon indüktif olarak eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (LA-ICP-MS) ve kullanarak bir enerji dağıtıcı X ışını spektrometresi (SEM-EDS) ile donatılmış bir taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yüksek NTE içeren numuneler tanımlanmaya çalışılmıştır. Çalışma sonunda en yaygın olarak Al ve Si'un baskın olduğu yerlerde NTE varlığı tespit edilmiştir. NTE'ni alüminasilikatlardan ayırmak için de bazı kimyasal ve fiziksel yollara başvurulması kanaatine varılmıştır.

Bielowicz ve ark. (2018) Polonya'daki Büyük Santrallerde Bitümlü Kömürün Yanmasından Kaynaklanan Uçucu Külün Kritik Elemanları konusunda bir çalışma yapmışlardır. 9 Elektrik santrali ve 1 termik santral külünde yapılan çalışmada belirtilen elementlerde uçucu külün

zenginleştirilmesinin, Polonya'da sadece birkaç bitümlü kömür işleme alanında gerçekleştiğini göstermiştir.

Kurşun ve ark. (2017) yaptıkları araştırmada basnazit cevherinden bazı NTE'nin asit liçi ile ayrılması konusunda çalışmışlardır. Bu kapsamda, Eskişehir-Kızılcaören yöresindeki farklı bölgelerden bastnazit içeren numuneler alınmış ve bu numuneler harmanlanarak temsili numune elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda; pülp katı oranı, asit dozajı, liç süresi ve liç sıcaklığının NTE çözünme verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Sülfrik asitle yapılan çalışmada optimum çözünme ve ayrışma değerleri bulunmaya çalışılmıştır.

Şahiner ve ark. (2017) MTA adına yaptıkları araştırmada Dünya'da NTE varlığı, rezervi ve Pazar durumunu ortaya koymaya çalışmışlardır. Ülkemizde 1965'ten beri yapılan çalışmalarla şu ana kadar kayda değer bir rezerv tespit çalışması yapılmamış olup ileride daha kapsamlı çalışmaların yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Franus ve ark. (2015) NTE kaynağı olarak kömür uçucu külleri adlı bir çalışma yapmışlardır. Avrupa birliğinin en büyük ikinci kömür tüketicisi konumundaki Polonya'da uçucu kül miktarının fazla oluşundan dolayı böyle bir çalışma yapılmış ve çalışma sonucunda da oldukça elverişli sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Kashiwakura ve ark. (2013) Nadir Toprak Elementlerinin Kömür Uçucu Külü Parçacıklarından Seyreltik H2SO4 Solventinde Çözünmesi konulu bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma ile kömür uçucu külünde NTE varlığı tespit edilmiş olup bunların kazanımını H2SO4 çözeltisiyle iki kademede gerçekleştirmişlerdir.

Çelik ve Karayiğit (2010) Lakustrin Seyitomer Lignitlerinin (Miyosen) Kimyasal Özellikleri ve Petrografik Bileşimi adlı bir çalışma yapmışlardır. Sahadan alınan 30 numunenin kimyasal ve petrografik

analizleri yapılmıştır. Kömür külü numunelerinin XRF ile kimyasal analizleri, kömür bazında linyit numunelerinin Cr ve özellikle Ni ve Bi, Co, Cu, Mo, Sc ve V için zengin olduğunu ve ayrıca çoğu dünya kömürü. Tüm numunelerin en bol miktarda makro grubu, metininit, ulminit ve özellikle densinitin zengin olduğu hümittir. Tüm numunelerdeki inertinit grup makerallerinden oldukça yüksek olan liptinit grubu makeralleri, esas olarak sporinit ve liptodetrinit içerdiği görülmüştür.

Karayiğit ve Gayer (2010) Afşin-Elbistan sahasında bulunan Pliyosen-Pleistosen Linyit Profilinde İz Elementleri adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma ile sahada bulunan linyitlerin kimyasal ve petrografik analizleri yapılmış olup kömür içindeki iz elementler tespit edilmeye çalışılmıştır. Endüktif olarak eşleşmiş plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS) ile belirlenen linyitteki ortalama iz element konsantrasyonları, Mo (ortalama 20 ppm), W (ortalama 15 ppm) ve U (ortalama 25 ppm) içinde nispi zenginleşme gösterir. Diğer kömürler için küresel aralıkla karşılaştırıldığında, diğerleri (NTE) global aralıkları içindedir.

Karayiğit ve Çelik (2010) Tunçbilek kömürlerinde ana ve iz element içeriklerini incelemişlerdir. Sekiz farklı numune üzerinde yapılan analizlerde potansiyel olarak tehlikeli hava kirletici olarak kabul edilen on iz element (As, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Th ve U), düşük ila orta konsantrasyonlarda bulunmuştur. Tüm örneklerde Cr ve Ni konsantrasyonları ve bazı örneklerde As, Co, Mn, Se, Th ve U konsantrasyonları, dünyadaki diğer kömürlere kıyasla göreceli zenginleşme göstermiştir.

Karayiğit (2010) Asma-Dilaver ve Gelik taşkömürü numunelerinde yaptığı mineroloji ve iz element içerikleri çalışmasında 43 adet numunenin analizi yapılmıştır. Bazı damarlardaki Cs, Mn, Rb ve Th iz elementleri hariç, temel konsantrasyonların, çoğu dünya kömürünün değer aralıkları içindedir. Bazı iz elementler (Sc, Cr, Cu, Ga, Rb, NTE'ler, Y, Cs, Hf, Ba, Ta, Nb, Th,

W, Zr, U, Zn, Pb, Bi, Tl, Be, Mo ve Co Tüm örneklerde, esas olarak mineral madde ile ilişkili olduklarını belirten kül verimi ile pozitif korelasyon göstermiştir. Kalan iz element As, Cd, Ge, Mn, Sb ve Sr'nin kül verimi ile bir ilişkisi yoktur.

Karayiğit ve Querol (2010) Şırnak asfaltitlerinin mineraloji ve mineral madde içeriğini incelemişlerdir. XRF, XRD ve ICP-MS ve TEM analizleri yapılmış ve asfaltitlerin Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Sb, Se, Tl, U, V ve Zn'ye göre zenginleştiği kanıtlanmıştır. Ayrıca, bazı örneklerdeki Bi, Dy, Er ve Gd konsantrasyonları, çoğu dünya kömürü için şu anda mevcut olan sınırları aşıyor. SEM-EDX'ten elde edilen toplu kimyasal veriler, Sf'nin sfalerit ve CdZn-sülfid'de, pentlanditte Ni ve piritlerde Ni, Cu, Zn, V ve Cr izlerinde tespit edildiğini doğrulamaktadır.

İnaner ve Karayiğit (2007) Çan kömür sahasında bulunan kömürlerde iz element varlığını incelemişlerdir. Ana element olarak silisyum, Alüminyum ve demir mineralleri tespit edilirken iz element olarak B, Sc, Sn, Th, Tl ve U tespit edilmiştir. Bulunan bu değerler Dünya ortalamasının üstünde değerlerdir.

Karayiğit ve ark. (2007) Kömür Yakıtlı Bir Santralde Ana ve İz Elementlerin Kütle Dengesi konulu bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 48 örnek üzerinde yapılan analizlerde ana elementlerin yanında iz elementler de incelenmiş olup bulunan sonuçlar Dünya ortalamasının üzerinde değerlerdedir.

Esenlik ve ark. (2006) Kömür yakıtlı Orhaneli santralinde yanma sırasındaki eleman davranışı konulu bir çalışma yapmışlardır. 51 örnek üzerinde yapılan analizlerde metaller ve NTE'ler tespit edilmiştir.

Karayiğit ve ark. (2006) Soma termik santrali uçucu küllerinin içeriğinin varyasyonlarını incelemişlerdir. Element analizinin sonuçları, B5 ünitesinin daha fazla NTE konsantrasyonlarına sahip olduğunu göstermiştir.

Vassilev ve ark. (2005) Doma termik santraline beslenen kömürden elde edilen uçucu küller ve taban küllerini incelemişlerdir. Uçucu küller inorganik madde, cam, kristobalit, mullit, Fe oksitler, kireç ve anhidrit bakımından zenginleştirilmiştir. İz elementlerin çoğu (özellikle As, Bi, Cd, Ge, Pb, Sn, Tl ve W) uçucu külllerde daha fazla bulunurken, taban külünde Ca, Cs, Fe, Ho, Mn, P, Sc'de daha zengindir.

Karayiğit (2001) Gelik, Zonguldak Akalın damarının minerolojisi ve iz element içeriği konulu bir çalışma yapmıştır. Tüm numuneler ICP-MS kullanılarak iz elementler için analiz edilmiştir. İncelenen kömür örneklerinin iz element içerikleri, Ba (31 ± 432 g/g, ortalama 130 g/g) ve Mn (52 ± 579 g/g, ortalama 129 g/g) hariç nispeten düşüktür. Bu durumun iki sebebi olabileceği sonucuna varılmıştır; birincisi, baritle ve daha sonra da numunelerdeki başlıca killerle ilgili olabilir.

Karayiğit ve ark. (2001) Ankara Çayırhan santraline beslenen kömürlerin minerolojisi ve jeokimyasını incelemiştir. 48 adet numune incelenmiş olupiz element içeriği W hariç çoğu Dünya ortalamasının üstünde bulunmuştur. As, Bi, Ge, Mo, Pb, Tl, W ve Zn gibi elementler taban külüne göre uçucu külde daha fazla bulunmuştur.

Karayiğit ve ark. (2000) Gökler kömür sahasından, Gediz, Türkiye Kömür damarlarında antimuan ve arsenik anomalileri adlı bir çalışma yapmışlardır. Orta bitümlü kömürden oluşan sahadan alınan numunelerde analizler yapılmıştır. Dünya ortalamasının içinde değerlere sahip As ve Sb zenginleşmeleri tespit edilmiştir.

Karayiğit ve ark. (2000) Türkiye'deki termik santrallere beslenen kömürlerin iz element içeriği konulu bir çalışma yapmışlardır. Bu ön çalışma, on adet kömür yakıtlı elektrik santralinden (Çayırhan, Seyitomer, Tuncbilek, Orhaneli, Soma, Yatağan, Yeniköy, Elbistan, Kangal ve Catalagzi) besleme kömürlerindeki ana ve iz element konsantrasyonlarının

belirlenmesi ve karşılaştırılmasına odaklanmaktadır. Besleme kömürlerinin çoğunun Cr, Cs, Mo, Ni, Rb, Th, U ve V'ye göre zenginleştiği kanıtlandı. Ayrıca As, Co, Cu, Ga, Mn, Li, Sc, Sn, Ta, Tl konsantrasyonları ve bazı besleme kömürlerindeki bazı nadir toprak elementleri, çoğu dünya kömürü için mevcut aralıkları aştığı tespit edilmiştir.

Karayiğit ve ark. (2000) yaptığı çevreye duyarlı iz elementlerin Sorgun kömürlerinde dağılımı konulu çalışmada ana ve iz elementlerin çoğu yüksek kül örneklerinde zenginleştirilirken, Ba, Br, Mn ve W düşük kül örneklerinde göreceli zenginleşme göstermiştir.

Karayiğit ve ark. (1999) Türkiye, Ilgın linyitinin kalite, palinoloji ve paleoekonomik yorumu alı bir çalışma yapmışlardır. Linyit, dünyadaki çoğu kömürün aralığına göre daha yüksek bir U (ortalama 43 ppm) konsantrasyon gösterirken, diğerleri (NTE) küresel aralıklar ile aynı aralıkta bulunmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Sahası

Çalışma kapsamında kullanılan numuneler Kahramanmaraş ilinde bulunan Afşin-Elbistan kömür işletmesinden temin edilmiştir.

3.1.1. Sahanın Tanımı

Kahramanmaraş ili Afşin ve Elbistan ilçeleri kuzeyindeki Afşin-Elbistan linyit havzasında ilk çalışmalar, 1936'da Önen tarafından yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında Sivas, Malatya, Kahramanmaraş ve Gaziantep illerinin civarında muhtemel linyit yatak oluşumları incelemiştir. Çalışma sonucunda Kahramanmaraş çevresinde dört farklı bölgede kömür oluşumu tespit edilmiştir (Önen, 1936). Sonrasında MTA ve Alman şirketi birlikte 1966 yılında daha ayrıntılı bir çalışma başlatmış, 1967 yılından itibaren havzada

düşük kalorili büyük bir linyit rezervi tespit edilmiştir. 1968 yılında yapılan yatırım programıyla Elbistan linyitlerinin kullanılabilmesi için bir termik santral yapılmasına karar verilmiştir. 1973'te inşaatına başlanan termik santral 344 MW'lık dört üniteden oluşmaktadır ve ilk ünite 1984'ün Temmuzunda üretime geçmiştir.

Havzada toplam 4,50 milyar ton linyit rezervi tespit edilmiştir. Ortalama 120 km2'lik ruhsat alanı; Kışlaköy (A), Çöllolar (B) ve Afşin (C) adlı üç ana sektörden ve D, E ve F alt sektörleri olarak ayrılmıştır. Havza fizibilite raporları 1969'da hazırlatılmıştır. Açık işletme derinliği bakımından Kışlaköy sektörünün kuzey kısmı daha düşüktür. Geri kalan sektörlerde de santral kurulabileceği ihtimalinden hareketle kazılar öncelikli olarak Kışlaköy sektöründe başlatılmıştır. Havzada kuzey doğu kesiminde bulunan Kışlaköy açık işletmesinde, Bager diye adlandırılan altı adet döner kepçeli kazıcı, 55 km uzunluğa sahip bant taşıyıcı sistemi ve beş adet dökücü ile donatılmış, ortalama 55 milyon m3/yıl örtü kazı ve 20 milyon ton/yıl linyit üretilebilecek şekilde tasarlanmıştır (Yörükoğlu, 1991).

3.1.2. Sahanın Genel Jeolojisi

Havza Alp Orojenezinin sonunda Toros Dağları yükselirken oluşan kapalı bir basendir. Bölge tabanında Permo-Karbonifer yaşa sahip kireçtaşları mevcuttur. Kışlaköy sahası Kuzeydoğu–Doğu'sunda bulunan Kızıldağda ise Üst Kretase yaşa sahip grimsi ve beyaz renklerdeki kireçtaşları yüzeylenmiştir (Gökmen ve ark., 1993).

Kızıldağ'ın güneyinde Neojen formasyonlar mostra vermiş olup geri kalan yerlerde Kuvaterner yaşlı çökeller tarafından örtülmüştür. Genel olarak kalınlık 300-400 m'dir. Neojen formasyonları alttan üste doğru şöyle sıralanmaktadır;

- Kırmızı, kahverengi iri taneli klastik çökeller,
- Kızıl kahverengi, kumlu, marnlı sedimentler,
- Yeşilimsi, mavimsi-plastik kömür altı kil ve marnları,
- Kömür,
- Gidya,
- Yeşilimsi, mavimsi, plastik kömür üstü kil ve marnları.

Gidya bu formasyonlarda oldukça büyük önem taşımaktadır. Göl oluşumu Pliosen'de Torosların yükselmesi ve havzanın çökmesiyle olmuştur. Bol gastrapot fosilleri, bitki kalıntıları ve humuslu oluşları ile ayırt edilen Gidya formasyonu, gölde büyük bir kısma çökelmiş kömür ile ara tabakalanmalardır. Üst tarafa gidildikçe kömürlü gidya, humuslu gidya, killi ve kalkerli gidya şeklinde son bulmaktadır. Bunun üzerinde kömür üstü kil ve marnlar gelmektedir. Kalınlık 40-50 m'ye ulaşabilmektedir. Eğim 5° ile 10° arasında güneydoğuya doğrudur. Bu kalınlık sahada Kuzey ve Kuzeydoğuya doğru incelerek kaybolmaktadır (Yörükoğlu, 1991).

Pliyosende oluşmuş olan düşük kaliteli linyit, gidyanın alt kısmından başlayarak 10-80 m kalınlığına ulaşmaktadır. Havzada kömür kalınlığı kuzeyden güneye ve doğudan batıya gittikçe artma eğilimindedir. Faylı yapı özellikle Kışlaköy sahası doğu kısmında görülmektedir. Kuvaterner, Neojen çökellerin üzerlerini tamamıyla örtmüştür. Kalınlık 15-40 m arasında değişebilmektedir. Kırmızı, kahverengi, kil, lehm, çakıl, kum, yamaç molozu, eski dere yatakları çökelleri ve tatlı su kalker horizonları şeklinde bulunmaktadır. Eski dere yatakları çökelleri Ca-CO3'ün tabii çimento haline dönüşmesiyle sertleşmiş, konglomera ve kumtaşı haline dönüşmüşlerdir (Yörükoğlu, 1991).

Çalışma sahasında Pliyosen - Pliyostesen yaşlı gölsel çökellerle Kuvaterner yaşlı akarsu ve yamaç molozu ürünü olan litolojik birimler yer

almaktadır. inceleme alanındaki Neojen birimleri alttan üste doğru; kırmızı kahve renkli killi–kumlu–çakıllı birim, turkuaz renkli taban kili, linyit horizonu, gri gidya, bej gidya ve kireçtaşlarıdır. Kuvaterner yaşlı birimler; çalışma sahasının batısında akarsu çökeli doğusunda ise çoğunlukla yamaç molozu çökelleri şeklinde yer almaktadır.

3.2. Metod

Açılan BA-33-1 ve BA-33-2 kuyularından Lehim, Alüvyon, Siyah kil, mavi kil, taban kili, bej gidya, gri gidya, kömür numuneleri ve 4 adet uçucu kül olmak üzere 20 numune alınmıştır. Alınan numuneler üzerinde kömüre uygulanan kısa analizler dışında ICP-MS ile nadir toprak elementi miktarlarının tespiti yapılmıştır.

Afşin-Elbistan bölgesinden alınan numunelerin kimyasal içeriklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D3174'e göre kül elde edilmiş ve daha sonra bu küllerden XRF analiz yöntemiyle kimyasal içerikleri belirlenmiştir.
Afşin-Elbistan bölgesinden alınan numunelerin kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon özellikleri ile kükürt ve kalori değerleri belirlenerek kısa analiz, kükürt analizi ve alt ısıl değer analiz sonuçları bulunmuştur.

Analiz sonuçlarına göre nadir toprak elementi içeren birimler Seredin ve Dai tarafından geliştirilen katsayıya göre değerlendirilmiş olup potansiyel NTE kaynağı olup olmadığı değerlendirilmiştir (Seredin ve Dai, 2012). Formül eşitlik 1'de verilmiştir.

$$C_{outl} = (Nd+Eu+Tb+Dy+Er+Y/\Sigma REY)/(Ce+Ho+Tm+Yb+Lu)/\Sigma REY) \quad (1)$$

Burada, C_{outl} katsayısı ne kadar yüksekse, potansiyel endüstriyel değer açısından NTE kaynağı o kadar umut verici kabul edilmektedir. I kesin bir

kaynak, II umut verici bir kaynak ve III endüstriyel gelişme için oldukça umut verici bir hammadde kaynağıdır (Seredin ve Dai (2012)).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Kömür numuneleri üzerinde Kısa Analiz, Kükürt Analizi ve Alt Isıl Değer Analizi yapılarak sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Afşin-Elbistan numunelerinin kısa analiz, kükürt analizi ve alt ısıl değer analizi sonuçları

Analiz (adb) (havada kuru)	Sonuç
Sabit karbon (ağırlıkça %)	23,98
Kül (ağırlıkça %)	28,60
Uçucu madde (ağırlıkça %)	41,92
Nem (ağırlıkça %)	5,50
Kükürt (ağırlıkça %)	3,456
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3593

Alınan numuneler üzerinde XRF yöntemi ile majör kimyasal içerik belirleme analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Afşin-Elbistan numunelerinin XRF sonucu*

NO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	SO_3	$V2O_5$	MnO	Fe_2O_3
1	22	51	2,63	4	1,73	0	0,091	0,28	17,2
2	7	20	0,24	63,7	0,67	0,3	0,03	0,12	5,74
3	18	46	2,48	4,45	1,37	15	0,088	0,052	12,5
4	8,6	22,8	0,28	59,1	0,81	0,7	0,063	0,072	5,34
5	8,9	28,3	1,2	49,7	0,81	2,1	0,04	0,15	6,63
6				98,46		0,86			0,19
7	4			91,74	0,16	1,8		0,03	2,12
8	3,98	8,88	0	72,32	0,41	7,74	0	0,038	3,7
9	4,72	9,71	0	61,13	0,48	15,6	0	0,066	4,69
10	13,4	34,2	1,38	17,3	1,4	16,6		0,048	14,34
11	12,8	31,3	1,028	17	1,198	16,8		0,051	14,5
12	7,85	17,2	0,22	39,6	0,851	21,5		0,094	10,69
13	8,14	20,1	0,69	16,6	0,878	22,7		0,095	24,45
14	7,62	17,1	0,086	50,74	0,639	15,7		0,037	4,93
15	8,34	23,2	0,86	27	1,55	17,6		0,087	18,4
16	7,82	17	0,55	22,5	0,646	30,6		0,067	16,96
17	7,82	14,22	0,54	20,18	0,73	28,28	0,25	0,06	27,92

* Analiz sonuçları yüzde (%) birimindedir.

ICP-MS ile yapılan analizler sonucunda NTE miktarları tespit edilmiş olup sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. NTE içerikleri

	Element (ppb)																
No	**Ce**	**Dy**	**Er**	**Eu**	**Gd**	**Ho**	**La**	**Lu**	**Nd**	**Pr**	**Sm**	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**Y**	**Yb**
1	400,68	4,47	12,89	0,54	14,87	3,17	71,66	1,86	66,28	30,00	14,15	0,12	36,31	1,12	32,63	69,21	9,46
2	362,16	3,73	14,64	12,22	15,51	1,38	54,07	1,35	54,82	30,57	20,88	0,50	31,33	0,90	56,20	55,67	6,04
3	414,03	2,92	14,31	3,95	14,35	2,14	71,13	1,09	58,75	35,01	9,03	0,26	29,92	0,96	83,54	34,77	6,76
4	480,76	17,66	17,60	1,01	24,52	5,29	103,86	2,89	91,59	43,23	21,58	2,47	37,98	2,29	62,82	148,09	17,48
5	842,59	19,16	14,22	4,18	36,18	4,95	233,48	1,95	211,83	77,80	40,38	4,10	73,60	1,53	52,92	87,81	11,61
6	26,69	0,00	0,00	0,00	1,13	0,37	9,76	0,00	1,92	3,11	0,33	0,00	0,00	0,00	28,75	5,50	0,21
7	604,96	0,66	10,56	2,02	15,89	2,65	102,11	1,92	74,00	54,07	14,36	0,05	27,90	1,22	47,83	62,54	9,37
8	247,07	15,68	11,93	4,74	20,69	4,03	130,05	1,54	119,47	28,02	45,81	21,88	3,58	61,91	1,54	109,11	87,82
9	244,89	15,30	11,23	5,08	19,65	3,66	119,26	1,36	121,89	26,23	59,02	20,01	3,32	40,33	1,71	223,45	92,54
10	777,58	58,35	33,99	17,28	68,10	10,98	415,70	5,31	375,57	97,91	244,28	69,37	10,28	136,55	4,64	200,68	327,36
11	538,88	36,59	23,39	11,34	42,74	7,74	276,39	3,25	249,05	61,06	146,35	48,24	6,62	99,28	3,31	159,62	204,28
12	475,51	34,82	22,16	9,99	42,23	7,04	241,29	2,76	223,62	59,15	134,64	44,66	5,96	83,17	2,95	201,42	191,93
13	480,08	40,87	26,08	9,50	42,92	7,89	258,54	3,82	236,34	56,70	168,81	41,35	5,94	102,03	4,05	244,43	238,85
14	495,35	30,73	89,84	8,80	33,70	5,42	210,64	2,17	200,79	47,72	90,97	37,10	4,91	73,45	2,21	292,48	117,54
15	519,86	36,51	24,91	11,08	47,34	7,55	272,83	3,88	240,92	62,97	166,05	46,51	6,17	97,78	3,33	419,51	188,57
16	526,07	29,48	17,03	9,60	37,01	5,46	264,03	2,57	194,76	58,90	137,47	38,47	5,05	92,04	2,25	537,72	139,59
17	526,08	35,00	79,28	8,97	43,02	7,11	255,58	3,98	208,11	61,06	118,63	44,14	6,57	94,92	3,47	261,68	167,85

Numunelerin C_{outl} değerleri hesaplanmış olup sonuçlar Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Numunelere ait C_{outl} değerleri

Numune No	**Toplam NTE Miktarı (ppb)**	**C_{outl} katsayısı**
1	700,49	0,37
2	634,47	0,38
3	669,44	0,27
4	980,32	0,55
5	1591,77	0,40
6	49,03	0,27
7	956,39	0,24
8	1588,52	0,70
9	754,38	1,04
10	753,39	0,60
11	2548,21	0,62
12	1681,50	0,71
13	1517,15	0,72
14	1647,25	0,95
15	1392,51	0,95
16	1660,40	1,08
17	1483,79	0,80

5. SONUÇ VE TARIŞMA

Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde Afşin-Elbistan kömür sahasında kömür ve kömürle beraber kazılan diğer tabakalar içinde NTE varlığı tespit edilmiş ve bu değerlerin dünya ortalamalarının üzerinde değerlerde olduğu görülmüştür. Yapılan deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki değerlere ulaşılmıştır.

- Yıllık 20 milyon ton kazı göz önüne alındığında oldukça yüksek bir üretim miktarlarının olduğu görülmüştür.

- Bulunan NTE değerlerinin dünya ortalamalarının üzerinde olduğu ve özellikle taban killerinde birikim miktarının daha fazla olduğu görülmüştür.
- Ekonomik olarak değerlendirilebilmesi konusunda bu elementlerin ayrılması çalışmalarının yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Hâlihazırda kazılmış malzemenin içindeki NTE'lerin değerlendirilmesi ekstra bir kazı maliyeti oluşturmayacağından daha ekonomik bir sonuç alınmasına neden olacaktır.
- yapılan analizler sonucunda 1, 2, 3, 6, ve 7 numaralı numuneler I. Grupta yer alırken diğer numuneler III. Grupta yer almıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma için maddi destek sağlayan Çukurova Üniversitesi, Bilimsel Araştırma projeleri Destekleme Fonu' na (FBA-2019-12148) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Abaka-Wood, G., Zanın, M., Addaı-Mensah, J., Skınner, W., 2019. Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide–silicate rich tailings – Part 1: Magnetic separation. Minerals Engineering, 50-61.

Bıelowıcz, B., Botor, D., Mısıak, J., Wagner, M., 2018. Critical Elements in Fly Ash from the Combustion of Bituminous Coal in Major Polish Power Plants. E3S Web of Conferences 35, 1-8.

Celık, Y., Karayığıt, A.I., 2010. Chemical Properties and Petrographic Composition of the Lacustrine Seyitomer Lignites (Miocene), Kutahya, Turkey. Energy Sources, 26:4, 339-352. Copolymer. Journal of Minerals Engineering, 81-88.

Esenlik, S., Karayığıt, A.I., Bulut, Y., Querol, X., Alastuey, A., Font, O., 2006. Element behaviour during combustion in coal-fired Orhaneli power plant, Bursa-Turkey. Geologica Acta, Vol.4, Nº 4, 2006, 439-449.

Franus, W., Malgorzata, M., Motyka, W., Wdowin, M., 2015. Coal Fly Ash As A Resource For Rare Earth Elements. Environmental Science and Pollution Research, 1-11.

Inaner, H., Karayığıt, A.I., 2008. Concentration of Major and Trace Elements in the Miocene Lignite from the Çanakkale-Çan Coalfield. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 30:4, 289-296.

Karayığıt, A.I., 2001. Mineralogy and Trace Element Contents of the Akalin Seam, Gelik Mine, Zonguldak-Turkey. Energy Sources, 23:8, 699-709.

Karayığıt, A.I., 2010. Mineralogy and Trace Element Contents of the Upper Carboniferous Coals from the Asma-Dilaver and Gelik Mines in Zonguldak, Turkey. The Journal of Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 25:7, 689-702.

Karayığıt, A.I., Akgün, F., Gayer, R.A., Temel, A., 1999. Quality, palynology, and palaeoenvironmental interpretation of the Ilgin lignite, Turkey. International Journal of Coal Geology 38 1999 219–236.

Karayığıt, A.I., Bulut, Y., Querol, X., Alastuey, A., Vassılev, S., 2006. Variations in Fly Ash Composition from the Soma Power Plant, Turkey. The Journal of Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy., 27:15, 1473-1481.

Karayığıt, A.I., Bulut, Y., Querol, X., Alastuey, A., Vassılev, V.S., Vassıleva, C.G., 2007. Mass Balance of Major and Trace Elements in a Coal-Fired Power Plant. Energy Sources, Part A, 28:14, 1311-1320.

Karayığıt, A.I., Gayer, R.A., 2010. Trace Elements in a Pliocene-Pleistocene Lignite Profile from the Afsin-Elbistan Field, Eastern Turkey. The Journal of Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 22:1, 13-21.

Karayığıt, A.I., Gayer, R.A., Querol, X., Onacak, T., 2000. Contents of major and trace elements in feed coals from Turkish coal-fired power plants. International Journal of Coal Geology 44 2000 169–184.

Karayığıt, A.I., Onacak, T., Gayer, R.A., Goldsmıth, S., 2001. Minerology and Geochemistry of Feed Coals and their Combustion Residues from the Cayirhan Power Plant, Ankara, Turkey. Applied Geochemistry 16 (2001) 911-919.

Karayığıt, A.I., Querol, X., 2010. Mineralogy and Elemental Contents of the Sirnak Asphaltite, Southeast Turkey. Energy Sources, 24:8, 703-713.

Karayığıt, A.I., Spears, D.A., Booth, C.A., 2000. Antimony and arsenic anomalies in the coal seams from the Gokler coalfield, Gediz, Turkey. International Journal of Coal Geology 44 2000 1–17.

Karayığıt, A.I., Spears, D.A., Booth, C.A., 2000. Distribution of environmental sensitive traceelements in the Eocene Sorgun coals, Turkey. International Journal of Coal Geology 42 2000 297–314.

Kashıwakura, S., Kumagaı, Y., Kubo, H., Wagatsuma, K., 2013. Dissolution of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash Particles in a Dilute H2SO4 Solvent. Open Journal of Physical Chemistry, 2013, 3, 69-75.

Kurşun, İ., Özdemir, O., Tombal, T.D., Terzi, M., Hacıfazlıoğlu, H., 2017. Bastnazit Kompleks Cevherinden (Eskişehir, Türkiye) Bazı Nadir Toprak Elementlerinin (Ce, Nd, La) Asit Liçi ile Çözünürlüklerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(1), ss. 207-214.

Mondal, S., Ghar, A., Satpati, A.K., Sınharoy, P., Sıngh, D.K., Sharma, J.N., Sreenıvas, T., Kaın, V., 2019. Recovery of rare earth elements from coal fly ash using TEHDGA impregnated resin. Journal of Hydrometallurgy, 93-101.

Qian, Y., Qın X., Peng, Y., 2019. Mitigating the coating of fine quartz in fluorite flotation using a triblock.

Seredin, V.V., Dai, S., 2012. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. Int. J. Coal Geol. 94, 67–93.

Smıth, R., Taggart, R.K., Hower, J.C., Wıesner, M.R., Hsu-Kım, H., 2019. Selective Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash Leachates Using Liquid Membrane Processes. Environmental Science & Technology, 4490-4499.

Şahiner, M., Akgök, Y.Z., Arslan, M., Ergin, M.H., 2017. Dünyada Ve Türkiye'de Nadir Toprak Elementleri (Nte). MTA, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı Yayını.

Thompson, R.L., Bank, T., Montross, S., Roth, E., Howard, B., Verba, C., Granite, E., 2018. Analysis of rare earth elements in coal fly ash using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry and scanning electron microscopy. Spectrochimica Acta Part B, 1-11.

Vassılev, V.S., Vassıleva, C.G., Karayiğit, A.I., Bulut, Y., Alastuey, A., Querol, X., 2005. Phase–mineral and chemical composition of composite samples from feed coals, bottom ashes and fly ashes at the Soma power station, Turkey. International Journal of Coal Geology 61 (2005) 35– 63.

Wang, Z., Dai, S., Zou, J., French, D., Graham, I. T., 2019. Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction. International Journal of Coal Geology, 1-14.

Yang, X., Werner, J., Honaker, R. Q., 2019. Leaching of rare Earth elements from an Illinois basin coal source. Journal of Rare Earths, 312-321.

REDÜKTÖRLER: YENİLİKLER, VERİMLİLİK VE MADEN ENDÜSTRİSİNDE UYGULAMALAR

GEARBOXES: INOVATION, EFFICIENCY AND APPLICATIONS FOR MINING INDUSTRY

Mustafa Şenyel
Flender, Adana

ÖZ: Redüktörler, mekanik sistemlerde güç aktarımı ve hız kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan kritik bileşenlerdir. Optimum boyutlandırma, enerji tasarrufu, yeni tasarım dişli formları ve gelişmiş soğutma sistemleri gibi yenilikler, redüktörlerin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmada önemli rol oynamaktadır. Bu özelliklerin yanında redüktörler, maden endüstrisi proseslerinin doğası gereği uygulanan yüksek radyal ve eksenel kuvvetlere, maden ocaklarındaki patlamalar kaynaklı titreşimlere, ortam koşullarındaki ani basınç değişimlerine ve korozif kimyasallara dayanım göstermelidir. Tüm bunların yanında uzun ömürlü olmaları ve plansız duruşlara/arızalara neden olmadan makinelerin kesintisiz bir şekilde çalışmasını sağlamaları başlıca beklenen temel özelliklerdir. Bu bildiri, redüktörlerin temel işlevlerini, yapılan yenilikleri ve sürdürülebilirlik açısından sağladıkları avantajları ve maden endüstrisindeki belirli proseslerdeki uygulamaları incelemektedir.

Anahtar Kelimeler: Redüktör, Güç Aktarımı, Enerji Verimliliği, Maden

ABSTRACT: *Gearboxes are critical components used in mechanical systems to enable power transmission and speed control. Innovations such as optimal sizing, energy savings, new gear design forms, and advanced cooling systems play a significant role in enhancing the efficiency and sustainability of gearboxes. In addition to these features, gearboxes must withstand high radial and axial forces inherent in mining industry processes, vibrations caused by explosions in mines, sudden pressure changes in environmental conditions, and exposure to corrosive chemicals. Furthermore, they are expected to be long-lasting and ensure uninterrupted machine operation without causing unplanned downtimes or failures. This paper examines the fundamental functions of gearboxes, recent innovations, their advantages in terms of sustainability, and their applications in specific processes within the mining industry.*

Keywords: *Gearbox, Power Transmission, Energy Efficiency, Mining*

1. GİRİŞ

Redüktörler, mekanik sistemlerde dönen bir güç kaynağından (örneğin bir motor) gelen torku ve hızı düzenleyerek güç aktarımı sağlayan dişli kutularıdır. Bu bileşenler, yüksek hızdaki giriş torkunu düşük hızda ve yüksek torklu bir çıkışa dönüştürerek çeşitli endüstriyel uygulamalarda birçok fonksiyonun (döndürme, kaldırma vb.) yerine getirilmesine olanak sağlar. Bu endüstriyel uygulamalar çimento fabrikaları başta olmak üzere kâğıt, ambalaj, kimya vb. birçok farklı sektörde görülmekte ve günlük hayatımızın bir parçası olan birçok ürünün üretim süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır.

1.1. Redüktörlerde Yapılan Yenilikler ve Verimlilik Artışları

Optimum Boyutlandırma ile Hammadde Tüketiminin Azaltılması: Yeni tasarım anlayışı ile redüktörlerin boyutları optimize edilerek hammadde tüketimi azaltılmıştır. Bu sayede, nikel gibi metallerin daha az kullanımı ile maliyetler düşürülmüş ve çevresel etkiler minimize edilmiştir. Ek olarak solvent bazlı kimyasalların kullanımı azaltılarak bu malzemeler yerine doğa dostu alternatif ürünler tercih edilmiş ve çevreye olan negatif etki minimuma indirilmiştir.

Daha Az Güç Kaybı: Redüktörlerde yapılan iyileştirmeler sonucunda %20 daha az güç kaybı sağlanmıştır. Bu durum, enerji verimliliğini artırarak işletme maliyetlerini düşürmektedir ve uzun vade de ürünleri kullanan işletmelerin amortisman sürelerine ciddi katkıda bulunmaktadır.

Yeni Tasarım Dişli Formları ile Verimlilik Artışı: Yenilikçi dişli formları, güç aktarımı sırasında daha az dirençle karşılaşarak verimliliği artırır. Bu sayede, enerji tasarrufu sağlanır ve redüktör performansı yükseltilir.

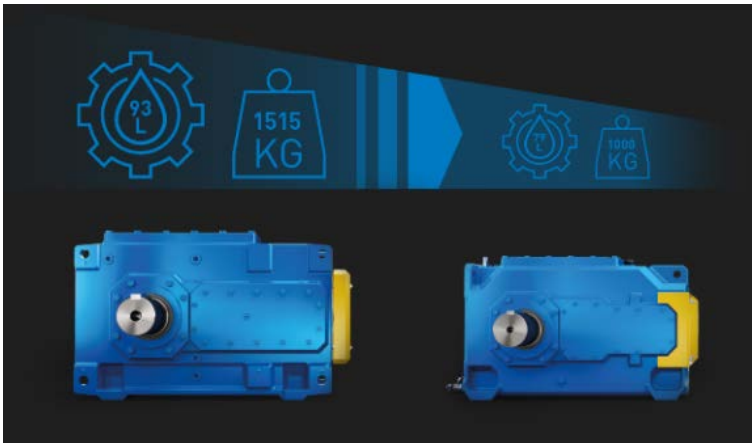
Şekil 1. Redüktörü meydana getiren parçalardan bir görünüm

Güçlendirilmiş Giriş Kademesi ve Termal Kapasite Artışı: Güçlendirilmiş giriş kademesi ve %30 oranında artırılmış termal kapasite, redüktörlerin daha yüksek yüklerde ve zorlu çalışma koşullarında performansını artırır. Genişletilmiş yüzey alanı ve buna bağlı olarak artan termal kapasite sayesinde önceki nesillerde fan ile soğutma gereken bir redüktörde aynı motor gücü, devir ve tork değerlerini sağlamak koşuluyla hiçbir ek soğutmaya ihtiyaç duyulmadan redüktörün operasyonu sağlanabilmektedir.

Artırılmış Rulman Ömrü: Yeni tasarımlar ve malzeme seçimleri ile rulman ömrü artırılmıştır. Bu durum, bakım maliyetlerini düşürür ve sistemin güvenilirliğini artırır.

Alternatif Soğutma Seçeneği: Güç aktarım sektörüne yeni bir bakış açısı getiren ve sadece soğutma ihtiyacı duyulan durumlarda devreye giren E-Fan

teknolojisi sayesinde işletmelerin enerji verimliliğine katkı sunarak maliyetlerini düşürür.



Şekil 2. Eski ve yeni redüktörün ağırlık ve operasyon esnasında kullanılan yağ miktarının karşılaştırılması

1.1.1. *Yeni nesil AIQ teknolojisi ve sağladığı faydalar*

AIQ sensör, yapay zekâ destekli ileri teknoloji özellikleriyle donatılmış, endüstriyel uygulamalar için özel olarak tasarlanmış bir analiz ve ölçüm cihazıdır. Bu sensör, redüktörlerin performansını izlemek ve plansız duruşları önlemek amacıyla geniş bir yelpazede veri toplama ve analiz yapabilme yeteneklerine sahiptir. AIQ sensörün başlıca özellikleri şunlardır:

Yapay Zeka Destekli Analiz: AIQ sensör, yapay zeka algoritmaları kullanarak redüktörlerin durumunu analiz eder ve potansiyel sorunları önceden tespit ederek plansız duruşları önler.

Redüktör Durum Analizi: Sensör, redüktörlerin çalışma süresi boyunca performansını sürekli olarak izler ve durum analizi yapar.

Tork İzleme: AIQ sensör, redüktörlerin tork değerlerini hassas bir şekilde ölçer ve izler. Redüktörün giriş ve çıkış tork değerlerini anlık olarak kullanıcı ile paylaşır.

Titreşim ve Hız Ölçümü: Titreşim ve hız verilerini toplayarak, redüktörlerin mekanik sağlığını değerlendirir. Değerlerde herhangi bir problem varsa alarm fonksiyonu sayesinde kullanıcısına bilgi verir.

Aşınma (Kaplin) Ölçümü: Elastik kaplinlerin lastik aşınma seviyelerini izleyerek, bakım ihtiyaçlarını belirler ve kullanıcının tüm senaryolara önceden hazır olmasına olanak sağlar.

Şekil 3. Farklı ürünlere göre tasarlanmış AIQ sensörler

Yağ Sıcaklığı ve Yağ Ömrü Ölçümü: Yağ sıcaklığını ve ömrünü izleyerek, yağ değişim zamanlarını optimize eder.

Redüktör Çalışma Süresi: Redüktörlerin toplam çalışma süresini kaydederek, performans değerlendirmesi yapar.

Redüktör Değerlerine Erişim: Kullanıcılar, anlık ve geçmiş redüktör performans verilerine kolayca erişim sağlar.

Özel Alarm Noktaları: Belirlenen kritik değerler aşıldığında özel alarm uyarıları vererek, kullanıcıları bilgilendirir.

Aşırı Yüke Karşı Koruma: Redüktörlerin aşırı yüklenmesini önleyerek, uzun ömürlü ve güvenli bir çalışma sağlar. AIQ sensör, endüstriyel süreçlerin güvenilirliğini artırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak amacıyla, redüktörlerin performansını proaktif olarak izler ve optimize eder.

Bu sayede hem kullanıcıların verimliliği artar hem de işletme operasyonlarının durmasına neden olacak plansız duruşların önüne geçilir.

2. FLENDER REDÜKTÖRLERİN MADEN ENDÜSTRİSİNDE KULLANIM ALANLARI

Maden endüstrisi gerek zorlu çalışma koşulları gerekse üretim proseslerinin kompleksliği bakımından birçok endüstriyel ekipmanın kullanılmasını gerektiren bir sektördür. Kullanılan tüm ekipmanların kaliteli ve uzun ömürlü olması ve plansız duruşlara/arızalara neden olmaması işletmeler açısından büyük önem arz etmektedir. Madenciliğin doğası gereği, ekipmanların yüksek radyal ve eksenel kuvvetlere, maden ocaklarındaki patlamalar kaynaklı titreşimlere, ortam koşullarındaki ani basınç değişimlerine, korozif derecesi yüksek çeşitli kimyasallara ve yüksek sıcaklıklara dayanım göstermesi beklenmektedir.

Şekil 4. Maden ocağındaki bir konveyör bant tahriğinde kullanılan Flender redüktör

Diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında, genel olarak madenler yapısı gereği üst seviyede akma ve çekme mukavemetleri sergileyen rijit yapılardır.

Bu özellikleri, madenlerin işlenebilmesi için kullanılan proseslerde yüksek güç ve tork ihtiyacı ortaya çıkarmakla beraber beklenmedik ani yük değişimlerine dayanıklı ekipmanların kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Özellikle kırma ve öğütme proseslerinde kullanılan değirmenlerdeki yüksek tonaj ve değirmenin dönüş hareketine bağlı ortaya çıkan radyal kuvvetler bu konudaki en iyi örneklerden biridir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, redüktörlerdeki yenilikler, verimlilik artışları ve maden endüstrisindeki uygulamaları üzerine bilgiler paylaşılmaktadır.

AIQ sensör teknolojisi, yapay zekâ destekli analizlerle redüktörlerin performansını sürekli izleyerek plansız duruşları önlemekte ve bakım maliyetlerini düşürmektedir. Bu yenilikler, redüktörlerin daha sürdürülebilir ve uzun ömürlü olarak işletilmesine olanak sağlayarak endüstriyel tesislere ekonomik olarak ciddi katkılar sunmaktadır.

Sonuç olarak, redüktörlerdeki bu teknolojik gelişmeler, endüstriyel süreçlerde verimlilik ve güvenilirliğin artmasına katkıda bulunmakta, maden işletmelerine ve çevreye önemli faydalar sağlamaktadır. Bu yeniliklerin gelecekte de devam etmesi ve süreçlerin her geçen yıl daha verimli hale gelmesi beklenmektedir.

BOKSİT DIŞI KAYNAKLARDAN ALÜMİNA KAZANIMI

EXTRACTION OF ALUMINA FROM NON-BAUXITE SOURCES

Muhammed Kürşat Aydemir, Ramazan Aydoğmuş, Mücevher Turan, Bahaa Alyosif, Kader Şentürk
İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Malatya

Emine Mete, Esra Porgalı Tüzer
İnönü Üniversitesi Kimya Bölümü, Malatya

Thierno Saidou Barry
Quebec Hükümeti Çevre Bakanlığı Quebec City Kanada

Mehmet Fatih Taşıtlı, Serkan Yumuşak
İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Malatya

Ayşe Nur Yapıcı
İnönü Üniversitesi Kimya Bölümü, Malatya

Gökçe Tumbuloğlu, Kemal Demir, Tufan Kıyak
İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Malatya

Turan Uysal
Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane

Mehmet Deniz Turan
Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ

Sema Erdemoğlu
İnönü Üniversitesi Kimya Bölümü, Malatya

Mustafa Birinci, Hikmet Sis, Murat Erdemoğlu
İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Malatya

ÖZ: Bayer süreciyle boksitten alümina üretimi uzun yıllardır bilinmekte ve endüstriyel olarak başarıyla uygulanmaktadır. Öte yandan, Bayer sürecine uygun olmayan boksitlerin yanında, kaolinitik killer, nefelinli siyenit, kömür yakma tesisi uçucu ve taban külleri, çeşitli feldspatlar ve Türkiye'de dikkate değer miktarda rezerve sahip olan pomza gibi boksit dışı kaynaklardan da

alümina kazanımı konusunda yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu cevherlerdeki alüminyum silikat minerallerinin yapısı kavurma ya da aşırı öğütme yoluyla aktifleştirilerek asidik liç koşullarında daha verimli çözünmeleri sağlanmaktadır. Bu bildiride, boksit dışı kaynaklardan alümina kazanımında cevherlerin termal ve mekanik aktivasyonu, asidik liç ve yüklü liç çözeltilerinin saflaştırılması koşulları hakkında yapılmış çalışmalardan elde edilmiş sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alümina, Boksit Dışı Kaynaklar, Asit Liçi, Aktivasyon

ABSTRACT: *The alumina production from bauxite by the Bayer process has been known for many years and it is successfully applied industrially. Instead, besides the bauxites that are not suitable for the Bayer process, intensive research is being carried out on alumina production from non-bauxites such as kaolinitic clays, nepheline syenite, fly and bottom ashes from coal combustion plants, various feldspars, and pumice which has considerable reserves in Türkiye. The structure of aluminum silicate minerals in these ores is activated by roasting or intensive milling to provide more efficient dissolution under acidic leaching conditions. In this paper, the results obtained from studies on thermal and mechanical activation of ores, acidic leaching and purification conditions of pregnant leach solutions for the alumina extraction from non-bauxite sources are presented.*

Keywords: *Alumina, Non-bauxite Sources, Acidic Leaching, Activation*

1. GİRİŞ

Alümina ve alüminyum üretiminde uzun süredir kullanılan Bayer prosesi yalnızca boksit cevherlerinin işlenmesine uygun bir yöntemdir. Ancak, boksit rezervlerinin yetersiz olduğu veya bulunmadığı ülkelerde alümina ve alüminyum ihtiyacı çoğunlukla ithalatla karşılanmaktadır. Ayrıca, Bayer prosesi sonucunda oluşan "kırmızı çamurun" depolanma zorunluluğu ve çevreye etkileri, boksit dışı kaynaklardan alümina üretimi arayışlarını hızlandırmaktadır (Habashi, 1997).

Dünya boksit rezervleri ile alüminyum üretiminde önde gelen ülkeler arasında dikkat çekici bir fark vardır; alüminyum üreticisi ülkelerin çoğu, boksit rezervleri bakımından alt sıralarda yer almaktadır (Girgin, 1984). Kanada, boksit rezervine sahip olmamasına rağmen, tamamen ithal cevherlere dayalı alüminyum üretmektedir. Bununla birlikte, Kanada'da bir şirket asit liçi yöntemiyle günlük 1 ton yüksek saflıkta alümina ürettiğini bildirmiştir (Erdemoğlu vd. 2018).

Boksit dışı kaynaklardan alümina üretimi genellikle iki yöntemle gerçekleştirilmektedir. Birincisi, termal veya mekanik aktivasyonun ardından uygulanan asit liçi yöntemidir. İkincisi ise, kireç veya soda-kireç karışımıyla sinterleme yapılarak su veya alkali liç uygulanmasıdır (Erdemoğlu vd. 2018; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022). Sinterleme yönteminde, toz halindeki malzeme kireç veya soda ile reaksiyona girerek çözünür kalsiyum alüminat ve çözünmeyen dikalsiyum silikat bileşikleri oluşturur. Bu sinterlenmiş bileşikler, su veya alkali (Na_2CO_3 ve NaOH) liçi ile işlenerek alüminyum içeriği yüksek bir çözelti elde edilir. Ancak süreç sırasında yoğun kalsiyum silikat atıkları oluşur. Alüminyum çözeltisi saflaştırılıp kristallendirilerek, uygun sıcaklıkta kalsinasyonla alümina üretimi tamamlanır (Yao vd. 2014).

Boksit dışı kaynaklardan alümina kazanımı, Bayer Prosesiyle karşılaştırıldığında ekonomik zorluklar içermektedir. Bunun temel sebebi, boksitin alümina içeriğinin %50 civarında olmasına karşın, kil minerallerinin yaklaşık %20-30 seviyesinde alümina içermesidir. Ayrıca Bayer sürecinde elde edilen alüminyum hidroksitin işlenmesi, asit liçiyle elde edilen alüminyum klorürün işlenmesine göre daha kolaydır. Alkali liç süreçleri, asidik liçte ortaya çıkan korozyon sorunlarını da ortadan kaldırmaktadır (Habashi, 2017).

Boksit dışı kaynaklardan alümina kazanımı konusundaki literatür çalışmaları incelendiğinde kaolinit ve pirofillit içeren killer (Flint vd. 1946; Cohen ve Mercier, 1976; Bengtson, 1979; Sawyer vd. 1983), nefelinli siyenit (Arlyuk vd. 1992), kömür uçucu külleri (Matjie vd., 2005; Shemi vd., 2012; Shemi vd., 2014), çeşitli feldspatlar ve pomza (Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022) öne çıkmaktadır. Boksit dışı kaynaklardan alümina kazanımı konusundaki bazı çalışmalar Çizelge 1'de özetlenmektedir.

2. BOKSİT DIŞI KAYNAKLARDAN ALÜMİNA KAZANIMI

Kaolinit ve pirofillit içeren killerden, pomza ve K-feldspat cevherlerinden özelliklerine bağlı olarak başlıca aktivasyon, asit liçi, çözelti saflaştırma ve kavurma işlemleri uygulanarak alümina kazanımı sağlanmaktadır (Erdemoğlu vd., 2018; Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022).

Pirofillit cevherinden alümina kazanımında, termal ve mekanik aktivasyon yöntemleriyle aktive edilen cevher liç edilmiştir. Mekanik aktivasyonla en yüksek alüminyum kazanımı elde edilmiştir (Uysal, 2018; Uysal vd., 2019). Ayrıca flotasyon ve aşındırmalı yıkama yöntemleriyle zenginleştirilen cevher HCl ile liç edilerek alüminyum kazanımları karşılaştırılmıştır (Aydoğmuş, 2019; Aydoğmuş vd., 2023). Beyaz kaolinit kilinden alümina kazanımı üzerine yapılan çalışmada, termal aktivasyon, asit liçi, gaz çökeltme ve kavurma işlem basamakları ile yüksek saflıkta alümina üretilmiştir (Al-Ajell ve Al-Sindy, 2006). Pomzadan asit liçiyle alümina kazanımının araştırıldığı çalışmada; mekanik aktivasyon, asit liçi, çöktürme ve kavurma işlemlerini içeren ardışık bir süreçle pomzadan alümina üretilebileceği gösterilmiştir (Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022).

Çizelge 1. Alümina kazanımı için araştırılan bazı seçilmiş boksit dışı kaynaklar

Boksit Dışı Kaynak	**Aktivasyon Yöntemi**	**Liç Ortamı**	**Çözeltide Alüminyum Kazanımı (%)**	**Referans**
Irak Kaolinitik Kili	Termal	HCl	99	Al-Ajell & Al-Sindy, 2006
İllit içerikli Kil	Termal	H_2SO_4	86	Bazin vd., 2007
Kaolinitik Kil	Termal	HCl	63	Al-Zahrani & Abdul Majid, 2009
Kil	Termal	H_2SO_4	95,1	Numluk & Chaisena, 2012
Pirofillit içerikli kil	Termal ve Mekanik	HCl	Termal: 33,63 Mekanik: 86,5	Uysal vd., 2019
Zenginleştirilmiş Pirofillit	Termal ve Mekanik	HCl	Termal: 67,88 Mekanik: %92,62	Aydoğmuş, 2019
Nefelinli Siyenit	-	HCl	55	Bagani vd., 2021
Uçucu Kül	-	H_2SO_4	85	Matjie vd. 2005
Uçucu Kül	-	H_2SO_4 Asetilaseton	85 64	Shemi vd., 2012
Asidik Pomza	Mekanik	HCl	91,37	Aydemir & Erdemoğlu, 2022
K-Feldspat	Mekanik	HCl	86	POTASSIAL, 2022

K-Feldspat cevherinden asit liçi ile alümina kazanımı olanaklarının araştırıldığı bir çalışmada ise mekanik aktivasyon, asit liçi, çöktürme ve kavurma işlemlerini içeren benzer bir yöntemle alümina ve KCl üretilmiştir (POTASSIAL, 2022).

Termik santral uçucu küllerinden alümina kazanımı çalışmaları kapsamında; kalsiyum oksit ile karıştırılan uçucu külden, kalsinasyon, asit liçi, solvent ekstraksiyon ve kavurma işlemlerini içeren bir prosesle alümina üretilebileceği tespit edilmiştir (Matjie vd., 2005). Bu kapsamda uçucu küllerden asit liçinin yanında gaz fazı ekstraksiyonunun kullanıldığı bir başka çalışma da yapılmış ve iki yöntem alüminyum kazanımı açısından karşılaştırılmıştır (Shemi vd., 2012). Uçucu küllerden alümina kazanımıyla ilgili bir diğer çalışmada ise Kömür uçucu külü ve amonyaktan elde edilen $NH_4Al(SO_4)_2$, suda kontrollü bir pH'da reaksiyona sokulmuş ve ardından ardışık kristalizasyon ile yüksek saflıkta alümina (>%99,9) üretilmiştir (Park vd. 2004). Bir diğer boksit dışı kaynak olan nefelinli siyenitten alümina kazanımı çalışmaları kapsamında genel olarak, sodyum ve potasyumun çöktürülerek kazanılması ve daha sonra asit liçiyle alümina kazanımı (Samantray vd., 2019) ve doğrudan asit liçi ile alümina kazanımı (Bagani vd., 2021) şeklinde iki yöntemin öne çıktığı görülmektedir.

2.1. Aktivasyon

Boksit dışı kaynaklardan alümina kazanımında, liç işlemi sırasında alüminyumun çözünme hızını ve verimini artırmak için genellikle kalsinasyon (termal aktivasyon) uygulanmaktadır. Bununla birlikte, alüminyum silikat minerallerinin mekanik aktivasyon yoluyla da aktifleştirilebileceğine dair çalışmalar da bulunmaktadır. (Erdemoğlu vd., 2016; Erdemoğlu vd., 2017; Birinci vd., 2017; Erdemoğlu vd., 2018; Uysal

vd., 2019; Aydoğmuş, 2019; Aydoğmuş vd., 2023; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022).

Kalsinasyon kavurması sırasında, silikatlı minerallerin kristal yapısındaki su buharlaşarak uzaklaşır (dehidroksilasyon), bu süreç sonucunda gözenekli, yüksek özgül yüzey alanına sahip, XRD analizinde amorf yapıda görülen ve seyreltik asitlerde kolayca çözünür bir katı elde edilir (Habashi, 1999). Bu durumda, dehidroksilasyon aktivasyonu sağlayan temel mekanizma olmaktadır. Isıl işlem görmüş silikat mineralleri seyreltik asitlerle liç edildiğinde, metaller çözeltiye geçerken geride silis iskeleti kalmaktadır. Ancak derişik asit kullanıldığında, silis jelleşir ve filtrasyon sorunlarına yol açar. Kavurma sıcaklığı dehidroksilasyon sıcaklığını aştığında, amorf yapı yeniden kristallenerek aktifliğini kaybeder ve liç işlemine dirençli hale gelir (Erdemoğlu vd., 2018).

Minerallerin enerji verimi yüksek yeni nesil değirmenlerde öğütülmesi, mekanik aktivasyon olarak adlandırılan bir işlemle mekanik olarak aktifleşmelerine yol açar. Mekanik aktivasyon, liç süresince seçimli çözünme verimini ve tepkime hızını artırarak süreci daha etkin hale getirir (Warris vd., 1997). Bu etki, mineralin özgül yüzey alanındaki artış, yapısal düzensizlik, mikrogerilimler (Baláž, 1996) amorflaşma (Tkáčová vd., 1993), mikrotopografik değişimler (Tromans ve Meech, 1996), çözünmeye yatkın yeni fazların oluşumu (Welham, 2001) ve termal indirgenme eğilimindeki artışın (Pourghahramani ve Forssberg, 2007) bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu sayede mineral, kalsinasyon kavurması (Şener, 2012; Uysal vd., 2016) veya liç (Erdemoğlu, 2009) gibi metalurjik işlemler sırasında daha aktif davranarak sürecin hızlanmasını veya düşük sıcaklıkta gerçekleşmesini sağlar. Liç işlemi öncesi uygulanan mekanik aktivasyonun temel amacı, mineraldeki suyu uzaklaştırmak değil, alümina silikat kristal kafes yapısını bozarak kafes bağlarını zayıflatmaktır. Aşırı öğütme sırasında, tam

anlamıyla dehidroksilasyon sağlanamasa da, kil mineralinin kristal yapısında X-ışını difraktometresiyle tespit edilebilen belirgin bozulma ve amorflaşma oluşur. Bu işlemin beklenen sonucu, mineralin kimyasal yapısından çok fiziksel yapısını bozarak, asisik çözeltilerinde yüksek verimle liç edilebilir hale getirilmesidir (Uysal, 2018; Erdemoğlu vd., 2018; Uysal vd., 2019; Aydoğmuş, 2019; Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022; Aydoğmuş vd., 2023).

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, Al-Ajeel ve AlSindy (2006), kaolinitik killerin farklı sıcaklıklarda 30 ve 45 dakika kalsine edilmesi sonucunda, kalsinasyon sıcaklığı 720°C'ye ulaşıncaya kadar alümina kazanımının arttığını, bu sıcaklıktan sonra ise azaldığını belirlemişlerdir. Bazin vd. (2007), illit/klorit tipi kil minerallerinden alümina kazanımı üzerine kalsinasyonun etkisini çalışmışlardır. Buna göre kalsinasyon yapılmadan kazanılabilen alümina miktarı en fazla %74,7 iken, kalsinasyon kavurması sonucu bu oran %84,9 olarak bulunmuştur. Ajemba ve Onukwuli (2012), killerden sülfürik asit liçiyle alümina kazanımında asit derişimi ve kalsinasyon sıcaklığının en önemli faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Alümina kazanımının kalsinasyon sıcaklığı, liç sıcaklığı, asit derişimi ve karıştırma hızıyla doğru orantılı, ancak katı/çözelti oranıyla ters orantılı olduğu bulunmuştur. Numluk ve Chaisena (2012), %22,7 Al_2O_3 içeren killerden 750°C sıcaklıkta kalsine edildikten sonra 3 M sülfürik asit çözeltisinde 100°C sıcaklıkta 2 saat liç işlemi sonucunda alümina kazanımının %95,1 olduğunu rapor etmişlerdir

Pirofillit cevherinden asit liçi yoluyla alüminyum kazanımına aktivasyonun etkisinin incelendiği bir çalışmada (Aydoğmuş, 2019), aktive edilmemiş tüvenan cevher ile kalsinasyon ve aşırı öğütme yoluyla aktive edilmiş cevherler HCl ile liç edilmiştir. Deneysel bulgulara göre, liç çözeltisindeki Al kazanım oranları tüvenan cevherde %10,57, kalsine

cevherde %33,63 ve aşırı öğütülmüş cevherde %86,5 olarak bulunmuştur. Kalsinasyon işlemi sırasında kil tabakaları arasında yeterli açılma olmadığı ve gözenekli yapının oluşmadığı, ayrıca yüksek sıcaklıkta asit direnci gösteren yeni mineral fazlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, termal aktivasyon ile elde edilen Al kazanımı görece düşük kalmıştır. Mekanik aktivasyonun ise kil minerallerinin amorflaşmasını sağlayarak alüminyumun çözeltiye geçişini belirgin bir şekilde iyileştirdiği görülmüştür. Sonuç olarak, termal aktivasyonun kısıtla sınırlı etkisi bulunurken, mekanik aktivasyon alüminyum kazanımını çok daha etkili bir şekilde artırmıştır (Aydoğmuş, 2019). Tang vd. (2010), mekanik aktivasyonun kaolin artığı bir cevher üzerindeki etkilerini incelemiş ve 4 saatlik öğütme sonunda XRD kırınımlarının kaybolduğunu, iğne şekilli kristallerin küreselleştiğini ve tane boyunun küçüldüğünü gözlemlemiştir. Mekanik aktivasyonun liç sıcaklığı ve süreyi düşürerek liç kinetiğini iyileştirdiği belirtilmiştir. Temuujin vd. (2003), pirofillitten poroz silika üretmek için mekanik aktivasyon ve asit liçi üzerine yaptıkları çalışmada, 3 saatlik öğütmeyle dehidroksilasyon sıcaklığının 550°C'den 490°C'ye düştüğünü ve uzun süreli öğütmenin kristal yapıyı bozduğunu tespit etmiştir. Aynı zamanda, 4 M HCl ile liçte alüminyum kazanımının azaldığı ancak yüzey alanın arttığı belirlenmiştir. Erdemoğlu vd. (2016), Erdemoğlu vd. (2017) ve Uysal vd. (2016), Pütürge pirofillitinden alüminyum kazanımında mekanik aktivasyonun etkisini araştırmışlardır. 50 dakikalık öğütmede, alümina kazanımının %12,5'tan %73,09'a yükseldiği gösterilmiştir. Pomzadan asit liçiyle alümina kazanımında mekanik aktivasyonun etkisini inceleyen bir çalışmada (Aydemir, 2021), pomza 2-60 dakika süreyle aşırı öğütülerek aktifleştirilmiş ve asit liçi uygulanmıştır. Tüvenan pomzanın liçi sırasında alüminyum kazanımı neredeyse yokken, mekanik aktifleştirilmiş pomzadan elde edilen alüminyum kazanımı %91,37'ye ulaşmış ve mekanik

aktivasyonun bu süreç üzerindeki belirgin etkisi ortaya konmuştur (Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022).

Son olarak, K-feldspat cevherinden alümina kazanımı çalışmaları kapsamında cevher mekanik aktifleştirilmiş ve alüminyum kazanımı tüvenan cevherle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda mekanik aktivasyonun alüminyum kazanımını belirgin şekilde artırdığı tespit edilmiştir (POTASSIAL, 2022).

Bir karşılaştırma yapabilmek için, Şekil 1'de pirofillit cevherinden asidik liç yoluyla alüminyum kazanımı için liç öncesi uygulanan termal ve mekanik aktivasyonun alüminyum çözünmesine etkisi gösterilmektedir.

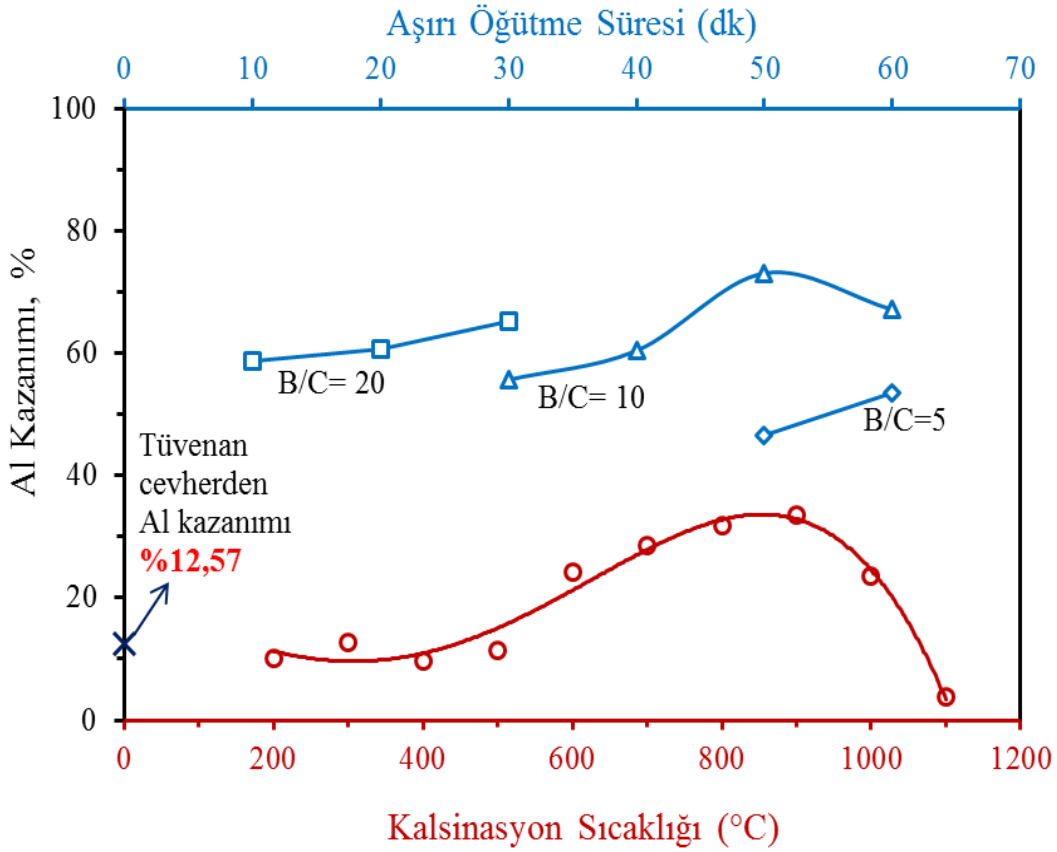
2.2. Asit Liçi

Asit liçi için H_2SO_4 (Daniels ve Muzenda, 2012; Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022), HNO_3 (Dewey vd., 1981; Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022), HCl (Dewey vd., 1981; Erdemoğlu vd., 2018; Uysal vd., 2019; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022) ve H_2SO_3 (Redlich vd., 1946) gibi inorganik asitlerin kullanımı yaygındır. Bu asitlerden hangisinin kullanılacağı, kilin tepkime yeteneğinden çok, asit maliyetlerine bağlı olarak belirlenmektedir.

Liç sürecinde kullanılan çözücünün geri kazanım verimi maliyetleri doğrudan belirlediğinden, killerin liçinde kullanılan asitin geri kazanımı da temel alınabilir. Liç için H_2SO_4 kullanılırsa ve alüminyum sülfat kristallendirilmişse, asit maliyeti düşük ancak sülfatın oksite bozuşma maliyeti, kavurmanın yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekliliğinden dolayı yüksek olmaktadır.

Öte yandan, liç için HNO3 kullanıldığında ve alüminyum nitrat kristallendirilirse, asit maliyeti yüksek fakat bozuşma maliyeti düşük

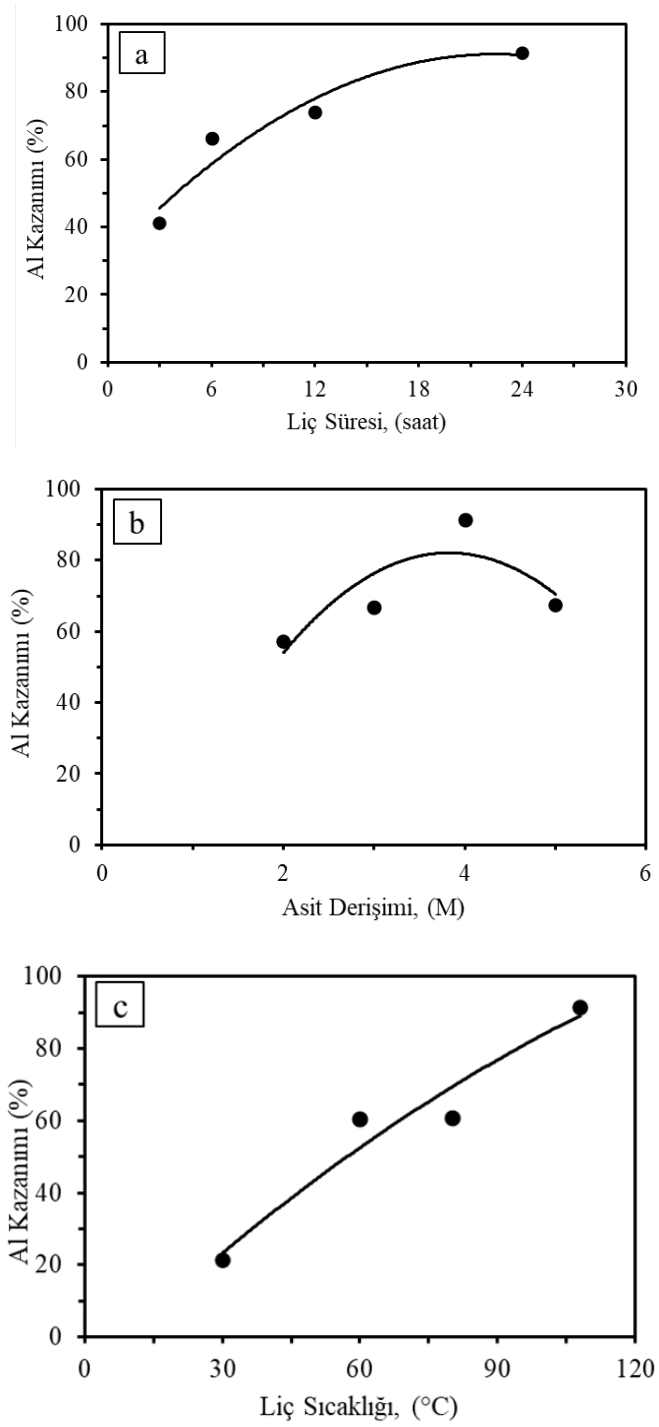
olmaktadır. HCl ile liç ve alüminyum klorürün bozuşma maliyetleri, H2SO4 ve HNO3 maliyetlerinin arasında kalmaktadır (Habashi, 1999).



Şekil 1. Pirofillit Cevherinden Asit Liçiyle Alüminyum Kazanımına Ön İşlem Olarak Termal ve Mekanik Aktivasyonun Etkisinin Karşılaştırılması (Değirmen hızı: 400 devir/dk; B/C: Bilya/Cevher oranı) (Erdemoğlu vd., 2018)

Pomzadan alümina kazanımı amacıyla yapılan çalışmasında farklı asit türleriyle (HCl, H_2SO_4 ve HNO_3) yapılan liç testlerinde HCl liçi sonucu alüminyum çözünmesinin diğer asitlere göre belirgin şekilde yüksek olduğu ve aşırı öğütme süresinin artışıyla alüminyum çözünmesinin de arttığı belirlenmiştir (Çizelge 2).

Asit türü olarak HCl belirlenmiş ve asit derişimi, liç süresi ve liç sıcaklığı parametrelerinin alüminyum kazanımına etkisi incelenmiştir (Şekil 2) (Aydemir, 2021; Aydemir ve Erdemoğlu, 2022).



Şekil 2. Pomzadan HCl liçiyle alüminyum çözünmesine (a) liç süresi, (b) asit derişimi ve (c) liç sıcaklığının etkisi (Aydemir, 2021)

Benzer şekilde yapılan çalışmalarda ve K-Feldspattan alümina kazanımı çalışmalarında (POTASSIAL, 2022) HCl kullanılmıştır (Al-Ajeel ve Al-Sindy, 2006; Al- Zahrani ve Abdul-Majid, 2009; Erdemoğlu vd., 2016; Erdemoğlu vd., 2017; Erdemoğlu vd., 2018; Aydoğmuş, 2019; Uysal vd., 2019; Aydoğmuş vd., 2023).

Çizelge 2. Pomzadan asit liçiyle alüminyum çözünmesine öğütme süresi ve asit türünün etkisi (Aydemir, 2021)

Asit Türü	**Aşırı Öğütme Süresi, (dk)**			
	Öğütülmemiş	15	30	60
	Al Kazanımı, (%)			
HCl	0,6	31,71	49,53	66,40
H_2SO_4	0,07	21,60	39,55	51,91
HNO_3	0,9	23,92	44,04	54,86
Liç koşulları: Sıcaklık: Çözelti kaynama sıcaklığı; Süresi: 6 saat; Çözelti/Cevher Oranı: 20; Asit derişimi: 4 M; Karıştırma Hızı: 600 devir/dk				

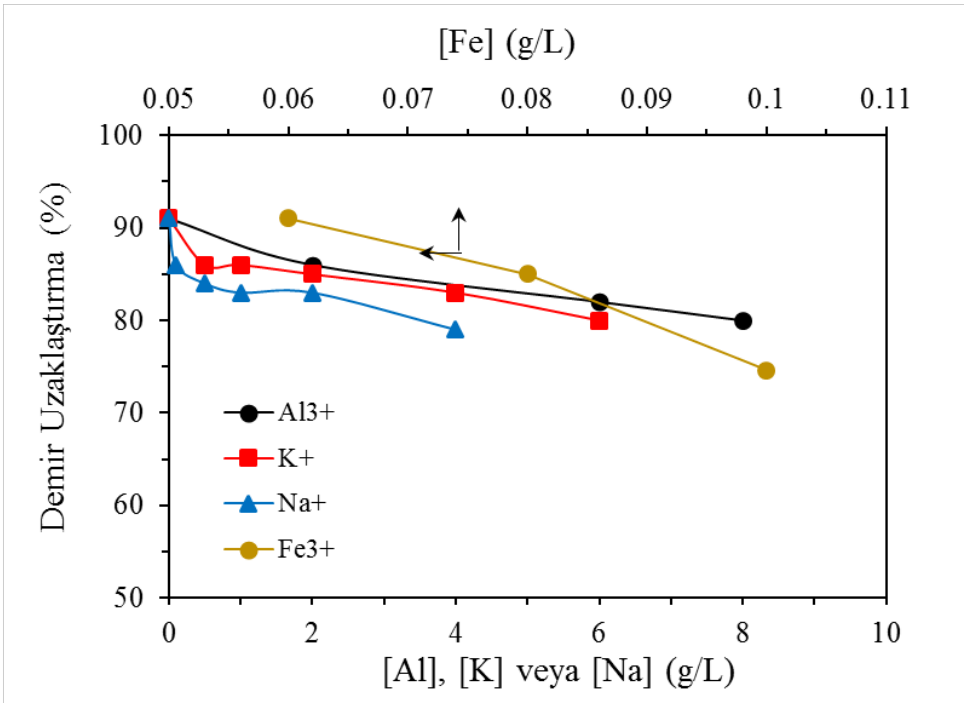
2.3. Çözelti Saflaştırma

Yüklü liç çözeltisi, cevherden veya öğütme ortamından kaynaklanabilecek, başta demir olmak üzere titanyum, silisyum, kalsiyum ve magnezyum gibi safsızlıklar içerir. Bu safsızlıklar alüminyum ile birlikte çözünerek çözeltinin kirlenmesine ve son ürün olan alüminanın saflığının düşmesine yol açar. Saflaştırma amacıyla, liç sırasında çözeltiye geçen demirin kalsiyum ferrosiyanür yardımıyla Prusya Mavisi halinde çöktürülerek uzaklaştırılması önerilmektedir (Habashi, 1999). Ancak, asidik ortamda ferrosiyanürün hidrojen siyanüre dönüşmesi tehlikesi bulunduğu için, D2EHPA (Biswas ve Begum, 1998; Turan, 2022), Aliquat 336 (Mishra vd., 2011), TBP ve Cyanex 272 gibi reaktiflerle HCl çözeltilerinden demirin solvent ekstraksiyon yöntemiyle uzaklaştırılması tercih edilmektedir. Ayrıca, flokülant veya

koagülant yardımıyla kolloidal silikanın çöktürülmesi, alüminanın kirlenmesini önlemekte etkili olmaktadır.

Asit liçi yüklü çözeltisinden demirin solvent ekstraksiyonla uzaklaştırılmasının araştırıldığı bir çalışmada (Turan, 2022), organik çözücü olarak kerosen içerisinde D2EHPA kullanılarak yalnızca %2 Alüminyum kaybıyla, %95,58 demir uzaklaştırma verimi elde edilmiştir. D2EHPA ile demir uzaklaştırılmasına Al, K ve Na iyonlarının etkisi Şekil 3'de gösterilmektedir.

Mete (2024) tarafından yapılan çalışmada, alüminyum içeren model asidik liç çözeltisinden Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının uzaklaştırılmasında, polimerik reçineler (Amberlite IR120, Amberlite CG50 ve Dowex 50WX4) ve bu reçinelerin EDTA, oleik asit, fosforik asit ve D2EHPA ile modifiye edilmiş formları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının polimerik reçinelerle asidik liç çözeltisinden yüksek verimle uzaklaştırılabileceği gösterilmiştir.

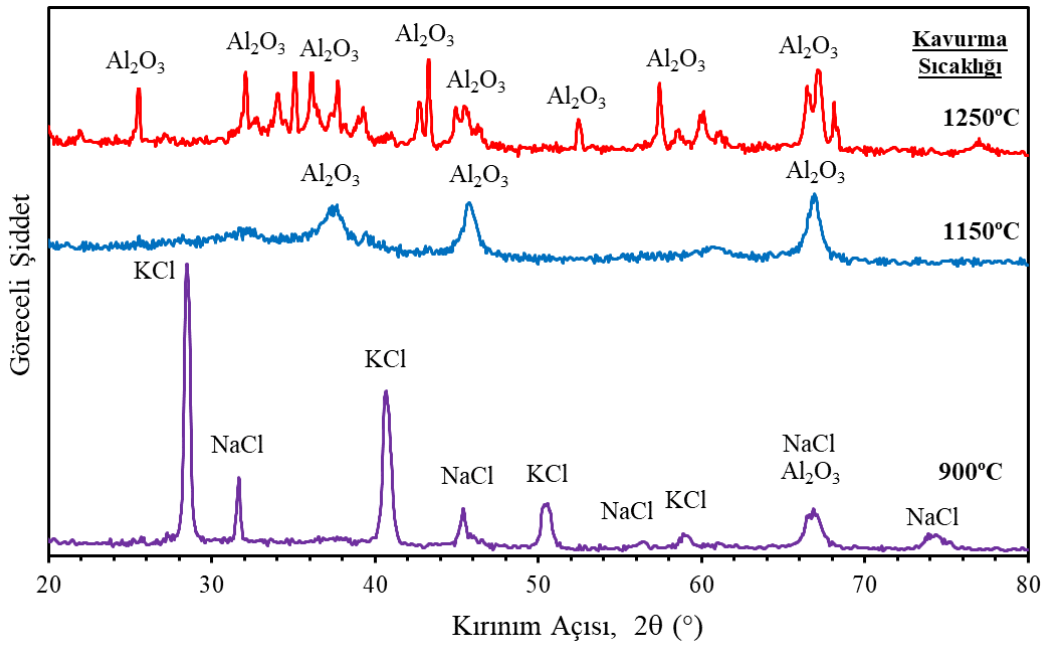


Şekil 3. D2EHPA ile demir uzaklaştırılmasına sulu çözeltinin ilk Al, K, Na ve Fe iyonları derişiminin etkisi (Turan, 2022)

2.4. Kavurma

Asit liçiyle alümina kazanımının son aşaması bozuşturma kavurmasıdır. Bozuşturma kavurmasıyla ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, Hartman vd. (2005), $AlCl_3$ tuzunun termal bozuşmasını araştırmış ve 270°C'ye kadar yükselen sıcaklıklarda bozuşma hızını incelemişlerdir. Bu sıcaklıklarda Al_2O_3 oluşumu gözlemlenmiş, ancak hala bir miktar klorürlü türün var olduğu tespit edilmiştir. 350°C'de 1 saat kalsinasyondan sonra ise alüminanın yaklaşık %9'unun klorür içerdiğini rapor etmişlerdir. Park ve Jeong (1996) ise düşük sodalı alüminanın alüminyum klorürün termal bozuşması sırasında meydana gelen morfolojik değişimleri dikkate alarak, bozuşma sıcaklığını 300-900°C aralığında ve kalsinasyon sıcaklığını ise 1100-1400°C aralığında incelemişlerdir.

Bu çalışmada, üretilen düşük sodalı alüminanın, Bayer prosesiyle üretilen alüminayla karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Benzer şekilde Uysal (2018), Erdemoğlu vd. (2018), Uysal vd. (2019); Aydemir (2021); Aydemir ve Erdemoğlu (2022) tarafından yapılan çalışmalarda pirofillit ve pomzadan alümina kazanımında $AlCl_3$ tuzu, 900-1300°C sıcaklıkta, 1-3 saat bozuşturma kavurmasına tabi tutularak alümina üretilmiştir. Alümina kazanımında kavurma sıcaklığının alümina kristalleşmesine etkisi Şekil 4'te görülmektedir. K-Feldspat cevherinden alümina kazanımında da aynı yöntem kullanılmıştır (POTASSIAL, 2022). K-Feldspat cevherlerinden bu yöntemle alümina kazanımı sırasında aynı zamanda KCl tuzu da elde edilebilmektedir. KCl tuzunun saflaştırılması üzerine çalışmalar da bulunmaktadır (Erdemoğlu vd., 2023).

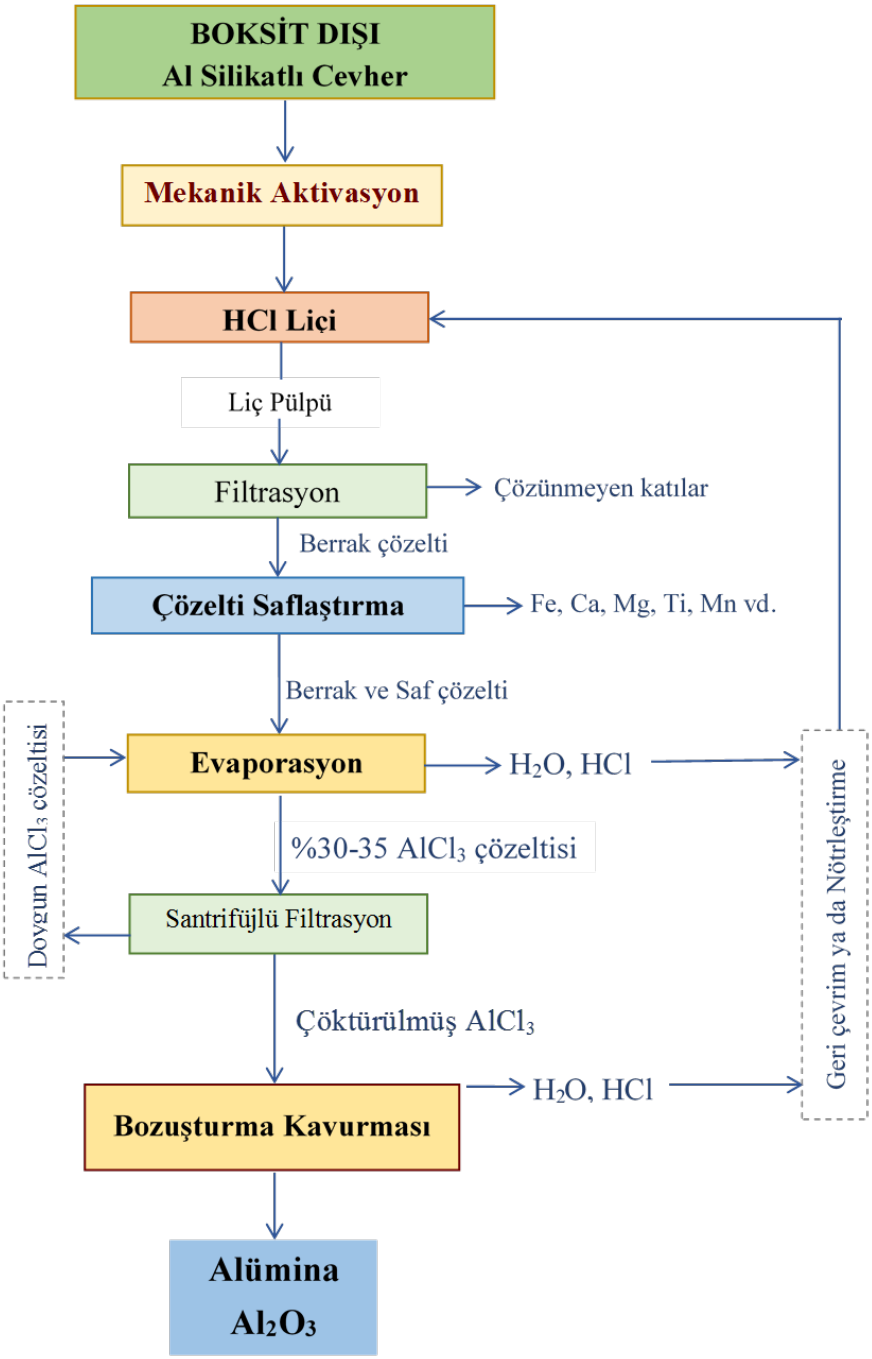


Şekil 4. K-Feldspat cevherinden alümina kazanımında kavurma sıcaklığının etkisi (POTASSIAL, 2022)

3. SONUÇLAR

Boksit dışı kaynaklardan alümina kazanımı, artan alüminyum talebi ve sınırlı boksit rezervleri nedeniyle giderek daha önem kazanmaktadır. Bayer Prosesi'ne alternatif oluşturan bu yöntemler, alüminyum silikat minerallerinin termal ve mekanik aktivasyonla reaktif hale getirilmesini ve sonrasında uygulanan liç süreçlerini kapsamaktadır.

Bu yöntemler, hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlayarak boksit dışı kaynakların değerlendirilmesine olanak tanır. Termal ve mekanik aktivasyon, alüminyumun liç sırasındaki çözünme hızını ve verimini artırırken, asit liçi ve alkali liç gibi yöntemler alümina içeriği yüksek çözeltiler elde edilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, boksit dışı kaynaklardan sırasıyla, mekanik aktivasyon, asidik liç, saflaştırma (solvent ekstraksiyon ve/veya iyon değiştirme) ve kavurma işlemleriyle alümina kazanılabileceği gösterilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Boksit dışı kaynaklardan alümina kazanımı için süreç akış şeması

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu bildiride gerçekleştirilmiş olan çalışmaları destekleyen TÜBİTAK'a (Projeler: 214M432 ve 122N039) ve İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Projeler: 2015/44,

FYL-2019-1533, FYL-2020-1984, FYL-2020-2176, FBG-2022-2978, FBA-2023-3131 ve FED-2024-3491) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Ajemba, R. O., & Onukwuli, O. D., 2012. Process optimization of sulphuric acid leaching of alumina from Nteje clay using central composite rotatable design. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, 3(5), 1-7.

Al-Ajeel, A. W., & Al-Sindy, S. I., 2006. Alumina recovery from Iraqi kaolinitic clay by hydrochloric acid route. Iraqi Bulletin of Geology and Mining, 2(1), 67-76.

Al-Zahrani, A. A., & Abdul-Majid, M. H., 2009. Extraction of alumina from local clays by hydrochloric acid process. Journal of King Abdulaziz University: Engineering Sciences, 20(2), 29-41.

Arlyuk, B. I., So, D., & Pivnev, A .I., 1992. Efficiency of nepheline ore processing for alumina production all-union aluminum and magnesium. In: Peterson, W.S. (Ed.), Light Metals, Wiley-VCH.

Aydemir, M. K., & Erdemoğlu, M., 2022. Pomzadan asit liçiyle alümina üretiminin araştırılması. Scientific Mining Journal, 61(4), 193-200.

Aydemir, M. K., 2021. Pomzadan alümina üretiminin hidrometalurjik yöntemlerle araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.

Aydoğmuş, R., 2019. Zenginleştirilmiş Malatya-Pütürge pirofillit cevherinin alümina üretimi için aktifleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.

Aydoğmuş, R., Uysal, T., & Erdemoglu, M., 2023. Pirofillit Cevherinden Alümina Üretimine Zenginleştirme Yöntemlerinin Etkisi. J. Inst.of Science and Technology, 13(2), 1297-1305.

Bagani, M., Balomenos, E., & Panias, D., 2021. Nepheline Syenite as an Alternative Source for Aluminum Production. Minerals, 11, 73.

Baláž, P., 1996. Influence of solid state properties on ferric chloride leaching of mechanically activated galena. Hydrometallurgy, 40, 359-368.

Bazin, C., El-Ouassiti, K., & Ouellet, V., 2007. Sequential leaching for the recovery of alumina from a Canadian clay. Hydrometallurgy, 88, 196-201

Bengtson, K. B., 1979. A technological comparison of six processes for the production of reduction grade alumina from non-bauxitic raw materials. In Peterson, W. S. (Ed.), Light Metals (pp. 217-312). Heidelberg: Wiley-VCH.

Birinci, M., Uysal, T., Erdemoğlu, M., Porgalı, E., & Barry, T. S., 2017. Acidic Leaching of Thermally Activated Pyrophyllite Ore From Pütürge (Malatya-Turkey) Deposit. XVII Balkan Mineral Processing Congress, Antalya.

Biswas, R. K., & Begum, D. A., 1998. Solvent extraction of Fe^{3+} from chloride solution by D2EHPA in kerosene. Hydrometallurgy, 50, 153-168.

Cohen, J., & Mercier, H. 1976. Recovery of alumina from non-bauxite aluminum-bearing raw materials. Société Aluminium Pechiney, Light Metals. Heidelberg: Wiley-VCH.

Daniels, A.L., & Muzenda, E., 2012. Recovery of aluminium oxide from flint clay through H2SO4 leaching. Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol III, July 4-6, London, U.K.

Dewey, J. L., Scott, C. E., Kane, J. F., Stratton, C. L., Rushing, J. C., & Spoonts, R. H., 1981. Alumina production by nitric acid extraction of clay. United States Patent No: 4.246.239.

Ding, J., Ma, S., Zheng, S., Zhang, Y., Xie, Z., Shen, S., & Liu, Z., 2016. Study of extracting alumina from high-alumina PC fly ash by a hydro-chemical process. Hydrometallurgy, 161, 58-64.

Erdemoğlu, M., 2009. Carbothermic reduction of mechanically activated celestite. International Journal of Mineral Processing, 92, 144-152.

Erdemoğlu, M., Birinci, M., & Uysal, T., 2018. Kil minerallerinden alümina üretimi: güncel değerlendirmeler. Politeknik Dergisi, 21(2), 387-396.

Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T., Porgalı, E., & Barry, T. S., 2017. Acid leaching performance of mechanically activated pyrophyllite ore for Al_2O_3 extraction. 9. International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying, Slovakia.

Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T., Porgalı, E., & Yumuşak, S., 2016. Characterization of mechanically activated pyrophyllite for Al_2O_3 production by acid leaching process. International Mineral Processing Symposium, İstanbul.

Erdemoğlu, M., Demir, K., Şentürk, K., & Mete, E., 2023. Potasyum alüminyum silikat cevherlerinin asit liçiyle elde edilen potasyum klorürün saflaştırılması. İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Proje No: FBA-2023-3131 (Devam ediyor).

Flint, E. P., Clarke, W. F., Newman, E. S., Shartsis, D. L., Bishop, L. S., & Wells, L. S., 1946. Extraction of alumina from clays and high silica bauxites. Journal of Research of The National Bureau of Standards, 36.

Girgin, İ., 1984. Boksit dışı kaynaklardan alümina üretimi. Madencilik Dergisi, 23(3), 7-14.

Habashi, F., 1997. Handbook of Extractive Metallurgy, Volume 2. Heidelberg, Germany: Wiley-VCH.

Habashi, F., 2017. Alumina from Silicates. The International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, 17, June.

Habashi, F., 1999. Textbook of Hydrometallurgy (2nd Ed.). Métallurgie Extractive, Québec, Canada.

Hartman, M., & Trnka, Šolcová, O., 2005. Thermal decomposition of aluminum chloride hexahydrate. Industrial & Engineering Chemistry Research, 44(17), 6591-6598.

Matjie, R. H., Bunt, J. R., & Van Heerden, J. H. P., 2005. Extraction of alumina from coal fly ash generated from a selected low rank bituminous South African coal. Minerals Engineering, 18 (3), 299-310.

Mete, E., 2024. Model asidik liç çözeltilerinden Ca ve Mg iyonlarının polimerik reçinelerle giderimi. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi. Malatya

Mishra, R.K., Rout, P. C., Sarangi, K., & Nathsarma, K. C., 2011. Solvent extraction of Fe (III) from the chloride leach liquor of low grade iron ore tailings using Aliquat 336. Hydrometallurgy, 108, 93-99.

Numluk, P., & Chaisena, A., 2012. Sulfuric acid and ammonium sulfate leaching of alumina from Lampang clay. E Journal of Chemistry, 9(3), 1364-1372.

Park, H. C., Park, Y. J., & Stevens, R., 2004. Synthesis of alumina from high purity alum derived from coal fly ash. Materials Science and Engineering: A, 367(1-2), 166-170.

Park, K. Y., & Jeong, J., 1996. Manufacture of low-soda alumina from clay. Industrial & Engineering Chemistry Research, 35(11), 4379-4385.

POTASSIAL, 2022. Zero-waste valorisation of feldspathic ores: Green application and sustainable sourcing of strategic raw materials. EU ERA-MIN2 2021 yılı çağrısı projesi No 27. İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü (Kordinatör: M. Erdemoğlu). Devam ediyor.

Pourghahramani, P., & Forssberg, E., 2007. Effects of mechanical activation on the reduction behavior of hematite concentrate. International Journal of Mineral Processing, 82, 96-105.

Redlich, O., Jiarch, C. C., Adams, J. F., Sharp, F. H., Holt, E. C., & Taylor, J. E., 1946. Extraction of alumina from clay. Industrial and Engineering Chemistry, 38(11), 1181-1187.

Samantray, J., Anand, A., Dash, B., Ghosh, M. K., & Behera, A. K., 2019. Nepheline syenite—an alternative source for potassium and aluminium. In: Rare Metal Technology 2019, Springer International Publishing, 145-159.

Sawyer, D. L., Turner, T. L., & Hunter, D. B., 1983. Alumina mini-plant operation-overall mass balance for clay HCl acid leaching. U.S. Bureau of Mines Report No 8759, 29 pp.

Shemi, A., Mpana, R. N., Ndlovu, S., Van Dyk, L. D., Sibanda, V., & Seepe, L., 2012. Alternative techniques for extracting alumina from coal fly ash. Minerals Engineering, 34, 30-37.

Shemi, A., Ndlovu, S., Sibanda, V., & Van Dyk, L. D., 2014. Extraction of aluminium from coal fly ash: Identification and optimization of influential factors using statistical design of experiments. International Journal of Mineral Processing, 127, 10-15.

Singh, R., Singh, L., & Singh, S. V., (2015). Beneficiation of iron and aluminium oxides from fly ash at lab scale. International Journal of Mineral Processing, 145, 32-37.

Şener, M., 2012. Jipsin ($CaSO_4.2H_2O$) ısıl davranışına mekanik aktivasyonun etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Tang, A., Su, L., Li, C.H., & Wei, W., 2010. Effect of mechanical activation on acid leaching of kaolin residue. Applied Clay Science, 48, 296-299.

Temuujin, J., Okada, K., Jadambaa, T. S., MacKenzie, K. J. D., & Amarsanaa, J., 2003. Effect of grinding on the leaching behaviour of pyrophyllite. Journal of European Ceramic Society, 23(8), 1277-1282.

Tkáčová, K., Baláž, P., Mišura, B., Vigdergauz, V. E., & Chanturiya, V. A., 1993. Selective leaching of zinc from mechanically activated complex Cu-Pb-Zn concentrate. Hydrometallurgy, 33, 291-300.

Turan, M., 2022. Asidik alüminyum klorür çözeltisinden demirin solvent ekstraksiyonla uzaklaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.

Uysal, T., 2018. Asit liç yöntemi ile pirofillit cevherinden alümina üretiminde aktifleştirme koşullarının araştırılması. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.

Uysal, T., Erdemoğlu, M., & Birinci, M., 2019. Pirofillit cevherinden asit liçi yöntemiyle alüminyum kazanımına aktivasyonun etkisi. Scientific Mining Journal, 58(2), 111-120.

Uysal, T., Mutlu, H.S., & Erdemoğlu, M., 2016. Effects of mechanical activation of colemanite ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) on its thermal transformations. Int. Journal of Mineral Processing, 151, 51-58.

Warris, C.J., & McCormick, P.G., 1997. Mechanochemical processing of refractory pyrite. Minerals Engineering, 10, 1119-1125.

Welham, N.J., 2001. Enhanced dissolution of tantalite/columbite following milling. International Journal of Mineral Processing, 61, 145-154.

Yao, Z. T., Xia, M. S., Sarker, P. K., & Chen, T., 2014. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China. Fuel, 120, 74-85.

METALİK MADEN ARAMALARINDA JEOFİZİK YÖNTEMLER VE GÜNCEL GELİŞMELER

GEOPHYSICAL METHODS AND RECENT DEVELOPMENTS IN METALLIC MINERAL EXPLORATION

M. Emin Candansayar
Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZ: Jeofizik yöntemler, dünyada 1900'lü yılların başlarından itibaren metalik maden aramalarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Türkiye'de ise özellikle 1950'li yıllardan itibaren jeofizik araştırmalar, maden keşiflerinde önemli bir yer edinmiştir. Son yıllarda, teknolojik gelişmeler sayesinde jeofizik veri toplama süreçleri önemli ölçüde ilerlemiştir. Özellikle kara ve havadan yapılan ölçümlerle daha hızlı ve yüksek kaliteli veri elde edilmekte, gelişmiş veri işleme teknikleri, 3B modelleme ve ters çözüm algoritmaları sayesinde cevherlerin yüzeyden olan derinliği ve yer altındaki hacimsel boyutları daha doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu sunumda, metalik maden aramalarında jeofizik yöntemlerin veri toplama süreçlerindeki yenilikler, 3B modelleme tekniklerindeki gelişmeler ve bu yöntemlerin başarılı uygulama örnekleri ele alınacaktır.

Anahtar Kelimeler: Jeofizik, Maden, Arama, 3D, Modelleme, Ters Çözüm

ABSTRACT: *Geophysical methods have been effectively used in metallic mineral exploration worldwide since the early 1900s. In Turkey, geophysical investigations have played a significant role in mineral exploration, particularly since the early 1950s. In recent years, technological advancements have significantly improved geophysical data acquisition processes. Particularly, ground and airborne surveys now enable faster and higher-quality data collection. Additionally, with advanced data processing techniques, 3D modeling, and inversion algorithms, it has become possible to determine the depth of ore bodies from the surface and their volumetric dimensions underground with greater accuracy. This presentation will focus on recent advancements in geophysical data acquisition methods, developments in 3D modeling techniques, and successful case studies in metallic mineral exploration.*

Keywords: *Geophysics, Mining, Exploration, 3D, Modeling, Inversion*

1. GİRİŞ

Arama jeofiziği çalışmaları 1900'lerin başından itibaren bütün dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Mineraller, fosil yakıtlar, hidrokarbon, jeotermal ve yeraltı suyu rezervuarlarının araştırılması vb. ekonomik değeri olan araştırmalar kapsamında yapılan jeofizik çalımalar, "arama jeofiziği" olarak isimlendirilir. Arama jeofiziği uygulamalarında, özdirenç, hız, manyetik duyarlılık, yoğunluk gibi farklı fizik parametrelerine duyarlı jeofizik yöntemler kullanılır.

Metalik maden aramalarında yaygın olarak kullanılan başlıca jeofizik yöntemler; Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) (DC Resistivity), Yapay Uçlaşma (Induced Polarization-IP), Geçici Elektromanyetik (Transient Electromagnetic-TEM), Manyetik ve Gravite yöntemleridir (Nabighian ve Asten, 2002; Vallee vd., 2011). Özellikle son 20 yılda manyetotellürik yöntemlerde audio-frekanslarda ölçü alan sistemlerin geliştirilmesi sayesinde, özellikle derin maden cevherleri Audio-Manyetotellürik yöntem yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Yang vd., 2016; Jiang et al., 2023).

Son yıllarda metalik maden aramalarında kullanılan jeofizik yöntemler ile havadan ve yarı-havadan araştırmalar yaygınlaşmaya başlamıştır (Nazari vd., 2023; Mörpe vd., 2024). DAÖ yöntemi ile uzun elektrod (long-electrde) kullanarak derindeki küçük cevher zonları belirlenebilmektedir (Zhang vd., 2014; Candansayar, 2023).

Madencilik faaliyeti sırasında karşılaşılan sorunların giderilmesi için, kuyu içi tünel içi jeofizik veri toplama ve yorum tekniklerinde önemli gelişmeler olmuştur (Wang vd., 2023; Arıcan ve Candansayar, 2023). Bu çalışmada, metalik maden aramalarında kullanılan jeofizik elektrik ve elektromanyetik yöntemlerde, veri toplama, veri işlem, modelleme ve ters

çözüm konularındaki gelişmeler başarılı uygulama örnekleri ile açıklanacaktır.

2. MADEN ARAMALARINDA KULLANILAN JEOFİZİK YÖNTEMLER

Arama jeofizik kapsamında kullanılan birçok jeofizik yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında maden jeofiziği madenlerin araştırılmasında kullanılan başlıca yöntemler Çizelge 1' de sunulmuştur. Çizelgede her yöntemin duyarlı olduğu fizik parametre, matematik model, ölçülen büyüklük bilgileri görülmektedir.

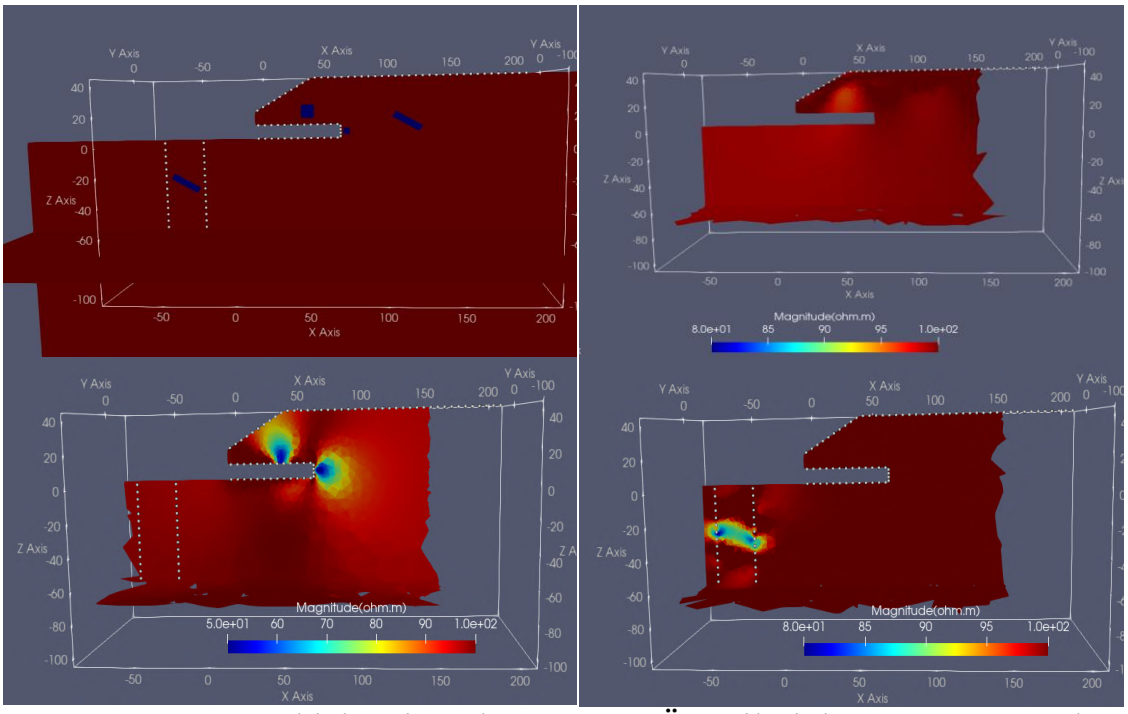
Çizelge 1. Maden aramalarında kullanılan başlıca jeofizik yöntemler

Jeofizik Yöntem (geliştirildiği Yıl)	Fizik Kuram/ Matematik model	Ölçülen Büyüklük	İncelediği Fizik Param.	Araştırma Derinliği
Elektrik Yöntemler (1900-1910) (DAÖ, YU, DU)	Poisson Denk./ Eliptik KDD	Gerilim farkı	Özdirenç / yüklenebilirlik	0-500 m 0.5-5 km
Elektromanyetik Yöntemler (MT/CSAMT, TEM, HLEM, GPR, MRS) (1930-40-50)	Maxwell Denklemleri/ Eliptik, parabolik ve hiperbolik KDD	E,H,dB/dt, Hs/Hp, …	Özdirenç, Dielektrik geçirgenlik	0-10 cm 0-100 m 0-500km
Manyetik (19.yy)	Potansiyel Alan (Laplace)/ Eliptik KDD	Manyetik alan (x,y,z) bileşenler	Manyetik duyarlılık	0-5m 0-20km
Gravite (18.yy)	Potansiyel Alan (Laplace)/ Eliptik KDD	Yerçekimi ivmesi (x,y,z) bileşenleri	Yoğunluk farkı	0-6450km
Sismik Yöntemler (1910-1915)	Akustik, Elastik Dalga/ Hiperbolik KDD	Sismik dalga geliş zamanı ve genliği	Sismik hızlar	0-100 m 0-10 km
Radyometrik Yöntemler	radyoaktivite	Yeryüzü, hava, kuyu içi	Doğal radyoaktivite yayılım haritaları	

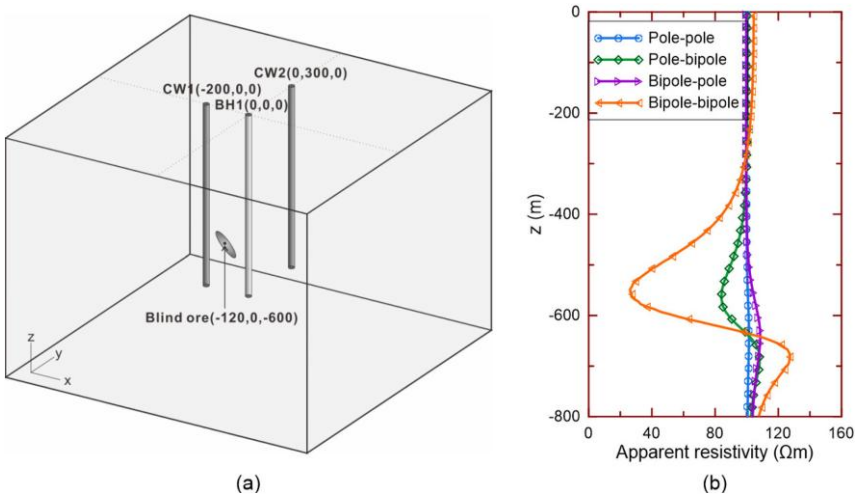
Bu yöntemler arasında metalik maden aramalarında en yaygın kullanılan yöntemler: DAÖ ve YU yöntemleridir. Bu yöntemlerde son yıllarda, tünel içi ve kuyular arası ölçü sistemleri geliştirilmiştir (Şekil 1) (Arıcan ve Candansayar, 2023; Yang et al., 2017).

Ayrıca düzenli/düzensiz ağ ile 2B/3B ters çözüm yapan algoritmalar geliştirilmiştir (Adrian vd., 2022; Gündoğdu ve Candansayar, 2018; Blanchy

vd., 2020). Bu algoritmalar sayesinde, gömülü cevherlerin yerleri ve hacimleri gerçeğe daha yakın elde edilebilmektedir (Şekil 2).



Şekil 1. Yüzey, tünel içi ve kuyular arası DAÖ verilerinin 3B ters çözümleri (Arıcan ve Candansayar 2023)



Şekil 2. (a) Basitleştirilmiş bir derinde (kör) cevher modeli. Dikey olarak 800 m derinliğe kadar üç kuyu açılmıştır. Kör cevher, a=50 m (x yönü), b=30 m (y yönü) ve c=10 m (z yönü) ile elipsoid şeklinde, 45◦ eğimle z = 600 m'ye yerleştirilmiştir. Cevherin özdirenci 10 m ve arka plan özdirenci 100 m'dir. (b) BH1'deki görünür özdirenç profilleri. (Yang vd.; 2017)

Son yıllarda, sondaj kuyuları içindeki metal teçhizatlar, akım elektrodu olarak da ölçüler alınmaktadır (Yang vd., 2017). Uzun elektrod DAÖ ters çözümü ile çek derindeki küçük ölçekli cevher zonları bu ölçülerle belirlenebilmektedir (Şekil 2).

3. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, metalik maden aramalarında kullanılan jeofizik yöntemlerin ölçüm sistemlerinin geliştirilmesiyle daha hızlı ve yüksek çözünürlükte veriler elde edilebildiği gösterilmiştir. Özellikle, Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) ve Yapay Uyarma (YU) yöntemlerinin kuyu içi, tünel içi ve uzun elektrod dizilimleriyle birlikte uygulanması, metalik maden cevherlerinin üç boyutlu (3B) ters çözümü aracılığıyla çok daha ayrıntılı bir şekilde haritalanmasına olanak sağlamaktadır.

Kuyu içi DAÖ ve YU çalışmaları ile:

- Çok derin seviyelerde yer alan metalik cevher zonlarının belirlenmesini kolaylaştırmaktadır.
- Sondaj öncesinde detaylı bilgi sunarak, metalik cevher yapılar hakkında daha güvenilir sonuçlar vermektedir.
- Maden yatağının jeofizik özelliklerini daha doğru bir şekilde ortaya koyarak, maden rezervlerinin sınırlarını belirlemede büyük kolaylık sağlamaktadır.

3B ters çözüm uygulamalarının sağladığı katkılar:

- Metalik cevherin yatay ve düşey yönlerdeki dağılımını yüksek doğrulukla belirleyebilmektedir.
- Kuyu içi ve tünel içi uygulamalarla birleştirildiğinde, geleneksel yöntemlere kıyasla daha ayrıntılı modelleme yapılabilmektedir.

- Elektrot dizilimlerinin optimize edilmesiyle çözünürlük artırılmakta ve küçük ölçekli cevher zonları bile tespit edilebilmektedir.

Sonuç olarak, güncel jeofizik teknolojilerinin entegre kullanımı, metalik maden aramacılığında sondaj öncesi jeolojik bilgi sağlamada büyük avantajlar sunmaktadır. Bu yöntemler sayesinde, sondaj yerlerinin daha doğru bir şekilde belirlenmesi mümkün olmakta, bu da arama faaliyetlerinin maliyetlerini önemli ölçüde düşürmekte ve sondaj başarısını artırmaktadır. Bu araştırma, gelişmiş jeofizik yöntemlerin madencilik sektöründe daha yaygın olarak kullanılmasının, kaynakların daha verimli şekilde değerlendirilmesine katkı sağlayacağını ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Arıcan, C., & Candansayar, M. E., 2023. Tünel İçinde 3B Jeofizik Özdirenç Tomografi ile Cevher Araştırılması. 75. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özetleri Kitabı

Blanchy, G., Saneiyan, S., Boyd, J., McLachlan, P., & Binley, A., 2020. ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling. Computers & Geosciences, 137, 104423.

Candansayar, M. E., 2023. Maden Jeofiziği Araştırmalarında Son 20 Yıldaki Gelişmeler. 75. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özetleri Kitabı

Gündoğdu, N. Y., & Candansayar, M. E., 2018. Three-dimensional regularized inversion of DC resistivity data with different stabilizing functionals. Geophysics, 83(6), E399-E407.

Jiang, W., Brodie, R. C., Duan, J., Roach, I., Symington, N., Ray, A., & Goodwin, J., 2023. Probabilistic inversion of audio-frequency magnetotelluric data and application to cover thickness estimation for mineral exploration in Australia. Journal of Applied Geophysics, 208, 104869.

Mörbe, W., Yogeshwar, P., Tezkan, B., Kotowski, P., Thiede, A., Steuer, A., & Becken, M., 2024. Large-scale 3D inversion of semi-airborne electromagnetic data-topography and induced polarization effects in a graphite exploration scenario. Geophysics, 89(5), 1-54.

Nabighian, M. N., & Asten, M. W., 2002. Metalliferous mining geophysics—State of the art in the last decade of the 20th century and the beginning of the new millennium. Geophysics, 67.3, 964-978.

Nazari, S., Rochlitz, R., & Günther, T., 2023. Optimizing semi-airborne electromagnetic survey design for mineral exploration. Minerals, 13(6), 796.

Vallee, M. A., Smith, R. S., & Keating, P., 2011. Metalliferous mining geophysics—State of the art after a decade in the new millennium. Geophysics, 76(4), W31-W50.

Wang, H., Liu, J., Guo, W., & Tian, S., 2023. A surface-tunnel frequency domain electromagnetic method for mineral exploration in Tajikistan area. Frontiers in Energy Research, 11, 1247346.

Yang, B., Zhang, A., Zhang, S., Liu, Y., Zhang, S., Li, Y., & Wang, Q., 2016. Three-dimensional audio-frequency magnetotelluric imaging of Akebasitao granitic intrusions in Western Junggar, NW China. Journal of Applied Geophysics, 135, 288-296.

Yang, J., Liu, Y., & Wu, X., 2017. 3-D DC resistivity modelling with arbitrary long electrode sources using finite element method on unstructured grids. Geophysical Journal International, 211(2), 1162-1176.

Zhang, Y. Y., Liu, D. J., Ai, Q. H., & Qin, M. J., 2014. 3D modeling and inversion of the electrical resistivity tomography using steel cased boreholes as long electrodes. Journal of Applied Geophysics, 109, 292-300.

JEOFİZİK YAPAY UÇLAŞMA YÖNTEMİNDE ÇELİK ELEKTROT KULLANIMI: METALİK MADEN SAHASI ÖRNEĞİ

THE USE OF STEEL ELECTRODES IN INDUCED POLARIZATION METHOD: AN EXAMPLE OF METALLIC MINE DEPOSIT

N. Yıldırım Gündoğdu, İsmail Demirci, M. Emin Candansayar
Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Jeofizik Modelleme Grubu (GMG), Ankara

Cem Demirel
DSİ Genel Müdürlüğü

Emin Pişkin
TMMOB JFMO Adana Şubesi

ÖZ: Jeofizik yapay uçlaşma yönteminde yer altının yüklenebilirlik dağılımı belirlenmektedir. Yapay uçlaşma çalışmalarında genellikle çok düşük genlikte gerilim farkları ölçülmekte; belirli bir süre akım uygulandıktan sonra akımın kesildiği anda belirli bir süre ölçüm yapılmaktadır ve yöntemin temeli gereği polarize olmayan elektrotlar (pot) kullanılmaktadır. Çok elektrotlu ölçü sistemleri ile yapılan jeofizik yapay uçlaşma çalışmalarında hedeflenen araştırma derinliğine bağlı olarak serim boyu artmakta ve onlarca pot kullanılmaktadır. Bu durum hem maliyeti arttırmakta hem de arazi çalışmalarında zaman kaybına neden olmaktadır. Bu çalışmada çok elektrotlu yapay uçlaşma ölçü sistemleri ile yapılan veri toplama çalışmalarında polarize olmayan elektrot ve çelik elektrot kullanımı karşılaştırılmıştır. Metalik bir maden sahasında yapılan çalışmalarda geniş ve dar yüzeyli polarize olmayan elektrotlar ve çelik elektrotlar kullanılarak farklı ölçüm zamanları kullanılarak yapay uçlaşma verileri (görünür yüklenebilirlik) toplanmıştır. Bu veriler yapay uçlaşma azalım eğrileri ve yapma kesitler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca ölçülen tüm veriler 2B ters çözüm algoritması ile değerlendirilerek yüklenebilirlik modelleri elde edilmiş ve hedef yapının yerinin modellerdeki görünürlüğü tartışılmıştır. Çalışmada ulaşılan tüm sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde çok elektrotlu ölçü sistemleri ile yapılan yapay uçlaşma çalışmalarında çelik elektrot kullanılabilirliği ortaya konulmuştur. Yapay uçlaşma ölçümlerinde

çelik elektrot kullanımı arazi çalışmalarının maliyet ve zamanını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Uçlaşma, Polarize Olmayan Elektrot, Çelik Elektrot

ABSTRACT: *In the induced polarization (IP) method, the chargeability distribution of the underground is determined. In IP studies, measured voltage differences are usually low. After applying the current during a certain time, the measurement is performed during a certain time when the current is cut off and non-polarized electrodes (pot) are used as the basis of the method. The IP studies performed with multi-electrode measurement systems, the profile length increases and tens of pots are used depending on the target investigation depth. This situation both increases the cost and causes loss of time in field studies. In this study, the use of non-polarized electrodes and steel electrodes was compared in data acquisition studies with multi-electrode measurement systems. The IP data (apparent chargeability) was measured using different measurement times using wide and narrow surface non-polarized electrodes and steel electrodes in a metallic deposit site. These data are compared with IP decay curves and pseudosections. In addition, all measured data were evaluated with the 2D inversion algorithm, and chargeability models were obtained and the visibility of the location of the target structure in the models was discussed. When all the results obtained in the study are evaluated together, the usability of steel electrodes in IP studies performed with multi-electrode measurement systems has been revealed. The use of steel electrodes in IP measurements significantly reduces the cost and time of field studies.*

Keywords: *Induced Polarization, Non-Polarizable Electrode, Steel Electrode*

1. GİRİŞ

Yapay Uçlaşma (IP) yöntemi, yüklenebilirlik parametrelerini kullanarak yeraltı görüntülemesinin yapıldığı jeofizik elektrik yöntemlerden bir tanesidir. IP yöntemi, yer altı suyu araştırmaları (Dahlin vd., 2002, Fiadanca vd., 2013), çevre ve mühendislik çalışmaları (Slater ve Lesmes 2002, Gazoty

vd., 2012) ve metalik maden yataklarının araştırılması (Sumner 1976, Ward 1990, Siegel vd., 2007) gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır.

Bu yöntemde iki tür gerilim farkı ölçülür. Birincisi, akım yer altına uygulanırken ölçülen doğru akım gerilimidir. İkincisi ise akım kesildikten sonraki gerilim azalmasıdır. Bu ikinci gerilim genellikle çok zayıftır ve bu değerler doğru akım geriliminden çok daha düşüktür (Dahlin 2000). Bu nedenle yüklenebilirlik değerlerinin elde edilmesi bu yöntemdeki temel sorundur. Zayıf ikinci gerilimi uygun şekilde ölçmek için polarize olmayan elektrotlar kullanılır. Günümüzde IP yönteminde veri toplama çoğunlukla çok elektrotlu ve çok kanallı ölçüm sistemleri kullanılarak sondaj-profil ölçü tekniği ile gerçekleştirilmektedir. Bu ölçüm sisteminde çok sayıda polarize olmayan elektrot kullanımı gerekmektedir. Çok sayıda polarize olmayan elektrot kullanımı maliyeti artırmakta ve ölçüm sisteminin hızlı veri toplama avantajını kaybettirmektedir.

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen sorunların üstesinden gelmek için çok elektrotlu ve çok kanallı sistemler kullanılarak IP yönteminde paslanmaz çelik elektrotların kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla, metalik bir maden yatağı sahasında bir profil boyunca paslanmaz çelik ve polarize olmayan elektrotlarla IP verileri toplanmıştır. AGI marka SuperSting R8/IP ölçüm sistemi kullanılmıştır. İki tip Cu-CuSO4 polarize olmayan elektrot ince ve geniş yüzeyli olarak test edilmiştir. Toplanan tüm veriler IP azalım eğrileri, görünür özdirenç ve görünür yüklenebilirlik yapma kesitleri ve yer altı modelleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

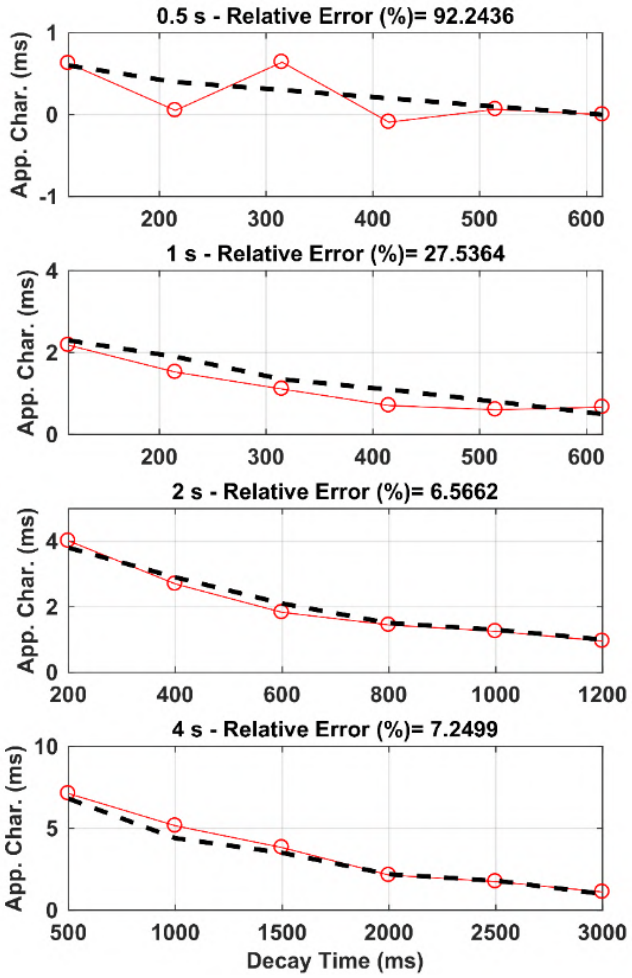
Bu çalışmada, paslanmaz çelik ve polarize olmayan elektrotları karşılaştırmak için iyi bilinen bir metalik maden yatağı üzerinde bir profil

boyunca sondaj-profil ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Her 5 m'de bir 56 paslanmaz çelik akım elektrodu ve 56 polarize olmayan elektrot olmak üzere toplam 112 pasif elektrot yerleştirilmiştir. 25 m ve 50 m elektrot aralıklı dipol-dipol elektrot dizilimi kullanılmıştır. Toplam 211 görünür özdirenç ve 211 görünür yüklenebilirlik verisi 8 seviyede toplanmıştır.

Paslanmaz çelik ve polarize olmayan elektrotlar için veri toplamak üzere aynı komutlar kullanılmıştır. Başka bir deyişle, akım elektrotları ve gerilim elektrotları karşılaştırma yapmak amacıyla her iki tip ölçüm için de aynı seçilmiştir. Bir ölçüm noktasındaki akım elektrodunun birkaç ardışık ölçümde gerilim elektrodu olarak kullanılması, ölçülen veriler üzerinde elektrokimyasal yük akışı nedeniyle bozucu bir etkiye neden olur. Bu etkiyi bastırmak için artı-eksi-artı kullanılarak akım uygulanır ve ayrıca elektrotların ardışık kullanımını önlemek için ölçüm komutları düzenlenebilir (Dahlin 2000). Yapay uçlaşma ölçümünde gerilim farkı çok daha küçük olduğundan, akımın açılıp kapanma zaman döngüleri önemli hale gelmektedir. Bunların etkisini anlamak için paslanmaz çelik elektrotlarla farklı zaman döngüleri için ölçümler alınmıştır (0.5 sn, 1sn, 2sn, 4 sn). Gerilim farklarının ölçümünde altı zaman aralığı kullanılmıştır.

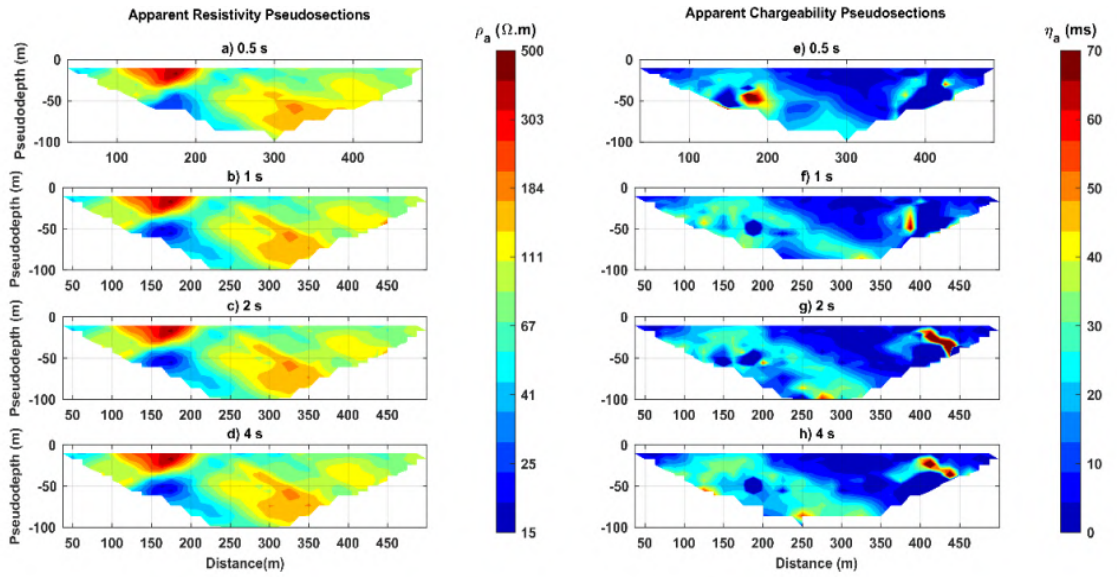
3. BULGULAR

Paslanmaz çelik elektrodun ölçüm azalım eğrileri ve logaritmik regresyon kullanılarak hesaplanan eğriler farklı zaman döngüleri için Şekil 1'de gösterilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan azalım eğrileri arasındaki bağıl hatalar her bir şekil başlığında verilmiştir. 0.5 s'lik ölçümün bağıl hatası 2 s ve 4 s'lik ölçümlerden daha yüksektir. Bunun nedeni, elektrokimyasal yük akışının ölçüm noktasında kısa süre için dengeye ulaşmamasıdır. Ayrıca, 2 s ve 4 s ölçümlerinin bağıl hataları birbirine çok yakındır.

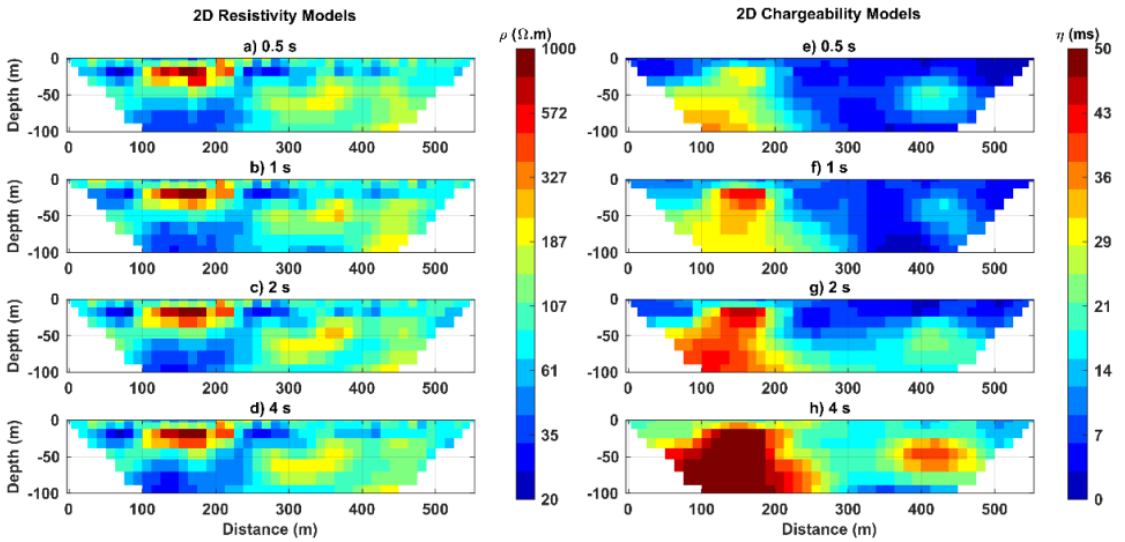


Şekil 1. Paslanmaz çelik elektrot durumunda 0,5 s, 1 s ve 4 s ölçüm süreleri için ölçülen (kırmızı çizgi) ve hesaplanan (siyah çizgi) azalım eğrileri

AGI EarthImager2D ters çözüm programı kullanılarak elde edilen görünür özdirenç ve yüklenebilirlik yapma kesitleri ile yer altı özdirenç ve yüklenebilirlik modelleri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te görülmektedir. Özdirenç modelleri arasında herhangi bir farklılık yoktur. Öte yandan, yüklenebilirlik modelleri birbirinden farklıdır. Zayıf anomali 0.5 s ve 1 s yeraltı modellerinde bilinen bir metalik madenin olduğu yerde görülmektedir. 2 s ve 4 s yeraltı modellerinde bu anomali daha belirgindir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, 4 s zaman döngüsü seçildiğinde ölçüm süresi oldukça uzun olduğundan, farklı elektrot türlerinin karşılaştırılması 2 s zaman döngüsü kullanılarak yapılmıştır.



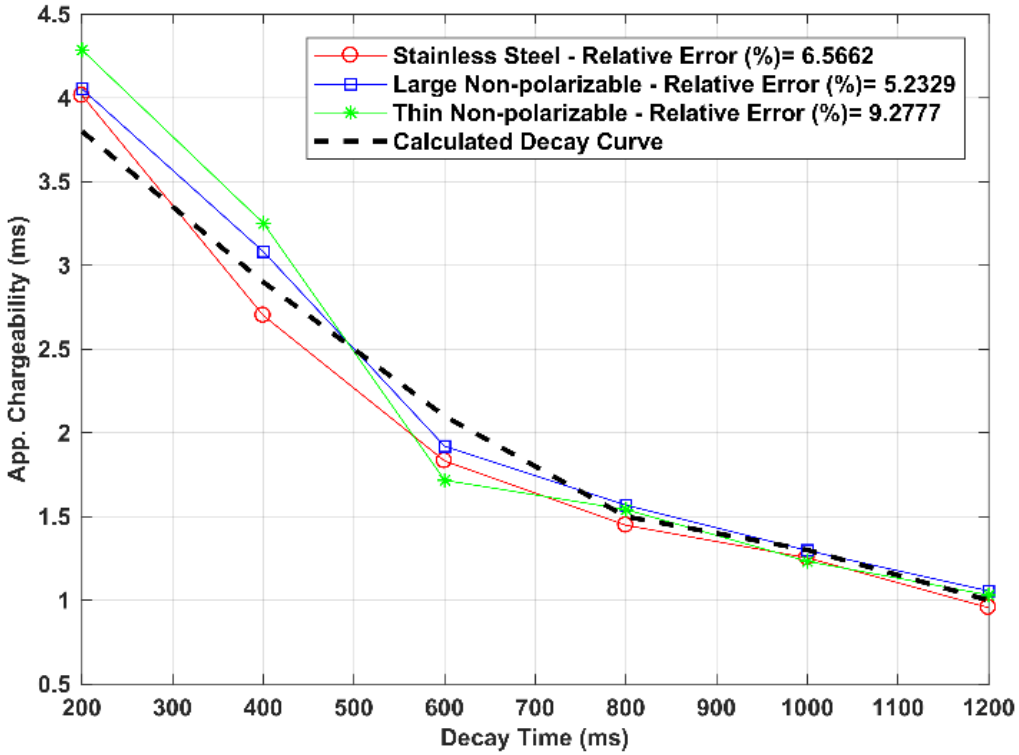
Şekil 2. Paslanmaz çelik elektrot durumunda 0.5 s, 1 s, 2 s ve 4 s ölçüm süreleri için görünür özdirenç (sol tarafta) ve görünür yüklenebilirlik (sağ tarafta) sözde kesitleri



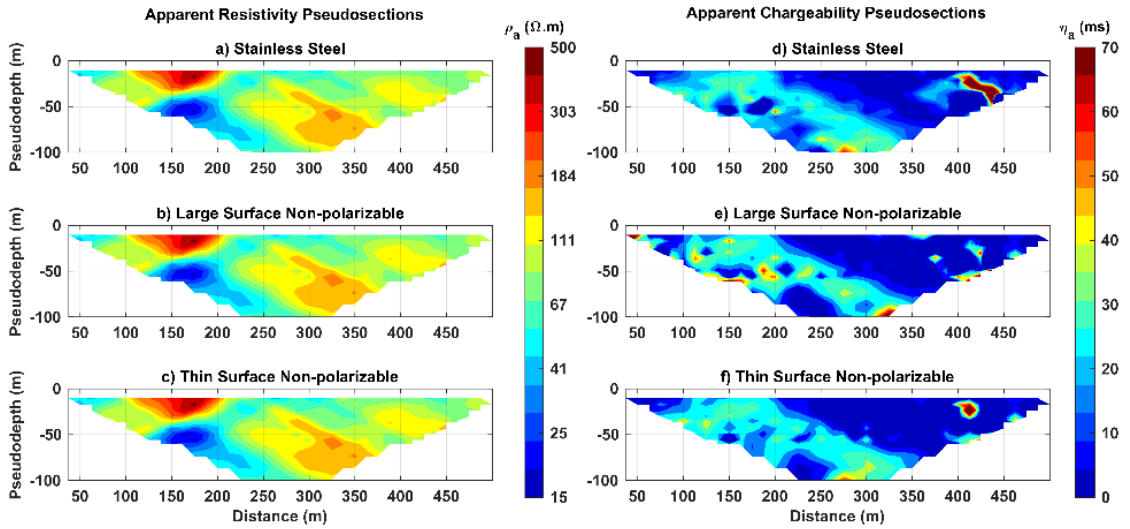
Şekil 3. Paslanmaz çelik elektrot durumunda 0.5 s, 1 s, 2 s ve 4 s ölçüm süreleri için 2D özdirenç (sol tarafta) ve 2D yüklenebilirlik (sağ tarafta) modelleri

Paslanmaz çelik, ince ve geniş yüzeyli polarize olmayan elektrotların azalım eğrileri ve hesaplanan eğriler tek ölçüm noktası için Şekil 4'te verilmiştir (A=175 m, B= 150 m, M=275 m, N= 300 m). İnce yüzeyli elektrotun bağıl hatası paslanmaz çelik ve geniş yüzeyli polarize olmayan

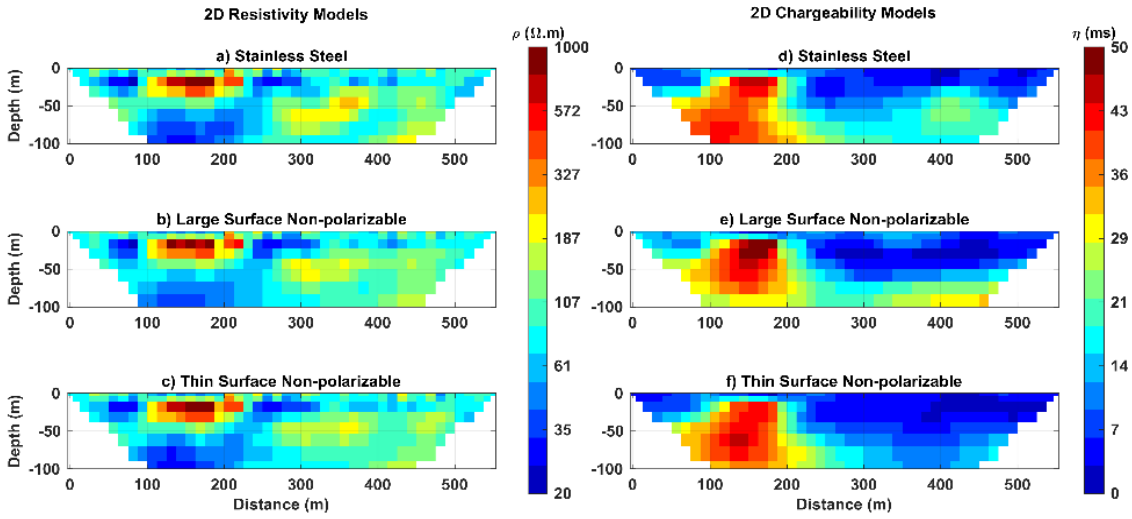
elektrotlardan daha yüksektir. Farklı tip elektrotların tüm yapma kesitleri ve yer altı modelleri sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 4. Paslanmaz çelik, ince ve geniş yüzeyli polarize olmayan elektrotlar için ölçülen (kırmızı çizgi) ve hesaplanan (siyah çizgi) azalım eğrileri



Şekil 5. Paslanmaz çelik, ince ve geniş yüzeyli polarize olmayan elektrotlar için görünür özdirenç (sol tarafta) ve görünür yüklenebilirlik (sağ tarafta) sözde kesitleri



Şekil 6. Paslanmaz çelik, ince ve geniş yüzeyli polarize olmayan elektrotlar için 2D özdirenç (sol tarafta) ve 2D yüklenebilirlik (sağ tarafta) modelleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada çok elektrotlu-kanalı özdirenç/yapay uçlaşma ölçüm sistemleri kullanılarak metalik maden aramalarında paslanmaz çelik ve polarize olmayan elektrotların kullanımı karşılaştırılmıştır. Paslanmaz çelik elektrotlarla IP ölçümünün zaman döngüsü de incelenmiştir. Azalım eğrileri, yapma kesitler ve yer altı modelleri karşılaştırmalar için kullanılmıştır. Sonuçlar, yüksek ölçüm doğruluğuna sahip çok elektrotlu-kanallı sistemlerinin kullanılması durumunda, saha uygulaması daha zor ve daha maliyetli olan polarize olmayan elektrotlar yerine paslanmaz çelik elektrotların tercih edilebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

Dahlin, T., 2002. Electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multielectrode arrays. Geophysical Prospecting, 48, 181-187.

Dahlin, T., Leroux, V., & Nissen, J., 2002. Measuring techniques in induced polarisation imaging. J. Appl. Geophys., 50, 279-298.

Fiandaca, G., Ramm, J., Binley, A., Gazoty, A., Christiansen, A.V. & Auken E., 2013. Resolving spectral information from time domain induced polarization data through 2-D inversion. Geophys. J. Int., 192, 631-646.

Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E.& Christiansen, A. V., 2012. Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. Near Surf. Geophys., 10, 575-586.

Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D.S. & Vozoff, K. 2007. The early history of the induced polarization method. Lead. Edge, 26 (3), 312-321.

Slater, L.D. & Lesmes, D., 2002. IP interpretation in environmental investigations. Geophysics, 67, 77-88.

Sumner, J. S., 1976. Principles of ınduced polarization for geophysical exploration. Elsevier, Amsterdam.

Ward, S. H., 1990. Resistivity and induced polarization methods. Geotechnical and Environmental Geophysics, 1, 147-189.

DÜNYADA VE TÜRKİYEDE ALTIN MADENCİLİĞİ İLE İLGİLİ ÖNEMLİ DAVALAR

IMPORTANT CASES RELATED TO GOLD MINING IN THE WORLD AND IN TÜRKİYE

Ömer Günay
Maden Mühendisi, Hukukcu

ÖZ: Modern altın üretimi için devasa miktarda kayanın öğütülmesi, çeşitli kimyasalların kullanılarak işlenmesi ve büyük enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu durum, altın madenciliğinin çevreye olan etkilerini arttırmakta, madenciliğin neden olduğu çevresel sorunlar ve kirlilik en büyük kaygılar arasında yer almaktadır. Tüm bu etmenler, özellikle yerel halk tarafından ciddi tepkilere yol açmakta ve altın madenciliği projeleri, halkın direnişiyle en fazla karşılaşan projeler arasında bulunmaktadır.Bu yazıda , çevre koruma ile ekonomik gelişim arasında bir denge kurulmasının yolları araştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Altın Madenciliği, Çevre Kirliliği, İnsan Hakları, Çevre Koruma, Altın Madenciliğinin Dengelenmesi

ABSTRACT: *Modern gold production requires the grinding of massive amounts of rock, the processing with various chemicals, and significant energy consumption. This increases the environmental impacts of gold mining, and the environmental issues and pollution caused by mining are among the greatest concerns. All these factors lead to serious reactions from the local population, and gold mining projects are among the projects that encounter the most resistance from the public. This article explores ways to establish a balance between environmental protection and economic development.*

Keywords: *Gold Mining, Environmental Pollution, Human Rights, Environmental Protection, Balancing Gold Mining*

1. GİRİŞ

Altın madeni, dünya üzerinde ilk olarak üretilen madenlerden biri olarak bilinir ve insanlık tarihi boyunca temel bir değer taşıdığı kabul edilmektedir.

İlkçağlardan bu yana altın, çeşitli medeniyetler için hem estetik hem de ekonomik bir kaynağı temsil etmiştir.

Ancak, geçmişte altın elde etme yöntemleri oldukça basitti; insanlar genellikle nabit halde bulunan altınları doğadan toplayarak veya su akışlarındaki altın parçalarını toplayarak ihtiyaçlarını gideriyorlardı. Günümüzde ise altın madenciliği, büyük ölçekli ve oldukça karmaşık süreçler gerektiren bir endüstri haline gelmiştir. Modern altın üretimi için devasa miktarda kayanın öğütülmesi, çeşitli kimyasalların kullanılarak işlenmesi ve büyük enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu durum, altın madenciliğinin çevreye olan etkilerini arttırmakta, madenciliğin neden olduğu çevresel sorunlar ve kirlilik en büyük kaygılar arasında yer almaktadır. Tüm bu etmenler, özellikle yerel halk tarafından ciddi tepkilere yol açmakta ve altın madenciliği projeleri, halkın direnişiyle en fazla karşılaşan projeler arasında bulunmakta ve pek çok dava ile karşı karşıya kalmaktadır.

Bu çalışmada dünya ve Türkiye'de önemli altın madenleri ile ilgili davalar irdelenmiş ve dava sonuçları değerlendirilmiştir.

2. ALTIN MADENLERİ İLE İLGİLİ DAVALAR

2.1. Türkiye'den Altın Madeni Davası Örnekleri

Türkiye'de Bergama Altın Madeni Davası, çevre hukuku ve kamu yararı konularında önemli ve sembolik bir dava olarak değerlendirilmektedir. Bu dava, altın madeni projelerinin çevresel etkileri, kamu yönetiminin karar alma süreçleri ve temel insan hakları gibi birçok konuda derin hukuki tartışmalara ve kaygılara yol açmıştır.

2.1.1. *Bergama altın madeni davası'nın detaylı bir analizi*

Davacılar: Davacılar, projeden doğrudan etkilenecek olan Bergama halkı, çevre örgütleri ve çeşitli sivil toplum kuruluşlarıdır.

Davalılar: Davalı taraf, Eurogold Madencilik şirketi olmakla birlikte, projeyi onaylayan devlet kurumları da dava sürecinin önemli bir parçasını oluşturmuştur.

Hukuki Dayanaklar: Dava, çevre hukuku kapsamındaki çeşitli yasalar ve düzenlemelere dayanarak yapılmıştır. Özellikle Çevre Kanunu ve Maden Kanunu gibi yasalar, bu hukuki sürecin temel basamakları arasında yer almaktadır. Ayrıca, Anayasa'nın 56. maddesi, sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkını güvence altına alarak davacıların argümanlarını güçlendirmiştir. İdarenin kamu yararı ilkesine uygun hareket etme yükümlülüğü de davanın önemli bir hukuki çerçevesini sağlamaktadır.

2.1.1.1. *Mahkeme kararları*

İlk Kararlar: İdare mahkemeleri, projenin çevresel etkilerini dikkate alarak detaylı bir inceleme yapmış ve bu bağlamda projenin durdurulmasına karar vermiştir. Bu karar, çevresel etkilere karşı gösterilen önemin ve duyarlılığın bir göstergesi olarak ön plana çıkmıştır.

Danıştay Kararı: Daha sonra Danıştay, projenin çevresel riskler taşıdığını ve kamu yararı ilkesine aykırı olduğunu belirterek, projenin iptal edilmesi yönünde bir karar almıştır. Bu karar, kamu sağlığı ve çevre koruması açısından güçlü bir mesaj niteliği taşımaktadır.

Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi (AİHM): Bergama halkı, Türkiye'deki yargı süreçlerinin ardından AİHM'ye başvurarak uluslararası hukuk çerçevesinde hak arama yoluna gitmiştir. AİHM, Türkiye'nin çevre hakkını ihlal ettiğine hükmederek tazminat ödenmesine karar vermiştir. AİHM'nin

kararı, Türkiye'de çevre haklarının korunmasına yönelik önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur.

2.1.1.2. *Hukuki tartışmalar*

Çevre Hakkı ve Ekonomik Fayda: Davada, çevre hakkı ile ekonomik kalkınma arasındaki denge derinlemesine incelenmiş ve tartışılmıştır. Mahkemeler, çevre hakkının öncelikli olduğuna vurgu yaparak, bu hakların korunmasının uzun vadede ekonomik kalkınmayı destekleyeceği sonucuna varmışlardır.

İdarenin Takdir Yetkisi: İdarenin projeyi onaylarken çevresel etkileri yeterince değerlendirip değerlendirmediği, davada önemli bir sorgulama konusu olmuştur.

Siyanür Kullanımının Riskleri: Siyanür liçi yönteminin çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri, dava sürecinde sıkça gündeme gelmiş ve bu konu önemli bir tartışma unsuru haline gelmiştir.

2.1.1.3. *Değerlendirme*

Çevre hukukunun önemi: Bergama Davası, çevre hukuku alanında önemli bir dönüm noktası olarak kabul edildi ve bu dava, çevre hukukun iktisadi çıkarların önüne geçme kapasitesini gözler önüne serdi. Bu durum, çevre koruma ile ekonomik gelişim arasında bir denge kurulmasının mümkün olduğunu gösterdi. Özetle, çevre hukuku, doğal kaynakların korunması ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Yerel halkın rolü: Bergama Davası sürecinde, yerel halkın ve sivil toplum kuruluşlarının aktif ve belirgin rolü, çevre mücadelesinde toplumsal katılımın ne kadar hayati bir öneme sahip olduğunu bir kez daha kanıtladı. Yerel toplulukların seslerinin duyulması, çevresel karar alma süreçlerinde etki sahibi olmaları gerektiğini vurguladı. Bu durum, çevresel konulara dair

toplumun bilincinin artırılmasının ve katılımcı demokrasinin önemini de ortaya koydu.

Sürdürülebilir kalkınma: Dava, sürdürülebilir kalkınma ilkeleriyle çevrenin korunması arasındaki dengenin nasıl sağlanabileceğine dair oldukça önemli bir örnek teşkil etti. Bu süreç, ekonomik büyüme ile ekolojik denge arasında nasıl bir uyum oluşturulabileceğini göstermekteydi. Sonuç olarak, Bergama Davası, çevre koruma ile ekonomik kalkınma arasındaki ilişkiyi anlama konusunda kayda değer bir model olarak değerlendirilmektedir.

Bergama davasının Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi (AİHM) ile bağlantılı olan unsurları, dikkat çeken bir dava olarak Taşkın davası olarak adlandırılmaktadır. Bu dava, çeşitli bireylerin haklarının ihlaline yönelik önemli bir durumu ortaya koymaktadır.

Genel Bilgiler: Ahmet Murat Taşkın ve diğer başvurucular, Türkiye'nin batısında yer alan Bergama bölgesinde, özellikle Ovacık çevresinde gerçekleştirilen altın madeni projesine karşı düzenlenen protesto gösterilerine aktif olarak katılım sağlamışlardır. Bu protestolar, çevresel sorunlara dikkat çekmek ve yerel halkın yaşam alanlarının korunmasını sağlamak amacıyla organize edilmiştir. Protesto esnasında, başvurucular polis müdahalesiyle karşılaşmış ve bazıları gözaltına alınmıştır. Başvurucular, Türk yetkililerinin demokratik bir hak olan protesto etme özgürlüğü ve ifade özgürlüğünü ihlal ettiğini iddia ederek Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi'ne başvurmuşlardır.

AİHM Değerlendirmesi: Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi, davayı incelerken Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi'nin 10. maddesi (ifade özgürlüğü) ve 11. maddesi (toplantı ve gösteri özgürlüğü) çerçevesinde değerlendirmiştir. Bu değerlendirme, demokratik bir toplumda bireylerin haklarının ne denli kıymetli olduğunu göstermektedir.

İfade Özgürlüğü (AİHS Madde 10): AİHM, başvuruculların gerçekleştirdikleri protesto eylemlerinin ifade özgürlüğü kapsamında ele alınacağını belirtmiştir. Yapılan protestoların barışçıl bir tarzda gerçekleştirildiği ve bu eylemlerin, demokratik bir toplumda ifade özgürlüğünün meşru bir kullanımı olarak tanımlandığı ifade edilmiştir. Mahkeme, Türk makamlarının bu noktada yaptığı müdahalelerin, demokratik bir toplumda kabul edilebilir ölçüde orantısız ve gereksiz olduğuna hükmederek başvuruculların ifade özgürlüğünün açıkça ihlal edildiği sonucuna varmıştır.

Toplantı ve Gösteri Özgürlüğü (AİHS Madde 11): AİHM, Türk yetkililerinin müdahalesi neticesinde başvuruculların toplantı ve gösteri özgürlüğünün de ihlal edildiğini tespit etmiştir. Gerçekleştirilen polis müdahalesinin, barışçıl ve demokratik bir protestoyu engellemeye yönelik olduğunu, bu nedenle orantısız bir güç kullanıldığını vurgulamıştır. Mahkeme, devletlerin toplantı özgürlüğünü kısıtlarken demokratik değerlere uygun hareket etmeleri gerektiğini belirtmiş ve bu tür müdahalelerin kabul edilemez olduğu sonucuna varmıştır.

Etkili Başvuru Yolu (AİHS Madde 13): AİHM, başvuruculların ulusal mahkemelerde etkili bir hukuki başvuru yolu bulamadığını, dolayısıyla haklarının yeterince korunmadığını tespit etmiştir. Türk mahkemeleri, başvuruculların haklarının güvence altına alınmasında yetersiz kalmış ve adil bir yargılama süreci sağlayamamıştır.

Sonuç: Sonuç olarak, Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi, Türkiye'nin AİHS'nin 10. ve 11. maddelerini ihlal ettiği yönünde kesin bir karar vermiştir. Bu karar sonucunda başvuruculara tazminat ödenmesine hükmedilmiştir. Bahse konu karar, ifade ve toplanma özgürlüğü gibi temel hakların korunmasının önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir.

Kararın Önemi: Bu karar, özellikle çevresel protestoların ifade özgürlüğü ve toplantı özgürlüğü kapsamında korunması gerektiğini vurgulayan önemli bir emsal teşkil etmiştir. AİHM, devletlerin protesto hakkını kısıtlarken orantılı davranması gerektiğini ve barışçıl protestoların demokratik bir toplumun vazgeçilmez bir unsuru olduğunu belirtmiştir.

2.2. Dünya'dan Altın Madeni Davası Örnekleri

Dünya genelinde altın madenciliği, çevresel etkileri, insan hakları ihlalleri ve yerel topluluklar üzerindeki sosyo-ekonomik etkileri nedeniyle sık sık hukuki tartışmalara ve davalara konu olmaktadır. Bu davalar, genellikle çevre hukuku, insan hakları hukuku ve mülkiyet hakları gibi alanlarda yoğunlaşır. İşte dünyadan önemli altın madenciliği davalarına ilişkin bazı örnekler aşağıdaki alt başlıklarda sunulmuştur.

2.2.1. *Roşia Montană Davası (Romanya)*

Roşia Montană, Romanya'nın batısındaki Apuseni Dağları'nda yer alan ve zengin altın rezervleriyle bilinen tarihi bir bölgedir. 2000 yılında Kanadalı Gabriel Resources şirketi, burada Avrupa'nın en büyük açık ocak altın madeni projesini başlatmayı planladı. Bu proje, siyanür liçi yöntemi kullanarak yılda yaklaşık 500 ton altın ve 1.600 ton gümüş çıkarmayı hedefliyordu. Ancak projenin çevresel ve kültürel mirasa olası zararları nedeniyle geniş çaplı protestolar ve hukuki süreçler başlatıldı.

Projenin Tartışmalı Yönleri

- Çevresel Endişeler: Siyanür liçi yöntemi, büyük miktarda siyanür kullanımını içerdiğinden, su kaynaklarının ve toprağın kirlenmesi riski bulunmaktadır. Ayrıca, projenin gerçekleştirilmesi durumunda dört dağın yok edilmesi ve geniş çaplı ormansızlaşma söz konusu olacaktır.

- Kültürel Mirasın Tehlikeye Girmesi: Roşia Montană, Roma dönemine kadar uzanan tarihi yapıları ve arkeolojik alanlarıyla tanınmaktadır. Madencilik projesi, bu değerli mirasın tahrip olma riskini beraberinde getirmiştir.

Protestolar ve Hukuki Süreçler: 2013 yılında, Romanya'nın başkenti Bükreş başta olmak üzere birçok şehirde on binlerce insanın katıldığı protestolar düzenlendi. Göstericiler, projenin iptal edilmesini ve çevrenin korunmasını talep ettiler. Bu kitlesel hareketler sonucunda, Romanya hükümeti projeyi askıya aldı ve bölgenin UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne alınması için girişimlerde bulundu (The Guardian, 2017; Balkan Insight, 2021).

Uluslararası Tahkim ve Sonuç: Projenin iptali üzerine, Gabriel Resources şirketi 2015 yılında Romanya aleyhine uluslararası tahkim davası açarak 4,4 milyar dolarlık tazminat talebinde bulundu. Ancak, 2022 yılında Dünya Bankası'nın Uluslararası Yatırım Anlaşmazlıkları Çözüm Merkezi (ICSID), Romanya lehine karar vererek şirketin tazminat talebini reddetti. Bu karar, çevresel ve kültürel mirasın korunması adına önemli bir emsal teşkil etmektedir.

Roşia Montană davası, ekonomik çıkarlar ile çevresel ve kültürel değerlerin korunması arasındaki dengenin sağlanması konusunda uluslararası alanda dikkat çeken bir örnek olmuştur.

2.2.2. *Pascua-Lama davası (Şili ve Arjantin)*

Proje, Pascua-Lama, Şili ve Arjantin sınırında bulunan bir altın madeni projesiydi (Reuters, 2013).

Tartışma: Proje, buzulların erimesine, su kaynaklarının kirlenmesine ve yerel toplulukların yaşam koşullarının bozulmasına neden olacağı gerekçesiyle eleştirildi.

Dava: Yerel halk ve çevre örgütleri, projenin çevresel etkilerini durdurmak için mahkemelere başvurdu. Şili mahkemeleri, projeyi çevresel ihlaller nedeniyle 2018 yılında askıya aldı.

Sonuç: Proje, çevresel riskler nedeniyle durduruldu ve şirket tazminat ödemeye mahkûm edildi.

2.2.3. O*k Tedi madeni davası (Papua Yeni Gine)*

Proje; Ok Tedi altın ve bakır madeni, Papua Yeni Gine'de faaliyet gösteriyordu (Ok Tedi Mine, 2002).

Tartışma: Maden atıkları, yerel nehir sistemlerini kirletti ve balık popülasyonlarını yok etti. Bu durum, yerel toplulukların geçim kaynaklarını ciddi şekilde etkiledi.

Dava: Yerel halk, maden şirketi BHP Billiton'a karşı dava açtı. Şirket, 1996 yılında tazminat ödemeyi kabul etti ve madenin çevresel etkilerini azaltmak için önlemler aldı.

Sonuç: Dava, çevresel tahribatın tazmin edilmesi açısından önemli bir emsal oluşturdu.

2.2.4. *Yanacocha madeni davası (Peru)*

Proje, Yanacocha, Güney Amerika'nın en büyük altın madenlerinden biridir (Fraser, 2009; Earthworks, 2011; Ejatlas, 2022).

Tartışma: Maden, su kaynaklarını kirletti ve yerel toplulukların sağlığını olumsuz etkiledi. Ayrıca, maden genişleme projeleri yerel halkın mülkiyet haklarını ihlal etti.

Dava: Yerel halk ve çevre örgütleri, maden şirketi Newmont'a karşı dava açtı. 2012 yılında, maden genişleme projesi halkın protestoları ve hukuki mücadeleler sonucunda durduruldu.

Sonuç: Proje, yerel halkın direnişi ve hukuki süreçler nedeniyle iptal edildi.

2.2.5. *Grasberg madeni davası (Endonezya)*

Proje, Grasberg, dünyanın en büyük altın ve bakır madenlerinden biridir.

Tartışma: Maden, çevresel kirliliğe ve yerel halkın yaşam alanlarının tahrip edilmesine neden oldu. Ayrıca, maden çalışanlarının insan hakları ihlalleri de gündeme geldi.

Dava: Yerel halk ve insan hakları örgütleri, maden şirketi Freeport-McMoRan'a karşı dava açtı. Davalar, çevresel ihlaller ve insan hakları ihlalleri üzerine odaklandı.

Sonuç: Maden, faaliyetlerini sürdürse de, çevresel ve sosyal sorumluluk önlemleri almak zorunda kaldı.

2.2.6. *Cerrejón madeni davası (Kolombiya)*

Proje, Cerrejón, Kolombiya'daki büyük bir kömür ve altın madenidir (The Guardian, 2013).

Tartışma: Maden, yerel toplulukların yerinden edilmesine ve çevresel tahribata neden oldu.

Dava: Yerel halk, maden şirketine karşı dava açtı ve tazminat talep etti. Davalar, mülkiyet hakları ve çevresel ihlaller üzerine odaklandı.

Sonuç: Bazı davalarda tazminat ödenmesine karar verildi, ancak maden faaliyetleri devam etti.

3. SONUÇLAR

Bergama Davası ve alıntılanan diğer davalar çevre hakları alanında önemli bir dönüm noktası olarak kabul edildi ve bu davalar, çevre haklarının, ekonomik çıkarların önüne geçme kapasitesini gözler önüne serdi. Bu

durum, çevre koruma ile ekonomik gelişim arasında bir denge kurulmasının mümkün olduğunu gösterdi. Bilim ve teknolojinin gelişmesi altın madenciliğini devasa boyutlara getirirken ve buna karşılık çevrenin korunmasız kalması kabul görmedi.

Aynı zamanda her türlü yasal izin tamamlanmış olsa bile halkın onayı olmadan projelerin hayata geçmesi oldukça zor, kimi zamanlarda imkânsız oldu.

KAYNAKLAR

UNESCO, 2021. Rosia Montana Mining Landscape. https://whc.unesco.org/en/list/1552/documents/

The Guardian, 2017. The Guardian: Romania's Rosia Montana fails in bid for UNESCO world heritage status. https://www.theguardian.com/environment/2017/aug/31/romania-may-seek-to-pull-gold-mine-from-unesco-protected-list

Balkan Insight, 2021. Balkan Insight: Romania's Rosia Montana: From Mining Town to UNESCO Heritage Site, https://balkaninsight.com/2021/07/27/ancient-romanian-gold-mine-given-unesco-protection/

The Guardian, 2013. Al Jazeera: Colombia's Cerrejón mine: A dirty business. https://www.theguardian.com/sustainable-business/cerrejon-mine-colombia-human-rights

Ok Tedi Mine, 2002. ABC News: The environmental disaster that is the Ok Tedi mine. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://pdf.wri.org/wr2002_case_oktedi_papua.pdf

Fraser, B., 2009. Peruvian gold rush threatens health and the environment. Envıronmental Scıence & Technology 43, 7162–7164.

Earthworks, 2011.Yanacocha Gold Mine. https://earthworks.org/blog/yanacocha/

Ejatlas, 2022. Mining Watch Canada: Peru: Yanacocha Mine Expansion Faces Opposition. https://ejatlas.org/conflict/yanacocha-mine-peru

Reuters, 2013. BBC News: Chile court suspends Barrick Gold's Pascua-Lama mine. https://www.reuters.com/article/markets/commodities/chile-court-suspends-barricks-pascua-lama-project-idUSL2N0CX0II/

SİNKOT (ARTVİN) SAHASININ JEOLOJİSİ, CEVHERLEŞMESİ VE DOĞU KARADENİZ METALOJENİK KUŞAĞINDAKİ KONUMU

GEOLOGY, MINERALIZATION, AND POSITION OF THE SINKOT (ARTVIN) FIELD IN THE EASTERN BLACK SEA METALLOGENIC BELT

Ümit Aydın
MTA Doğu Akdeniz Bölge Müdürlüğü, Adana

Fatih Pekdemir
MAPEG, Ankara

Serdar Keskin
MTA Doğu Karadeniz Bölge Müdürlüğü, Trabzon

Tuna Öner
MTA Güneydoğu Anadolu Bölge Müdürlüğü, Diyarbakır

Leman Çetiner
ETKB Tabii Kaynaklar Dairesi Başkanlığı, Ankara

Saruhan Saklar
MTA Maden Analizleri ve Teknolojisi Daire Başkanlığı, Ankara

ÖZ: Kızılkaya Formasyonu içinde Geç Kretase yaşlı (82-91 Milyon yıl) dasit-dasitik tüfler içinde gözlenen Cu-Au-Pb-Zn cevherleşmelerinin oluşum şekli ve boyutu yeni maden yataklarının bulunmasında bir yol haritası gösterecektir. Bölgedeki bu tip maden yataklarının büyük bir kısmı derin deniz ortamında volkanik kayaçların baskın olduğu seriler içinde oluşmuştur. Geç Kretase yaşlı volkanik kayaçların egemen olduğu bu ortamdaki kayaçların yaygın olarak altere olmuş lav, lav breşi ve hiyaloklastik kayaçlar olduğu gözlenir. Sedimanter kayaçlar ise mikritik kireçtaşları, çamurtaşları ve sıcak su çökellerinden (veya eksalit) oluşur. VMS yatakları bölgedeki magmatik yayın gelişimi süresince oluşan volkanizmaya bağlı olarak ortaya çıkan riyolitik/dasitik domlara yakın kesimlerde oluşmuşlardır. Bu yataklardan Sinkot alterasyon sahasında oluşan mineralizasyon; çeşitli kırık ve kanallar boyunca yayılan hidrotermal çözeltilerin deniz tabanında masif, deniz tabanının hemen altında

dasitik/riyolitik yan kayaçların zayıflık zonlarına sızarak ağsal-saçınımlı (ştokvörk) ve damar/ mercek (sub-seafloor replacement) türde cevher fasiyeslerini oluşturduğu gözlenir. Piritçe zengin masif kısımlar yer yer Au ve Zn, nispeten Pb bakımından zengin iken, ağsal-saçınımlı kısımlarda ise genelde Cu bakımından zengin olduğu gözlenmiştir. Örtü kayaçlarla uyumlu bir ilişkiye sahip olan masif cevher kısımları (pirit>kalkopirit) genelde düzenli bir yataklanmaya sahiptir. Genelde masif gövdenin hemen altında yer almayan ağsal saçınımlı tip cevherleşmeler mercekler halinde yer almaktadır. Sahada yan kayaçlar ile uyumsuz bir ilişki sunan genelde Cu bakımından zengin damar ve mercekler şeklinde masif kısımlar da yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sinkot, VMS, Bakır, Doğu Karadeniz

ABSTRACT: *The Cu-Au-Pb-Zn mineralizations observed within the Late Cretaceous (82–91 Ma) dacite-dacitic tuffs of the Kızılkaya Formation provide a roadmap for discovering new ore deposits. Most of the ore deposits of this type in the region have formed within volcanic rock-dominated sequences in a deep-sea environment. The volcanic rocks of this Late Cretaceous setting predominantly consist of extensively altered lava, lava breccia, and hyaloclastic rocks. The sedimentary rocks, on the other hand, are composed of micritic limestones, mudstones, and hydrothermal exhalative deposits (or exhalites). VMS deposits have developed in association with volcanic activity during the evolution of the regional magmatic arc, forming in proximity to rhyolitic/dacitic domes. The mineralization observed in the Sinkot alteration zone is attributed to hydrothermal solutions migrating through various fractures and conduits, precipitating massive sulfide deposits on the seafloor and infiltrating the weakness zones of the underlying dacitic/rhyolitic host rocks to form stockwork and sub-seafloor replacement ore facies. The massive sulfide sections, which are rich in pyrite, exhibit enrichment in Au and Zn, while relatively containing higher Pb contents. In contrast, the stockwork-type mineralization is typically enriched in Cu. The massive ore bodies, which exhibit a conformable relationship with the overlying sedimentary cover (pyrite > chalcopyrite), generally display a well-stratified bedding. Stockwork-type mineralization, which is not always situated immediately beneath the massive body, occurs in the form of lenticular structures. Additionally, discordant massive ore bodies enriched in Cu, occurring as veins and lenses, are also present in the study area.*

Keywords*: Sinkot, VMS, Copper, Eastern Black Sea*

1. GİRİŞ

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı tarafından, Doğu Karadeniz Yay Mağmatitleri İle İlişkili Polimetal Maden Aramaları Projesi kapsamında Sinkot sahasının maden potansiyelinin ortaya çıkarılması için detaylı çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda 2017 yılında sahanın 1/2.000 ölçekli detay maden jeoloji haritası ve alterasyon haritası yapılmıştır. 2017 ve 2018 yıllarında sahanın cevher potansiyelinin ve rezervinin ortaya çıkarılması için toplam 93 adet 44.318,20 m. karotlu maden sondajı yapılmış, sondaj karotlarından toplamda 27.201 adet jeokimya örneği Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı laboratuvarlarına gönderilmiş ve analizleri yapılmıştır.

Sinkot (Artvin/Merkez) Köyü ve civarında yer alan ve yaklaşık 5 km^2 lik bir alanı kapsayan çalışma alanının en yaşlı birimini Santoniyen yaşlı asidik volkanizma ürünlerinden dasit, riyodasit, riyolit ve bunların piroklastları ile yer yer kırmızı çamurtaşı ve tüf seviyelerinden oluşan Kızılkaya formasyonu oluşturur. Birimin üst kesiminde çalışma sahasında (Sümbüllü) volkanizmanın duraksadığı dönemde bordo renkli mikritik kireçtaşları bu asidik volkanizma ürünleri üzerine tedrici geçişli olarak gelmiştir. Bu dönemden sonra yeni bir volkanik evre başlamış ve Geç Santoniyen-Geç Kampaniyen yaşlı, Çağlayan formasyonuna ait bazik-ortaç volkanizma ürünleri olan bazaltik, andezitik lav ve piroklastları ile bunlarla ara katkılı sedimanter litolojilerden oluşan kumtaşı, silttaşı, kiltaşı, mikritik kireçtaşı, çamurtaşı seviyeleri gelmiştir. Yay volkanizmaına bağlı bu asidik ve bazik volkanizmaya ait Kızılkaya ve Çağlayan formasyonları oluştuktan sonra yay ekseninin güneye gerilemesi ile daha önce yükselen yay bölgesi çökmüş, yeni bir transgresyonla bölge tekrardan denizel ortam halini almış

ve kaba kırıntılılardan oluşan Geç Maastrihtiyen yaşlı Ovacık formasyonu yay birimleri üzerine uyumsuz olarak çökelmiştir. Ovacık formasyonu genellikle kırmızı-bordo renkli konglomera, kumtaşı ve sarımsı renkli karbonatlardan oluşur. Doğu Pontidler ile Toridler'in, Selandiyen-Erken Tanesiyen zaman aralığında çarpışmasından sonra, gerilmeli tektonik rejim sonucu olarak denizel ortam koşulları egemen olmuş ve geç Tanesiyen-İpresiyen yaşlı Erenler formasyonu açısal uyumsuzlukla çökelmiştir (Kandemir vd., 2017). Erenler formasyonu uyumsuz olarak çoğunlukla türbiditik kırıntılı kayaçlardan oluşur. Çalışma alanında genellikle orta kaba taneli kumtaşı, konglomera ve olistostromal seviyelerden oluşmaktadır. Havza kenarı özelliğindeki bu bölgede çok sayıda bloklara rastlanılmaktadır.

Sinkot (Sümbüllü) alterasyon sahasındaki cevherleşme Üst Kretase yaşlı (Kızılkaya Formasyonu) dasitik volkanizma ile ilişkili olup; volkanojenik masif sülfid (VMS) tipte bir çevherleşmedir. Dissemine-ağsal, masif, breşik tipte cevherleşme; dasitlerin içinde ve üst seviyelerindeki tortul kayaçlar arasında yer almaktadır.

Çalışma alanları magmatik yay özelliğindeki Pontidler'in kuzey zonunda (Doğu Karadeniz Bölgesi'nde) yer almaktadır. Üst Kretase'de başlayan ve kuzeye doğru dalan Neotetis okyanusal plakasına bağlı gelişen denizaltı volkanizması ve sedimantasyonu sonucu litolojik birimler oluşmuştur. Doğu Karadeniz (Pontid) kuşağında yer alan VMS (Volkanojenik Masif Sülfit) yatakları; denizaltı volkanizması ve sedimantasyonunun tüm özelliklerini taşıması bakımından karakteristiktir. Özellikle pirit Cu-Au-Zn maden yatakları bakımından özel bir konuma sahip olan bu bölgede, gömülü yeni rezervlerin bulunması ülke madenciliği için ayrı bir öneme sahiptir.

Bu bildiri, 2017-2018 yılları arasında MTA Genel Müdürlüğüne ait AR: 201400301 No'lu ruhsat sahasında yer alan Sinkot (Sümbüllü)

alterasyon alanında yapılmış prospeksiyon, detay etüt ve sondajlı arama çalışmaları ile bunlara ilişkin sonuçları kapsamaktadır.

1.1. Çalışma Yöntemleri

Çalışma yöntemleri; arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve büro çalışmaları şeklinde 3 ana başlık altında toplanmıştır.

1.1.1. Arazi çalışmaları

Çalışma alanında arazi çalışmaları, prospeksiyon, detay maden jeoloji ve sondaj çalışmaları şeklinde gerçekleştirilmiştir.

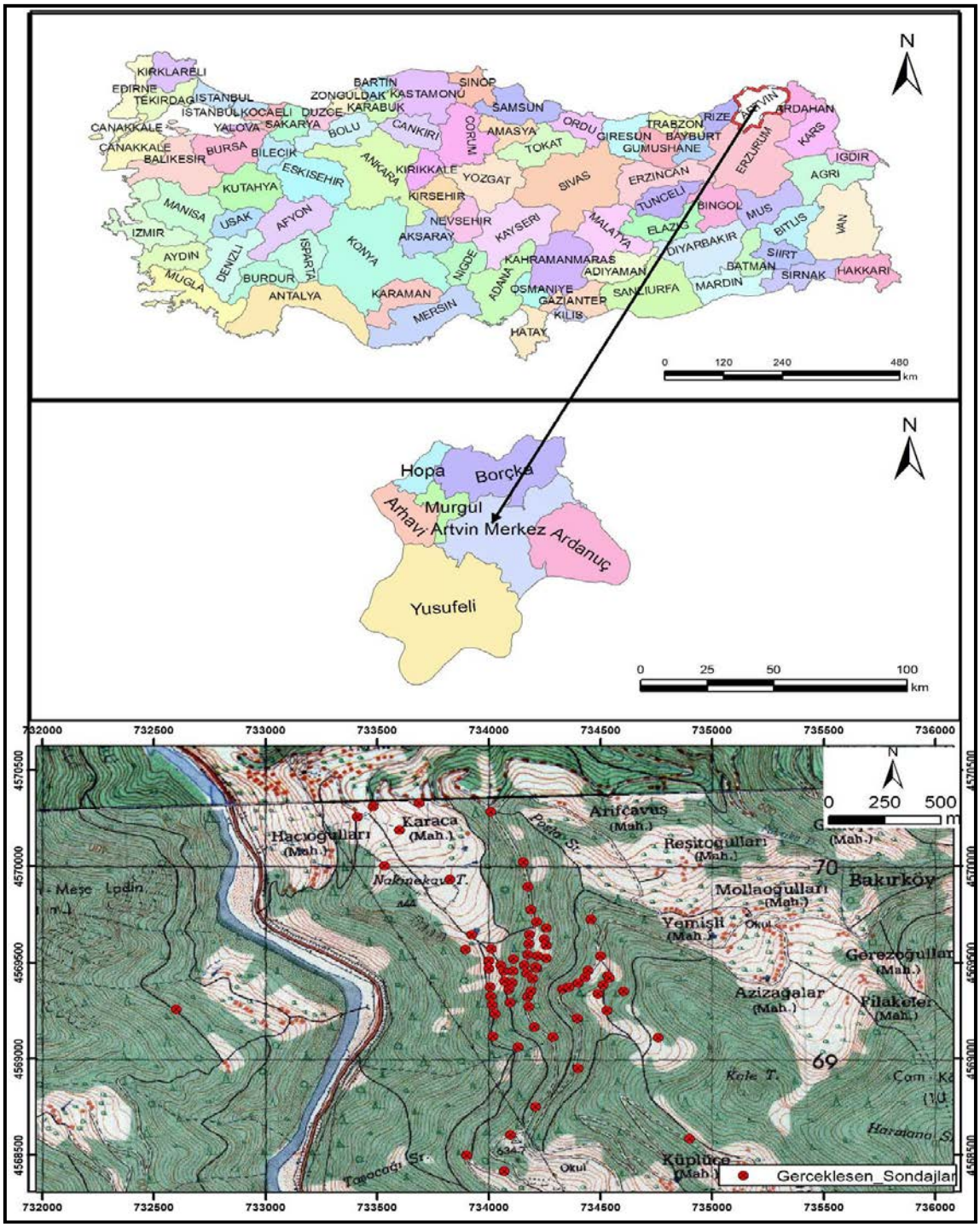
1.2.2. Laboratuvar ve depo çalışmaları

2017 ve 2018 yıllarında Sinkot sahasında yapılan sondajlardan alınan karotlar depolarda yarılama işlemine tabi tutulmuş ve tüm kuyuların determinasyonları yapılmıştır. Determinasyonları yapılan karotlar kırıcı makineler ile belirli boyutlara getirilmiş ve numune torbalarına koyulmuştur. Numuneler analiz için Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı laboratuvarlarında gönderilmiş ve analizleri yapılmıştır.

1.1.3. Coğrafya ve ulaşım

Ruhsat sahası Artvin ili, Sinkot (Sümbüllü) köyü sınırları içerisinde, Artvin F47-c1, F47-b4 paftalarında yer almaktadır. İnceleme sahası, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde, Artvin'in 8 km. kuzeybatısında, Sinkot (Sümbüllü) Köyü sınırları içinde bulunmaktadır. Ulaşım olarak, Artvin İline 12 km. yol mesafesinde yer almaktadır. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil-1'de verilmiştir.

Sahada yükseltiler 450 m. ile 800 m. arasında değişmektedir. Sahanın en yüksek kesimi Kale Tepe (734 m.) civarıdır. Çalışma alanının yaklaşık 500 metre batısında Çoruh Nehri yer almaktadır.



Şekil 1. Sinkot (Sümbüllü) ruhsat sahası yerbulduru haritası

2. JEOLOJİ

2.1. Bölgesel Jeoloji

Çalışma alanını bölgesel jeolojisi Kandemir vd., (2017) raporundan alınmıştır. En yaygın litoloji topluluğu, Geç Kretase birimleridir. Geç Kretase öncesi birimler "Temel Birimler" adı altında ele alınmıştır. Bu başlık altında Artvin granitoyidi, Yalnızçamtepe volkaniti, Narlık grubu, Öğdem formasyonu ve Aşağımaden formasyonu yer alır.

Geç Kretase dönemi Doğu Pontidler'de geniş alanlar kaplayan yay magmatizması ürünlerinin geliştiği bir dönemdir. Bu dönem çoğunlukla olgun yay dönemi olarak tanımlanmıştır (Konak vd., 2001). Geç Kretase'den başlayan bu bölüm ***"Geç Kretase Doğu Pontid Yay Birimleri"***, ***"Yay-içi Örtü Birimleri"***, ***"Yay-ardı Havza Birimleri"*** ve ***"Çarpışma Sonrası Birimler"*** olarak değerlendirilmiştir. "Geç Kretase Doğu Pontid Yay Birimleri"; Çatak formasyonu, Kızılkaya formasyonu, Sakalar volkaniti, Çağlayan formasyonu, Çayırbağ formasyonu, Kaçkar granitoyidi-I'i içerir. Geç Kretase yay volkanizmasının ilk ürünü Erken-Orta Turoniyen'de gelişimine başlayan Çatak formasyonudur. Çatak formasyonu Narlık grubu ve Aşağımaden formasyonu birimlerini karasal konglomera ile uyumsuz olarak üzerler. Taban konglomerası niteliğindeki bu birim Zeytinlik üyesi adı ile ele alınmıştır. Ortamın deniz altı olması ve hızla derinleşmesi neticesinde küçük taneli kırıntılılar ve mikritik kireçtaşları çökelmiş ve devamında bazik-ortaç volkanizma eşlik etmiştir (Kandemir vd., 2017). Koniasiyen sonlarında asidik volkanizma ürünleri oluşmaya başlamış Santoniyen'den itibaren bölgedeki masif sülfid cevherleşmesinin kaynağı konumundaki Kızılkaya formasyonu gelişmiştir. Birim içerisindeki haritalanabilecek ölçekteki pelajik kireçtaşları Kireçtaşı üyesi olarak incelenmiştir. Aynı dönemde gelişen geniş yayılımlı subvolkanik dasitler ise

Sakalar volkaniti adı ile incelenmiştir. Geç Santoniyen'de yeniden bazik-ortaç volkanik faaliyet başlamış (Çağlayan formasyonu) ve Geç Kampaniyen'e kadar varlığını sürdürmüştür. Geç Kampaniyen-Erken Maastrihtiyen dönemi yine asidik volkanizma ürünlerinin egemen olduğu bir dönemdir. Yay volkanizmasının son ürünleri olan bu birimler Çayırbağ formasyonu adı ile incelenmiştir. Üst seviyelerindeki yaklaşık 30 m. kalınlıktaki pelajik kireçtaşları Kireçtaşı üyesi olarak incelenmiştir. Turoniyen-Erken Maastrihtiyen aralığında volkanizmanın duraksadığı dönemlerde sedimanter birimler çökelime eşlik etmiştir. Birimlerde yanal ve düşey fasiyes değişimleri yoğun olarak gözlenmekte ve birbirleri ile girik olarak izlenebilmektedir. Geç Kretase'de yay magmatizmasının plütonik ürünleri olarak Kaçkar granitoyidi-I gelişmiştir.

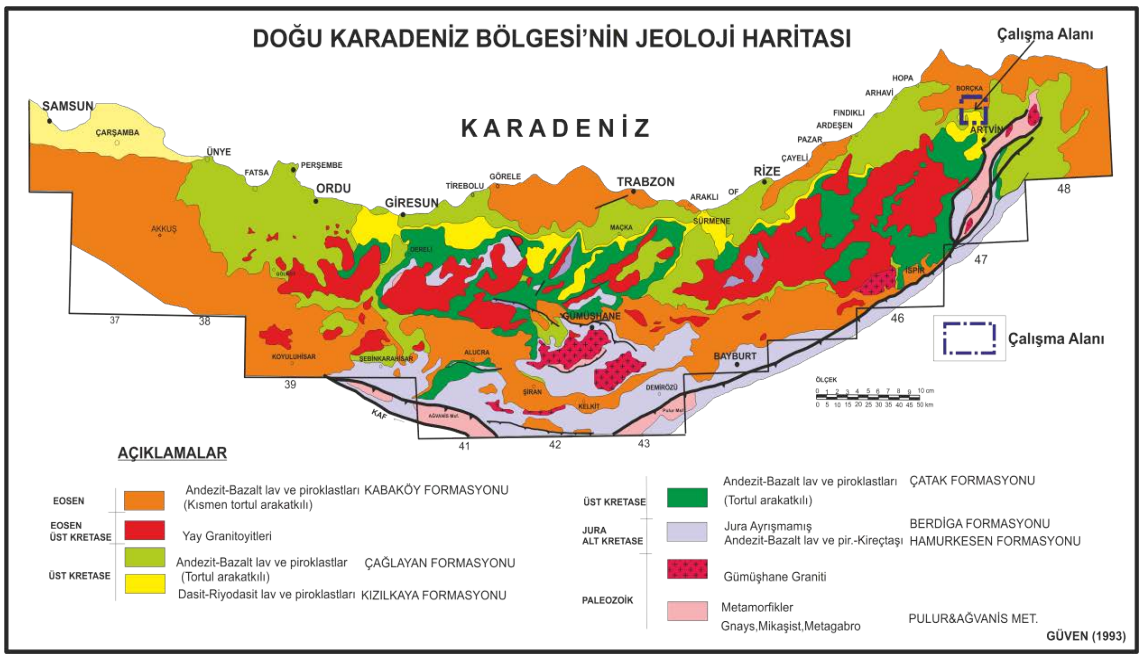
İlk olarak Geç Kampaniyen'de yükselmeye başlayan yay bölgesi, nihai olarak Erken Maastirihtiyen sonunda yükselerek pozitif alan oluşturmuş, yay volkanizması sona ermiş ve yayın kuzeyinde Doğu Karadeniz yay-ardı havzası açılmaya başlamıştır. Diğer bir deyişle yükselen doğu-batı uzanımlı sıradağlar (Kaçkarlar) ilk defa bu dönemde Neo-Tetis ile Doğu Karadeniz havzasını ayıran bir set oluşturmuştur. Bu döneme kadar Neo-Tetisin parçası/devamı olan Doğu Karadeniz Geç Kampaniyen/Erken Maastrihtiyen'den itibaren Neo-Tetisten ayrılarak hızla derinleşmiştir. Bu hat çalışmamızda Murgul-Borçka hattı olarak tanımlanmıştır. Geç Maastrihtiyen'de yeni bir trangresyonla Ağıllar formasyonu ve Beşağıl formasyonu yükselen yay bölgesini uyumsuz olarak üzerler. Bu birimlerin taban konglomeraları Ovacık formasyonu adıyla incelenmiştir. Bu formasyonlar "Yay-içi Örtü Birimleri" olarak değerlendirilmiştir. Murgul-Borçka hattına uzak alanlardaki Ağıllar formasyonu genelde taban konglomerası ile başlayan neritik karbonatlardan oluşur. Ağıllar formasyonunun taban kesimlerinde gözlenen hemipelajik kireçtaşları Saygılı

üyesi adıyla incelenmiştir. Murgul-Borçka hattına yakın konumlanan Beşağıl formasyonu ise yer yer taban konglomerası ile başlar, hemipelajik kireçtaşı-yer yer neritik kireçtaşı ile devam eder. Birimler olasılı olarak erken Selandiyen'e kadar çökelimine devam eder. Hattın kuzeyinde, yay ardında kalan ve yay birimlerini uyumlu olarak üzerleyen Cankurtaran ve Koyuncular formasyonu "Yay-ardı Havza Birimleri" olarak ele alınmıştır. Cankurtaran formasyonu yamaç-havza niteliğindeki pelajik çökellerden meydana gelmiştir. Cankurtaran formasyonu Geç Kampaniyen/yanalda bazı alanlarda Erken Maastrihtiyen'de çökelimine başlamış ve Geç Daniyen sonlarına kadar varlık göstermiştir. Cankurtaran formasyonunu çamurtaşlarından oluşan Geç Daniyen yaşlı Koyuncular formasyonu uyumlu olarak üzerler.

Geç Daniyen sonrası yay ve yay-ardı bölgede Geç Tanesiyen'e kadar çökel gözlenememiştir. Bu durum bu bölgedeki yükselmeye işaret etmektedir. Doğu Pontidlerin kuzeydoğusundaki çökelmezlik dönemine karşılık gelen bu yükselimin Doğu Pontidler ile Torid-Anatolid'in çarpışmasıyla ilişkili olduğu tarafımızdan değerlendirilmiştir. Bu dönemden sonra gelişen Erenler formasyonu, Kabaköy formasyonu ve Kaçkar granitoyidi-2 birimleri "Çarpışma Sonrası Birimleri" adı altında incelenmiştir. Çarpışma sonrası erozyon ve gerilmeli tektonik rejim neticesinde Geç Tanesiyen'den itibaren kırıntılılardan oluşan Erenler formasyonu yay, yay-içi örtü ve yay-ardı birimlerini trangresif olarak üzerler ve geç İpresiyen' e kadar çökelimine devam eder. Erken İpresiyen'de birime volkanik faaliyet eşlik eder ve Lütesiyen'de son bulur (Şekil 2).

Volkanik faaliyetin yoğun gözlendiği alanlar Kabaköy formasyonu adı altında incelenmiştir. Kabaköy formasyonu içerisinde dasit, diyorit porfir/andezit, bazalt ve volkanotortul birimler üye mertebesinde haritalanmıştır. İnceleme alanında tespit edilen en genç volkanizma ürünleri

asidik volkanit ve yarı derinlik kayaçlarından oluşan, Kabaköy formasyonunu kesen 33 my yaştaki Efeler volkanitidir (Kandemir vd., 2017).



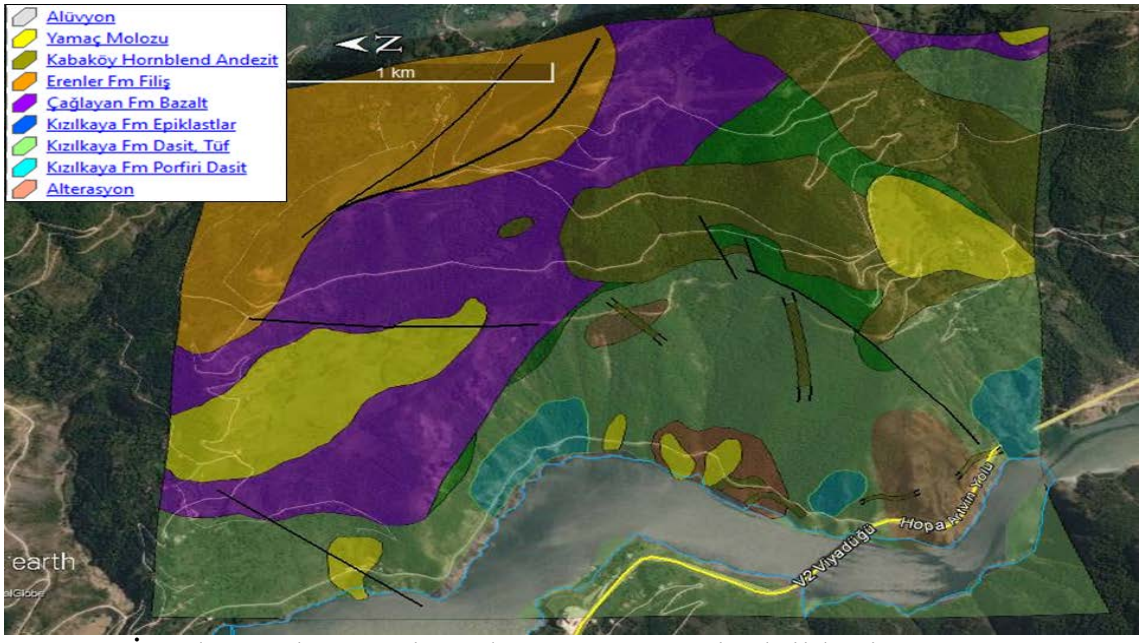
Şekil 2. Bölgesel jeoloji haritası (sadeleştirilerek alınmıştır)

2.2. Çalışma Alanının Jeolojisi

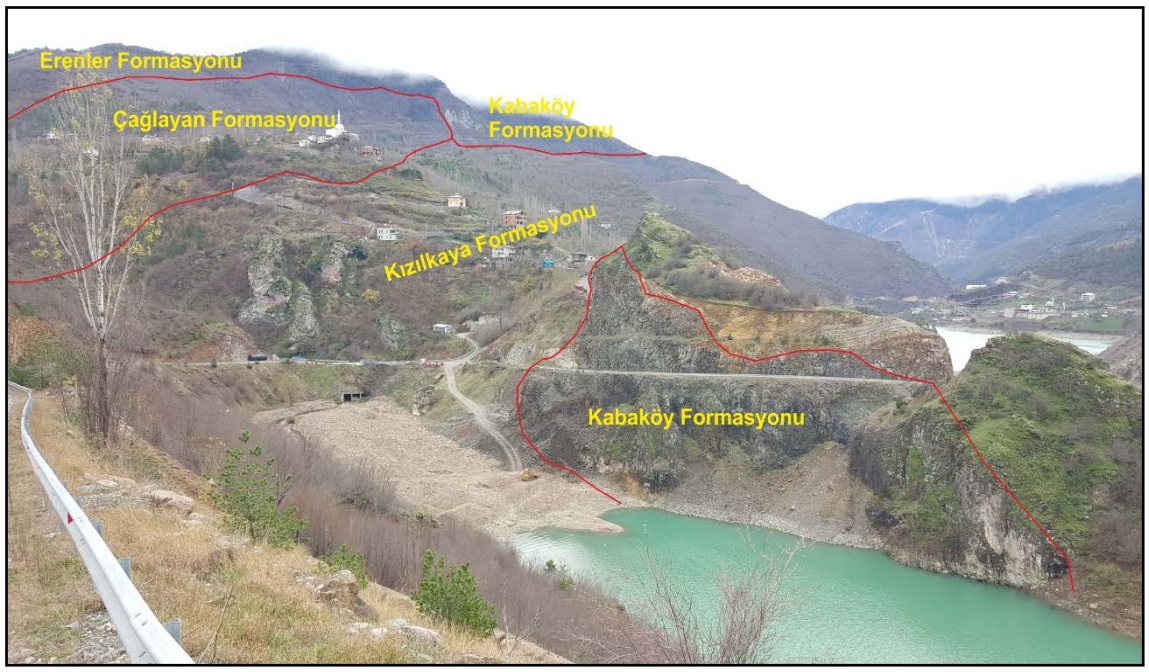
Sinkot alterasyon sahası, Artvin İli Merkez İlçesi, Sümbüllü (Sinkot) Köyü sınırlarında, Artvin'in kuş uçuşu 8 km. kuzeybatısında yer almakta olup, Artvin'e 12 km. yol mesafesindedir. Saha F47-c1 (1/25.000) paftası içinde yeralmaktadır.

İnceleme alanı Doğu Pontidlerin, Kuzeydoğu Zonu içerisinde kalmakta olup, bölgede Üst Kretase döneminde etkin bir yay volkanizması gözlenmektedir. Ayrıca çalışma alanı Eosen döneminde de etkin ve yaygın bir volkanizma izlenmektedir. Çalışma alanında volkanizmalar denizaltı volkanizması şeklinde olup, bazik ve asidik karekterlerde şeklinde gelişmiştir. Aynı zamanda volkanizmanın duraylı dönemlerinde volkaniklerle ara katkılı ve yer yer seviye ve mercekler şeklinde sedimander

kayaçlar çökelmiştir. Yapılan ayrıntılı jeoloji çalışmaları sonucu Sinkot alterasyon sahasının stratigrafisi ortaya çıkarılmış olup inceleme alanında gözlenen birimler yaşlıdan gence doğru şu şekilde sıralanmaktadır (Şekil 3-4-5).



Şekil 3. İnceleme alanına ait uydu göüntüsü ve jeoloji haritası



Şekil 4. Sinkot sahasının kuzeybatıdan-güneydoğuya genel görünümü-1 (Koordinat y: 733075, x: 4570819)

Şekil 5. Sinkot sahasının batıdan-doğuaya genel görünümü-2 (Koordinat y: 732967, x: 4569345)

- Kızılkaya Formasyonu: Asidik
- Epiklastik Seviye (Kırıntılar-Mikritik Kireçtaşı-Tüfler)
- Dasit, Tüf, Dasitik Tüf
- Porfirik Dokulu Dasit
- Çağlayan Formasyonu: Bazik
- Ovacık Formasyonu
- Erenler Formasyonu: Filiş
- Kabaköy Formasyonu: Hornblendli Andezit
- Yamaç Molozu: Blok Çakıl-Kum-Kil

3. CEVHERLEŞME

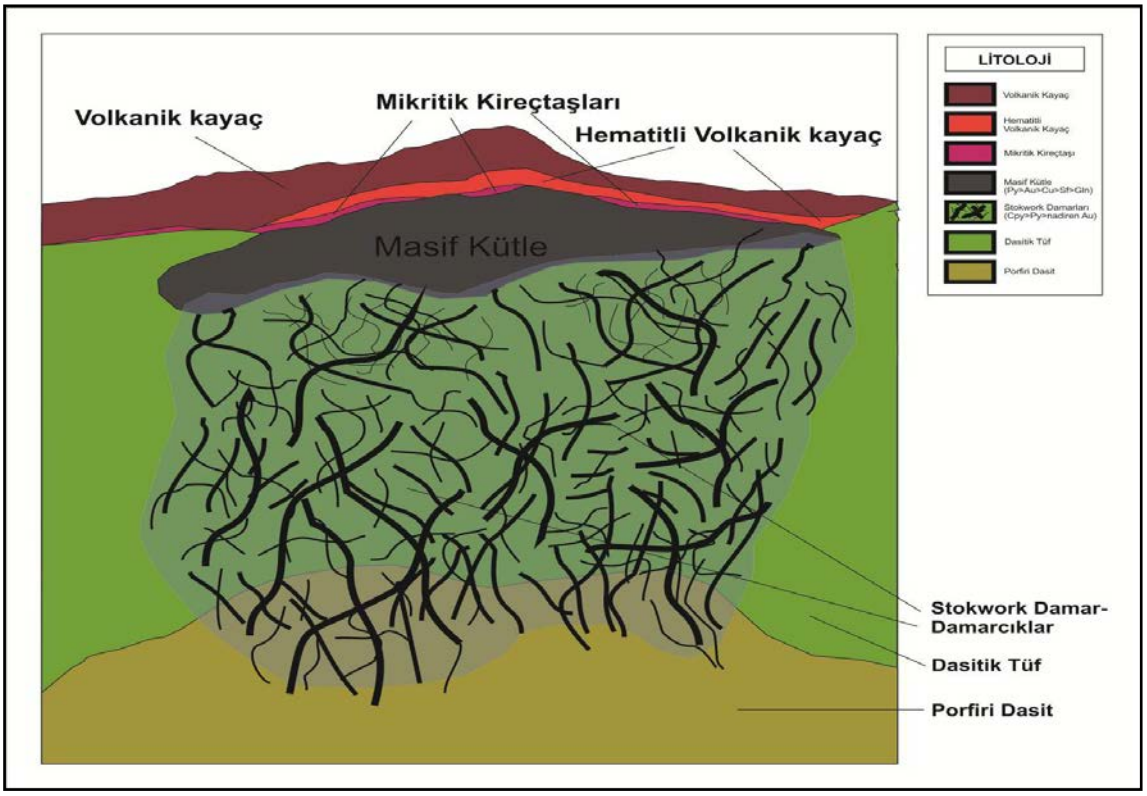
Sinkot alterasyon sahasında Doğu Karadeniz bölgesinde oluşan VMS yataklarında olduğu gibi deniz tabanının hemen altında çeşitli çatlaklar ve

kanallar boyunca yayılan hidrotermal çözeltilerin dasitik/riyolitik yan kayaçların zayıflık zonlarına sızarak ağsal-saçınımlı ve damar/mercek türde cevher fasiyeslerini oluşturduğu gözlenmiştir. Cevherleşme VMS tipi yataklarda genellikle gözlenebilen masif ortamlardan ziyade yine aynı tür yataklarda gözlenen damar, saçınım ve ağsal tiptedir.

Sümbüllü (Sinkot) alanında cevher zonları yoğun silisifiye ile karakterize edilmiş olup masif mercekler (?), masif damarlar ve ağsal saçınımlar şeklinde bulunur. Revan vd., 2013 cevher damarlarının/merceklerinin yan kayaçlarla uyumsuz ilişkisi ve yan kayaçlardaki alterasyonun şiddetinin örtü kayaçlara göre daha fazla olması deniz tabanının hemen altındaki ornatma verilerine işaret ettiğini belirtmiştir.

Pirit yoğunluklu kalkopirit masif cevher seviyelerinin kalınlığı 0,5 m ile 130 m arasında değişmektedir (Pirit>Kalkopirit). Altın, gümüş, yer yer kurşun ve çinko değerlerinin yüksek olduğu kısımlar bu seviyelere karşılık gelmektedir. Mercek şekli cevher güneydoğu-kuzeybatı yönelimini göstermektedir.

Sahada yan kayaçlar ile uyumsuz bir ilişki sunan genelde Cu bakımından zengin damar ve mercekler şeklinde masif kısımlar da yer almaktadır. Cevherleşmenin mineral parajenezi pirit, kalkopirit, galenit, sfalerit, fahlerz, kovellin, markazit, pirotin, molibdenit, bornit, enarjit, bizmut, luzinit, ayikinit mineralleri olup, yer yer Cu-Bi-sülfür (Emplektit?) ve Bi-Se-Cu-sülfür mineralleri gözlenmiştir. Kalkopirit, pirit, sfalerit ve galenit minerallerinin birlikte gözlendiği piritçe zengin kısımların çatlaklarında kalkopirit, galenit ve sfalerit mineralleri gelişmiştir. Çalışma alanında yeni keşfedilen bu bakır cevherleşmeleri, ortam, oluşum ve mineral birlikteliği bakımından tipik VMS-tip bakır cevherleşmelerinin oluştuğu ortam koşullarını yansıtmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Sinkot sahası cevherleşmesine ait şematik gösterim (ölçeksiz).

Masif cevherleşmeyi takiben daha derinde gözlemlenen ağsal-saçınımlı cevherleşme kalınlık olarak 25 m. ile 75 m. arasında değişiklik göstermektedir. Bu cevherleşmede de pirit yoğunluklu, kalkopirit ve yer yer nadiren sfalarite rastlanmıştır. Bununla beraber cevher damarları ise kalınlık olarak 50-70 cm.'ye kadar ulaşmakta olup pirit ağırlıklı, kalkopirit içeriğine sahiptir. Damarlar yoğun silisifikasyon ile karakterize edilmiş olup yerli kayacın ilksel dokusunu bozmuştur.

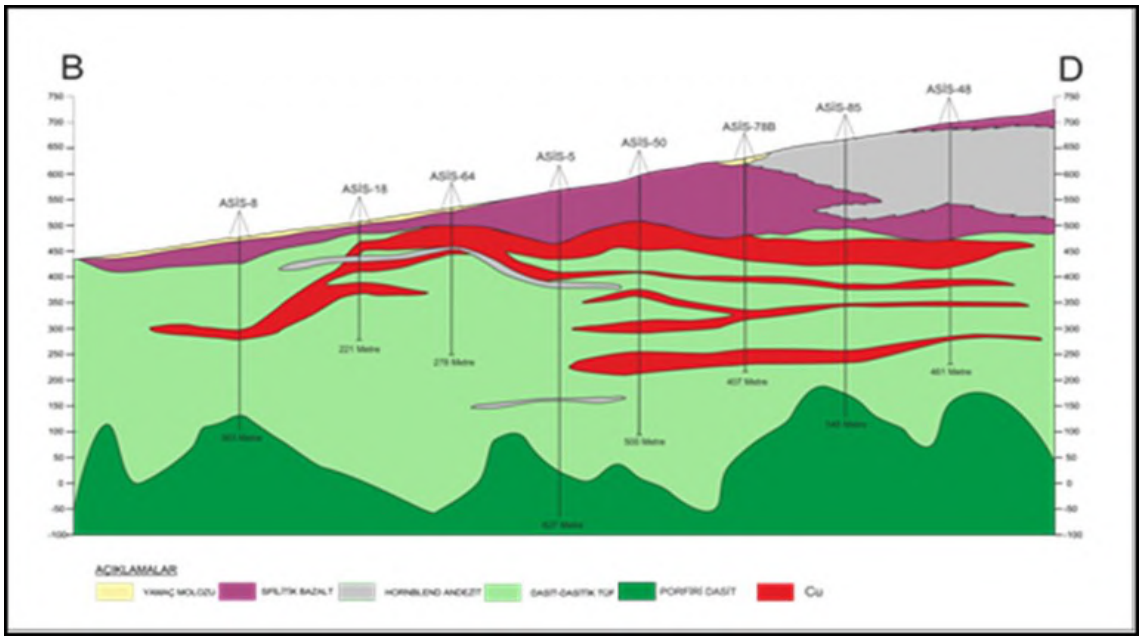
Mineral dağılımları ve litolojik çeşitlilik düşünüldüğünde çalışma alanında cevherleşme genellikle örtü birimi olarak gözlenen Çağlayan Formasyonu (Kampaniyen) bazikleri ile Kızılkaya Formasyonu (Santoniyen) dasit-dasidik tüfleri dokanaklarında ve Kızılkaya Formasyonu'nun içinde gözlemlenmiştir (Şekil 31). Kızılkaya Formasyonu içersinde piroklastları kesen dasit domları gözlemlenmektedir. Ayrıca bu piroklastların üst seviyelerine doğru epiklast seviyeler ve en üst dokanaklara

doğru bordo mikritik kireçtaşı düzeyleri ile Kızılkaya formasyonu sonlanmaktadır. Cevherleşmenin piroklast ve mikritik kireçtaşlarının alt seviyelerinde olduğu gözlemlenmektedir. Çalışma alanında daha genç olduğu düşünülen andezitlerin (İmbresiyen-Lutesiyen) cevherleşmeyide kesmiş olarak gözlemlenmemiştir. Bu andezitlerden alınan numunelerde cevherleşme ile herhangi bir ilgisi olmadığı görülmüştür.

3.1. Cevher Zonlarına ait Kesitler ve Grafikler

3.1.1. *Bakır cevherleşme kesitleri*

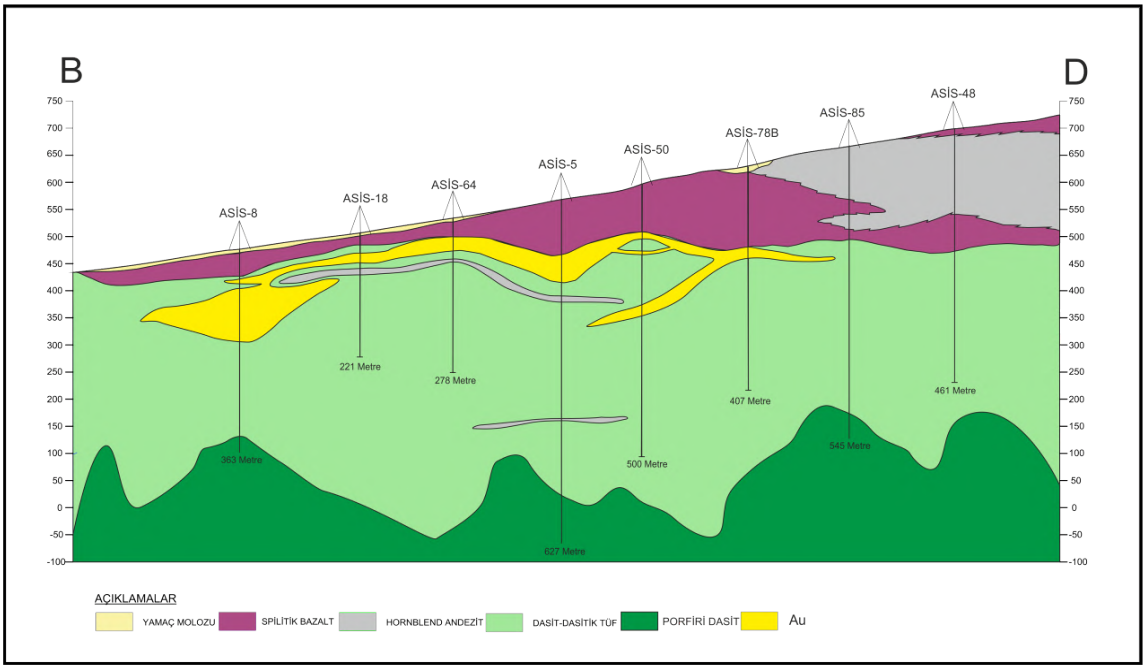
Sinkot alterasyon sahasında bakır cevherleşmesine ait enine kesitler Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 7. Sinkot alterasyon sahasında bakır cevherleşmesine ait enine kesiti

3.1.2. *Altın cevherleşme kesitleri*

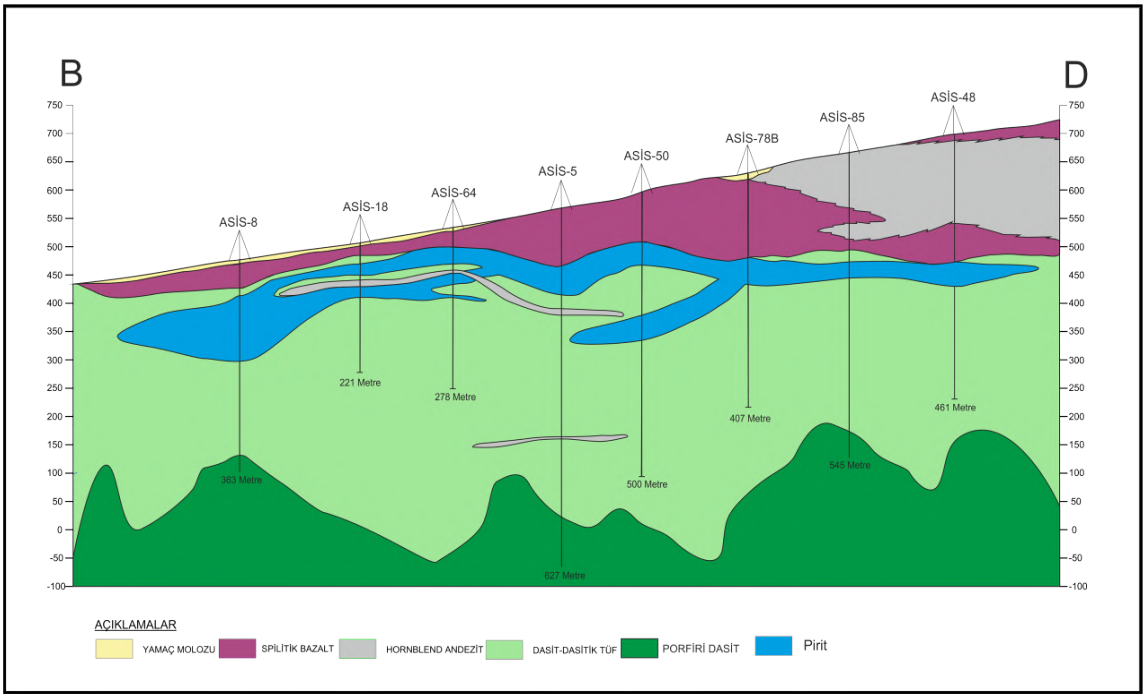
Sinkot alterasyon sahasında altın cevherleşmesine ait enine kesitler Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Sinkot alterasyon sahasında altın cevherleşmesine ait enine kesiti

3.1.3. *Pirit cevherleşme kesitleri*

Sinkot alterasyon sahasında altın cevherleşmesine ait enine kesitler Şekil-9'da verilmiştir.



Şekil 9. Sinkot alterasyon sahasında pirit cevherleşmesine ait enine kesiti-

4. SONUÇLAR

1. İnceleme alanında Cu-Au-FeS_2 cevherleşmeleri, Santoniyen yaşlı Kızılkaya formasyonu içindeki dasit ve dasitik tüf türü kayaçlara bağlı olarak gelişen Volkanojenik Masif Sülfit (VMS) tip cevherleşmeleridir.

2. Mineralizasyon alanında, yüzeydeki asidik karakterli kayaçlarda yoğun hematitleşme, limonitleşme, piritleşme ve killeşme gibi yoğun alterasyon ürünleri görülmektedir. Yüzeyde cevher minerali olarak kalkopirit mineralleri saçınımlı ve stokvörkler şeklinde görülmektedir.

3. Yüzey verileri ve sondaj sonuçlarına göre cevherleşme saçınımlı pirit-kalkopirit cevherleşmesi, ağsal silis-pirit-kalkopirit damar/damarcıkları şeklinde ve de masif pirit-kalkopirit şeklindedir.

4. Netpro/mine programı kullanılarak sahanın Cu için **2.872** ppm tenörlü **108.786.750 ton,** Au için **293** ppb tenörlü **39.451.375 ton** kaynak tahmini yapılmıştır.

5. Tam teknolojik test çalışmaları kapsamında, buluculuk talep edilen sahada Cu için teknolojik test çalışmaları neticelenmiş olup Au ve pirit için teknolojik test teknolojik test çalışmaları devam etmektedir. Cu için yapılan teknolojik test çalışmalarında; flotasyon deneyleri için farklı boyut dağılımlarının etkisi incelenmiş, % 80'i <38 μm olan (d80:38 μm) boyut dağılımı ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre d80: 38 μm'da 70 g/t toplayıcı kullanılarak (KAX) pH:11'de yapılan flotasyon deneyinde; 3. temizlemeden sonra % 29.40 Cu, % 0.04 Pb, % 1.26 Zn tenörlü konsantre % 83.6 bakır kazanım verimi ile elde edilmektedir. Kaba ve süpürme flotasyonları sonunda nihai verim % 92.3 olmakta, artık Cu tenörü % 0.06'ya düşmektedir. Numunede bulunan gümüşün sadece % 20-30 kadarının bakır ürünlerinde (konsantre, temizleme artıkları ve süpürme konsantresi) toplandığı, geri kalan kısmının pirit içerisinde olduğu düşünülmektedir.

6. 201400301 No'lu Artvin-Sümbüllü (Sinkot) polimetal sahasında S (Kükürt) için kaynak tahmini yapılmış, bu amaçla analizlerinden gelen S (kükürt) yüzde değerleri kullanılmıştır. Sahada yapılan ve Pirit tespit edilen 46 adet sondajın analiz sonuçları ile veri tabanı oluşturulmuş, 1077 analiz değeri kullanılarak, öncelikle özet istatistik değerleri hesaplanmıştır. Buna göre en küçük değer 0, en büyük değer % 50,7 S ve ortalama değer % 19,06 S'dür.Tonaj hesabı için önemli bir parametre olan yoğunluk değeri arazide yerinde yapılan analiz sonucuna göre ortalama 3,15 gr/cm³ olarak alınmıştır. Netpro/mine programı kullanılarak sahanın Pirit için **% 21 Kükürt (S)** tenörlü **6.845.128 ton** kaynak tahmini yapılmıştır.

7. Fizibilite Etütleri Dairesi tarafından Sinkot sahasına ait alternatif bakır (Cu) ve altın (Au) için alternatif tenör ve tonaj tablosu aşağıda verilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Sinkot sahasına ait alternatif bakır (Cu) ve altın (Au) için alternatif tenör ve tonaj bilgileri

BAKIR				**ALTIN**			
Tenör		Tonaj	Yerinde Metal	Tenör		Tonaj	Yerinde Metal
ppm	%		ton Cu	ppb	g/t		ton Au
2871	~0,30	108.786.750	312326,8	292,45	~0,30	39451375	11,5376
7000	~0,70	21.439.688	150077,8	550	~0,55	12883500	7,0859
8500	~0,85	13.958.458	118646,9	650	~0,65	8847563	5,7509
9500	~0,95	11.202.188	106420,8	800	~0,80	5000625	4,0005
10000	~1	8.150.625	81506,3	850	~0,85	4213125	3,5812

KAYNAKLAR

Güven, İ. H., 1993. Doğu Pontidler'in jeolojisi ve 1/250 000 ölçekli kompliasyonu. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara (Yayımlanmamış).

Kandemir Ö., Kanar, F., Tok, T., & Pehlivanoğlu, Ş., 2017. Artvin Borçka-Yusufeli arasında kalan alanın jeolojisi. MTA Genel Müdürlüğü Rapor No:13575. 692 s. Ankara.

Konak, N., Hakyemez, Y., Bilgiç, T., Bilgin, R., Hepşen, N., & Ercan, T. (2001). Kuzeydoğu pontidlerin jeolojisi. MTA Raporu. 378 sf., Ankara.

ERENLER (ARTVİN) SAHASININ JEOLOJİSİ, CEVHERLEŞMESİ VE DOĞU KARADENİZ METALOJENİK KUŞAĞINDAKİ KONUMU

GEOLOGY, MINERALIZATION, AND POSITION OF THE ERENLER(ARTVIN) FIELD IN THE EASTERN BLACK SEA METALLOGENIC BELT

Ümit Aydın
MTA Doğu Akdeniz Bölge Müdürlüğü, Adana

Aytaç Tulukçu
MTA Genel Müdürlüğü Orta Anadolu II. Bölge Müdürlüğü, Konya

Tuna Öner
MTA Güneydoğu Anadolu Bölge Müdürlüğü, Ankara

Serdar Keskin
MTA Genel Müdürlüğü Doğu Karadeniz Bölge Müdürlüğü, Trabzon

Füsun Niğdeli, Tahsin Aksoy
MTA Fizibilite Etütleri Dairesi Daire Başkanlığı, Ankara

Saruhan Saklar
MTA Maden Analizleri ve Teknolojisi Daire Başkanlığı, Ankara

Resul Varlık
MTA Genel Müdürlüğü Doğu Karadeniz Bölge Müdürlüğü, Trabzon

ÖZ: D-B yönünde yaklaşık 350 km uzunluğa ve K-G yönlü yaklaşık 60 km genişliğe sahip olan Doğu Karadeniz Metalojenik Kuşağı içerisinde birçok VMS, porfiri, epitermal, skarn tip cevherleşmeler mevcuttur. Ordu-Altıntepe, Giresun-Lahanos, Rize-Madenköy, Gümüşhane-Mastra, Artvin-Sinkot, Murgul, Cerattepe, Hod, Taç-Çorak sahaları bu kuşak içerisindeki en önemli yataklardır. Metalojenik Kuşak içerisindeki maden yataklarını araştırmak, cevherleşmelerin oluşum ortam ve şartlarını kontrol eden süreçlere cevap bulabilmek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Geç Kretase yaşlı (82-91 Milyon yıl) dasit-dasitik tüfler içinde gözlenen Cu-Au-Pb-Zn VMS cevherleşmeleri oluşum şekli ve yaşı bakımından diğer VMS

yataklarına göre farklılık sunmaktadır. Bölgedeki bu tip maden yataklarının büyük bir kısmı derin deniz ortamında volkanik kayaçların baskın olduğu seriler içinde oluşmuştur. Geç Kretase yaşlı volkanik kayaçların egemen olduğu bu ortamdaki kayaçların yaygın olarak altere olmuş lav, lav breşi ve hiyaloklastik kayaçlar olduğu gözlenir. Sedimanter kayaçlar ise mikritik kireçtaşları, çamurtaşları ve sıcak su çökellerinden (veya eksalit) oluşur. Epitermal, porfiri ve skarn cevherleşmeler ise net olarak ortaya konulamamış, genelde Eosen (?) yaşlı magmatizmaya bağlı oluşmuş cevherleşmelerdir. Erenler alterasyon sahası; denizaltı felsik domlara bağlı oluşmuş bir epitermal sistemi veya daha genç magmatizmaya bağlı yüksek sülfitli epitermal sistemi göstermektedir. Erenler alterasyon sahasında üst kotlarda siyah cevher bakımından zengin masif kısım, daha alt kısımlarda ise çinko, altın ve yer yerde gümüş bakımından zengin olan stokvork şeklinde cevherleşme mevcuttur. Varolan bu cevherleşmesinin Erenler formasyonu üzerine itilmesi esnasında parçalanarak şu anki yapısını aldığı düşünülmektedir. Sondajların geneli dikkate alındığında Au zenginleşmesinin daha çok sfaleritçe zengin kısımlarda yüksek, gümüş değerlerinin ise galenitçe zengin kısımlarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Sahadaki Cu cevherleşmesi ise genelde masif olarak değilde damar-stokvork şeklinde yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Erenler, VMS, Bakır, Au, Doğu Karadeniz

ABSTRACT: *The Eastern Black Sea Metallogenic Belt, extending approximately 350 km in an E-W direction and about 60 km in width in a N-S direction, hosts numerous VMS, porphyry, epithermal, and skarn-type mineralizations. The most significant deposits within this belt include Ordu-Altıntepe, Giresun-Lahanos, Rize-Madenköy, Gümüşhane-Mastra, Artvin-Sinkot, Murgul, Cerattepe, Hod, and Taç-Çorak. Studies have been conducted to investigate the ore deposits within the Metallogenic Belt and to understand the processes controlling the formation environments and conditions of these mineralizations. The Cu-Au-Pb-Zn VMS mineralizations observed within the Late Cretaceous (82–91 Ma) dacite-dacitic tuffs exhibit distinct characteristics in terms of formation mechanisms and age compared to other VMS deposits. Most of these types of ore deposits in the region have formed within volcanic rock-dominated sequences in a deep-sea environment. The volcanic rocks of this Late Cretaceous setting predominantly consist of extensively altered lava, lava breccia, and hyaloclastic rocks. The sedimentary rocks, on the other hand, comprise micritic limestones, mudstones, and hydrothermal exhalative deposits (or exhalites). The epithermal, porphyry, and skarn mineralizations have not*

been clearly identified; however, they are generally associated with Eocene (?) magmatism. The Erenler alteration zone represents either an epithermal system associated with submarine felsic domes or a high-sulfidation epithermal system related to a younger magmatic event. Within the Erenler alteration zone, the upper levels contain massive ore bodies enriched in black ore, whereas the lower sections host stockwork-type mineralization rich in zinc, gold, and, in some places, silver. It is thought that this mineralization acquired its current structural configuration due to fragmentation during the thrusting of the deposit onto the Erenler Formation. Drilling data indicate that Au enrichment is primarily concentrated in sphalerite-rich zones, while Ag values are elevated in galena-rich sections. The Cu mineralization in the area generally occurs in vein-stockwork form rather than as massive ore bodies.

***Keywords**: Erenler, VMS, Copper, Au, Eastern Black Sea*

1. GİRİŞ

Çalışma alanı magmatik yay özelliğindeki Doğu Pontidler'in kuzey zonunda (Doğu Karadeniz Bölgesi'nde) yer almaktadır. Geç Kretase'de başlayan denizaltı volkanizması ve sedimantasyonu sonucu litolojik birimler oluşmuştur. Doğu Karadeniz kuşağında yer alan VMS (Volkanojenik Masif Sülfit) yatakları; denizaltı volkanizması ve sedimantasyonunun tüm özelliklerini taşıması bakımından karakteristiktir. Özellikle Cu-Au-Zn-Ag maden yatakları bakımından özel bir konuma sahip olan bu bölgede, gömülü yeni rezervlerin bulunması ülke madenciliği için ayrı bir öneme sahiptir.

Bu çalışma, 2014-2021 yılları arasında MTA Genel Müdürlüğüne ait ruhsat sahasında yer alan Erenler (İrsahan) alterasyon alanında yapılmış prospeksiyon, detay etüt ve sondajlı arama çalışmaları ve bunlara ilişkin çalışmaları kapsamaktadır.

Erenler (Artvin/Merkez) köyü ve civarında yer alan ve yaklaşık 2,5 km^2 lik bir alanı kapsayan çalışma alanınında en yaşlı birimini Santoniyen

yaşlı asidik volkanizma ürünlerinden dasit, riyodasit, riyolit ve bunların piroklastları ile yer yer kırmızı çamurtaşı ve tüf seviyelerinden oluşan Kızılkaya formasyonu oluşturur. Birimin üst kesiminde çalışma sahasında volkanizmanın duraksadığı dönemde bordo renkli mikritik kireçtaşları bu asidik volkanizma ürünleri üzerine uyumlu olarak yerleşmiştir. Doğu Pontidler ile Toridler'in, Selandiyen-Erken Tanesiyen zaman aralığında çarpışmasından sonra, gerilmeli tektonik rejim sonucu olarak denizel ortam koşulları egemen olmuş ve Geç Tanesiyen-İpresiyen yaşlı Erenler formasyonu açısal uyumsuzlukla çökelmiştir (Kandemir vd., 2017). Erenler formasyonu uyumsuz olarak çoğunlukla türbiditik kırıntılı kayaçlardan oluşur. Çalışma alanında Santoniyen yaşlı Kızılkaya formasyonuna ait dasit-dasitik tüf ve piroklastları Erenler formasyonu üzerine tektonik olarak gelmiştir.

Erenler (İrsahan) alterasyon sahasındaki cevherleşme Geç Kretase yaşlı (Kızılkaya Formasyonu) dasitik volkanizma ile ilişkili olup; volkanojenik masif sülfit tipte bir çevherleşmedir. Dissemine-ağsal, masif, breşik tipte cevherleşme; dasitlerin içinde yer alır.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı tarafından, Doğu Karadeniz Yay Magmatitleri İle İlişkili Polimetal Maden Aramaları Projesi kapsamında Erenler sahasının maden potansiyelinin ortaya çıkarılması için detaylı çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda 2017-2021 yılları arasında toplamda 74 farklı lokasyonda toplam 35951,50 m karotlu sondaj çalışması yapılmış olup, karot numunelerinden toplamda 29566 adet jeokimya örneklemesi, 302 adet petrografi, 160 adet parlatma, 345 adet XRD ve 15 adet sıvı kapanım örneği alınmıştır.

1.1. Coğrafya ve Ulaşım

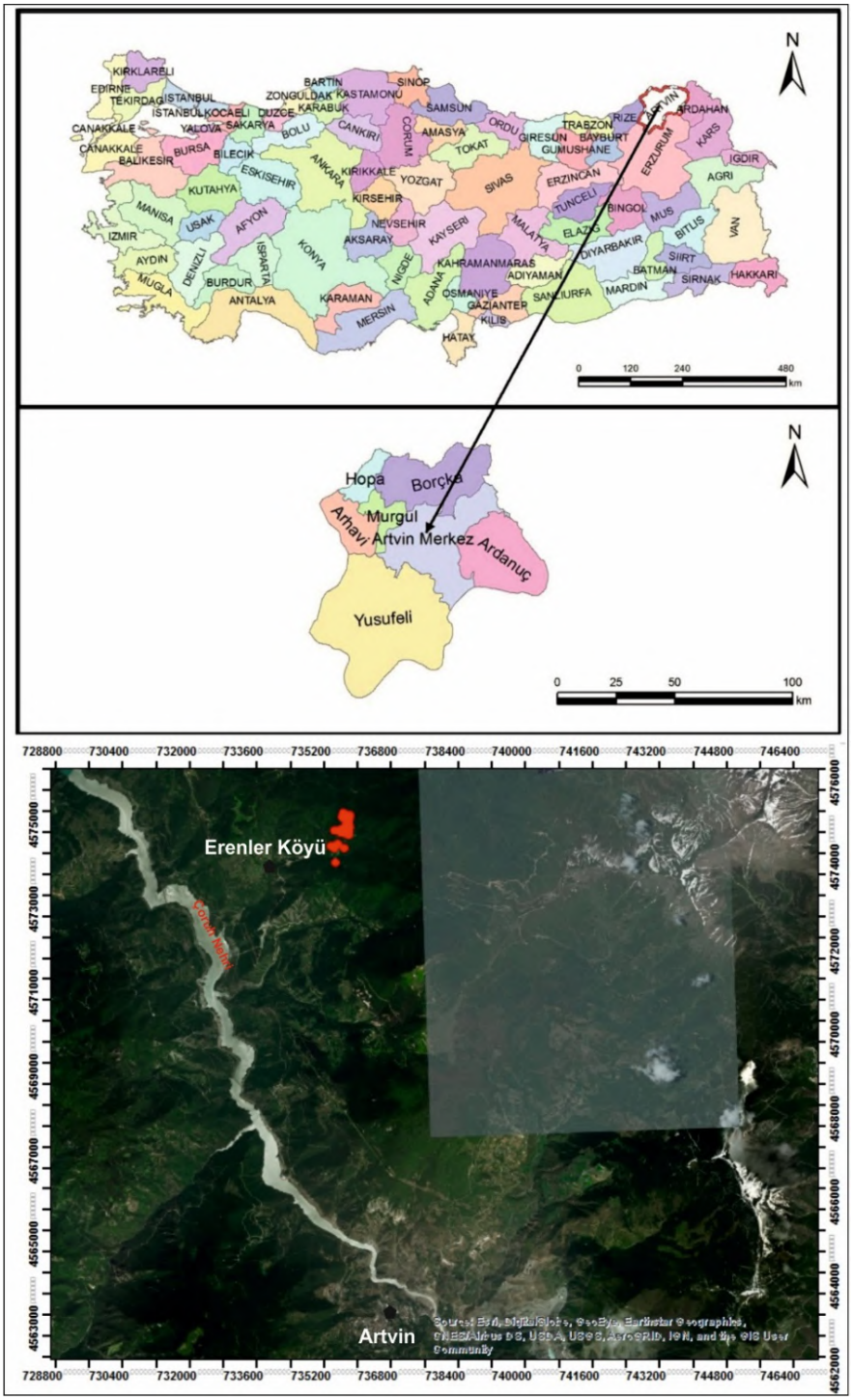
Ruhsat sahası Artvin ili, Erenler (İrsahan) köyü sınırları içerisinde, Artvin F47-b4 paftasında yer almaktadır. İnceleme sahası, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde, Artvin'in 12 km. kuzeybatısında, Erenler (İrsahan) Köyü sınırları içinde bulunmaktadır (Şekil 1).

2. JEOLOJİ

Tetis-Avrasya kuşağının bir parçası olan Doğu Pontidler, Tetis okyanus kabuğunun Jura'dan Miyosen'e kadar devam eden yitimine bağlı olarak gelişen bir ada yayı üzerinde yer almaktadır (Şengör ve Yılmaz, 1981). Bölgedeki VMS porfiri-tip Cu-Mo ve volkanojenik Cu-Pb-Zn yataklarının ada yayları ile ilişkili ortamlarda oluştuğu görüşü pek çok araştırmacı tarafından desteklenmektedir (Adamia vd., 1977; Tüysüz vd., 1994; Brauhart vd., 1998; Saez vd., 1999; Çiftçi, 2000; Saraç, 2000; Tüysüz, 2000; Tüysüz ve Akçay, 2000; Revan, 2010; Revan vd., 2013; Okay ve Nikishin, 2015; Delibaş vd., 2016)

2.1. Bölgesel Jeoloji

Çalışma alanının bölgesel jeolojisi Kandemir vd., (2017) raporundan alınmıştır. Bu kapsamda inceleme alanı ve yakın çevresinde farklı jeolojik döneme ait kaya birimleri yer alır. En yaygın litoloji topluluğu, Geç Kretase yaşlı birimlerdir. Anlatımda kolaylık sağlamak adına inceleme alanındaki Geç Kretase öncesi birimler "Temel Birimler" adı altında ele alınmıştır. Bu başlık altında Artvin granitoyidi, Yalnızçamtepe volkaniti, Narlık grubu, Öğdem formasyonu ve Aşağımaden formasyonu yer alır. Çalışma alanının temelini Hersiniyen orojenezine bağlı olarak gelişen Artvin granitoyidi oluşturur.



Şekil 1. Erenler ruhsat sahası ve buluculuk talep edilen alana ait yerbulduru haritası

Artvin granitoyidi inceleme alanı dışında Geç Paleozoyik yaşta yeşilşist metamorfitleri içerisine sokulum yapmaktadır (Konak vd., 2001).

Yaşını Karbonifer (Misisipiyen-Orta Pensilvaniyen) olarak tespit ettiğimiz granitoyidleri ve volkanitleri Liyas-Dogger yaşlı Berta formasyonu taban konglomerası ile uyumsuz olarak üzerler. Aynı dönemde toleyitik volkanizma ürünlerinden oluşan Hızarlıdere volkaniti gelişimine başlamıştır.

Berta formasyonu içerisinde tektonik dilim şeklinde gözlenen kümülat gabrolar, Soylu gabrosu adıyla tanımlanmıştır. Bu birimler Narlık grubu adı altında incelenmiştir (Kandemir vd., 2017). Berta formasyonu içerisindeki taban koglomerası, kanal dolgusu üye mertebesinde incelenmiştir. Geç Jura-Erken Kretase'den itibaren yeni bir trangresyonu temsil eden ve bu birimleri uyumsuz üzerleyen Öğdem ve Aşağımaden formasyonları ile sonraki birimler metamorfizma göstermezler (Kandemir vd., 2017).

Dogger sonlarından itibaren yükselen bölgeyi yeni bir trangresyonla Erken Kretase yaşlı karasal-sığ denizel konglomera-kumtaşlarından oluşan Öğdem formasyonu uyumsuz olarak üzerler. Karasal ve sığ denizel detritikler tedrici olarak Aşağımaden formasyonuna ait neritik kireçtaşlarına geçer.

Geç Kretase dönemi Doğu Pontidler'de geniş alanlar kaplayan yay magmatizması ürünlerinin geliştiği bir dönemdir. Bu dönem çoğunlukla olgun yay dönemi olarak tanımlanmıştır (Konak vd., 2001). Geç Kretase'den başlayan bu bölüm ***"Geç Kretase Doğu Pontid Yay Birimleri"***, ***"Yay-içi Örtü Birimleri"***, ***"Yay-ardı Havza Birimleri"*** ve ***"Çarpışma Sonrası Birimler"*** olarak değerlendirilmiştir.

"Geç Kretase Doğu Pontid Yay Birimleri"; Çatak formasyonu, Kızılkaya formasyonu, Sakalar volkaniti, Çağlayan formasyonu, Çayırbağ formasyonu, Kaçkar granitoyidi-I'i içerir. Geç Kretase yay volkanizmasının ilk ürünü Erken-Orta Turoniyen'de gelişimine başlayan Çatak formasyonudur. Çatak formasyonu Narlık grubu ve Aşağımaden formasyonu birimlerini karasal konglomera ile uyumsuz olarak üzerler.

Taban konglomerası niteliğindeki bu birim Zeytinlik üyesi adı ile ele alınmıştır. Ortamın deniz altı olması ve hızla derinleşmesi neticesinde küçük taneli kırıntılılar ve mikritik kireçtaşları çökelmiş ve devamında bazik-ortaç volkanizma eşlik etmiştir (Kandemir vd., 2017). Koniasiyen sonlarında asidik volkanizma ürünleri oluşmaya başlamış Santoniyen'den itibaren bölgedeki masif sülfid cevherleşmesinin kaynağı konumundaki Kızılkaya formasyonu gelişmiştir.

Birim içerisindeki haritalanabilecek ölçekteki pelajik kireçtaşları Kireçtaşı üyesi olarak incelenmiştir. Aynı dönemde gelişen geniş yayılımlı subvolkanik dasitler ise Sakalar volkaniti adı ile incelenmiştir.

Geç Santoniyen'de yeniden bazik-ortaç volkanik faaliyet başlamış (Çağlayan formasyonu) ve Geç Kampaniyen'e kadar varlığını sürdürmüştür. Geç Kampaniyen-Erken Maastrihtiyen dönemi yine asidik volkanizma ürünlerinin egemen olduğu bir dönemdir. Yay volkanizmasının son ürünleri olan bu birimler Çayırbağ formasyonu adı ile incelenmiştir. Üst seviyelerindeki yaklaşık 30 m. kalınlıktaki pelajik kireçtaşları Kireçtaşı üyesi olarak incelenmiştir.

Turoniyen-Erken Maastrihtiyen aralığında volkanizmanın duraksadığı dönemlerde sedimanter birimler çökelime eşlik etmiştir. Birimlerde yanal ve düşey fasiyes değişimleri yoğun olarak gözlenmekte ve birbirleri ile girik olarak izlenebilmektedir. Geç Kretase'de yay magmatizmasının plütonik ürünleri olarak Kaçkar granitoyidi-I gelişmiştir.

İlk olarak Geç Kampaniyen'de yükselmeye başlayan yay bölgesi, nihai olarak Erken Maastirihtiyen sonunda yükselerek pozitif alan oluşturmuş, yay volkanizması sona ermiş ve yayın kuzeyinde Doğu Karadeniz yay-ardı havzası açılmaya başlamıştır. Diğer bir deyişle yükselen doğu-batı uzanımlı sıradağlar (Kaçkarlar) ilk defa bu dönemde Neo-Tetis ile Doğu Karadeniz havzasını ayıran bir set oluşturmuştur. Bu döneme kadar

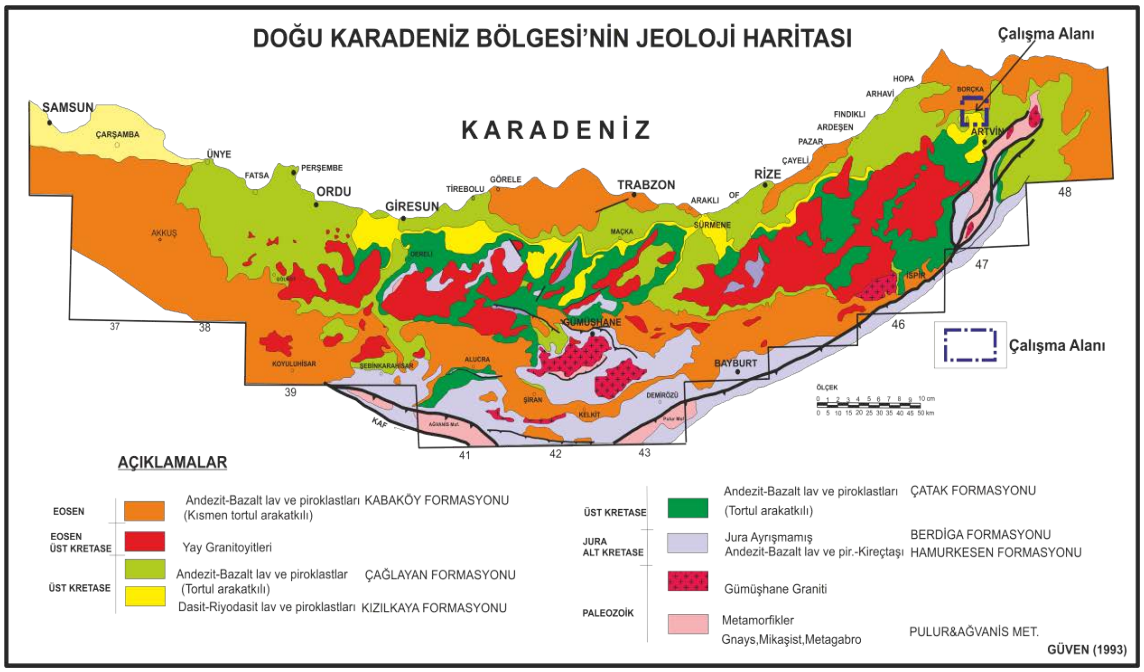
Neo-Tetisin parçası/devamı olan Doğu Karadeniz Geç Kampaniyen/Erken Maastrihtiyen'den itibaren Neo-Tetisten ayrılarak hızla derinleşmiştir. Bu hat çalışmamızda Murgul-Borçka hattı olarak tanımlanmıştır.

Geç Maastrihtiyen'de yeni bir trangresyonla Ağıllar formasyonu ve Beşağıl formasyonu yükselen yay bölgesini uyumsuz olarak üzerler. Bu birimlerin taban konglomeraları Ovacık formasyonu adıyla incelenmiştir. Bu formasyonlar "Yay-içi Örtü Birimleri" olarak değerlendirilmiştir. Murgul-Borçka hattına uzak alanlardaki Ağıllar formasyonu genelde taban konglomerası ile başlayan neritik karbonatlardan oluşur. Ağıllar formasyonunun taban kesimlerinde gözlenen hemipelajik kireçtaşları Saygılı üyesi adıyla incelenmiştir.

Murgul-Borçka hattına yakın konumlanan Beşağıl formasyonu ise yer yer taban konglomerası ile başlar, hemipelajik kireçtaşı-yer yer neritik kireçtaşı ile devam eder. Birimler olasılı olarak Erken Selandiyen'e kadar çökelimine devam eder. Hattın kuzeyinde, yay ardında kalan ve yay birimlerini uyumlu olarak üzerleyen Cankurtaran ve Koyuncular formasyonu "Yay-ardı Havza Birimleri" olarak ele alınmıştır. Cankurtaran formasyonu yamaç-havza niteliğindeki pelajik çökellerden meydana gelmiştir. Cankurtaran formasyonu Geç Kampaniyen/yanalda bazı alanlarda Erken Maastrihtiyen'de çökelimine başlamış ve Geç Daniyen sonlarına kadar varlık göstermiştir. Cankurtaran formasyonunu çamurtaşlarından oluşan Geç Daniyen yaşlı Koyuncular formasyonu uyumlu olarak üzerler.

Erenler formasyonu, Kabaköy formasyonu ve Kaçkar granitoyidi-2 birimleri "Çarpışma Sonrası Birimleri" adı altında incelenmiştir. Çarpışma sonrası erozyon ve gerilmeli tektonik rejim neticesinde Geç Tanesiyen'den itibaren kırıntılılardan oluşan Erenler formasyonu yay, yay-içi örtü ve yay-ardı birimlerini trangresif olarak üzerler ve geç İpresiyen' e kadar çökelimine devam eder.

Erken İpresiyen'de birime volkanik faaliyet eşlik eder ve Lütesiyen'de son bulur. Volkanik faaliyetin yoğun gözlendiği alanlar Kabaköy formasyonu adı altında incelenmiştir. Kabaköy formasyonu içerisinde dasit, diyorit porfir/andezit, bazalt ve volkanotortul birimler üye mertebesinde haritalanmıştır. İnceleme alanında tespit edilen en genç volkanizma ürünleri asidik volkanit ve yarı derinlik kayaçlarından oluşan, Kabaköy formasyonunu kesen 33 my yaştaki Efeler volkanitidir (Kandemir vd., 2017), (Şekil 2).



Şekil 2. Bölgesel jeoloji haritası (Güven, 1993)

2.2. Cevherleşme

Erenler ruhsat sahası Doğu Karadeniz bölgesinde oluşan VMS yataklarında olduğu gibi deniz tabanının hemen altında çeşitli çatlaklar ve kanallar boyunca yayılan hidrotermal çözeltilerin dasitik/riyolitik yan kayaçların zayıflık zonlarına sızarak ağsal-saçınımlı ve damar/mercek türde cevher fasiyeslerini oluşturduğu gözlenmiştir. Cevherleşme VMS tipi

yataklarda genellikle gözlenebilen masif ortamlardan ziyade yine aynı tür yataklarda gözlenen damar, saçınım ve ağsal tiptedir.

Erenler alterasyon sahasında üst kotlarda siyah cevher bakımından zengin masif kısım, daha alt kısımlarda ise çinko, altın ve yer yerde gümüş bakımından zengin olan stokwork şeklinde cevherleşme mevcuttur. Varolan bu cevherleşmesinin Erenler formasyonu üzerine itilmesi esnasında parçalanarak şu anki yapısını aldığı düşünülmektedir. Sondajların geneli dikkate alındığında Au zenginleşmesinin daha çok sfaleritçe zengin kısımlarda yüksek, gümüş değerlerinin ise galenitçe zengin kısımlarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

3. SONUÇLAR

- Ruhsat sahasından çinko ve altın için Tam Teknolojik Test numunesi alınmıştır. Numuneler üzerinden yapılan tam teknolojik test raporuna göre; gümüşlü çinko numunesinin giriş analiz değerleri; %2,02 Zn, %0,12 Cu, %0,15 Pb, %0,008 Cd, 0,3 g/t Au ve 9,8 g/t Ag olarak belirlenmiştir. SEM-MLA analizlerinde Zn kaynağının %85i sfalerit, %15inin ise Zn oksit kaynaklı olduğu gözlemlenmiştir.
- Cevherin %20'ye varan miktarda kil içerdiği belirlenmiştir. Yapılan zenginleştirme deneyleri sonucu 38 μm boyutta en yüksek konsantre tenörü alınmıştır. Belirlenen boyut dağılımında flotasyon deneyleri sonucu temizleme aşamalarından sonra %59,60 Zn, %2,84 Cu, %0,31 Pb ve %0,18 Cd içeren konsantre %74,65 kazanım verimiyle elde edilmiştir. Zenginleştirme verimi kaba ve süpürme devreleri sonrasında %84,58 olmakta ve artıktaki Zn verimi %15,42 ve tenörü %0,37ye düşmektedir. Cd'nin Zn ile paralel hareket ettiği gözlemlenmiş ve Zn konsantresinde toplandığı görülmüştür. Au'nun ise yarısının Zn'li ürünlerde kaldığı, yarıya

yakınının ise artıkta kaldığı görülmüştür. Zn konsantresinde Au tenörü 1,5 g/t ve Ag 185 g/t olarak tespit edilmiştir. Ag'nin ise çoğunlukla (%80) Zn konsantresinde kaldığı gözlemlenmiştir.

- Altın için yapılan Tam Teknolojik Test Raporuna göre; altın cevherinin doğrudan siyanür özütlemesi (yığın veya karıştırmalı) için uygun olmadığı ancak bir ön hazırlık işlemi (kavurma) sonrasında özütlenebileceği anlaşılmıştır.
- Fizibilite Etütleri Dairesi tarafından Erenler sahasına ait alternatif Cu, Au, Zn, Ag için alternatif tenör ve tonaj bilgileri aşağıda verilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge1. Alternatif tenör tonaj tablosu

ALTIN			**BAKIR**		
Sınır Tenör (Au ppb) (≥)	**Ortalama Tenör (ppb)**	**Tonaj**	**Sınır Tenör (Cu ppm) (≥)**	**Ortalama Tenör (Cu ppm)**	**Tonaj**
100	462,11	36.815.00	1.000	3.227,79	15.568.207
500	1.217,40	8.931.304	2.000	5.523,25	6.877.489
1.000	1.955,76	3.727.163	3.000	8.007,12	3.768.522
2.000	3.036,66	1.324.321	5.000	12.069,26	1.901.158
3.000	3.801,62	593.649	10.000	16.972,86	926.033
4.000	4.638,51	181.071	30.000	55.801,21	33.625
ÇİNKO			**GÜMÜŞ**		
Sınır Tenör (Zn ppm) ≥)	**Ortalama Tenör (Zn ppm)**	**Tonaj**	**Sınır Tenör (Ag ppm) (≥)**	**Ortalama Tenör (Ag ppm)**	**Tonaj**
5.000	15.289,20	18.994.76	10	41,27	15.402.268
15.000	33.971,61	4.921.691	50	127,17	2.972.618
30.000	74.042,13	1.210.500	100	168,09	1.739.421
50.000	111.832,65	618.364	150	226,32	820.954
100.000	158.266,68	315.739	200	285,92	385.511
150.000	176.169,60	214.864	250	311,12	269.000

- Çalışma sahasında geliştirilen cevherleşmenin geometrik modelleri; mevcut sondajların ve kaya örneklerine ilişkin verilerin, 3B modellemesi ile üretilmiştir.
- Erenler alterasyon sahasında Netpro/mine programı kullanılarak; Cu için **3.227,79** ppm tenörlü **15.568.207** ton, Au için **462,11** ppb tenörlü **36.815.004** ton, Zn için **15.289,2** ppm tenörlü **18.994.763** ton, Ag için **41,27** ppm tenörlü **15.402.268** ton, Pb için **7.066,32** ppm tenörlü **5.288.204** ton kaynak tahmini yapılmıştır.

KAYNAKLAR

Adamia, S. H. A., Lordkipanidze, M. B,. & Zakariadze, G. S., 1977. Evolution of active continental Magrin as examplified by the Alpine History of the caucasus. Tectonophysics, 40, 183-199.

Brauhart, C. W., Groves, D. I. & Morant, P., 1998. Regional alteration systems associated with volcanogenic massive sulfide mineralization at Panorama, Western Australia. Economic Geology, 93, 292–302.

Çiftçi, E., 2000. Mineralogy, paragenetic sequence, geochemistry and genesis of the gold and silver bearing uppercretaceous mineral deposits, Northeastern Turkey, Doktora Tezi, University Of Missouri-Rolla, Missouri.

Delibaş, O., Moritz, R., Ulianov, A., Chiaradia M., Saraç, C., Revan K. M., & Göç, D., 2016. Cretaceous subduction-related magmatism and associated porphyry-type Cu Mo mineralizations in the Eastern Pontides, Turkey: New constraints from geochronology and geochemistry. Lithos, 248-251: 119-137.

Güven, İ. H., 1993. Doğu pontidler'in jeolojisi ve 1/250 000 ölçekli kompliasyonu. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara (Yayımlanmamış).

Kandemir Ö., 2017. Artvin Borçka-Yusufeli arasında kalan alanın jeolojisi. MTA Genel Müdürlüğü Rapor No:13575. 692 s. Ankara.

Konak, N., Hakyemez, Y., Bilgiç,T., Bilgin, R., Hepşen, N., & Ercan, T., 2001a. Kuzeydoğu pontidlerin jeolojisi. MTA Raporu. 378 s., Ankara.

Okay, A. I. & Nikishin, A. M., 2015. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region, International Geology Review,57(5-8), 1051-1076.

Revan, K., 2010. Doğu Karadeniz Bölgesi volkanojenik masif sülfid yataklarının tip özelliklerinin belirlenmesi, Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı doktora tezi. 320 s.

Revan, M. K., Genç, Y., Maslennikov, V., Taner, Ü., Delibaş, O., & Hamzaçebi, S., 2013. Original findings on the ore-bearing facies of volcanogenic massive sulphide deposits in the Eastern Black Sea Region (NE Turkey). Bulletin of the Mineral Research and Exploration 147, 73–89.

Saez, R., Pascual, E., Toscano, M. & Almodovar, G. R., 1999. The Iberian Type of Volcano Sedimentary Massive Sulfide Deposits, Mineralium Deposita, 34, 549- 570.

Tüysüz, N., 2000. Geology, Lithogeochemistry and Genesis of the Murgul Massive Sulfide Deposit, NE-Turkey, Chemie der Erde, 60, 231-250.

Tüysüz, N. & Akçay, M., 2000. Doğu Karadeniz Bölgesindeki Altın Yataklarının Karşılaştırılmalı İncelemesi, Cumhuriyetin 75. Yıldönümü Yerbilimleri ve Madencilik Kongresi, MTA, Ankara, 625-645.

KROMİT ARAMALARINDA KULLANILAN PARAMETRELER

PARAMETERS USED IN CHROMITE SEARCH

Muzaffer Özoktay
Jeoloji Mühendisi (MSc) Serbest Danışman

ÖZ: Türkiye Kromit Madenciliği zor bir süreçten geçmektedir. Bu sürecin ana nedeni Türk Kromcularının, büyük bölümü kurumsal şirketler değildir. Sağlıklı bir arama yapılmadığı gibi üreticiler genellikle krom madenciliğini rant olayı olarak algılamaktadır. Genel olarak krom aramaları Ülkemizde sistematik bir şekilde yapılmamakta, krom madeni üreten kuruluşlarda bu olaya gereği gibi önem vermemektedir. Bilindiği gibi "1972 Penrose Ofiyolit Konferansından" günümüze dek Uluslararası nitelikte bir konferans yapılmamıştır. Yalnız benzer bir etkinliği MMO Adana Şubesi Ekim 2018'de "Krom Çalıştayı" olarak düzenlemiştir. İvedilikle başta MTA, MAPEG, Etimaden, Meslek Odaları, Üniversiteler, sivil toplum kuruluşları, KROMDER ve Krom şirketleri olmak üzere hep birlikte ülkemizde geniş kapsamlı bir "Krom Madenciliği Konferansının" düzenlenmesi ivedilikle yapılmalıdır. Krom aramalarında kullanılan 4 grupta toplam 32 parametre vardır. Parametre olarak tanımlanan verilerin birçoğu yerbilimlerinin temel taşlarıdır. Yerbilim insanları söz konusu bu verilerin özelliklerinden hareket ederek kromit aramalarında nasıl kullanıldığını ortaya koymuşlardır. Bu jeolojik temel veriler (patrametreler) ekonomik işletilebilir kromit yataklarını aramak ortaya koymak için krom jeologları tarafından 100 yıldır kullanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Parametre, Kromit, Prospeksiyon, Dunit

ABSTRACT: *Turkish Chromite Mining is going through a difficult process. The main reason for this process is that the majority of Turkish Chrome makers are not corporate companies. Not only is there no healthy exploration, but producers generally perceive chrome mining as a profit-making event. In general, chrome exploration is not carried out systematically in our country, and chrome mine producing organizations do not give due importance to this incident. As it is known, no international conference has been held since the "1972 Penrose Ophiolite Conference" until today. However, MMO Adana Branch organized a similar event as*

"Chrome Workshop" in October 2018. A comprehensive "Chromium Mining Conference" should be organized urgently in our country, together with MTA, MAPEG, Etimaden, Professional Chambers, Universities, non-governmental organizations, KROMDER and Chrome companies. There are a total of 32 parameters in 4 groups used in chrome searches. Many of the data defined as parameters are the cornerstones of earth sciences. Geoscientists have demonstrated how these data are used in chromite searches, based on their properties. These geological baseline data (patrameters) have been used for 100 years by chrome geologists to search for economically exploitable chromite deposits.

Keywords: *Parameter, Chromite, Prospection, Dunite*

1. GİRİŞ

Türkiye Kromit Madenciliği zor bir süreçten geçmektedir. Öncelikle belirtelim ki maalesef Türk Kromcularının, birkaç şirket dışında, kurumsallaşmadıkları gibi hiçte profesyonel çalışmadıklarını görüyoruz. Genel olarak krom aramaları Ülkemizde sistematik bir şekilde yapılmamakta, gerek akademik gerekse kurumsal nitelikte krom madeni üreten kuruluşlarda bu olaya gereği gibi önem vermemektedir.

Bu kanıya neden vardığımı sorarsanız 50 yılın üzerinde salt krom sektörüne emek vermiş bir kişi olarak eleştiri hakkımı kullandığımı ifade edebilirim. Krom madencileri zoru geldiği zaman ocakları kapatırlar. Nedeni gelecek için Ar-Ge yapılmamıştır ve en önemlisi Maliyet konusudur.

Krom ruhsat ve ocaklarına gittiğiniz zaman krom mostralarının gelişi güzel kazıldığını tüm verilerin dağıltıldığını, tahrip edildiğini görebilirsiniz. Mostranın ilksel konumunun planını, eskizini yapamıyorsan bari ilk konumun fotoğrafını çek. Halbuki ilk kromitin görüldüğü kromit yüzlekleri bir çok jeolojik veriyi barındırmaktadır. İnce bir sicim gibi primer bir kromit

yüzeylenmesinin, derinlerde milyon ton mertebesinde ulaştığını, üretim yapıldığını birçok lokasyonda görmek mümkündür.

Günümüzde Ülkemiz ve yurtdışında birçok yerbilimci Ofiyolitler, Peridotitler, Serpantinler konusunda, nasıl tanımlarsanız tanımlayın, sayısız çalışma yapmakta ve yayınlamaktadır. Bu bilimsel makalelere her yerde ulaşabilirsiniz. Hemen hemen hepsi krom ile ilişkili olmasına karşın **"Krom Aramalarında Kullanılan Temel Verileri"** akademik çalışmalarda göremezsiniz.

Bu çalışmada; kromitin nasıl oluştuğuna değinilmeden salt "Alpin Tipi Podiform Kromit" yataklarının pratik olarak nasıl aranması gerektiğini, takip edilmesi gereken yöntemleri ve parametreleri sunulacaktır. Kromit arama operasyonu 3 aşamalı bir programın uygulanmasıdır.

1. **Aşama-Ön Araştırma:** Çalışma yapılacak kromit ruhsatının veya kromit yataklarını içeren bir peridotit birimi hakkında literatür taraması yapılmalıdır.
2. **Aşama-Jeolojik Prospeksiyon:** Jeolojik prospeksiyon kromit madenciliğinin olmazsa olmazıdır. Ön arama olan bu operasyon alanın genelini kapsayan, 1/5.000 veya 1/10.000 ölçekte yapılmalıdır. Tabii ki bunun için topoğrafik harita ve/veya ilgili program yüklenmiş tablet gerekir.

   2a) Prospeksiyonda asıl amaç; kromiti barındıran dunit sınırları yeri yaklaşık olarak belirtilir. Kromitte lineasyon, foliasyonlar, kromit mostraları belirtilir. Mostralar arası uzanımlarda devamlılığın varlığı irdelenir.

   2b) Harzburjitler içinde yayılım sunan dunitik zonlar dışında; piroksenit uzanımları ve diyabaz (dolerit) daykları haritaya aktarılır.

   2c) Tektonik hatlar, fay sistemleri ve kromitle olan ilişkisi olan "Krom Tektonik" incelenir.

2d) Prospeksiyon çalışmasında krom aramalarında kullanılan "4 Grupta" tanımlanan "32 parametrenin" varlığı araştırılır.

2e) Prospeksiyonda özellikle dunit yayılımlarından yönlü numuneler alınır, ince kesitleri mikroskopta irdelenir, olivindeki forsterit (%Fo) oranlarına bakılır.

3. **Aşama-Ayrıntılı Kromit Jeolojisi:** Prospeksiyonda çıkan verilere göre gerekli görülen alan ve mevcut ocaklarda "5 - 10 hektar arasında 1/1000 ölçekte" ayrıntılı kromit jeolojisi gerçekleştirilir. Sondajlar bu çalışmalardan sonra gündeme gelmelidir.

"Önemli Uyarılar"

- Üretim aşamasında ister yeraltı ister yerüstü olsun kromit gövdelerinin mutlak jeolojisi ve yeraltı galerilerin 1/500 ölçekte jeoloji planları yapılmalıdır.
- Açık işletmelerde de üretim alanlarının cevher-tektonik izohipsleri çıkarılmalıdır.
- Gerek prospeksiyon ve gerekse ayrıntılı jeolojik etütlerde sık sık kesit alınması gerekir. Ama bu kesitlerin bilgisayar ortamlarında değil bizzat klasik yöntemlerle yapılmasını öneririm.
- Kullanacağınız programlar sizi yönlendirmemeli, onlara sizler hükmetmelisiniz.
- Sondaj karotları sistematik olarak muhafaza edilmeli, negatif sondajların bile birer veri olduğu unutulmamalıdır.
- Son yıllarda krom üreten kuruluşlar ve mühendisler "Drone Uçuşları" ile jeolojik harita yapmaktadır. Bu çok yanlış ve sakıncalı sonuçların doğmasına neden olur. Dronela çalışmanın birçok faydası vardır, ancak jeolojik harita ve yorumlama yapılamaz. Dronlar ile çok sağlıklı topoğrafik harita alımı yapılır, arazinin durum tespiti yapılır, peridotit birimleri dışında kireçtaşı gibi birimler ayırt edilir.

- Arazi çalışmalarında teknolojik gelişmelerden, olanaklar içinde mümkün olduğunca faydalanmak gerekir. Uzaktan algılama, optik okuyucu cihazlar, XRF el tipi cihazlar vb. Ama en önemlisi yüksek işlemcili tabletlere Micromine, Surpac gibi programlar yükleyip arazide kullanımı sağlanabilir.

2. KROMİT PARAMETRELERİ

Söz konusu parametreler hepimizin bildiği ve arazide gözlemlediğimiz, uyguladığımız jeolojinin temel değerlerdir. Bu güne dek kromit aramalarında kullanılan değerler toplam 32 adet olup ben bunları 4 grup ta sistematik bir şekilde sınıflandırdım. Bunlar her zaman tartışmaya ve gelişmelere açık bir konulardır. Amacım Kromit aramalar konusunda birliktelik, ortak bir nokta sağlamaktır.

2.1. Peridotit Masif Özellikleri

Peridotit masifinin özellikleri Çizelge 1'de sunulan başlıklar halinde incelenecektir.

Çizelge 1. Peridotit masif özelliği

1	Masifin tipi
2	Masif özelliği
3	Masif büyüklüğü (km^2)
4	Masif içerisindeki kromit yataklarının yoğunluğu ve üretim miktarı
5	Masif deformasyon şiddeti
6	Masifin neresindeyiz

Masif Tipi: Bildiğiniz gibi Krom Yataklarını barındıran 3 tip Masif vardır. Stratiform, Konsantrik ve Podiform. Ülkemizde Peridotitler salt Podiform tipte dir. Bazı yörelerde Konsantrik tipte de masifler bulunmaktadır.

Bunların ekonomik bir özelliği yoktur. Çizelge 2'de kromitin yataklanma türleri sunulmuştur.

Çizelge 2. Kromit Yataklanmaları

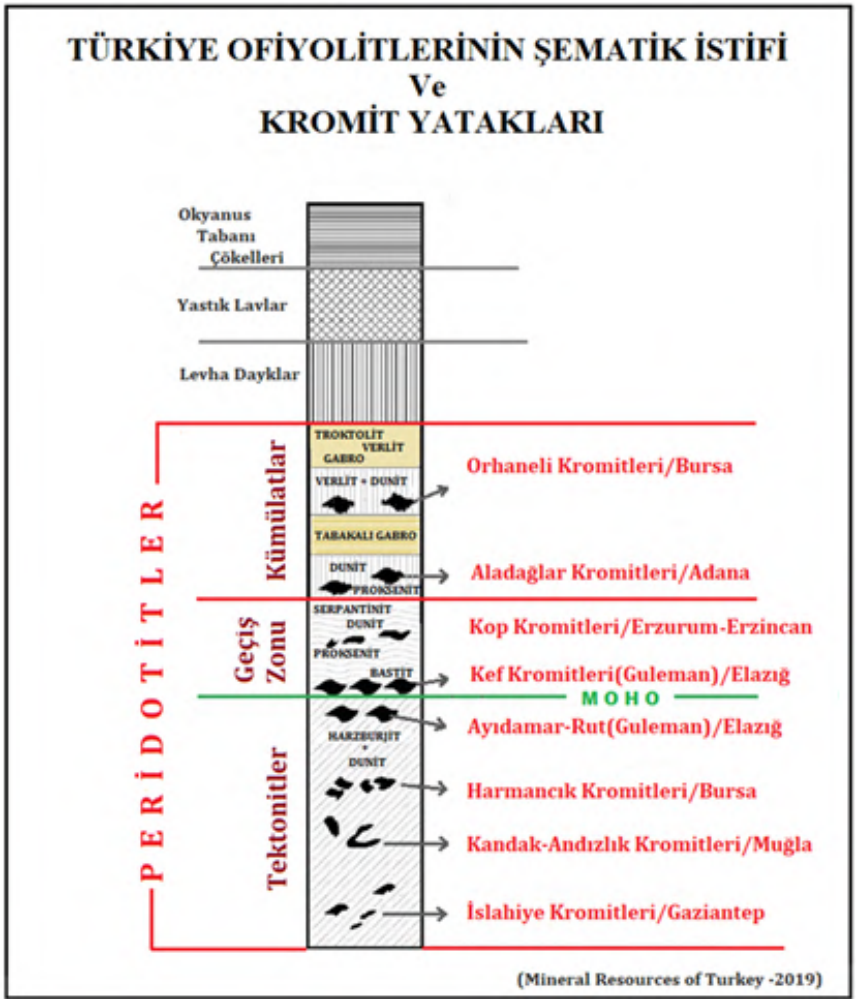
Statiform Krom Yatakları	Duraylı, karasal bölgelerde Ultrabazik-Bazik yüselimlerle oluşur. En önemli örnek Güney Afrika'daki Burweld Masifidir. Türkiye'de yoktur.
Konsantrik Krom Yatakları	Dairesel bir yapıda genç ultrabazik-bazik yükselimler örnek olarak Alaska'daki sokulumlar verilebilir.
Podiform Tip Krom Yatakları	Alp-Himalaya uzanımda, Alp Orajen kuşağı boyunca ofiyolit istifi olarak taşınan ultrabazik-bazik topluluklarıdır. Ülkemizde krom yatakları podiform tiptir.

Masif Özelliği: Ofiyolit Peridotit Masifleri Kümülat Geçiş Zonu ve Tektonitlerden ibaret tir. Alpin Tip Podiform Yatakların da da bu sıralanma aynı bölgede görmek pek mümkün değildir. Örneğin Bursa Orhaneli Kromit yatakları kümülat tipte ve en düzgün bir stratigrafik sıralanmayı gösterir. Bursa Harmancık Bölgesi ise tektonit tipte dir. Daha açık bir ifade ile kümülatlardaki bilgiler ile tektonitlerdeki kromit arama uygulamaları farklılıklar gösterirler. Şekil 2'de Türkiye ofiyolitlerin şematik istifi görülmektedir.

Masif Büyüklüğü: Çok önemli bir faktördür. Örneğin Güney Doğuda ki peridotit birimler, kısa mesafelerde 2 ile 20 km² arasında değişen bir alan kapsayan ve genç tortul birimler tarafından kuşatılmış ve de genellikle küçük çapta kromit adeseleri barındıran masiflerdir. Ülkemizde en geniş Peridotitik Alan 3975 km² ile Güney Batı Anadolu Tektonit Birimidir.

Masifte Yer alan Kromit Ocaklarının Yoğunluğu: İlginç bir parametredir. Yukarda anlattığım. 3900 km² üzerinde ki Güney Batı Anadolu Pedidotit Biriminde irili ufaklı 1700 e yakın kromit ocağında toplam 18 milyon ton

üretim yapılmasına karşın, 50 km² alana sahip Elazığ Guleman Biriminde 135 krom ocağından günümüze dek 36 milyon ton cevher üretilmiştir. Dünyanın en büyük podiform tip geçiş zonu (Tranzation Zone) olan Erzurum-Erzincan arasındaki Kop Bölgesinde 20 milyon tonluk bir üretim sadece 70 in üzerinde ocaklardan sağlanmıştır. Bu Jeoistaistik bilgiler kromit aramalarında yadsınmaz bir yeri vardır.



Şekil 2. Türkiye ofiyolitlerin şematik istifi

Masif Deformasyon Şiddeti: Kümülat ve Tektonitlerin deformasyonları dereceleri farklıdır. Peridotitlerde deformasyon taşınma sürecine (Orojenez koşulları) bağlı olup alterasyon, serpantinleşme, ikincil mineralleşme olağan dır. Kümülatlarda dünit ve harzbujitler tazeliklerini nispeten korumuş

olmalarına karşın tektonitlerde kayaç alterasyonları daha fazladır. Geçiş zonlarında ise taze birimlere pek rastlanmaz.

Masifin Neresindeyiz: Kromit aramalarında en önemli faktör çalışma yapılacak alan veya bölgenin, peridotit masifinin neresinde olduğumuzu bilmemiz öncelikli olmalıdır.

2.2. Krom-Tektonik İlişkisi

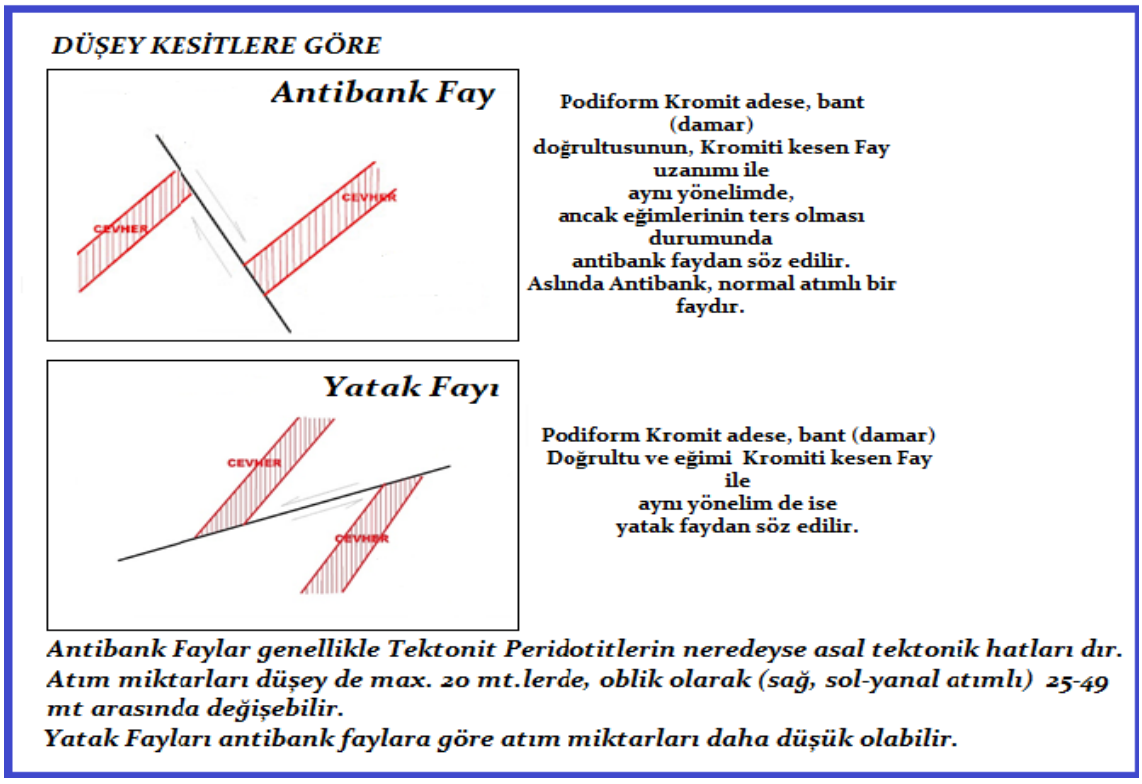
Krom-Tektonik tanımı, ilk olarak, 1955 li yıllarda kurulan Etibank Göcek Üçköprü Krom İşletmeleri tarafından kullanılmıştır. Podiform Kromit yataklarının faylarla olan ilişkisi anlatmak, tanımlamak ve mühendisler arasında ortak bir birliktelik sağlamak amacını taşımıştır. Daha açık bir anlatımla kromit aramalarında araştırma yapacak jeolog ve mühendislerin iyi bir yapısal jeoloji (tektonik) bilgisine sahip olması gereklidir. Krom tektoniğinde önemli faylar Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Krom-tektonik

1	Antibank fay
2	Yatak faylar
3	Doğrultu atımlı faylar
4	Cevherli faylar
5	Rotasyonel faylar

Antibank Faylar: Alman Jeologlar tarafından (Van der Kaaden vd.) kullanılan bu tanımlama aslında normal ve oblik atımlı fay sistemidir. Cevher ile fay doğrultuları aynı veya benzer gidişli ancak eğimleri farklıdır. Pedidotit ve kalker dokanak yakınlarında antibank faylar ters atımlı olabilirler ki bu olağandır. Antibank Fayların Krom Madenciliğinde önemli bir yeri vardır. Gerek açık işletme ve gerekse yeraltı üretim yöntemlerinde sık sık cevherler bu faylar tarafından kesintiye uğrarlar. Antibank Faylarda atım miktarları max. 20 m yi geçmemekte ve tektonitler içinde oldukça yaygındır.

Yatak Faylar: Cevher ve fayların doğrultu ve eğimleri aynı yönde ancak dereceleri farklı olabilir. Genel olarak yatak fayların eğim dereceleri, belli bir kural olmamasına karşın, 0º ile 20º arasında değişmektedir. Yatak Faylar Kümülat Peridotitlerin tipik fay sistemleri denilebilir (Şekil 3).

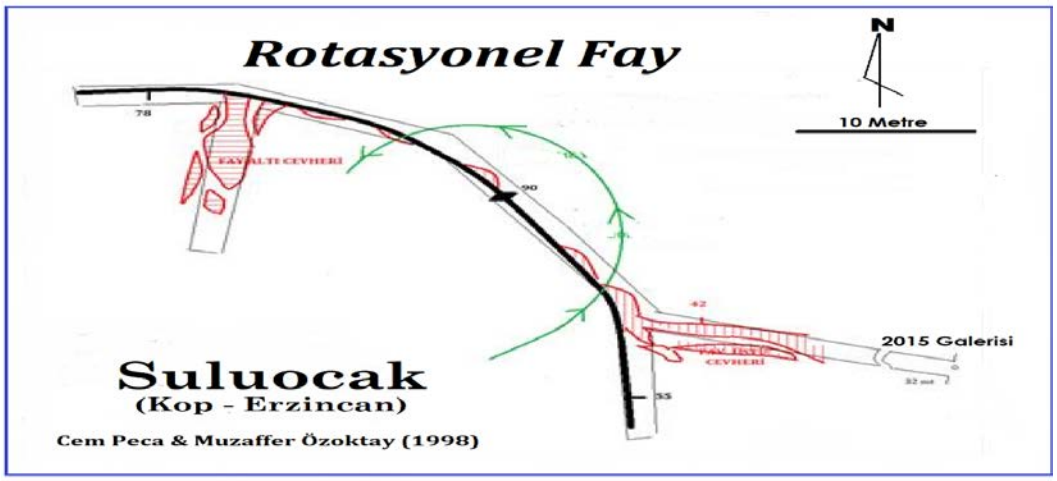


Şekil 3. Antibank ve yatak faylar

Gerek antibank ve gerekse yatak fayları krom ocaklarında en sık rastlanan fay sistemleridir. Belli bir oranlama yapılırsa, Podiform Krom Yataklarının %60 ını antibank faylar oluşturur. Sekonder sokulum olan Dolerit daykları eğer krom band veya adeselerini etkilemiş ise Yatak fayları genellikle olağan olarak karşımıza çıkar. Atım miktarları 5- 25 m arasında gelişir. Kıvrımlı yapıdaki kromit adeselerinde genel olarak yatak faylar olağandır. Antibank ve yatak faylar doğal olarak oblik atımlı da olabildiği gibi ters atımlarda olağandır. Fay ve cevher doğrutuları arasında diyagonal açılar da mümkündür.

Doğrultu Atımlı Faylar: Genel olarak yüzeyde izlenen tipik bilinen klasik faylardır. Oblik sürüklenme veya atım miktarı 150 m' de olabilir. Bilinen bu sistemler, cevher gövdelerini yanal öteleyen faylardır. Kalınlıkları 0,4-3,0 m arasında olabilir. Bu güne dek görülen en uzun öteleme 150 m kadardır. (Toptepe/Palandöken/Erzurum) Genellikle Normal ve oblik atımlıdır. Aynı zon üzerinde olan mostra veya küçük boyutlu kromit ocakları aralarındaki ilişkiler irdelendiğinde tipik doğrultu atımlı fayların etkileri görülür.

Rotasyonel Faylar: Bu tanımlama ondülasyonlu veya torsiyonel fay sistemleri olarak ta adlanabilir. Birçoğunuz hemen nasıl bir fay diye aklınızdan geçebilir. Aslında bilinen tipik doğrultu ve oblik atımlı faylardır. Tek farkı fay zonunun, özellikle gerilme kuvvetleri etkisi ile, doğrultu ve eğiminin yön değiştirmesidir (Şekil 4).



Şekil 4. Rotasyonel faylar

Rotasyonel faylar genellikle ileri derecede serpantinleşmiş tektonit masiflerde olağandır. Serpantinit bir blok içinde bile bu tür strüktürler net olarak görülür

Rotasyonel veya burkulma faylarına en güzel örneklerden biri Birlik Madencilik A.Ş.'nin Kop Bölgesinde, Geçis (Transition) Zonu içinde bulunan Suluocak ta kontrol amacı için açılan 2015 kotlu galeride

cevherleşmeyi kesen fay sürüklenme yönü olan sağa doğru takip edildiğinde Fay zonunu doğrultu ve eğiminin tipik olarak döndüğü net olarak izlenmiştir

Rotasyonel fayları genel olarak peridotit-kalker (özellikle bindirme zonlarında) dokanaklarında büyük tektonik hatlara bağlı olarak gelişmiştir. bulunur. Kum Ocak (Türk Maden-Dalaman/Muğla) Hortum tipli cevher gövdesi olup, doğrultu atımlı bir fayla sırası ile yatay olarak önce sağa, devamında 15 m hareketle yukarı doğru ve tekrar oblik atımla sola doğru 35 metre ötelenmiştir. Kum ocak bu ötelenmeden dolayı cevheri faydan sonraki devamı henüz bulunamamıştır.

Cevherli Fay Zonları: Peridotitler içinde bazı fay zonları cevher izleri içermektedir. Bunların çoğu parçaladıkları ve sürükledikleri bloklardaki, (genellikle dünitler içinde) var olan primer sınırlı krom iz veya lensleridir. Halbuki bazı kalın fay zonları içinde, 0.10 – 0,30 mt boyutunda kromit blokları bulunabilir. Bu cevher, bloklarının geometrisi iyi irdelenirse ana cevher gövdesine ulaşılır.

Ülkemizde birçok masifte bu tür cevherli fay zonlarını görmek mümkündür. Arazide görülen bu cevher içeren faylar çoğu araştırmacı tarafından bağımsız olarak tanımlanmaktadır. Bunların ana gövdesi mutlak yüzeylenmemiş krom adeselerinin varlığını göstermesi bakımından önemlidir.

2.3. Topoğrafik Bağdaşım

Topoğrafik Bağdaşım, çoğunuz bu tanımlamayı belki ilk defa duymuş olacaksınız. Bu grup içinde, krom aramalarında kullandığımız, 3 parametre salt dunitlerle ilgili olarak yer almaktadır. Bildiğiniz gibi dunitler kromit cevherini barındıran, çevreleyen kayaçlar olarak tanımlanır. Maalesef birçok krom madenciliği ile ilgili bu olguyu yatırımcı, mühendis ve çavuşlar henüz kavramış değildir. MAPEG dahi krom ruhsat sahaları için serpantin tanımını,

birçok resmi yazışmalarda "krom serpantin ler içinde bulunur" ibaresi olarak kullanmaktadır. Topoğrafik bağdaşımlar Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Topoğrafik bağdaşım

1	Dunitlerin aşınması
2	Dunit yayılımları ve kalınlıkları
3	Dunit-kromit dokonakları

Dunitlerin Aşınma Süreci: Dunitler kromitleri barındıran ana kayaçlardır. Genel olarak %90 olivin + %10 piroksen den ibaret olup kromitit aksesuar olarak bulunur. Diğer kayaç olan Harzburgitler ise sade bir anlatımla, olivin+piroksenit kristallerinin kombinasyonu ile oluşan kayaç adıdır. Piroksenler aşınmaya dayanıklı kristal olmalarına karşın olivn kristalleri ise piroksen' lere göre daha çabuk aşınırlar. Piroksenler iri kristalli olup aşınmaya dayanıklı olmasına karşın olivinler daha aşınmaya dayanımlı değillerdir. Ancak dünit bünyesinde ekonomik anlamda bir kromit gövdesi barındırıyorsa aşınma söz konusu değildir.

"STERİL DUNİTLER DAHA ÇABUK AŞINIR. KROM GÖVDESİNİ BARINDIRAN DUNİTLER İSE AŞINMAYA KARŞI DİRENÇLİDİR "

Dunitlerin Yayılımı ve Kalınlıkları: Dunit yayılımları tektonitlerde harzburjitler içinde, genellikle cevherleşme doğrultularına paralel olarak kapanımlı, ince uzun mercekler veya adeseler halinde uzanırlar. Kümülatlarda ise dünitler, diğer birimler olan piroksenit ve harzburjitlerle birlikte düzgün ve geniş yayılımlar göstermesine karşın, tektonit dunitler de aynı düzenliği görmek pek olası değildir. Tektonitler içindeki, yüzeyde görülen geniş dünit yayılımları bünyesinde barındırdığı düşük tenörlü bantlı

ve sacınımlı (dissemine) kromit yataklarının varlığı tektonit lerin üst kesimlerinde olduğumuzu gösteren önemli bir işarettir *(Yörükyatağı kromit Ocağı – Tefenni/Burdur).*

Tektonitlerin orta kesiminde krom adeseleri dunitik kılıflar la çevrelenmiş ve harzburjitler içinde dünit adacıkları halinde uzanırlar *(Gölalan Kromit Adesesi–Guleman/Elazığ), Andızlık Krom Ocağı–Dalaman/Muğla)*.

Kromit-Dunit Dokanakları: Kümülatlardaki kromit dünit dokanakları çoğu zaman ilksel sınırlıdır. Tektonitlerin taban kesimlerinde bulunan kromit gövdeleri genellikle yüksek tenörlü, faylı dokanaklar halinde olup ilksel sınırlar yok denecek kadar az izlenir. Geçiş zonlarındaki cevher gövdeleri çoğu zaman, ileri derecede alterasyondan dolayı, faylı sınırlardır.

2.4. Kromit ve Yan Kayaç İç Yapı Elemanları

Kromit ve krom içyapı elemanları krom arama ve üretim şamalarında önem arz etmektedir. Çizelge 5'de kromit ve yan kayaç içyapı elemanları görülmektedir.

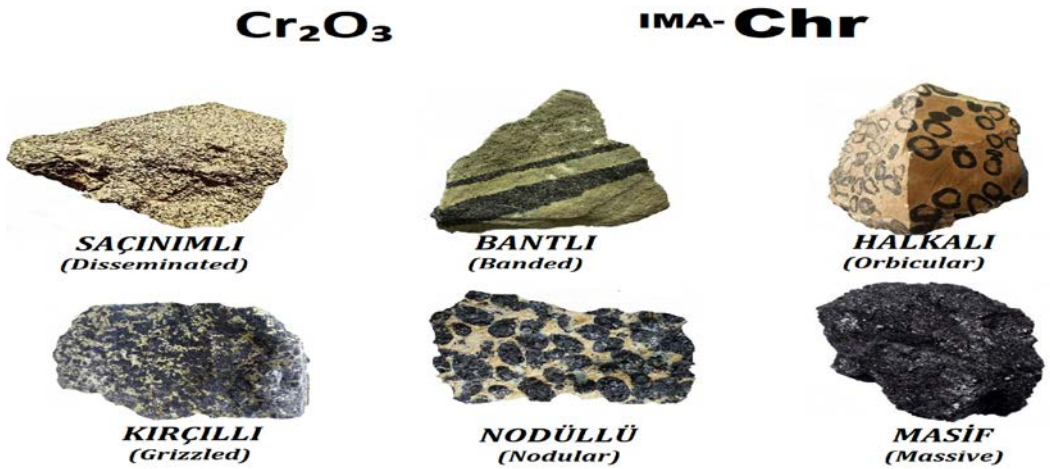
Çizelge 5. Kromit ve yan kayaç iç yapı elemanları

Kromit lineasyon	King bantlar
Kromit foliasyon	Ana kayaç alterasyonu
Kromit doku tipleri	Mağmatik bantlanmalar
Pull-apart dokusu	Ana kayaçta lineasyonlar
Kromitte kıvrım eksenleri	Ana kayaçta foliasyonlar
Kromit yatak tipleri	Yankayaç kıvrımları
Kromitin Mineralojisi	Piroksen damarları
Kromitin kimyasal bileşimi	Dolerit daykları
Kromitin diğer özellikleri	Yan kayaç petrografisi

Kromit Lineasyon: Peridotit kütlelerinde lineasyonlar, özellikle krom spinel ve piroksen yığışımlarının uzanımlan ile belirlenir. Cevher içinde çizgisellik genel anlamda tabakalanma yönü, dalım yönü (açısı değil), piroksenlerdeki king bantları ve kıvrım eksenleri ile benzer değerler gösteririler. Harzburgitler içinde uzanan dünit yayılımları da bu paralelizasyona uyum gösterir.

Kromit Foliasyon: Cevherin Yapraklanması genel olarak yan kayaçtaki magmatik bantlanmalara uyum gösterir**.** Yapılacak ayrıntılı kromit jeolojisi çalışmalarında Kromit ve yankayacın lineasyon ve foliasyon ölçümlerini haritalara aktarılarak irdelenmesi yüzeylenmemiş kromit gövdelerinin bulunmasında çok önemli bir katkı sağlamaktadır.

Kromit Dokuları: Saçınımlı kromitler Kümülatların tipik cevherleridir.Bantlı ve dissemine Kümülat ve tektonitlerde, Halkalı ve Nodüllü cevherler tektonitlerde, Kırçıllı ve masif cevherler ise kümülat, geçiş zonu ve tektonitlerin karakteristik özellikleridir (Şekil 5).

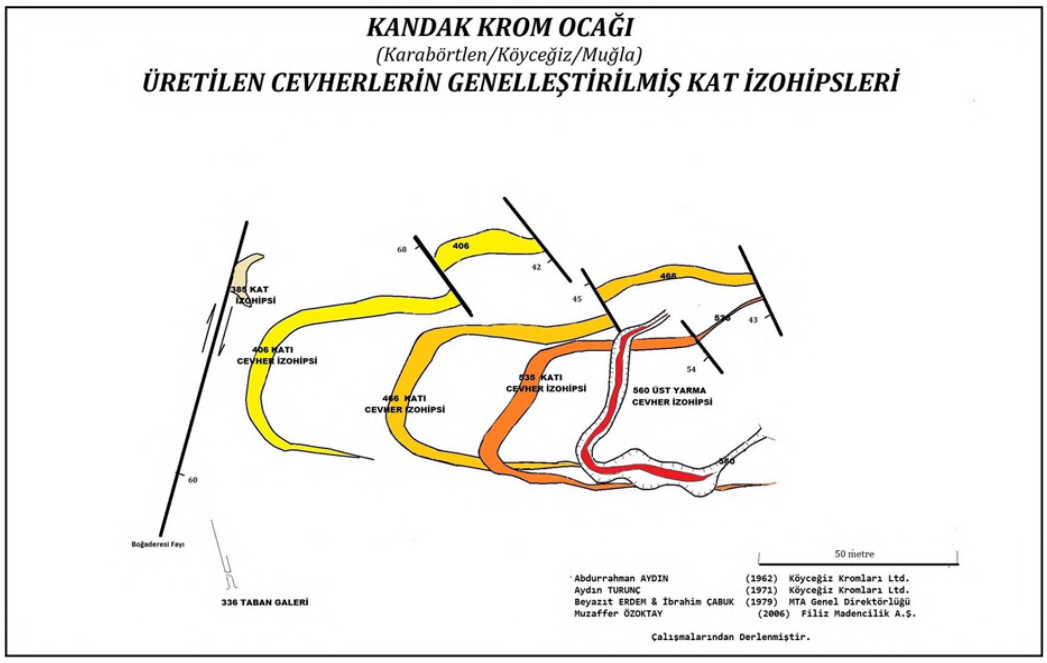


Şekil 5. Kromitin doku tipleri (Özoktay, 1989)

Pull-Apart Dokusu: Kromit mercekleri ile dünit kılıfının ve dünit kılıfı ile harzburgitin sınır ilişkileri çoğu yerde ilksel olmasına karşın, bazı yerlerde ise yer yer yırtılmıştır. Söz konusu yırtılmalara dik gelen yönler plastik

deformasyon yönü ve basınç şiddetini göstermesi bakımından önemlidir. Çek-Ayır salt kromitlere özgü bir strüktür olmayıp yantaşlarda da izlenmektedir.

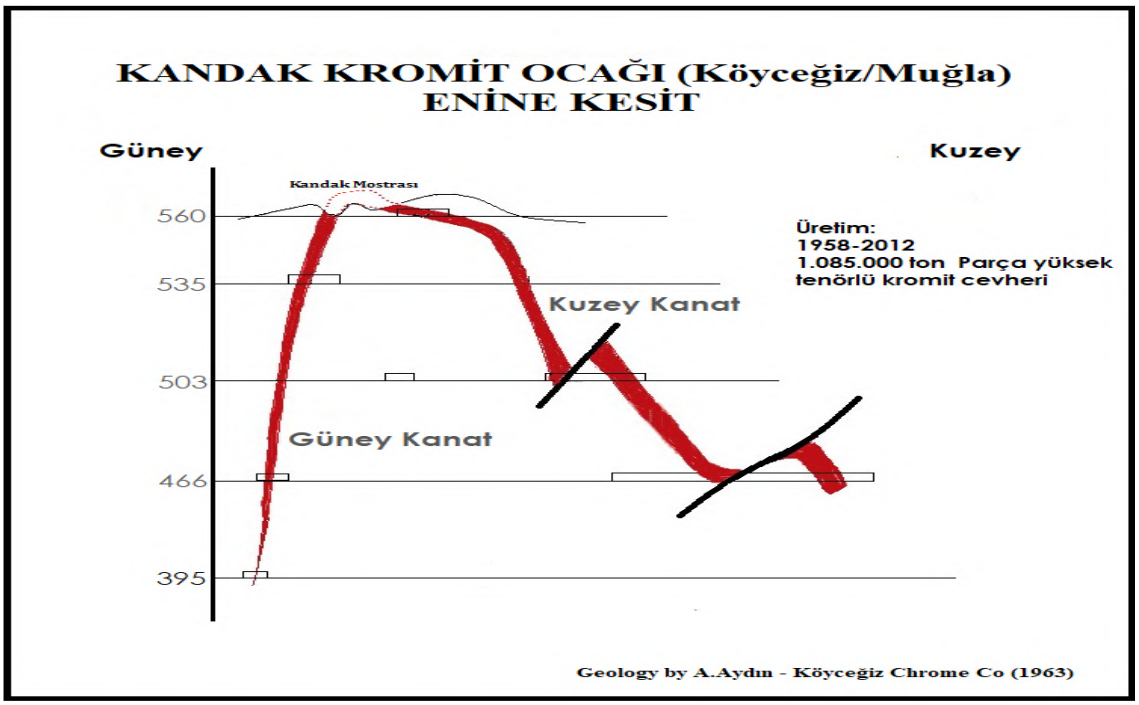
Kromitte Kıvrımlanma: Podiform Tip Kromit yataklarının büyük çoğunluğu kıvrımlı strüktürdedir. Birçok madenci kıvrımlanma yapısını düşünemedikleri için kromit ocaklarını «maden bitti» diye terkettiklerini biliyoruz (Şekil 6, Şekil 7).



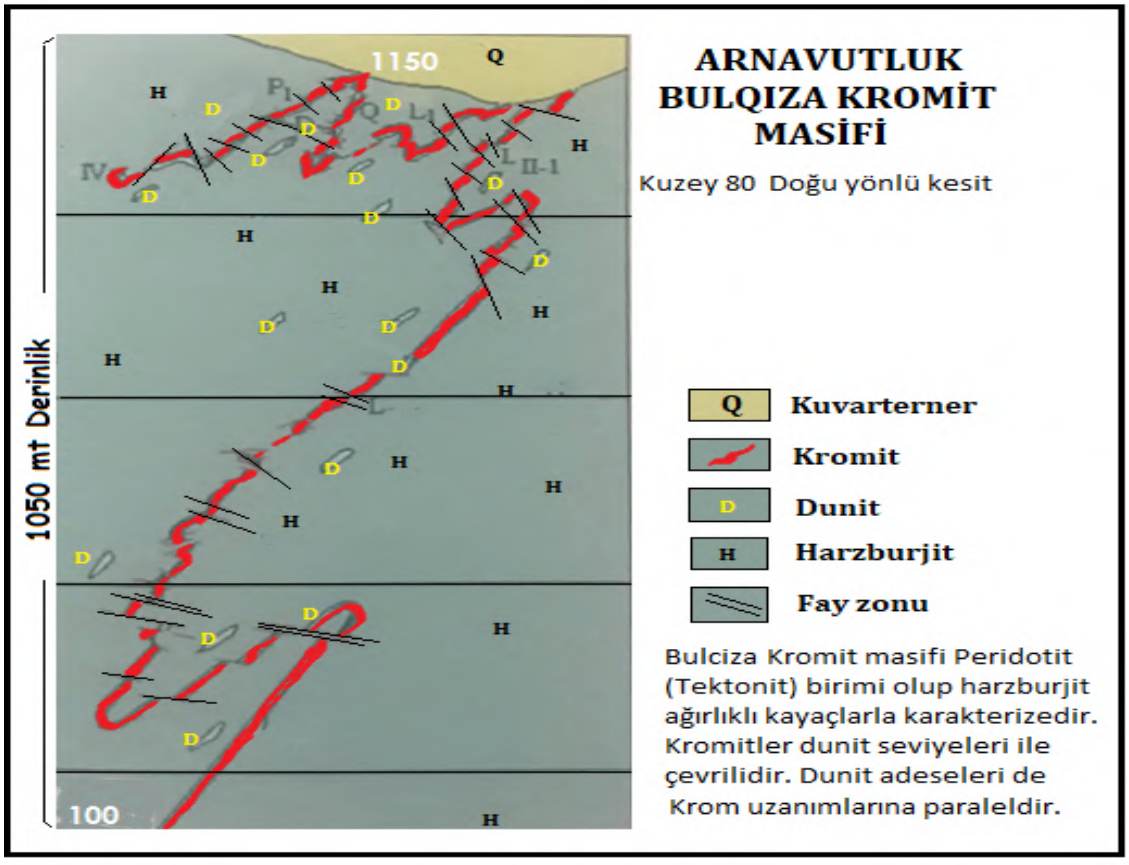
Şekil 6. Kandak kromit ocağı (Köyceğiz/Muğla)

Podiform tip kromit gövdelerinin yaklaşık %40'ı kıvrımlı strüktürdedir. Özellikle arama daha doğrusu ilk gözlem döneminde krom mostraları gelişi güzel kazılarak tüm veriler tahrip edilmektedir (Şekil 8).

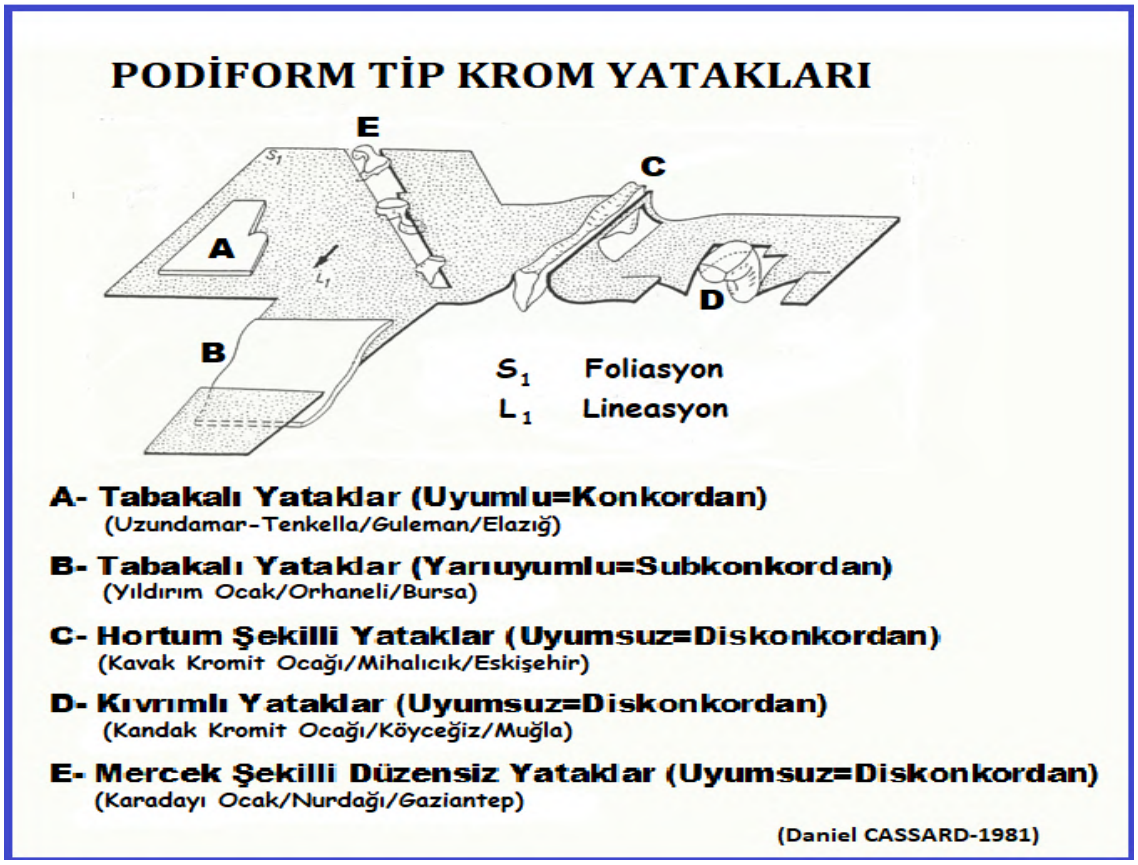
Krom mostralarının ilksel konumları birçok jeolojik veriyi barındırmaktadır. İnce sicim gibi primer bir kromit yüzeylenmesinin, derinlerde milyon ton mertebesinde ulaştığını, üretim yapıldığını birçok lokasyonda görmek mümkündür. Şekil 9'da Kromit Yatak Tipleri görülmektedir**.**



Şekil 7. Kandak kromit ocağı enine kesit (Köyceğiz/Muğla)



Şekil 8. Bulqiza kromit yatağı ocağı enine kesit (Arnavutluk)



Şekil 9. Podiform tip krom yatakları (Cassard, 1981)

Kromit Minerolojisi: 1-Metalurjik, 2-Refrakter, 3-Kimyasal

Podiform Kromit Yataklarının %85'i Metalurjik, %8 refrakter, %2'si kimyasal niteliktedir. %5'lik dilimde ise nonekonomik özellikte olan ve genellikle melanjlarda ofiyolitlerin resudial alanlarındaki kromitlerde bulunur.

Kromit Kimyasal Yapısı: Kimyasal Bileşim, Cr_2O_3, Cr/Fe Rasyo, Al/Mg Rasyo, Al_2O_3, Feo, SiO_2, MgO, CaO, P ve S değerleri yanısıra cevherleşmenin serbestleşme kriterleri, bileşik mineral özellikleri, zenginleşme oranları analizlerde tanımlanmalıdır. Bu bilgiler bir kromit yatağının ekonomik olup olmadığını ifade eden temel verilerdir. Arazi çalışmalarında, değişik noktalardan alınacak en az 2 veya 3 kromit örneğinin tam analizinin yapılması çok önemli olacaktır.

Kromit cevherlerinde alüminyum (Al_2O_3) içeriği, cevherin oluşum koşullarına ve türüne bağlı olarak değişir. Genel olarak; metalurjik kromit Cevherlerinde Alüminyum oksit (Al_2O_3) içeriği genellikle max %10 olmalıdır. Daha çok yüksek Cr/Fe oranı ve düşük gang mineralleri içeriği tercih edilir. Refrakter Kromitlerin Al_2O_3 yüzdesi %20- %30 arasında dır. Yüksek Al_2O_3 içeriği refrakter malzemelerde dayanıklılığı artırır. Kimyasal özellikte kromitlerde Al_2O_3 içeriği genellikle %10-20 arasında olmalıdır. Analiz uygulamaları XRF (X-ışını florerans spektrometre), ICP-OES (indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometre), ve kimyasal analiz yöntemleri ile yapılır.

Kromitin Diğer Özellikleri: Cevherleşme doğrultusu, eğimi, dalımı, adese veya damarın ortalama kalınlığı, mutlak ölçülmeli ve haritalanmalıdır. Birçok kişi cevherin eğim ve dalımının aynı tanımlama olduğunu ifade etmektedir ki bu çok yanlış yaklaşımdır.

King Bantlar: Özellikle piroksen kristallerinde izlenen, deformasyona bağlı kıvrımlanmalardır. Tektonit peridotitlerde ayrıntılı jeolojik çalışmalarda king bantlarının varlığı kromit gövdelerinin kıvrımlı strüktürde olduğunu gösteren önemli bir veridir. King bantlar piroksenler yanı sıra olivin kristallerinde de izlenir.

Ana Kayaç Alterasyonu: Alterasyon ile Deformasyon farklı farklı olaylardır. Özellikle Dunitler günlenme olarak tanımlanan atmosferik koşullara bağlı alterasyona maruz kalabilirler. Taze dunitler koyu yeşil renkleri günlenme nedeni ile kirli sarı renk alırlar.

Diğer kayaçlarda olduğu gibi dunitlerde günlenme: fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlere bağlı, atmosferik olaylarında etkisiyle, kayacın dış yüzeylerindeki değişimlerdir. Dunitte rengin açık ve koyu sarıya dönmesi, yapraklanmalar, konkovidal kırılmalar günlenmenin başlıca belirtileridir

Taze dünitte ki olivin içindeki demir Fe^{+2} şeklindedir. Günlenme, yani yüzey alterasyonu (su ve karbondioksit) ile serpantinleşne olunca olivin içindeki Mg ve Fe iyon haline geçip kolayca sekonder mineral (manyetit [demir Fe^{+3} halinde], dolomit, manyezit vb.) oluşumuna neden olur. Manyetit minerali ismi üzerinde manyetiktir. Jeofiziksel aramalara duyarlıdır. Manyetik alan eski dünitik alana karşılık gelebilir. Aramalarda kolaylık sağlayabilir. Mesela kalın bir kçt altında dünit seviyelerini ve dolaylı olarak da kromit yt bulunmasında faydalı olabilir. Peridotit varlığı Hiç bilinmeyen bir alanda kromit yatağının keşfini sağlayabilir.

Mağmatik Bantlanmalar: Aşınmaya karşı dayanıksız olan Dunitler ile aşınmaya dirençli piroksen minerallerinin yoğun olduğu Harzburjitlerin kombinasyonu olan ardalanmalardır (Şekil 11).

Şekil 11. Yürücekler Köyü (Orhaneli/Bursa) yol yarması mağmatik bantlanmalar

Kayaçta Lineasyon: Lineasyonlar (çizgisellik) foliasyon düzlemlerinde uzamış minerallerin yönü ile tanımlanır. Peridotit kütlelerinde lineasyonlar, özellikle krom spinel yığışımlarının veya piroksen yığışımlarının uzanımlan ile belirlenir. Kromit kütlelerinde ise, iki tip lineasyon oluşabilir:

Kromit aramaları sırasında kayaçlardaki lineasyon ve foliasyon yapıları önemli ipuçları sağlar. Kromit genellikle ultramafik kayaçlarla ilişkili olup, özellikle ofiolitik komplekste bulunur. Bu nedenle, yapısal jeoloji unsurları kromit damarlarının veya merceklerinin bulunmasına yardımcı olan önemli bir göstergedir.

Yankayaçta ki lineasyon ve foliasyon yönleri, cevherin uzanımı hakkında bilgi verir. Yani kromit içeren kayaçlarda deformasyon sonucu mineraller belirli bir doğrultuda hizalanabilir. Bu doğrultu, cevherleşmenin potansiyel yönünü gösterir.

Foliasyon (Tabakalanma): Şistozite veya gneissik yapı gibi özellikler, kromit açısından önemli olan tektonik süreçleri ve kayaçların gerilme yönlerini anlamaya yardımcı olur.

Sonuç olarak, dunit ve harzburgit kayaçlarındaki lineasyonlar, hem magmatik hem de tektonik süreçlerin bir parçası olup özellikle kromit aramalarında önemli yapısal göstergelerdir. Kromit aramalarında kayaçlardaki lineasyon ve foliasyon özellikleri, cevherleşmenin uzanım yönünü belirlemeye, sahada detaylı inceleme yapmaya ve ekonomik yatakların bulunmasına önemli katkılar sağlar.

Kayaçta Foliasyon: Harzburgit ve dunitlerde foliasyon konusu, özellikle jeoloji ve petrografi alanında, ultramafik kayaçların deformasyon süreçleriyle ilgili önemli bir konudur. Sonuçta; Harzburgit ve dunitlerde foliasyon, deformasyon süreçlerine, manto dinamiklerine ve kısmi erime koşullarına bağlı olarak gelişir. Harzburgitler genellikle daha belirgin bir foliasyon gösterebilirken, dunitlerde bu durum daha çok kanal akışına bağlıdır. 1997 yılında Birlik Madencilik Kop Bölgesi Külekçi Tepe de, 7 jeoloji mühendisi (İsmet Çakmak, Hasan Can, Muzaffer Özoktay, Trond Vesial-Norveç, İbrahim Milushi - Avni Meshi - Cem Peca-Arnavutluk) tarafından yüzeyde hiçbir kromit izi bulunmayan alanda 1/1000 lik ölçekte

sadece yantaşta lineasyon ve foliasyon ölçümü aldık. Elde edilen veriler şirketin jeofizik ekibi nin çalışmaları ile desteklendi. Sonuçlar sondajlarla irdelendi ve bugün Külekçi kromit ocağı 2 milyon tonun üzerinde üretime sahne olmuştur.

Yankayaç Kıvrımlanmaları: Kromit gövde veya lenslerinde görülen kıvrımlanmalar yan kayaç olan dünit ve harzburjitlerde de görülebilir. Eğer, bir masif içinde izlenen magmatik bantlanmalar yanı sıra kayaç lineasyonlarında da bir kıvrımlanma görüldüğü takdirde aranan kromit yatakları da mutlak kıvrımlı bir yapıda olacağı düşünülmelidir.

Piroksen Damarları: Peridotit masiflerindeki piroksen damarları ile kromit yatakları arasında doğrudan ilişki vardır. Kromit yatakları, bilindiği gibi peridotitler içinde, manto kökenli magmanın fraksiyonel kristallenmesi ile oluşur. Bunlar, sırasında erken evrede çökelerek biriken kromit tabakaları şeklinde gelişir. Piroksen damarları ise, peridotit içinde geç evre magma hareketleriyle ilişkilidir.

Hem kromit hem de piroksen ler peridotitik mağmanın Olivin-Kromit ayrımlaşması sürecinde oluşur.

Bu damarlar genellikle klino-piroksen (diopsit, augit) veya orto-piroksen (enstatit, bronzit) açısından zengindir ve kromit yataklarının yakınında bulunurlar.

Piroksen damarları ve kromit yatakları genellikle aynı magmatik sistemin farklı evrelerinde gelişen yapılardır. Kromit yatakları erken evrede oluşurken, piroksen damarları daha geç evrelerde gelişir. Bu nedenle, piroksen damarlarının varlığı, kromit yataklarının jeodinamik evriminde önemli bir göstergedir. Daha net bir anlatımla iri kristalli piroksen damarları çevresinde krom ekonomik kromit yatakları pek bulunmaz.

Dolerit Daykları: Bileşim olarak gabro ile aynı özelliklere sahip olan doleritler, başlıca plajiyoklas + piroksen + olivin'den oluşmuştur. Diyabaz

ve Dolerit aynı anlamda ancak taze olanlara ***Dolerit***, altere olanları ***Diyabaz*** olarak bilinir.

Podiform Peridotit masiflerinde bulunan dolerit dayklarının kromit oluşumu ile olan ilişkisi, yıllardır tartışılan bir konudur. Ülkemizde de dolerit dayklarının varlığı bazı bölgelerde krom gösterge kayacı olarak kabul edilmekte dir. Gerçekte doleritlerin petrojenezi, kromitlerin oluşum mekanizmaları açısından araştırılmalıdır. Dolerit daykları, genellikle ofiyolit masiflerindeki peridotitleri kesen mafik bileşimli damarlarlardır. Isı ve metasomatik etkileşimlerde yani daykların sokulumu sırasında sıcaklık artışı ve hidrotermal sıvı akışında kromitlerin yeniden kristalleşmesine neden olabilir. Veya mevcut kromit cevherlerini yeniden ısı artışı etkisi ile yeni kromit çökelmelerine neden olabilir. Bu direkt olarak özellikle tektonitlerde orbiküler kromit dokuları nın oluşumuna neden olacaktır.

Dolerit dayklarının kromit oluşumu ile doğrudan ilişkisi olmasa da, bu daykların sokulumu ısı, akışkan hareketleri ve deformasyon yoluyla kromit yataklarını etkilemekte ve kromit oluşumu ve dağılımı incelenirken dolerit dayklarının jeolojik bağlamda nasıl bir rol oynadığı detaylı petrografik ve jeokimyasal çalışmalarla araştırılmalıdır. Sonuç olarak dolerit dayklarının yoğunluğu kromit yataklarının rekristalizasyon sürecinde cevher içeriğinde Fe ve Si artışına neden olduğu unutulmamalıdır. Krom arama ve yeraltı veya yerüstü üretim dönemlerinde karşımıza, harzburjit, dünit, dolerit (diabaz), serpantinit karşımıza çıkacak litolojik kayaçlardır.

Yankayaç Petrografisi: Kromit cevherini arama sürecinde, yan ve çevre kayaçların petrografik özellikleri, cevherleşmelerin potansiyeli ve jeolojik süreçler hakkında çok önemli kritik bilgiler sağlar. Yakın geçmişte petrografik çalışmalar genel olarak akademik nitelikte kabul ediliyordu. Günümüzde ise krom madeni aramalarında yan ve çevre kayaçların mikro petrografik analizleri önemli avantajlar sağlamaktadır.

Dokusal olarak; lerzolitin kısmi ergimesi ile oluşan kalıntı peridot harzburjit olup tektonit dokuludur. Yine kısmi ergime ile gelişen ve kromit ile eşyaşlı olan kromiti mantolayan dünitler kümülatik dokuludur. Bazı dünitler % 10 a kadar piroksen içerebilir. Tamamen serpantinleşmeleri durumunda harzburjite benzetilerek içinden çıkılamaz hal alabilirler. Ancak bunların sahip oldukları kümülat doku harzburjitten ayrılmalarını sağlar.

Mineraloji-petrografi açısından; harzburjit içinde klinopiroksen (cpx) olmamalı. Hele iri kristalli cpx mineralleri hiç olmamalıdır. Dünit içerisinde de cpx olmamalı (bazan % 5 kadar olabiliyor). Dünit içindeki olivin de ağırlıklı olarak forsterit bileşimli olmalıdır.

Manyezit varlığı: Kromit mostralarında cevher etrafında yoğun manyezit olması düniti oluşturan olivinin forsterit oranının çok yüksek olduğu anlamını taşır. Bu da olivinde analiz yapmadan aramalardaki umudu artırmayı sağlar.

Dünitik kayaçların Yüksek Mg/Fe oranı: Kromit oluşumunda beklentiyi artırır.

Krom içeriğindeki (Cr/Al oranı): Kromitin kalitesini ve ekonomik değerini belirleyen önemli bir faktördür.

Çevre kayalarda piroksenitin varlığı: kromit potansiyelini artırır. Kütle hacimleri çevredeki kromit oluşumu ile doğru orantılıdır.

Bu özelliklerin birçoğu arazi incelemeleri, kristal kimyası ve ince kesit petrografik analizlerle irdelenir. Böylece Kromit madeni arama sürecinde bu özellikler dikkate alınarak jeologlar tarafından detaylı bir şekilde incelemeler yapılarak, potansiyel yatakların belirlenmesine çalışılır. Özellikle petrografik analizler, bölgenin jeolojik geçmişi ve kromit oluşumu ile ilgili kritik bilgiler sağlar. Gerek jeoloji ve gerekse maden mühendisi olsun bir kromit madeni şirketinde çalışılıyorsa mutlak bir krom petrografı ile birlikte görev yapmalarında yarar olacaktır.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Krom jeolojisinin temel verileri olan 4 grupta ki 32 parametreyi kullanarak yüzeylenmemiş alanlarda kromit gövdelerine ulaşmak mümkündür. Bizler bunu 30 yıldır uyguluyor ve başarılı sonuçlar alıyoruz.

Yukarıda da değindiğim gibi Kromit cevheri bakımından Dünyanın sayılı ülkesi olmamıza karşın krom madenciliğine yeteri kadar önem verilmediği kanısındayım. Özellikle kromit aramaları konusunda, kurumlar arasında birliktelik olmadığı gibi rezervler ve geçmişteki üretimler konusunda da sağlıklı veriler bulunmamaktadır. 1970 li yıllarda Dr Tandoğan Engin ile başlayan "Krom Madeni Arama Süreci" Türk Krom Ekolüne dönüşmeden sönümlenmiştir. Basit ve çarpıcı bir örnek vermek gerekirse Türkiye'de Krom Arama Konusunda Doktoralı Krom Jeoloğu sayısı 7 kişidir. Halbuki dış satımının %60 sını Kromit ihracından sağlayan Arnavutluk'ta kromit konusunda doktora yapan jeolog ve maden mühendisi ise 300 ün üzerindedir.

Bilindiği gibi "1972 Penrose Ofiyolit Konferansından" günümüze dek Uluslararası nitelikte bir konferans yapılmamıştır. Yalnız benzer bir etkinliği MMO Adana Şubesi Ekim 2018'de "Krom Çalıştayı" olarak düzenlemiştir.

İvedilikle başta MTA, MAPEG, Eti Maden, Meslek Odaları, Üniversiteler, sivil toplum kuruluşları, KROMDER ve Krom şirketleri olmak üzere hep birlikte ülkemizde geniş kapsamlı, aramadan, üretime dek politikaları da kapsayacak bir "Krom Madenciliği Konferansının" düzenlenmesi ön koşul olduğunu düşünüyorum. Tabii ki bu nokta da asıl amaç gerek arama gerekse üretim aşamalarında ortak bir dil kullanılmasının empoze edilmesidir.

Çarpıcı bir örnek vermek gerekirse, Ülkemiz yüzölçümünün %17,30'u Ofiyolitlerle kaplıdır. 5000'e yakın kromit ocak ve mostraların

yeraldığı, Kümülat, Geçiş Zonu, Tektonitler ve ofiyolitik Karmaşıkların (Melanj) toplamı ise yaklaşık 14.745 km² olup tüm ofiyolitlerin ancak %10,8 ini karşılamakta geri kalanları ise okyanus taban çökelleri, yastık lavlar, levha dayk ve gabroik birimlerdir. 135.511 km² olan ofiyolitlerin yaklaşık 2-3 katı büyüklüğünde bir yayılım ise neojen gibi genç birimler ile örtülüdür.

14.745 km² alana sahip Krom yataklarını barındıran Peridotitlerimizin. Kalınlıkları konusunda sağlıklı bir bilgi tam değildir. Bu nedenle Peridotitik birimlerin hacimsel dağılımları ve dolayısıyla kromitlerin derinlikleri konusunda gündemde olan bir tartışmadır. Türkiye'de Erzurum Kop Bölgesi Ezan Ocak yüzeyden dik olarak 800 mt derinlik ile Türkiye'nin en derin krom ocağı konumundadır. Bunun yanısıra, Elmacı Madencilik Demircili Kromit Ocağı (Pınarbaşı/Kayseri), Dedeman Madencilik Pulpınar Kromit Ocağı (Pınarbaşı/Kayseri), Türk Maden Şti Kavak Kromit Ocağı (Mihalıççık/Eskişehir), Eti Elektrometalurj, Andızlık Kromit Ocağı (Etibank Üçköprü Göçek' ten devir-Dalaman/Muğla) 500 mt nin üzerinde derinliğe ulaşmış ve üretimler devam etmektedir. 135.511 km² Ofiyolit yayılımlarının yaklaşık 2 katı Bir alanın Neojen ile örtülü olduğu düşünülmektedir.

TÜRKİYE STRATEJİK MADEN OLAN BİR KROM ÜLKESİDİR.

Kromit te çalışan maden ve jeoloji mühendis meslektaşlarıma krom envanterine baz olabilecek bir "Kromit Yatakları Bilgi Formu" Şekil 12'de sunulmuştur.

KROMİT YATAKLARI BİLGİ FORMU

Chromite Deposits İnformation Page

RUHSAT NO *Number Of License*	**İR 200705223**	**BÖLGE** *Region*	**Acıpayam / Denizli**
OCAK ADI *Name Of Mine*	**Desandre Ocak**	**SAHİBİ** *Owner*	**MTG Madencilik A.Ş.**

Koordinat *Coordinate*		**x**	y	z	**Harita** Map
	Yarma	**4146755**	**703695**	**1002**	**N 21-b_1**
	Galeri	***Yama aynasından desandre girildi***			

Ana Kayaç *Host Rock*	**Taze Harburjitler içinde altere olmuş Dunitler**
Yapısal Tip *Host Rock*	**Diskonkordan tip**
Doğrultu & Eğim *Strike & Dip*	**118° / 45° (N 062 E / 45 SE)**
Cevher Dalımı *İnclination*	**N 205 :-35**
Yatak Tipi *Deposite Type*	**Kıvrımlı Strüktür**

Çizgisallik *Lineation*	**Kayaç** *Rock*	**127° / 78°**	**Cevher** *Ore*	**122° / 55°**
Yapraklanma *Foliation*	**Kayaç** *Rock*	**300° / 75°**	**Cevher** *Ore*	**-**
Cevher Dokusu *Ore Texture*	**Primer sınırlı Banrtlı dissemine**			

Boyutlar *sİze*	**Uzunluk** *Length*	**Derinlik** *Widh*	**Kalınlık** *Thickness*
	9 mt	**1,8 mt**	**0,5 mt**

Jeolojik Çalışmalar *Geological Survey*	**Saha genelinin 1/5000 ölçekli prospeksiyonu yapıldı. Ocak alanını 1/500 ölçekli Ayrıntılı Jeolojik etüdü yapıldı**

				% Cr_2O_3
Kromit Tipi *Ore Type*	**Masif**	*Massive*		
	Nodüllü	*Nodular*		
	Saçınımlı	*Disseminated*		
	Bantlı	*Banding*		
	Faylı	*Faulting*		

TOPLAM ÜRETİM *Total Production*	**Tüvenan** *Raw Ore*	**Satılık** *Ore Sale*
	20 ton	**20 ton**

Şekil 13. Kromit bilgi formu

KAYNAKLAR

Ahmet, H. A., Shojı, A., & Abdel, K. A., 2001.Petrological characteristct of podiform choromitites and associated peridotites of the pan african proterozoic ophiolite complexes of Egypt. Mineraliun Deposita, 36, 72-84.

Arai, S., 1997. Origin of podiform chromitites. Journal of Asian Earth Sciences, 15, 2-3, 303-310, Pergamon.

Bucher, K., & Grapes, R., 2002. Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer International Publishing, ISBN 3031125932, 9783031125935

Baran, H.A., 2003. Andızlık Zımparalık (Fethiye-Muğla) civarındaki ultramafik kayaçların ve kromitlerin kökeni. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 76 s.

Cassard, D., Nicolas, A., Rabınovıch, M., Leblanc, M., & Prınzhofer, A., 1981. Structural classification of chromite pods in Southern New Caledonia. Economic Geology, 76, 805-631

Çapan, U., 1980: Toros kuşağı ofiyolit masiflerinin (Marmaris, Mersin, Pozantı, Pınarbaşı ve Divriği) içyapıları, petrolojisi, ve petrokimyalarına yaklaşımlar. Doktora Tezi , Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Enstitüsü, 400 s., Ankara.

Engin,T., & Hırst, D. M. 1970: The Alpine chrome ores of the Andızlık-Zımparalık area, Fethiye, SW Turkey. Institution of Mining And Metallurgy Transaction Sect. B, 79:16-29.

Engin, T., Özkoçak, O., & Artan, Ü., 1987 General geological setting and character of chromite deposits in Turkey: in evolution of chromium ore fields. In: Stowe CXW (ed) Evolution of chromium yields. Von Nostrand Reinhold Company, New York, 195–219.

Ersoy, Ş., 1990.Dirmil ve Burdur güneyindeki tektonik ve neootokton birimlerin stratigrafisi ve ortamsal yorumu. Türkiye Jeoloji Bülteni, 35,2, S.9-12.

Gracıansky, P. & Ch. De., 1972: Teke yarımadası (Likya) toroslarının üst üste gelmiş ünitelerinin stratigrafisi ve Dinaro-Toroslardaki yeri. MTA Dergisi 71, 73-92.

Karaman, M. E., 2013. Yapısal jeoloji ve uygulamaları. ISBN 978-975-94970 Akdeniz Üniversitesi Yayın Komisyonu kararı ile basılmıştır.

Kerr, P. F., 1959. Optical mineralogy. McGraw-Hill Book Company. Inc.

Moıser, D. L., Singer, D. A., Moring, B. C., & Galloway, J. P., 2012. Podiform chromite deposits-database and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey Report 5157, 54p.

Nicolas, A., 1988. Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere. Kluver Academic Publishers. S.323

Pişkin, Ö., 2010. Ofiyolit nedir ?, gözlemler, hipotezler, sorunlar, yorumlar. DEÜ Mühendislik Fak. Yayını No: 329 s. 128.

Robertson, A. H. F., & Parlak,O. (2009): Türkiye ve yakın doğu Akdeniz bölgesindeki kretase yaşlı ofiyolitlerin oluşum ortamı ve yerleşimlerine genel Bakış. Türkiye Jeoloji Kurultayı 836 p.

Rendeng, S., Wıılıam, G., Suzanne, Y. O., Qıshuaı, H., Xıaoran, Z., Delıang, L., Xıachen, Z., Qıongıa, X., & Lıng, D., 2012. Melt/mantle mixing produces podiform chromite deposits ın ophiolites: ımplications of re–os systematics In The Dongqiao Neo-Tethyan Ophiolite, Northern Tibet. Gondwana Research, 21, 194–206.

Tatar, Y., 2010. Jeolojide uzaktan algılama. Cumhuriyet Üniversitesi Yayını. 102, 155 s. Sivas/Türkiye.

Thayer, T. P., 1967. Garvity differantıation and magmatic re-emplacement of podiform chromite deposits. U.S. Geol. Survey Bulletine, 942-D, 132-146.

Thayer, T.P., 1964. Principal features and origin of podiform chromite deposits and some observations on The Guleman-Soridağ Districh, Turkey. Economic Gelology, 59,8, 1497-1523.

Özoktay, M., Feraud, J., Cabrol, B.; Beurnıer, M., & Laval, M., 1988. Evaluation and selection of 45 chromite concession of Etibank in The SW Anatolia (District Of Fethiye- Köyceğiz). BRGM- France . 88,170, s.278.

Özoktay, M., 1998. Kromit aramalarında pratik uygulamalar ve geleceğe yönelik projeksiyonlar. Konferans İTÜ S. 22. (Yayınlanmamış)

Özkan, Y. Z., 1995. Maden aramalarında yeni teknolojik gelişmeler. Jeoloji Mühendisliği, 47, 69-74.

Özkan, Y. Z., 2023. Maden arama projelerinin optimizasyonu. Dama Mühendislik Yayını. ISBN 978-605-72270-1-0.

Özkan, Y. Z., 2021. Maden ruhsat sahaları değerlendirme yöntemleri. Maden Jeologları Derneği Yayını. İSBN 978-625-7498-18-0.

Özkan, Y. Z., & Akbaba, M. A., 2013. İR.69070 No.lu (Ece, Tefenni, Burdur) ruhsat sahasının arama potansiyelinin değerlendirilmesi. Dama Mühendislik Rapor, 30s.

Şenel, M., & Bölükbaşı, A. S., 1994. 1/100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları, no: 7, Antalya - L10 Paftası, MTA Jeoloji Etüd Dairesi, Ankara.

Spry, A., 1969. Metamorphic Textures. Pergamon Press Ltd. Headington Hill Hall, Oxfort 4 & 5Fitzroy Square, London W.1.

Zhou, M. F., Sun, M., Keays, R. R., & Kerrıch, R. W. 1998. Controls on platinum group elemental distributions of podiform chromitites: a case study of High-Cr and High-Al chromitites from Chinese orogenic belts. Geochim Cosmochim Acta 62(4):677–688

UMREK VE METALİK MADENLER

UMREK AND METALLIC MINERALS

A. Halim Demirkan, Ahmet İbuk
Maden Mühendisleri Mesleki Gelişim Derneği, Ankara

ÖZ: 1994 yılında, Avustralya (JORC), Kanada (CIM), ABD (SME), Avrupa (PERC) ve Güney Afrika (SAMREC); bir araya gelerek, uluslararası ortak standart oluşturmak için CRIRSCO'yu kurmuşlardır. Türkiye CRIRSCO'ya 13. ülke olarak resmi üye olarak kabul edilmiştir. UMREK Türkiye'yi CRIRSCO'da üye olarak temsil etmektedir. Yer bilimleri, madencilik ve metalürji (cevher zenginleştirme) alanında faaliyet gösteren yurtiçi ve yurtdışı profesyonelleri bir araya getirmek, üyeleri arasında iş birliğini geliştirmek ve "Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Komisyonu (UMREK)" ile iş birliği yapmak amacıyla "Birlik olarak kuruldu. Dünyada en çok kamuya açık raporlamada, yani sermaye piyasalarında kullanılan Kod, Banka Kredi işlemlerinde de yaygın olarak tercih edilmektedir. Metalik Madenler; UMREK Kodunun genelinde ağırlığa sahiptir. Bunun nedeni, CRIRSCO kodunun çıkışının metalik madenler olması, bunun akabinde diğer madenlerin sisteme dahil olmasıdır. Metalik Madenler UMREK Kodunda; doğrudan, "EK 3- Cevherli Dolgular, Topuklar, Düşük Tenörlü Cevherleşmeler, Stoklar, Pasa ve Atıklarının Raporlanması, EK 8- Çözelti Madenciliği Yöntemi İle Çıkarılan Metalik ve Metalik Olmayan Madenler İçin Arama Sonuçları, Maden Kaynakları Ve Maden Rezervlerinin Raporlanması" başlığı ile yer almaktadır. Bunun yanında, UMREK Kodu, 2.Bölüm-Kapsam-Uygulama (2-2.3), 10.Bölüm-Eşdeğer Metalin Raporlanması, Tablo.1-Bölüm.4- ve Bölüm.5- Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Tahmini ve Raporlanması, 4.5-Raporlama, Bölüm 5: Teknik Çalışmalar, 5.3- Zenginleştirme ve test çalışmaları, Ek.1- Kod Kapsamında Kullanılan Terimler ve Eşanlamlıları Sözlüğü" bölümlerinde yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: CRIRSCO, UMREK, YERMAM, Uluslararası Standartlar, Metalik Madenler

ABSTRACT: *In 1994, Australia (JORC), Canada (CIM), the USA (SME), Europe (PERC), and South Africa (SAMREC) came together to establish CRIRSCO to create an international common standard. Turkey has been accepted as the 13th official member of CRIRSCO. The union was*

established to bring together domestic and international professionals in the fields of geosciences, mining, and metallurgy (ore enrichment), to enhance cooperation among its members, and to collaborate with the "National Mineral Resource and Reserve Commission (UMREK). "The Code, which is most widely used for public reporting, i.e., in capital markets, is also commonly preferred in Bank Credit transactions. Metallic Minerals hold significant weight in the overall UMREK Code. The reason for this is that the CRIRSCO code was initially developed for metalliferous minerals, followed by the inclusion of other minerals into the system. Metalliferous minerals are directly addressed in the UMREK Code under the title "Appendix 3- Reporting of Mineralised Fill, Pillars, Low Grade Mineralisation, Stockpiles, Dumps and Tailings, Appendix 8- Reporting of The Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves for Metalic and Non-Metallic Minerals Extracted Through Solution Mining Methods". Additionally, the UMREK Code covers them in the following sections: Part 2- Scope and Application (2-2.3), Part 10 - Reporting of Metal Equivalents, Table 1 - Part 4, Estimation and Reporting of Exploration Results and Mineral Resources and Mineral Reserves, 4.5 - Reporting, Part 5 - Technical Studies, Section 5.3 - Metallurgical and Testwork, and Appendix 1 - Glossary Of Generic Terms And Synonyms in the Code.

Keywords: *CRIRSCO, UMREK, YERMAM, International Standards, Metallic Minerals*

1. GİRİŞ

Madenlerin kaynak ve rezervleri ile kalitesinin belirlenmesi için, maden yatağı hakkında yeterli bilgilerin elde edilmesi gerekmektedir. Diğer bir deyişle, kaynak ve rezervler bu bilgilerin nitelik ve niceliklerinin yeterliliği ölçüsünde belirlenmekte ve sınıflandırılmaktadır. Bir maden sahasında yapılan arama çalışmaları ve buna bağlı yapılan değerlendirme çalışmaları sonucunda yatağın yalnız hacmi ve tonajı değil fiziksel, kimyasal, jeolojik, mineralojik, teknik, teknolojik ve ekonomik, yasal, çevresel ve sosyal tüm karakteristiklerinin ortaya çıkarılması için yapılan tüm çalışmaların kompozisyonu o yatağın kaynak/rezervinin belirlenmesinde esastır.

Madencilik sektörü büyük risk taşıyan bir sektördür. Bu riskin ana nedeni aramalar sonucunda ortaya çıkarılacak varlığın nicelik ve niteliklerinin tahmin edilmesindeki zorluklardır. Madencilikte büyük riskle birlikte yatırım tutarı da yüksektir. Bu riskin azaltılması, aramaların her aşamasında ve aramalardan sonra yapılacak bilimsel ve teknolojik çalışmalara bağlıdır. Maden arama, araştırma ve üretimi esnasında yapılan çalışmaların, üretilen verilerin uluslararası standartlara uygun, akredite laboratuvarlarda analiz ve testleri yapmış ve yetkin teknik elemanlar tarafından raporlanması bu çalışmaların açık, şeffaf ve güvenilir olması ile küreselleşen dünyada ve serbest piyasa ekonomisi koşullarında mühendisler, planlamacılar, madenciler, yatırımcılar ve finans kuruluşları arasında görüş birliğini sağlamaktadır. Uluslararası ticaretin ve madencilik yatırımlarının artması sebebiyle uluslararası kabul edilebilir bir rezerv/kaynak sınıflandırma sistemi oluşturma ihtiyacı doğmuştur. UMREK Kodu ve ilgili kurumlar, Türkiye'nin de bunu ihtiyaç hissetmesi üzerine oluşturulmuştur.

2.CRIRSCO

Maden aramacılığı ve işletmeciliği yatırım riskinin en yüksek olduğu alanlardan biridir. Maden aramacılığının ve madencilikte riskin büyüklüğü ve manipülasyonlara çok açık olması nedeniyle raporların gerçeğe aykırı şekilde hazırlanması ve bu nedenle hem maden yatırımcısı şirketler hem de hissedarlar büyük meblağlar kaybetmiştir. Poseidon (Avustralya 1969), Bre-X (Endonezya-1996), Cartaway (Batı Afrika 1996), Timbuktu (Batı Afrika 1996), Delgratia (Meksika 1997) en bilinen maniplasyonlardır.

Raporlama standartlarına; madencilik firmalarının maden kaynaklarını ve yeraltı zenginliklerini en iyi şekilde sunmaları, yönetmeleri ve yatırım kaynaklarına ulaşabilmeleri için, ortak bir dil ve terminoloji

kullanımına duyulan ihtiyaç, aramacılık ve madenciliğin risk taşıması ve manipulasyona çok açık olması ve yatırımcılarının haklarını korumak ve güvence altına almak için ihtiyaç duyulmuştur. Arama ve geliştirme faaliyetlerinin bir disiplin içinde açık, güvenilir ve şeffaf bir şekilde yapılmasıyla riskin olabildiğince azaltılması ve maniplasyonların önlenmesi hedeflenmektedir (Demirkan, 2017; Demirkan, 2018).

Bunun üzerine madenciliğin gelişmiş olduğu ülkeler, kendilerine özgü raporlama standartları geliştirmiş ve bunları hazırlayacak ve sorumluluğu üstlenecek uzmanlık alanlarında "yetkin kişilere" yetki verme yoluna gitmişlerdir. Maden ve yerbilimleri profesyonellerinin üye olduğu, sivil toplum örgütlerinin (STK, NGO) üyelerinden vasıfları uygun olanlar Yetkin Kişi (QP, CP) olarak yetkilendirilmektedir. Yetkin kişilerin uzmanlık alanlarında fiili tecrübeli, etik değerlere sahip ve mesleki gelişime önem veren ve bu konularda referanslara sahip olmaları aranmıştır.

1994 yılında, Avustralya (JORC), Kanada (CIM), ABD (SME), Avrupa (PERC) ve Güney Afrika (SAMREC); bir araya gelerek, uluslararası ortak standart oluşturmak için CRIRSCO'yu (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards - Maden Rezervleri Uluslararası Raporlama Standartları Komitesi) kurmuşlardır. CRIRSCO, maden arama sonuçları, maden kaynakları ve maden rezervlerinin rapor edilmesine yönelik küresel ölçekte en iyi uygulamaları teşvik eden bir çatı kuruluş olarak organize olmuştur. Halen CRIRSCO'nun 15 üyesi bulunmaktadır. Kuruculara ilave olarak; (Comison Minera), Rusya (NAEN), Endonezya (KOMBERS), Brezilya (CBRR), Kazakistan (KAZRC), Moğolistan (MPIGM), Kolombiya, Türkiye (UMREK), Filipinler ve Hindistan (IMIC)'dır. Türkiye 2018 Mayıs ayı itibari ile CRIRSCO'ya 13. ülke olarak kabul edilmiştir (CRIRSCO, 2024; Demirkan, 2018).

2.1. CRIRSCO Şablonu

CRIRSCO şablonu, dünya çapında ulusal veya bölgesel raporlama kodlarında ve standartlarında kabul edilen minimum standartlarının ve arama hedefleri, arama sonuçları, maden kaynakları ve maden rezervlerinin raporlanması amacıyla öneriler ve yorumlayıcı yönergelerle bütünleştirilmiştir. Bu sebeple, CRIRSCO şablonu ulusal veya bölgesel raporlama kodları ve standartlarında yaygın olarak kabul edilen arama hedefleri, arama sonuçları, maden kaynak ve rezervlerinin raporlanması için etkili, iyi denenmiş, en iyi uygulamanın yaygınlaştırılmasına ve tanıtımına yardımcı olmak için sunulmuştur. Önceki beş yıl içinde Ulusal Raporlama Kuruluşları (NRO) tarafından yayınlanan kod ve standartların güncellemelerine ait en iyi uygulamaları içermektedir (Demirkan, 2017; CRIRSCO, 2024).

Şablon, raporlama standartlarında tanımlanan ekonomik veya potansiyel olarak ekonomik olması öngörülen madenlerin raporlanması ile ilgilidir. Ekonomik olmayan veya henüz keşfedilmemiş madenlerin raporlanmasına doğrudan değinmemektedir. Bununla birlikte, CRIRSCO; kaynak ve rezerv kategorilerinde uluslararası raporlamanın tutarlılığını sağlamak için raporlarında bu tür bir maden envanteri olan kurumlar ile (hükümetler ve Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomi Komisyonu (UNECE) vb.) diyalog halindedir.

CRIRSCO şablonu; baz ve değerli metaller, değerli taşlar, inşaat ve endüstriyel hammaddeleri, doğal taşlar, enerji hammaddeleri uranyum ve kömür gibi hammaddeler de dahil olmak üzere tüm katı madenleri içermekte; petrol, gaz, su veya jeotermal enerji gibi katı olmayan enerji mineralleri içermemektedir. CRIRSCO, kaynak ve rezerv tanımlarının katı olmayan madenlerle uyumlu olması veya karşılıklı olarak anlaşılabilir olmasını

sağlamak için petrol ve gaz sınıflandırma standartları geliştiricileri ile iş birliği yapmaktadır (Demirkan, 2017; CRIRSCO, 2024).

3. UMREK

CRIRSCO standartlarının sermaye piyasaları tarafından aranması ve bankalar nezdinde itibar görmesi, benzer olgular Türkiye'de de ihtiyaç olarak ortaya çıkmıştır. Türkiye CRIRSCO üyeliği gündeme gelmiştir. Diğer ülkelerde, doğrudan CRIRSCO tarafından tanınmış profesyonellerin oluşturduğu kamunun etkin olmadığı, sivil toplum örgütleri üzerinden yürüyen Yetkin Kişilik ve standardın oluşması (KOD), Türkiye'de bu yapıda STK olmadığı için sekteye uğramıştır. Bunun üzerine, Türkiye özel sektörün ağırlıkta olduğu bir komisyon kurarak (UMREK) onun tarafından tanınmış, üyeleri arasından uygun vasıfta olanlara "Yetkin Kişilik" unvanı verecek, bir STK üzerinden yürümeye karar vermiştir. Doğal olarak CRIRSCO'ya uyumlu bir Ulusal Kod (UMREK Kodu)'un oluşturulması da UMREK'in görevi olmuştur.

"Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu (UMREK)" 7.9.2016 tarih ve 29824 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren, 20.8.2016 tarih ve 6745 Sayılı "Yatırımların Proje Bazında Desteklenmesi İle Bazı Kanun Ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun" ile kurulmuştur (Resmi Gazete, 2016).

UMREK Yönetmeliği 26.07.2017 tarih ve 30135 sayılı Resmi Gazetede yayımlanmıştır. 03.10.2017 tarihinde UMREK Başkanı ve üyelerinin ataması gerçekleştirilmiştir (Resmi Gazete, 2017a). Ayrıca "Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik" 29.12.2017 tarih ve

30285 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir (Resmi Gazete, 2017b).

Komisyonun üyeleri, yönetmelikte belirtildiği üzere, Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG), Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurumu (BDDK) veya Türkiye Bankalar Birliği (TBB), Sermaye Piyasası Kurulu (SPK) veya Borsa İstanbul A.Ş. (BİST), Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) ve Türkiye madencilik sektörü içinden gelen ve ilgili sivil toplum kuruluşlarına kayıtlı konusunda uzman 4 temsilciden oluşmaktadır. TOBB temsilcisi ilke birlikte özel sektörden katılan üye sayısı 5 olmuştur. UMREK, Nisan 2018'de 13. ülke olarak CRIRSCO'ya katılmıştır.

4. YERMAM

UMREK'in kurulması ve maden profesyonellerini CRIRSCO standartlarında barındıran bir STK bulunmadığı bilinmekteydi. UMREK'in tanıyacağı ve üyeleri arasından uygun vasıfta olanlara "Yetkin Kişilik" verilecek, maden profesyonellerinin üye olduğu bir birlik kurulması gerekmekteydi.

Yer bilimleri, madencilik ve cevher zenginleştirme alanında faaliyet gösteren yurtiçi ve yurtdışı profesyonelleri bir araya getirmek, üyeleri arasında işbirliğini geliştirmek ve UMREK ile işbirliği yapmak amacıyla 04.12.2017 tarihinde Bakanlar Kurulu kararı ile birlik olarak kurulmuş oldu (YERMAM, 2017a; YERMAM, 2024; Başbakanlık Kanunlar ve Kararlar Genel Müdürlüğü, 2017).

YERMAM, ekonomik ve teknik alanlarda işbirliğini geliştirmek, bu konularda bilgi, görgü ve karşılıklı teknolojilerden yararlanmak maksadıyla; yer bilimleri, madencilik ve metalürji alanında faaliyet gösteren yurtiçi ve

yurtdışı profesyonelleri bir araya getirmek, üyeleri arasında işbirliğini geliştirmek ve UMREK ile işbirliği yapmak amacı ile kurulmuştur (YERMAM, 2017a; YERMAM, 2017b; YERMAM, 2017c; YERMAM, 2017d).

4.1. YERMAM Üyelik Şartları

YERMAM üyelik şartları, YERMAM tarafından hazırlanmış yönerge ile belirlenmiştir. Buna göre; dil, din, ırk ayrımı gözetmeksizin, belirlenen üyelik kriterlerini taşıyan, birlik tüzüğüne ve etik kurallar dahil, birlik tarafından çıkartılacak kurallara uymayı yazılı taahhüt eden, yerbilimleri, madencilik ve cevher hazırlama alanlarında faaliyet gösteren gerçek ve tüzel kişiler, kamu kurum ve kuruluşları ile YERMAM'a üyelik için başvuranların üniversitelerden (YÖK'ün denklik verdiği yurt dışı üniversiteler dahil) lisans seviyesinde mezun olmuş, madencilik sektöründe en az 5 yıllık tecrübeye sahip adaylar YERMAM'a üyelik için başvurabilirler. YERMAM üyeleri içinden mühendis unvanına, uzmanlık alanında en az 7 yıllık fiili tecrübeye ve etik değerlere sahip, bunları YERMAM profesyonellerinden ikisinin referansı ve belgeler ile kanıtlayan üyeler, YERMAM profesyonel üyeliği için başvurabilirler. YERMAM profesyonel üyeleri talepleri halinde, UMREK Yetkin Kişilik adayı olabilir (YERMAM, 2017b).

5. UMREK YETKİN KİŞİSİ

Yetkin kişi (QP, CP), genel tanımı ile, Tanınmış Profesyonel Kuruluşlar (TPK) tarafından uygun üyelik sınıfına kayıtlı (profesyonel üye) ve TPK tarafından önerilenler arasından yetkinlik belgesi (sertifika) verilen madencilik sektöründe çalışan mühendis unvanlı profesyoneldir (UMREK, 2018a).

Belirlenen üyelik kriterlerini taşıyan, UMREK Koduna ve UMREK tarafından çıkartılacak kurallara uymayı yazılı taahhüt eden, etik değerlere sahip, yerbilimleri, madencilik ve cevher zenginleştirme alanlarında faaliyet gösteren vasıflı ve deneyimli gerçek profesyonel üyeler, yetkin kişi sertifikasyonuna sahip olmak için YERMAM vasıtasıyla UMREK'e başvurabilirler (UMREK, 2018c).

Yetkin Kişi'nin ilgili alandaki mesleki tecrübesinin güncel olması ve süreklilik göstermesi, etik değerlere ve fiili tecrübeye sahip olmanın yanında, mesleki gelişime önem vermesi ve bunu sağlaması gerekmektedir. UMREK Yetkin Kişileri, her yıl gösterdikleri mesleki gelişimi, belgeleri ile kanıtladıkları bir raporu, üyesi oldukları YERMAM'a vermek zorundadır. Vermedikleri takdirde, üyelikleri bir yıl süre ile askıya alınacaktır. YERMAM üyeliği herhangi bir nedenle sona eren uzmanın yetkin kişiliği de sonlanmaktadır (UMREK, 2018b; UMREK, 2018d).

Yetkin Kişi, uzmanı ve mesleği olan konuda arama, kaynak, rezerv tahmini raporlarını UMREK Koduna uygun olarak hazırlamak ve bir şahit ile birlikte imzalamak üzere yetkilendirilmiştir. Arama ve kaynak raporlarının jeoloji, rezerv raporlarının maden mühendisi yetkin kişi tarafından hazırlanması, işin özü gereğidir. Ancak, UMREK Kodu ile hazırlanana raporların multidisipliner bir çalışma olacağı ve raporun içeriğine göre farklı profesyonellerin sorumluluk aldıklarını da unutmamak gerekir. Maden ve jeoloji mühendisleri dışındaki mesleğe sahip Yetkin Kişiler, UMREK Kodlu raporun kendileri ile ilgili kısımlarından sorumlu olarak imza atabilmektedirler (UMREK 2023).

Türkiye'deki 166 UMREK Yetkin Kişisinden 94'ü jeoloji, 57'si maden mühendisidir. Diğer Yetkin Kişiler, hidrojeoloji, jeofizik, çevre ve jeodezi mühendisidir (UMREK 2024).

6. UMREK KODU

6.1. İçerik

UMREK Kodunun amacı, arama hedefleri, arama sonuçları, maden kaynakları veya maden rezervlerinin halka açık raporlanması için uluslararası terminolojiye uygun asgari bir standart sağlamaktır. Bu tür bir raporlama, arama hedefleri, arama sonuçları, maden kaynakları veya maden rezervleri ile ilgili makul ve dengeli bir yargıya varmak amacıyla yatırımcıların ve profesyonel danışmanların talep edecekleri ve halka açık raporda makul olarak bulmayı bekledikleri tüm bilgileri içermelidir. Kod, yalnızca tavsiye niteliğindedir ve ulusal bir yasal mevzuatın mevcut olduğu durumlarda, mevzuat öncelikli olacaktır, arama hedeflerinin, arama sonuçlarının, maden kaynaklarının ve maden rezervlerinin açık, güvenilir ve şeffaf bir şekilde raporlanması için gereken asgari standartları, önerileri, yasal gereklilikleri ve uygulama esaslarını belirlemektedir.

Bundan sonra gelen bölümlerde, kod, zorunlu bir eylemi ifade eden 'gerektirir/ gerektirmektedir', 'uygular/uygulanmaktadır' kelimelerini ve '-malıdır/-melidir' eklerini içermektedir. Söz konusu kullanımın amacı, Kodun kurum ve kuruluşlar tarafından benimsenmesini sağlamak olup Kodun kendisinin zorunlu bir raporlama standardı olduğu anlamına gelmez.

CRIRSCO Şablonunun 2019 güncellenen versiyonuna göre, her bir üye kendi ulusal maden kaynak ve maden rezerv raporlama kod veya rehberini hazırlamak durumunda olduğundan, UMREK Mevzuat ve Raporlama Standartları Çalışma Grubu UMREK Kodunun ikinci versiyonu için Aralık 2020 tarihinde çalışmalara başlamıştır. CRIRSCO Şablonu (2019) ile uyumlu UMREK Kodu 2023 Şubat ayında CRIRSCO tarafından kabul görmüş ve madencilik sektörü paydaşları ile de UMREK sitesinde

12.04.2023 tarihinde, 2024 yılında yürürlüğe girmek üzere, paylaşılmıştır (UMREK, 2018; UMREK 2023).

UMREK 2024 İçerik:

1. Giriş (Format)
2. Kapsam (Uygulama, İlkeler, Halka Açık Raporlar, Genel Raporlama)
3. Yetkinlik ve Sorumluluk (Yetkin Kişinin Deneyimleri, Yetkin Kişinin Sorumlulukları)
4. Raporlama Terminolojisi (Tanımlı Terimler, Dönüştürücü Faktörler)
5. Arama Hedeflerinin Raporlanması
6. Arama Sonuçlarının Raporlanması
7. Maden Kaynaklarının Raporlanması (Mümkün Maden Kaynakları, Belirlenmiş Maden Kaynakları, Ölçülmüş Maden Kaynakları, Maden Kaynağı Raporlama Kategorisinin Seçimi, Tahminlerin Doğruluğu)
8. Maden Rezervlerinin Raporlanması (Muhtemel Maden Rezervleri, Görünür Maden Rezervleri, Maden Kaynağı Raporlama Kategorisinin Seçimi, Tahminlerin Doğruluğu)
9. Teknik Çalışmalar (Kapsam Belirleme Çalışması, Ön Fizibilite Çalışması, Fizibilite Çalışması)
10. Eşdeğer Metalin Raporlanması
11. Emtia Fiyatlandırması ve Satışı
12. Madencilik İzinleri ve Yasal Zorunluklar
13. Sürdürülebilirlik Değerlendirmeleri

Tablo 1-Değerlendirme ve Raporlama Kriterleri Kontrol Listesi

Tablo 2-Teknik Çalışmalar İçin Rehber

Ek 1-Kod Kapsamında Kullanılan Terimler ve Eşanlamlıları Sözlüğü

Ek 2-Yetkin Kişi Onay Formu ve Uyumluluk Beyanı

Ek 3-Cevherli Dolgular, Topuklar, Düşük Tenörlü Cevherleşmeler, Stoklar, Pasa ve Zenginleştirme Atıklarının Raporlanması

Ek 4-Kömür Arama Sonuçları, Kömür Kaynakları ve Rezervlerinin Raporlanması

Ek 5-Elmas ve Diğer Değerli Taşların Arama Sonuçları, Kaynak ve Rezervlerinin Raporlanması

Ek 6-Endüstriyel Hammaddeler, Çimento Hammaddeleri ve İnşaat Hammaddeleri (Agregalar) Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Raporlanması

Ek 7-Doğal (Boyutlandırılabilir) Taşlar, Sanatsal ve Dekoratif Taşların Arama Sonuçları, Maden Kaynak ve Maden Rezervlerinin Raporlanması

Ek 8-Çözelti Madenciliği Yöntemleri ile Çıkarılan Metalik veya Metalik Olmayan Madenler İçin Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Raporlanması

Ek 9-Madencilik Yöntemleri ile Çıkarılan Asfaltit, Bitümlü Şeyller, Petrollü Kumlar ve Diğer Enerji Hammaddeleri İçin Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Raporlanması

Ek 10-Tanınmış Profesyonel Kuruluşlar (TPK'lar)

Ek 11-Terimlerin İngilizce- Türkçe Karşılıkları

EK 12-Kısaltma Listesi

6.2. UMREK Kodu Uygulamaları

Kod, dünyada en çok halka açık raporlamada, yani sermaye piyasalarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda bankaların kredi değerlendirmelerinde de yaygın olarak tercih edilmektedir.

Türkiye'de UMREK'in devreye girmesi ile; SPK karar organının, 21.09.2017 tarihli ve 34/1151 sayılı toplantısında sermaye piyasasında yapılacak değerleme hizmetlerinde, maden arama, maden kaynak ve

rezervlerinin değerlemesinde ve raporlamasında YERMAM tarafından önerilen ve UMREK tarafından belirlenen yetkin kişiler tarafından hazırlanan raporların esas alınacağına dair karar alınmıştır (UMREK 2024).

BDDK, Bankaların Değerleme Hizmeti Almaları ve Bankalara Değerleme Hizmeti Verecek Kuruluşların Yetkilendirilmesi ve Faaliyetleri Hakkında Yönetmeliğin 4. maddesinin (3) numaralı fıkrası ve ilgili diğer mevzuat hükümleri saklı kalmak kaydıyla, Bankalar/Katılım Bankaları ve Finansal Kurumlar Birliği üyesi banka ve şirketlerin kredi süreçlerinin ve/veya diğer iş ve işlemlerinin değerlendirilmesinde, maden sahalarında yapılan maden arama, maden kaynak ve maden rezervlerinin uluslararası standartlara uygun raporlanması ve bu raporların doğru, güvenilir ve şeffaf olmasını sağlamak amacı ile kurulan UMREK tarafından yetkilendirilecek kişilerce hazırlanan raporların dikkate alınmasında fayda görüldüğü ifade edilmiştir. Kısaca, UMREK Kodu; borsa, bankalar ve madencilik sektörünün geniş desteğini sağlamıştır (UMREK 2024).

Türkiye, 2019 yılında dünyada örneği görülmeyen bir uygulama ile, UMREK'i maden mevzuatına taşımıştır. 3213 sayılı Maden Kanunu'nda yapılan değişiklikle (Madde.24- Değişik dördüncü fıkra:14/2/2019-7164/17 md.); kanunun yirmi dördüncü maddesine "muhtemel rezerv alanlarının; IV. Grup maden işletme ruhsat sahalarında on yıl, diğer grup maden işletme ruhsat sahalarında beş yıl içinde Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Koduna göre kaynak ve/veya rezerv haline getirilmeyen alanlar taksir edilir." cümlesi ilave edilmiştir (Resmi Gazete, 1985; Resmi Gazete, 2019; Resmi Gazete, 2022). Bununla UMREK Yetkin Kişisi tarafından hazırlanan ve sorumluluğu alınan "Görünür Rezerv Raporları" mecburi hale gelmiştir. Bu madde, sektör için büyük bir mali yük getirmenin yanında, yeteri sayıda; konusunda uzman yetkin kişinin (maden mühendisi) olmayışı da ayrı bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Uygulamadaki bu sorun nedeni ile beş yıl

içinde IV. Grup dışındaki madenler için yerine getirilmesi gereken yükümlülük, süre dolduğunda iptal edilmiştir (11/05/2024-7501 Sayılı Kanun) (Resmi Gazete, 2024). Bu yükümlülüğün, IV. Grup madenler için yerinde kalması ve geri kalan 5 yıllık sürenin, bunlar için yürürlükte kalması şaşkınlık yaratmıştır. Beş yıllık süre içinde aynı durumla karşılaşılacağı kesinken, bu maddenin kalması eşitlik ilkesine aykırı bulunmaktadır (Resmi Gazete, 2024).

UMREK'in maden mevzuatına alındığı diğer konu, "Buluculuk Hakkı"nda olmuştur. Kanunun Buluculuk Hakkı konusundaki 15. Maddesinde yapılan değişiklik (Değişik fıkra:14/2/2019-7164/15 md.), "Ruhsat sahibi, arama ve/veya işletme ruhsatı süresince Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Koduna göre hazırlanan teknik raporlar ile kaynak veya rezerv olarak bildirdiği madenlerin bulucusu sayılır. Bu hakkı talep eden ruhsat sahibine buluculuk belgesi verilir." Şeklindedir (Resmi Gazete, 2019). Düzenleme öncesindeki "Buluculuk Hakkı" ile "UMREK'in gelmesinden sonraki hali; hem teknik olarak hem de mali olarak büyük yük getirmiş ve Buluculuk Hakkı gibi çok küçük meblağ için (%1), büyük bir yatırım gerekliliği ortaya çıkmıştır. Buluculuk Hakkı maddesindeki değişikliğin özel sektördeki yansıması görülemezken, yıllar içinde kamuda sorun yaratmıştır. Buluculuk Hakkı için aynı kanuna tabii olan MTA, 2024 yılında yapılan değişiklikle bu yükümlülükten kurtarılmıştır (11/05/2024 – 7501 Sayılı Kanun) (Resmi Gazete, 2024; Resmi Gazete,1985).

6.3.UMREK Kodunda Metalik Madenler

Metalik Madenler; UMREK Kodunun genelinde ağırlığa sahiptir. Bunun nedeni, CRIRSCO kodunun çıkışının metalik madenler olması, bunun akabinde diğer madenlerin sisteme dahil olmasıdır. Metalik Madenler UMREK Kodunda; doğrudan, "EK 3- Cevherli Dolgular, Topuklar, Düşük

Tenörlü Cevherleşmeler, Stoklar, Pasa ve Atıklarının Raporlanması, EK 8-Çözelti Madenciliği Yöntemi ile Çıkarılan Metalik ve Metalik Olmayan Madenler İçin Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Raporlanması" başlığı ile yer almaktadır. Bunun yanında, UMREK Kodu, 2.Bölüm-Kapsam-Uygulama (2-2.3), 10.Bölüm-Eşdeğer Metalin Raporlanması, Tablo.1-Bölüm.4- Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Tahmini ve Raporlanması, 4.5-Raporlama, Bölüm 5: Teknik Çalışmalar, 5.3- Zenginleştirme ve test çalışmaları, Ek.1- Kod Kapsamında Kullanılan Terimler ve Eşanlamlıları Sözlüğü" bölümlerinde yer almaktadır. (UMREK, 2018; UMREK, 2023).

Kodda İlgili Bölümler:

EK 3- Cevherli Dolgular, Topuklar, Düşük Tenörlü Cevherleşmeler, Stoklar, Pasa ve Atıklarının Raporlanması

A3-1. UMREK Kodu, ekonomik düzeyde maden olarak çıkartılabilecek tüm muhtemel malzemelerin raporlanmasında uygulanır. Bu duruma, Maden Kaynakları özelinde nihai ekonomik kazanım için makul beklentinin bulunduğu ve Maden Rezervleri özelinde ise, üretimin makul bir ekonomik derecede desteklendiği cevherli dolgular, topuklar, düşük tenörlü cevherleşmeler, stoklar, pasa ve zenginleştirme atıkları dahildir.

A3-2. Aksi belirtilmedikçe, Kodun 1'den 13'e kadar olan maddeleri (Şekil 1 dahil) uygulanır.

A3-3. Cevherli dolgular, topuklar, düşük tenörlü cevherleşmeler, stoklar, pasa ve zenginleştirme atıklarının raporlanmasında, Kodun bir bölümü olan Tablo 1 dikkate alınmalı ve gerekçeleriyle beraber sunulmalıdır.

A3-4. Bu maddede tanımlanan cevher içeren herhangi bir malzeme, Maden Kaynağı ve Maden Rezerv raporlaması açısından, yerinde cevherleşmeye benzer olarak düşünülür. Bu tür cevherli malzemelerin

kazanımı hakkındaki değerlendirmeler, alanında deneyimli ve profesyonel kişiler tarafından yapılmalıdır.

A3-5. Bu maddede tanımlanmış cevher içeren malzemelerin tümüyle veya kısmen ekonomik olarak üretilebileceği yönünde makul bir beklenti yoksa bu malzemeler, ne Maden Kaynağı ne de Maden Rezervi olarak sınıflandırılabilir.

A3-6.Eğer cevher içeren malzemelerin bazı bölümleri hâlihazırda yarı-ekonomik olup, gelecekte ekonomik hale gelebileceği yönünde makul bir beklenti varsa, bu malzeme Maden Kaynağı olarak sınıflandırılabilir.

A3-7. Malzemenin, Maden Rezervi olarak sınıflandırılabilmesi için ise teknik ve ekonomik araştırma çalışmalarının, varsayılan gerçekçi koşullar altında malzemenin ekonomik olarak üretilebileceğini göstermesi gerekmektedir.

Yukarıdaki maddeler, bazen “cevherli atık” veya “marjinal tenördeki malzeme” olarak da adlandırılan, yerinde düşük tenörlü ve çoğunlukla stok olarak tutularak maden ömrünün sonunda değerlendirilmesi planlanan malzemelere de uygulanır.

Bu tür malzemelerin toplam tonaj ve tenör tahminleri, her ne kadar Maden Kaynak ve Maden Rezerv hesaplamalarında bazen bir arada düşünülebilse de, daha açık anlaşılabilmesi için Halka Açık Raporlarda ayrı olarak listelenmesi tavsiye edilmektedir.

Hem yüzey, hem de yeraltı stoklarını içerecek şekilde tanımlanan stoklar, yeraltındaki kırılmış/patlatılmış olan üretim blokları ve hâlihazırda cevher stoğunda bulunabilen cevherleri de kapsamaktadır.

Eğer zenginleştirme sürecindeki cevher içeren bir malzeme raporlanıyorsa, çözeltiye alma (leaching) süreci de dâhil, ayrı olarak raporlanmalıdır.

EK 8- Çözelti Madenciliği Yöntemi ile Çıkarılan Metalik ve Metalik Olmayan Madenler İçin Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Raporlanması

A8-1. Bu ekte yer alan maddeler, özellikle su, buhar veya başka bir çözücü tarafından yerinde çözülerek ve sonrasında yüzeye aktarım yoluyla çıkarılan tüm madenlerin Halka Açık raporlanması ile ilgili olan konuları ele almaktadır.

A8-2. Aksi belirtilmedikçe, Kodun 1'den 13'e kadar olan maddeleri (Şekil 1 dahil) uygulanır.

A8-3. Su, buhar veya başka bir çözücü tarafından yerinde çözülerek ve sonrasında yüzeye aktarım yoluyla çıkarılan tüm madenlerin raporlanmasında, Kodun bir bölümü olan Tablo 1 dikkate alınmalı ve gerekçeleriyle beraber sunulmalıdır.

A8-4. Çözelti madenciliği yöntemiyle çıkarılmış madenler ile ilgili bilgi ve tahminler, Kodun temel ilkeleri ve amacına göre raporlanmalıdır.

A8-5. UMREK Kodunda Maden Kaynakları, yerinde kayaç miktarı, ekonomik maden ürününün miktar ve kalitesi cinsinden ifade edilen kalite parametreleri ile açıklanır.

A8-6. Eğer Maden Kaynakları üretim başladıktan sonraki bir aşamada tahmin ediliyorsa, bu tahminlerin yöntem ve varsayımları belirtilmelidir.

Koda uygun rapor edilen diğer bütün madenlerde olduğu gibi Yetkin Kişi, Maden Rezervlerini ve Maden Kaynaklarını mevcut bir üretim planı ve belirlenmiş bir dizi ürün, piyasa varsayımları ve hedefleri çerçevesinde rapor etmelidir.

Genellikle çözelti madenciliği yöntemiyle çıkarılmış ürün, kristalleşme sonrası çözücünün uzaklaştırılması veya geri dönüşümü sonrasında kalan katı madde olacaktır. Çözücünün miktarı, Maden

Kaynaklarının veya Maden Rezervlerinin bir parçası olarak bildirilmemelidir.

Satılabilir ürünlerle ilgili her raporda, rapor edilen ürün ve bunu elde etmek için hangi işlem adımlarına ihtiyaç duyulduğu konusunda okuyucunun tam olarak bilgilendirilmesini sağlamak için bir açıklamanın rapora dahil edilmesi önemlidir.

Çözelti madenciliği yöntemiyle çıkarılmış madenler için, Maden Kaynaklarının ve Rezervlerinin tahmin edilmesi ve raporlanması hakkında diğer endüstriyel uygulamalar (örn. hidrojeoloji) yararlı olabilir.

Raporlar, kaynak ve rezervlerin 'izin verilen' veya 'izin verilmeyen' statüsünü ortaya koymalıdır. Ayrıca, eğer rezervler devletin hukuki denetimi altında ise bu durum belirtilmelidir.

Bazı durumlarda ticari duyarlılık nedeniyle ayrıntılı kalite parametrelerinin yayımlanmasından kaçınılabilir, bu gibi durumlar raporda açıkça belirtilmelidir.

2. Bölüm-Kapsam-Uygulama

"2.3.Maden" tanımı geniş bir anlama sahip olup bu nedenle Kod; Arama Hedefleri, Arama Sonuçları, Maden Kaynak ve Maden Rezervlerinin Halka Açık raporlaması ile ilgili düzenleyici otorite tarafından gerekli görülen ama bunlarla sınırlı olmayan, çeşitli emtialara uygulanabilir:

- Metalik madenler;
- Kömür;
- Elmas ve diğer Değerli Taşlar;
- Endüstriyel Hammaddeler;
- Çimento ve İnşaat Hammaddeleri (Agregalar);
- Doğal Taşlar, Sanatsal ve Dekoratif Taşlar;
- Diğer tür hammaddeler ve

• Cevherli Dolgular, Bakiye Cevher, Topuk, Düşük Tenörlü Cevherleşmeler, Stok, Pasa ve Zenginleştirme Atıkları (yerinde bırakılmış hammaddeler)

10. Bölüm-Eşdeğer Metalin Raporlanması,

10.1. Polimetalik yataklar için Arama Sonuçlarının, Maden Kaynaklarının ve/veya Maden rezervlerinin metal eşdeğerleri (bir ana metalin eşdeğeri) cinsinden raporlanması, her bir bileşenden elde edilen ve net değere katkıda bulunan tüm önemli faktörlerin ayrıntılarını içermelidir.

10.2. Metal eşdeğerlerine atıf içeren herhangi bir Halka Açık Raporda aşağıda yer alan
asgari bilgiler, Madde 2.6, 2.7, 2.8'de belirtilen şeffaflık, kapsamlı olma ve yetkinlik ilkeleri ile uyumlu olmalıdır:

- Metal eşdeğeri hesaplamasına tüm metaller dahil edilmelidir;
- Tüm metaller için varsayılan emtia fiyatları. Varsayılan fiyatlar açıklanmalıdır. metal eşdeğerinin hesaplanmasında kullanılan fiyatlardan bahsedilirken spot fiyatlarını referans göstermek yeterli değildir. Ancak, kullanılan fiyatların açıklanmasının ticari olarak hassas olduğu durumlarda, yatırımcıların bu fiyatları belirlemede kullanılan yöntemi anlamaları için verilen bilgi, sayısal formdan ziyade anlat seklinde olmalıdır;
- Tüm metaller için varsayılan zenginleştirme verimleri ve varsayılan verimlerin hangi temele dayanılarak elde edildiğinin tartışılması (zenginleştirme test çalışmaları, ayrıntılı mineraloji, benzer cevherleşmeler vb.);

- Şirketin metal eşdeğerleri hesaplamasına dahil edilen tüm elementlerin makul verimlerle kazanılabilme ve satılabilme potansiyeline sahip olduklarına dair açık bir ifadesi; ve
- Kullanılan hesaplama formülü.

10.3. Çoğu durumda, metal eşdeğeri bazında raporlama için seçilen metal, metal eşdeğeri hesaplamasına en çok katkıda bulunan metal olmalıdır. Aksi halde, seçilen metalin seçilme mantığının açıklaması, rapora dahil edilmelidir.

10.4. Anlamli metal eşdeğerlerini hesaplamak amacıyla her metal için zenginleştirme verim tahminleri kullanılmalıdır.

10.5. Zenginlestirme verim bilgileri yoksa veya güvenilir şekilde tahmin edilemediğinde, metal eşdeğerleri temelinde raporlama uygun değildir.

Tablo.1-Bölüm.4-Arama Sonuçları, Maden Kaynakları ve Maden Rezervlerinin Tahmini ve Raporlanması

4.5-Raporlama

Maden Kaynakları

(i) Özel tenörler/nitelikler ve (cevher) kalınlıkları

(ii) Arama sonuçlarının yanıltıcı olarak raporlanmasını önlemek için konumlarıyla birlikte düşük/yüksek tenörler ile cevher genişliklerinin raporlanması.

(iii) Tenörlerin bölgesel ortalamaları mı içerdiği yoksa ilgili sahadan alınan münferit numunelerden mi seçildiğine dair bir açıklama

Maden Rezervleri

(iv) Açık ocak, yer altı, atık stokları, sahada bırakılan cevherli bölümler (bakiye), zenginleştirme atıkları ve mevcut topuklar veya diğer kaynakların bir Maden Kaynak beyanında ayrıntılarının verilmesi.

(v) Önemli değişikliklerin nedenlerinin bir açıklamasıyla birlikte bir önceki Maden Kaynağı tahminleri ile karşılaştırma. Herhangi bir dönemsel yönelime ilişkin yorum (örneğin, küresel eğilimler).

(vi) Kaynak tahmininde kullanılan bilgilerin temelleri ve %100 olmasa bile, raporun sahibi olan firmadan alınan bilgiye ait olan yüzde.

(vii) Metal eşdeğeri formüllerinin temelleri

Bölüm 5: Teknik Çalışmalar,

5.3- Zenginleştirme ve test çalışmaları,

Maden Kaynakları

(iv) Olası zenginleştirme yöntemleri ve nihai ekonomik zenginleştirme yöntemine önemli etkisi olabilecek herhangi diğer zenginleştirme faktörleri.

Zenginleştirme yöntemlerinin cevherleşme tipine uygunluğu.

Maden Rezervleri

(i) Numunelerin kaynağı, olası tesis beslemesini temsiliyeti, numunelerin alınmasında kullanılan yöntemler, laboratuvar ve zenginleştirme test teknikleri.

(ii) Zenginleştirmeye uygunluk ile ilgili tahminler veya varsayımların temelleri ve yapılmış olan herhangi bir ön mineralojik test çalışması.

(iii) Zenginleştirme yöntem(ler)i, ekipman, tesis kapasitesi, verimler ve personel ihtiyacı.

(iv) Gerçekleştirilen zenginleştirme test çalışmasının niteliği, miktarı ve temsiliyeti ile kullanılan verimler.

Özellikle satılabilir ürünlerin farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre fiyatlandırıldığı çoklu ürün operasyonları için ayrıntılı bir akım şeması ve madde denkliği.

(v) Zararlı elementler için yapılan varsayımlar veya toleranslar ve herhangi bir büyük miktarda numune alımı veya pilot ölçekli test çalışmasının varlığı ve bu amaçla alınan numunelerin bir bütün olarak temsiliyeti.

(vi) Zenginleştirme sürecinin denenmiş bir teknoloji mi yoksa yeni bir teknoloji mi olduğu ve eğer yeniyse, Maden Rezervi tahmininde kullanımının gerekçelendirilmesi.

Ek.1- Kod Kapsamında Kullanılan Terimler ve Eşanlamlıları Sözlüğü

Metal Eşdeğerliği/ Eşdeğer Tenör (Metal Equivalent)

Ekonomik değere sahip birkaç farklı metali içeren cevherleşmenin, farklı metal değerlerinin tek bir metal değerine karşılık gelecek şekilde dönüştürülmesini ifade etmekte kullanılan terim. Metal eşdeğerleri emtia fiyatlarını ve verimi hesaba katmalıdır. Metal eşdeğer hesaplamaları, metal oranları arasında az farklılıklar bulunan benzer maden yataklarını karşılaştırmak için sıklıkla kullanılırlar.

Metal/Mineral İçeriği (Metal Content/Mineral Content)

Belirli bir hacimde/miktarda bulunan metal/mineral/maden içeriği.

Metalik Madenler (Metallic Minerals)

Altın, Gümüş, Platin, Bakır, Kurşun, Çinko, Demir, Pirit, Manganez, Krom, Cıva, Antimuan, Kalay, Vanadyum, Arsenik, Molibden, Tungsten (Volframit, Şelit), Kobalt, Nikel, Kadmiyum, Bizmut, Titan (İlmenit, Rutil), Alüminyum (Boksit, Gipsit, Böhmit), Nadir toprak elementleri (Seryum Grubu, Yitriyum Grubu) ve Nadir toprak mineralleri (Bastnazit, Monazit, Ksenotim, Serit, Oyksenit, Samarskit, Fergusonit), Sezyum, Rubidyum, Berilyum, İndiyum, Galyum, Talyum, Zirkonyum, Hafniyum, Germanyum, Niobyum, Tantalyum, Selenyum, Telluryum, Lityum, Renyum gibi metalik madenleri.

Metalik Yataklar/Polimetalik Yataklar (Metallic Deposits/ Polymetallic Deposits)

Metal elementlerini çıkartmak için işletilen maden yataklar

Zenginleştirme (Metalürji, İşleme, Hazırlama, Konsantrasyon, Eritme ve Arıtma) / (Beneficiation (Processing, Preparation, Concentration, Smelting and Refining)): İlgili bileşenlerin daha büyük bir malzeme kütlesinden fiziksel ve/veya kimyasal olarak ayrılmasıdır. Maden olarak çıkarılan malzemeden nihai pazarlanabilir bir ürün hazırlamak için kullanılan yöntemlerdir. Örneğin, eleme, yüzdürme, manyetik ayırma, süzdürme, yıkama, kavurma, eritme ve rafine etme vb. süreçler.

Zenginleştirme Faktörü (Metallurgical Factor): Bir maden veya projede, verimleri veya zenginleştirme işlemi aşamalarının değerlendirilmesinde dikkate alınan bir dizi temel metalürjik veya zenginleştirme kriterlerinden biri.

7.SONUÇ

Madencilik teknolojisindeki gelişmeler, kaynakların daha derinlerde bulunması, arama ve AR-GE, iş güvenliği ve çevre koruma maliyetlerinin artması, madencilik yatırımlarının göreceli olarak büyümesine, öz kaynaklarla finanse edilmesini zorlaşmasına sebep olmaktadır. Metalik madenlere duyulan ihtiyacın dünya ölçeğinde artması nedenleri ile, madencilik yatırımları da artış gösterecektir.

CRIRSCO'ya bağlı UMREK standartları, metalik maden kaynakları ve rezervleri hakkında yatırımcılar, finans kuruluşları ve düzenleyici otoriteler için güvenilir, şeffaf ve karşılaştırılabilir bilgiler sunmaktadır. Yatırımcılar finansal kararlarını, UMREK standartlarına uygun raporlanmış kaynak ve rezerv tahminlerini esas almaları halinde, riskleri

düşürmektedirler. Diğer yandan, maden profesyonellerinin maden sahalarının ekonomik potansiyelini değerlendirmesine ve madencilik projelerini daha doğru planlamasına yardımcı olur. Standartlara dayalı rezerv raporlaması, madencilik projelerindeki teknik ve ekonomik riskleri azaltarak yatırımcı güvenini artırır.

Özetle, UMREK standartları, metalik madenler için küresel geçerliliği olan, güvenilir ve şeffaf bir raporlama çerçevesi sunarak madencilik sektöründe sürdürülebilir büyümeye katkı sağlar.

KAYNAKLAR

Başbakanlık Kanunlar ve Kararlar Genel Müdürlüğü, 2017. 4.12.2017 tarih ve 11211 tarihli Bakanlar Kurulu Kararı.

CRIRSCO, 2024. Committee for mineral reserves international reporting standards, https://www.crirsco.com/(Haziran 2024)

Demirkan, H., 2017. Ulusal Madenlerde Rezerv ve Kaynak Raporlama Komisyonu (UMREK) Çalıştay Notları, MAYEB Basın Yayın İnsan Kaynakları Ltd. Şti., Ankara.

Demirkan, H., 2018. Process of Turkey (Dated June 2018) and Workshops Notes, National Resource and Reserves Reporting Committee of Turkey (UMREK), MAYEB Basın Yayın İnsan Kaynakları Ltd., Ankara,

Resmi Gazete, 1985. Maden Kanunu (04.06.1985 tarihli ve 3213 Sayılı), Sayı:18785, 15.06.1985, Ankara.

Resmi Gazete, 2016. Yatırımların Proje Bazında Desteklenmesi ile Bazı Kanun ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde değişiklik yapılmasına Dair Kanun" (20.8.2016 tarih ve 6745 Sayılı), Sayı: 29824, 7.9.2016, Ankara.

Resmi Gazete, 2017a. UMREK (Ulusal Maden Rezerv ve Kaynak Raporlama Komisyonu) Yönetmeliği, Sayı: 30135, 26.07.2017, Ankara.

Resmi Gazete, 2017b. Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu Hakkında Yönetmelikte değişiklik yapılmasına Dair Yönetmelik, Sayı: 30285, 29.12.2017, Ankara.

Resmi Gazete, 2019. Maden Kanunu İle Bazı Kanunlarda Ve Kanun Hükmünde Kararnamede değişiklik yapılmasına izin verilmesi Dair Kanun, Sayı: 30700, 28.2.2019, Ankara.

Resmi Gazete, 2022. Maden Yönetmeliği, Sayı: 32040, 11.12.2022, Ankara.

Resmi Gazete, 2024. Maden Kanunu ile Bazı Kanunlarda değişiklik yapılmasına Dair Kanun, Sayı: 32543, 11/05/2024, Ankara.

UMREK Ulusal Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu, 2018. Ulusal Maden Kaynak ve Maden Rezerv Raporlama Kodu, Ankara.

UMREK Ulusal Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu, 2023. Ulusal Maden Kaynak ve Maden Rezerv Raporlama Kodu (2. Versiyon), Ankara.

UMREK, Ulusal Madenlerde Rezerv ve Kaynak Raporlama Komisyonu, https://www.umrek.com.tr, Erişim tarihi: Haziran 2024

UMREK, 2018a. Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu, Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonunun Çalışma Usul ve Esasları, Ankara.

UMREK, 2018b, Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu, Yetkin Kişiler İçin Sürekli Mesleki Gelişim (SMG) Rehberi, Ankara.

UMREK, 2018c, Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu, UMREK Yetkin Kişi Tebliği, Ankara.

UMREK, 2018d, Ulusal Maden Kaynak ve Rezerv Raporlama Komisyonu, UMREK Yetkin Kişi Etik Kurallarına İlişkin Usul ve Esaslar Tebliği, Ankara.

YERMAM, 2017a. Yerbilimleri, Maden ve Metalürji Profesyonelleri Birliği Tüzüğü, 2017/11211 Sayılı Bakanlar Kurulu kararı, 04.12.2017, Ankara.

YERMAM, 2017b. Yerbilimleri Maden ve Metalurji Profesyonelleri Birliği, YERMAM Üyelik Şartları Yönergesi, Ankara.

YERMAM, 2017c. Yerbilimleri Maden ve Metalurji Profesyonelleri Birliği, YERMAM Kayıtlı Üye Mesleki Ahlak Kuralları, Ankara.

YERMAM, 2017d. Yerbilimleri Maden ve Metalurji Profesyonelleri Birliği, YERMAM Yetkin Kişiler İçin Sürekli Mesleki Gelişim (SMG) Rehberi, Ankara.

YERMAM, Yer Bilimleri, Maden ve Metalürji Profesyonelleri Birliği, https://www.yermam.org.tr Erişim tarihi: Haziran 2024.

YİTİM ZONU ÜZERİNDE OLUŞAN TAVŞANLI/DAĞARDI (KÜTAHYA) OFİYOLİTİ İÇİNDEKİ KROMİT CEVHERLEŞMELERİNE BİR ÖRNEK

AN EXAMPLE OF CHROMITE ORE DEPOSITS WITHIN THE TAVŞANLI/DAĞARDI (KÜTAHYA) OPHIOLITE FORMED ABOVE A SUBDUCTION ZONE

Serdar Keskin
MTA Doğu Karadeniz Bölge Müdürlüğü, Trabzon

ÖZ: Bu çalışma, İzmir-Ankara-Erzincan okyanusunun kuzeye dalması sonucu oluşan ve Geç Kretase döneminde Torid-Anatolid kıta kabuğu üzerine yerleşen Tavşanlı/Dağardı Ofiyoliti'nin (Kütahya) üst manto peridotitlerini oluşturan ultramafik tektonitlerde (harzburjit, dunit) gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanındaki manto tektonitleri diyabaz daykları tarafından kesilmektedir. Ofiyolitik istifin en alt birimlerini oluşturan tektonitler içindeki merceksi ve bantlar şeklinde yer alan dunitik seviyeler içindeki podiform-tip kromit cevherleşmeleri dissemine, bantlı, masif ve benekli yapıdadır. Primer kromit bantlarının (~2 m) duruşları KB-GD doğrultulu (~300 m) ve 55^0-70^0 ile KD'ya eğimlidir. Ofiyolitin tektonit kısmında yer alan bu yüzeydeki cevherleşmelerden, işletmeye değer olanlardan detaylı çalışmalar yapılarak 2021-2023 yılları arasında 77 farklı lokasyonda 9050,20 m karotlu sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir.

Kaynak/Rezerv hesabında yapılan sondaj hatlarına yani sondaj doğrultularına paralel kesitler atılarak cevherli alanlar belirlenmiştir. Daha sonra cevherli alanların doğrultu ve eğim yönünde etki alanları belirlenmiş olup her kesit hattındaki cevherli alanlar birleştirilerek cevher katı model (wireframe, solid model) oluşturulmuştur. Böylece yüzeydeki cevherleşmenin yeraltındaki 3–boyutlu katı modeli ortaya çıkarılmıştır. Krom içeriğine göre hesaplanan yoğunluk değerleri (3.1 gr/cm^3) belirlenen katı modelin hacmi ile çarpılarak cevherli zonun tonajı belirlenmiştir. Böylelikle ruhsat sahasının güneyinde 1 km2'lik alan içinde kapalı işletme ile %8.10 Cr_2O_3 tenörlü 43.025 ton görünür rezerv ve de %6.66 Cr_2O_3 tenörlü 299.548 ton potansiyel kaynak hesaplanmıştır. Kromit cevheri yüzeyde 568,00 m kotundan 471 m derinliğine kadar devam edip eğim yönünde de yaklaşık 98 m aralıklarla devam etmektedir. Teknolojik test çalışmaları süresince yapılan deneylerde, -500+300 μm fraksiyonunda %85,94 verimle %48,40 Cr_2O_3 tenörlü konsantre, -300 +100 μm

fraksiyonunda %97,32 verimle %50,60 Cr_2O_3 tenörlü konsantre elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ofiyolit, Kromit, Tenör, 3-boyutlu modelleme, İşletme

ABSTRACT: *This study was conducted on the ultramafic tectonites (harzburgite, dunite) forming the upper mantle peridotites of the Tavşanlı/Dağardı Ophiolite (Kütahya), which was emplaced onto the Tauride-Anatolide continental crust during the Late Cretaceous as a result of the northward subduction of the İzmir-Ankara-Erzincan ocean. The mantle tectonites in the study area are crosscut by diabase dikes. The podiform-type chromite mineralization within the dunite levels, which occur as lens-shaped and banded structures within the tectonites at the base of the ophiolitic sequence, exhibit disseminated, banded, massive, and spotted textures. The primary chromite bands (~2 m thick) trend NW-SE (~300 m) and dip southeastward at angles of 55°–70°. Detailed studies were conducted on economically viable ore deposits within these surface occurrences in the tectonite section of the ophiolite, and between 2021 and 2023, a total of 9,050.20 meters of core drilling was carried out at 77 different locations.*

For resource/reserve estimation, ore-bearing zones were delineated by generating cross-sections parallel to the drilling lines (i.e., drilling directions). Subsequently, the influence areas of these ore zones in both strike and dip directions were determined, and the ore-bearing sections were combined to construct a solid ore model (wireframe, solid model). This approach enabled the development of a 3D solid model of the subsurface ore mineralization. The ore zone tonnage was calculated by multiplying the volume of the defined solid model by the density values (3.1 g/cm³) derived based on the chromite content. As a result, within a 1 km² area in the southern part of the license zone, an underground minable ore reserve of 43,025 tons with an average grade of 8.10% Cr_2O_3 was estimated, along with a potential resource of 299,548 tons with an average grade of 6.66% Cr_2O_3. The chromite ore extends from an elevation of 568.00 m at the surface to a depth of 471.00 m and continues along the dip direction at approximately 98 m intervals. During the technological test studies, experiments produced a chromite concentrate with a Cr_2O_3 grade of 48.40% and a recovery rate of 85.94% in the -500+300 μm fraction, while the -300+100 μm fraction yielded a concentrate with a Cr_2O_3 grade of 50.60% and a recovery rate of 97.32%.

Keywords: *Ophiolite, Chromite, Grade, 3D modelling, Mining*

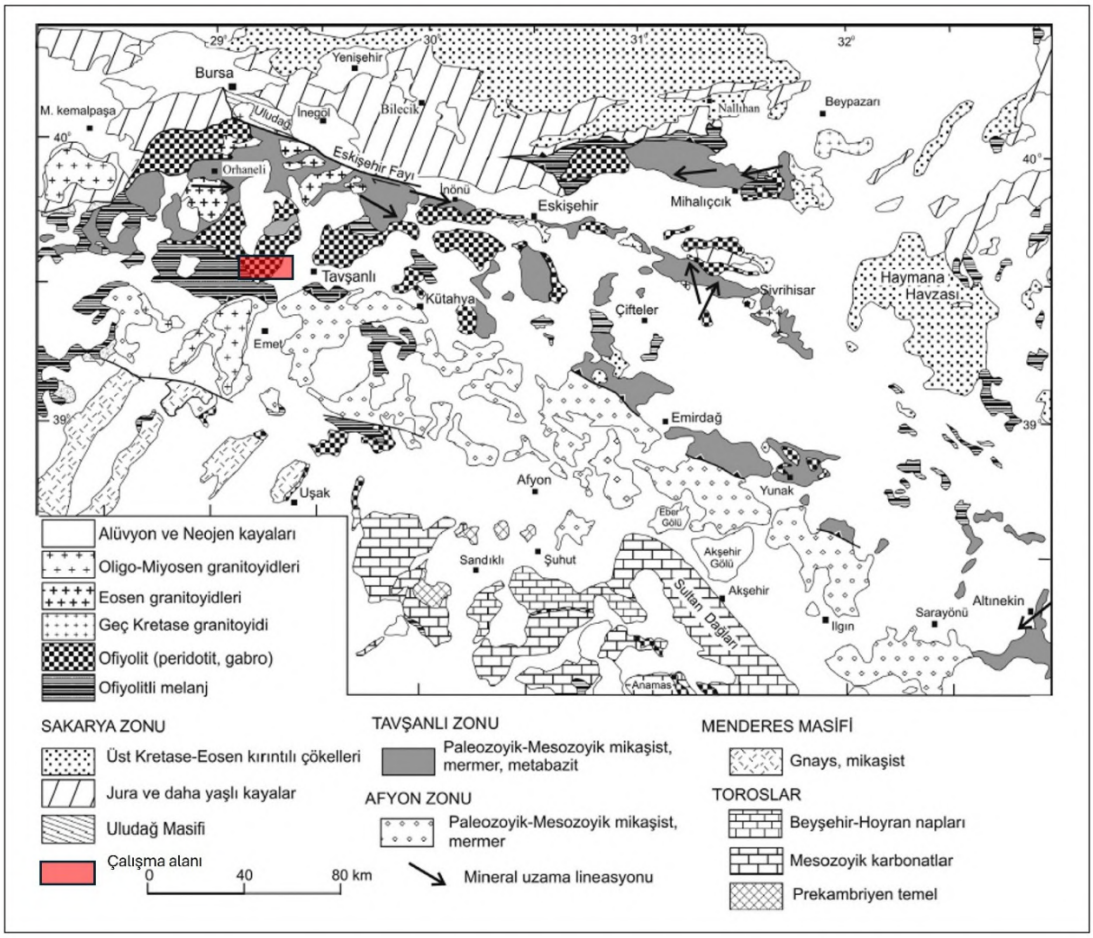
1. GİRİŞ

1.1. Bölgesel Jeoloji

İzmir-Ankara-Erzincan Kenet Zonu (İAEKZ) boyunca dilimler halinde yüzeyleyen ofiyolitler, Alpin orojenezi ile ilişkili olup çoğunlukla Anatolid-Torid Bloku'nun üzerine Geç Kretase'de itilmiş allokton kütleler olarak gözlenmektedir (Okay ve Tüysüz, 1999; Parlak vd., 2013; Sarıfakıoğlu vd., 2017). Bu ofiyolitler, Neotetis Okyanusu'nun kuzey kolunun günümüzdeki kalıntılarıdır. İAEKZ'nda, Orhaneli-Harmancık (Bursa), Tavşanlı (Kütahya), İnönü-Dağküplü-Mihalıççık (Eskişehir) ve en doğuda Refahiye (Erzincan) ofiyolitleri bulunur. Çalışma alanının da içinde olduğu Tavşanlı/Dağardı Ofiyoliti'de genellikle tüketilmiş üst mantoyu temsil eden serpantinleşmiş tektonitlerlerden (harzburjit ve dünit) oluşmaktadır. Bu ofiyolitler Anatolid-Torid Bloku'nun kuzey ucunda yer alan Tavşanlı Zonu içinde yer almakta ve Geç Kretase'de bir dalma batma zonu içine dalan ve daha sonra yükselerek kıta kabuğu üzerine yerleşen ofiyolit-ofiyolitik melanj olarak karşımıza çıkmaktadırlar. (Okay, 2011). Çalışma alanı Tavşanlı Zonu'nun hemen güneyinde yer almakta (Şekil 1) ve üzerinde yer aldığı İAEKZ, Şengör ve Yılmaz (1981), Yılmaz (1981)'a göre Geç Kretase ve Alt Eosen aralığı boyunca kuzeye doğru batan, güneyde Anatolid-Torid Platformu ve kuzeyde Sakarya Kıtası arasında sıkışmış Neotetis Okyanusu'nun kuzey kolunun kalıntılarını temsil etmektedir (Bacak ve Uz, 2003).

Çalışma alanın da içinde bulunduğu Kütahya İli ve çevresinde çok geniş yayılım gösteren ofiyolitler birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Arni, 1942; Okay, 1981; Robertson, 2002; Konak, 2002; Önen ve Hall, 1993; Önen, 2003; Sarıfakıoğlu, 2006; Okay, 2009; Özen, 1993; Özen vd., 2011; Keskin vd., 2024). Tavşanlı Zonu'nda yer alan ofiyolitik kayaçlar kendi içinde düzenli bir istif (Tavşanlı Ofiyoliti) ve düzensiz bir melanjdan

(Dağardı Melanjı) oluşur. Tavşanlı Ofiyoliti, Tavşanlı ilçesinin hemen kuzeyinde yaklaşık D-B uzanımlı bir kuşak halinde uzanır ve bunun tabanında Dağardı Melanjı çepeçevre mostra vermektedir (Ortalan vd., 1984; Çiftçi vd., 2017).



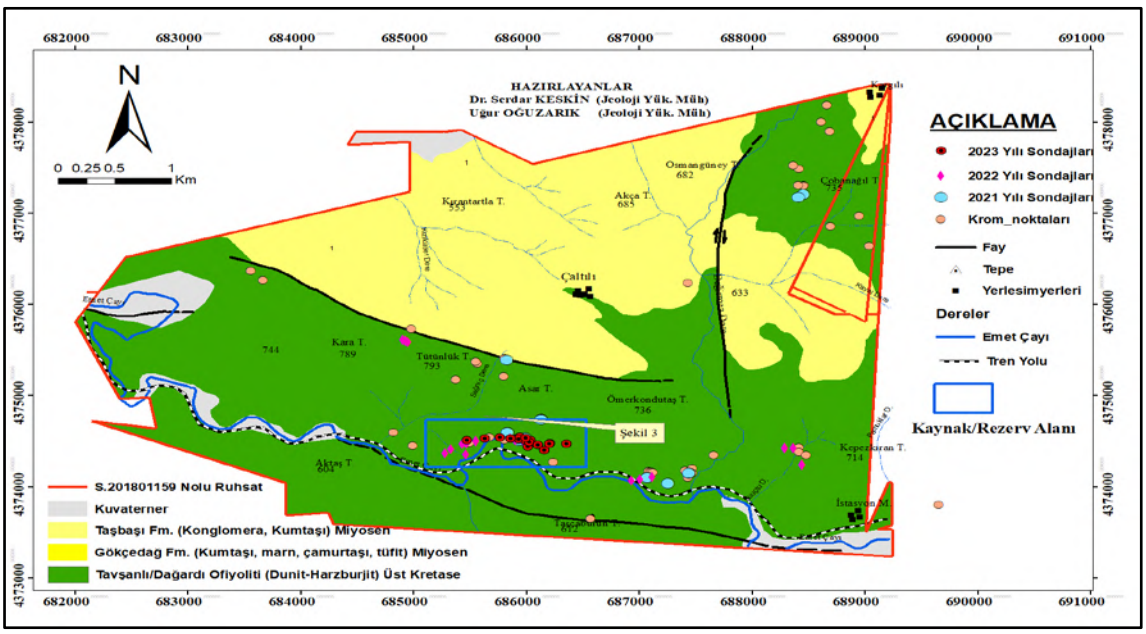
Şekil 1. Çalışma alanı ve Tavşanlı zonu içindeki yeri (Okay, 2011)

Çalışma sahasında Tavşanlı Ofiyoliti kayaçları içerisinde, eski yıllarda kromit cevherleşmelerini üretmek için madencilik faaliyetleri yürütülmüştür. Sahada eski yıllarda daha önce hiç sondajlı çalışma yapılmamıştır. Sondajlar genellikle ruhsat sahasının G-GB kısmında eski bir işletme sahasında yapılmıştır. Batı'dan Doğu'ya Ocak-1 (Açık Ocak), Ocak-2 (Orta Ocak) ve Ocak-3 (Karşı Ocak) olarak adlandırılan yaklaşık 1 km doğrultu boyunca

işletme yapılan sahada ilk dere kotu olan 483.metreden cevher alınmaya başlanarak dere kotunun altına 458.metreye kadar devam etttiği eski imalat planlarından anlaşılmaktadır (MAPEG'den temin). Yüzeyde 568. metre kotunda mosta veren (015/62) daha sonra galerilerle 510-500 m kotuna cevherin devamı tespit edilen alanda alt kotlarda galeri sürülerek 458.metreye kadar kuyu ile baş aşağı üretim yapılmıştır. Sahada 2012 yılında 4 m'lik masif cevherin devamına yönelik üretim yapılırken cevher faya takılmış ve üretim Ocak-2 kısmında durarak Ocak-3 kısmında devam etmiştir. 2014 yılında saha MAPEG'e düşerek, 2018 yılında MTA adına ruhsatlandırılmış ve sahada maden arama faaliyetleri yapılmıştır.

1.2. Çalışma Alanının Maden Jeolojisi

Çalışma alanı Tavşanlı ilçesinin 40 km batısında Çaltılı köyü ve çevresinde yüzeyleyen Üst Kretase'den Kuvaterner'e kadar değişen yaş aralıklarındaki kayaçlar içerisinde yer almaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma sahasının 1/10.000 ölçekli detay maden jeolojisi haritası

Bu kayaçlar Üst Kretase Tavşanlı Ofiyoliti birimlerine ait olarak, harzburjit, dunit ve diyabaz dayklarından oluşmaktadır. Üst manto tektonitleri olan peridotitik kayaçlar, Tavşanlı Ofiyoliti'nde baskın kayaç türünü oluşturmakta olup çalışma sahasında ağırlıklı olarak kromit yumruları içeren harzburjit ve dünitten meydana gelmektedir. Harzburjit, serpantinleşmiş olivin, iri taneli ve deforme olmuş ortopiroksen ile pull-apart dokular sergileyen kahverengimsi kırmızı kromit içeren porfiroklastik ve elek dokularına sahiptir. Dunitik kayaçlar aşırı altere olmuş, yer yer milonitik zonlar göstermekte ve ruhsat sahasının farklı kesimlerinde kromit cevherleşmelerini içermektedir.

Serpantinleşmiş dunitik kayaçlar, büyük kromit yumruları içeren tamamen olivin kristallerinden oluşmaktadır. Hem harzburjit hem de dünit, iri taneli, granüler bir doku içinde plajiyoklaz ve klinopiroksen kristalleri içeren, sahada 3-5 metre kalınlığındaki diyabaz daykları tarafından kesilmektedir. Bu ofiyolitik kayaçlar üzerine Neojen yaşlı Gökçedağ ve Taşbaşı formasyolarının birimleri gelmektedir. Bu Miyosen yaşlı kumtaşı, çakıltaşı, silttaşı, kiltaşı, marn ardalanmalı ve yer yer kömürlü sedimanter birimler ile Üst Miyosen yaşlı kumtaşı, çakıltaşı, kiltaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı ardalanmalı sedimanter birimler sahada ofiyolitik kayaçlar üzerine uyumsuz olarak yüzeylemektedir (Şekil 2).

Harzburjit ve dunitlerden oluşan peridotitlerde dunitler içinde mercek şeklinde ekonomik kromit cevherleşmeleri yer almaktadır. Ofiyoliti oluşturan ultramafikler genellikle tektonit kökenli olup, tektonitler içerisinde cep şeklinde, kısmi ergime sonucunda oluşan, tektonitlerle olan dokanağı zaman zaman faylanmış, dayk izlenimini veren gabrolar görülmektedir. Ana tektonik hatlara yaklaşıldığında ultramafiklerin yüksek oranda serpantinleştiği ve aynı zon içerisinde listvenitleşmenin de yoğunlaştığı görülmektedir. Tavşanlı Zonu'ndaki ofiyolitlerin büyük bir kısmını

oluşturan peridotitlerin mineral birlikteliğini olivin, ortopiroksen, klinopiroksen krom-spinel oluşturmaktadır (Önen, 2003). Ancak, önceki krom prospeksiyon çalışmalarında Tavşanlı Ofiyoliti'nin bu bölümünde kromit bantlaşmaları ve magmatik bantlaşmaların KB-GD doğrultulu olduğu görülmektedir (Ortalan vd., 1984).

Ruhsat sahasında ayrıca KB-GD doğrultulu kırık hatlarına bağlı olarak dunitik seviyelerde lisvenitleşmeler gelişmiştir. Limonitli, hematitli ve oldukça silisli olan bu kesimlerden örneklemeler yapılmış ve analize gönderilmiştir. Polimetal cevherleşme açısından herhangi bir zenginleşme görülmemiştir. Ruhsat sahasında ayrıca daha önce işletilen manyezit yatak ve zuhurları da bulunmaktadır.

Çalışma sahasında bu ofiyolitik istifin en alt birimlerini oluşturan üst manto tektonitler içindeki merceksi ve bantlar şeklinde yer alan dunitik seviyeler içindeki podiform-tip kromit cevherleşmeleri dissemine, bantlı, masif ve benekli yapıdadır. Ruhsat sahanının kırkdan fazla farklı yerinde irili ufaklı kromit cevherleşmeleri yer almakta olup (Şekil 2) primer kromit bantlarının hakim duruşları KB-GD doğrultulu (~300 m) ve 55^0-70^0 ile KD'ya eğimlidir (~2m). Yüzeydeki kromit mostralarından alınan örneklerde %7 ile %49,52 Cr_2O_3 arası değişen tenör değerleri mevcuttur.

2. MALZEME VE YÖNTEM

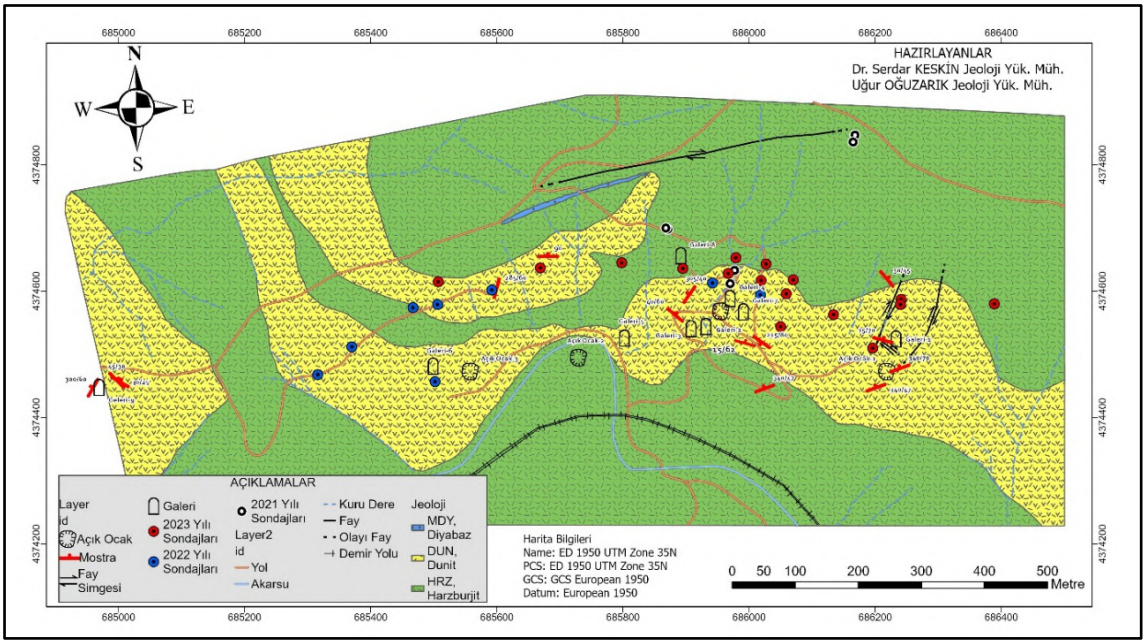
Günümüzde ofiyoltik kayaçlardaki mostra madenciliğinin azalmasına bağlı olarak krom madeni aramacılığında yeni yöntemler geliştirilmiştir. Yüzeyde görünen bir kromit cevherleşmesinin eğim ve doğrultu devamlılığı bulmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Yüzeyde genelde dünitler içinde dissemine, bantlı ve masif merceksi şeklinde yüzeyleme veren kromit cevherleşmelerinin çoğu tahrip edilmiş ve izleri hemen hemen kalmamıştır.

Bu da arazide geniş yayılım sunan ofiyolitik bir istifte cevherleşmenin takibini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla yüzeydeki bir cevherin yayılımını ortaya koymak için farklı arama parametlerine başvurulmaktadır. Bu arama yöntemleri, detay topoğrafik harita yapımı, detay maden jeolojisi haritası, galeri planları, jeokimyasal örnekleme, karotlu sondaj ve jeofizik çalışmaları şeklindedir. Bu yöntemlerle herhangi bir sahada var olan bir kromit cevherleşmesinin kaynak veya rezerv potansiyeli kolaylıkla ortaya konulmaktadır.

Bu amaçla, öncelikle ruhsat sahasındaki kromit mostralarının yerleri tespit edilerek haritaya işaretlenmiş ve doğrultu ve eğim yönleri ve açıları belirlenmiştir. İç yapı ortaya koyulduktan sonra ekonomik potansiyeli olan alanlarda (Şekil 2) Drone (IHA) ile detay 1/1000'lik topoğrafik harita alımı yapılmıştır. Bu IHA uçuşu toplam 1 km^2'lik alanda gerçekleştirilmiştir. Sahada 4 adet yer kontrol noktası tesis edilmiş ve ayrıca İHA dahili GPS'inin verilerinin düzeltilmesine referans sağlamak amacıyla uçuş süresince eş zamanlı 1 sn aralıklı statik uydu ölçmesi de yapılmıştır. Ortalama Uçuş yüksekliği yer + 250 m (bir profil üstündeki en yüksek düşey engel yer seviyesi kabul edilir) olarak gerçekleşmiştir. Wingtraone İHA üzerine entegre 42 MP sony kamera ile yaklaşık 800 adet 5 cm yer örnekleme aralıklı (yerdeki ayrıntı için 5 cm çözünürlük anlamına gelir) hava fotoğrafı toplanmıştır. Gerekli yazılımlar kullanılarak fotoğrafların ortofoto ve sayısal yükseklik modeli için uygun oldukları teyit edilmiş ve arazi çalışması sonlandırılmıştır. Ofiste değerlendirilen fotoğroflardan 3 boyutlu model ve bu modelden de 10 metre aralıklı grid verileri oluşturularak 1/1000'lik topografik harita üretilmiştir.

Bu topoğrafik harita üretiminden sonra uçuş yapılan alanın 1/1000'lik detay maden jeolojisi haritası, yer harita mühendisinin kullandığı el tipi leika marka hassas GPS ile yüzeydeki yapılar işlenerek yapılmıştır (Şekil 3). Bu

amaçla sahada cevherleşme ve yan kayaç ilişkisini iyi anlamak için detay 1/1000'lik maden jeoloji haritası yapılarak cevherin doğrultu ve eğim devamlılıklarını bulmak için çalışmalar yürütülmüştür (Keskin vd., 2024; Keskin, 2024). Böylelikle sahada 1/10.000 ve 1/25.000 ölçkeli haritada gösterilemeyen detaylar haritaya aktarılmıştır. Sahada harzburjit ve dunit geçişleri ile kromit mostraları ve eski galeri girişleri detaylı haritalanmıştır.



Şekil 3. Kaynak/Rezerv hesabı yapılan alanın 1/1.000'lik detay maden jeolojisi haritası

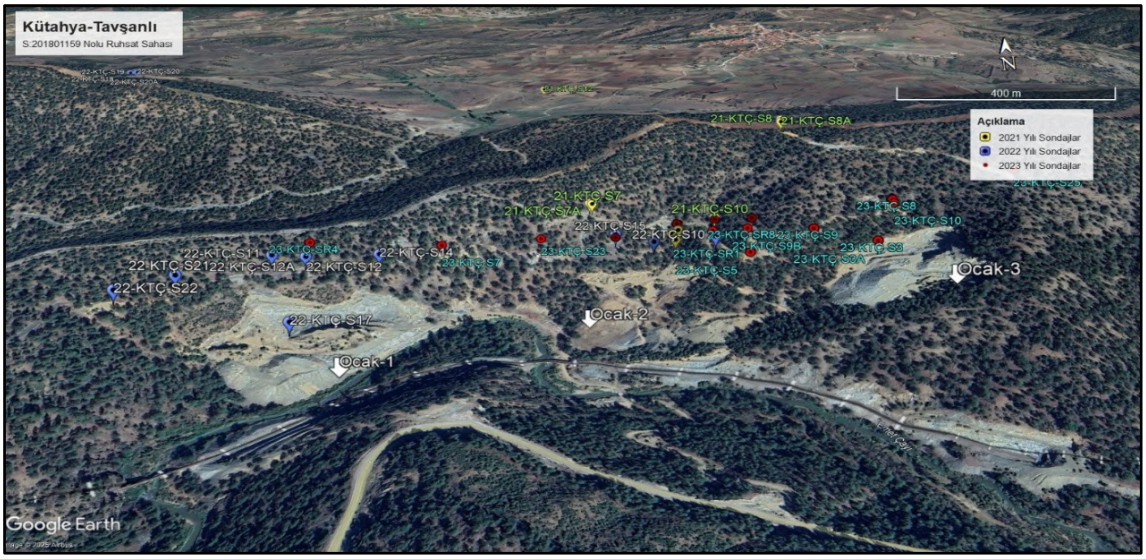
Harita çalışmalarından sonra yüzeyde mostra veren ve faylanmalarla ilişkili olan tüm birimler dijital ortama aktarılmıştır. Bu veriler ARCGIS Pro ve ve Micromine gibi bilgisayar programları üzerinden çalışılarak mostranın eğim ve boy devamlılığını aramak için sondaj lokasyonları belirlenmiştir. Belirli bir mostranın boy devamlılığına bakmak için makinayı cevherin doğrultu boyunu dik kesecek şekilde 10-15 veya 20 metre kot altı alınarak sondaj yapılmıştır. Cevherin eğimi göz önünde bulundurularak sondajın cevhere gireceği bir metre belirlenmiştir. Sondaj cevher kesmesi durumunda

ise makinenin açısı artırılarak cevherin eğim devamlılığını araştırılmıştır. Sondajlar bittikten sonra kuyudaki birimlerden ve cevherli yerlerden UMREK standartlarına göre determinasyon, kodlama ve karot örneklemesi yapılmıştır. Böylelikle cevherli zonlar belirlenmiş, yoğunluk testleri ile teknolojik test çalışmaları yürütülmüştür. Çıkan bilgilere dayanılarak ilgili program üzerinden modelleme yapılarak, ortaya ortalama tenörlü belli bir m3'lü cevher kütlesi çıkartılıp sahanın belli kısmının ekonomik potansiyeli belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kütahya ili Tavşanlı ilçesi Çaltılı Köyü civarında Üst Kretase yaşlı Tavşanlı Ofiyoliti'nin manto tektonitlerinde (harzburjit ve dunit) yer alan kromit cevherleşmelerinin derinlik devamı için yürütülen bu çalışmada 2021 ve 2023 yılları arasında ruhsat genelinde 77 farklı lokasyonda 9050,20 m karotlu sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu sondajlardan 52 tanesi (6185,35 m) kaynak/rezerv alanı belirlenen alanda yapılmıştır (Şekil 4, Çizelge 1).

Sahada sondaj yapılan eski Ocak ve çevresinde yüzeyde 690 m kotunda masif ve bantlı kromit cevherleşmeleri mosta vermektedir. 2021-2023 yılları arası yapılan detay haritalama ve sondaj çalışmaları sonucu, yüzeyde 50^0-62^0 ile KD'ya doğru eğimli cevherin (Şekil 5) derine doğru gittikçe dike yakın bir şekilde eğim kazandığı görülmektedir. Masif kromit cevherinin KD'ya eğimli maksimum 2 metre kalınlıkta ve KB-GD istikametinde 30 metre devamlılığı olduğu bu cevherin dunitik zonlar içinde bantlı ve dissemine cevher olarak 350-400 m doğrultu devamlılığı verdiği görülmektedir.



Şekil 4. Çalışma sahasında yapılan bazı sondaj lokasyonlarının görünümü

Şekil 5. Çalışma alanında yüzeyleme veren ince kromit bantlarının ve arazinin görünümü

Tespit edilen kromit cevherleşmesinin ve üretilen kısmının doğrultu ve eğim boyunca devamlılıklarını araştırmak (Ocak-1, Ocak-2 ve Ocak-3 arasındaki cevherin doğruıltu ve eğim boyunca devamlılığını) ve sahadaki diğer kromit mostraların devamlılıklarını ortaya koymak amacıyla 2022 yılında yarma ve rezerv/iştikaf amaçlı 18 farklı lokasyonda toplam 2208.80 m karotlu sondaj çalışması yapılmıştır. 2023 yılında da 20 farklı lokasyonda 2240.20 m karotlu sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Çalışma alanında kaynak/rezerv alanında yapılan rezerv/iştikaf sondajları

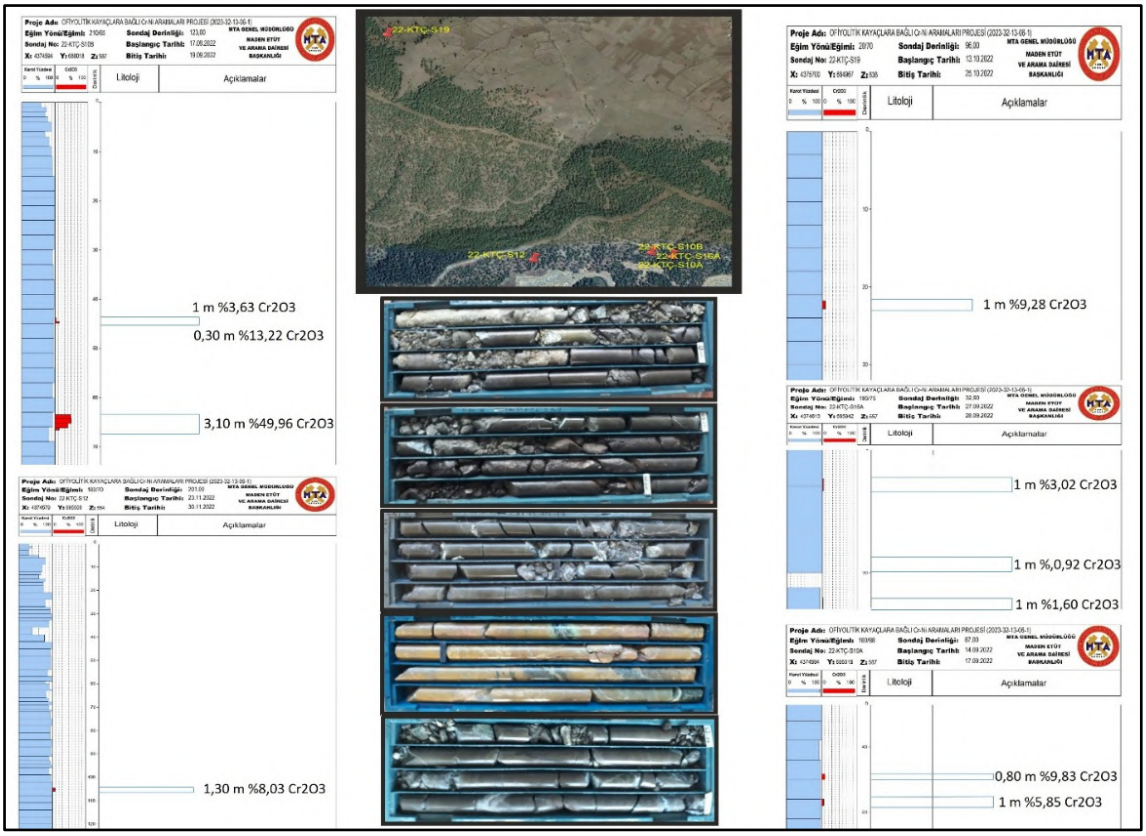
SIRA NO	SONDAJ NO	X	Y	Z	YÖN	EĞİM	SONDAJ DERİNLİĞİ (M)	BAŞLANGIÇ TARİHİ	BİTİŞ TARİHİ
1	21-KTÇ-S7	4374698	685871	593	175	75	213.00	14.07.2021	5.08.2021
2	21-KTÇ-S7A	4374700	685868	593	195	80	272.00	6.08.2021	14.08.2021
3	21-KTÇ-S9	4374612	685970	563	180	75	182.25	13.07.2021	16.07.2021
4	21-KTÇ-S9A	4374612	685970	563	180	55	82.00	16.07.2021	27.07.2021
5	21-KTÇ-S9B	4374612	685970	563	210	60	62.90	28.07.2021	31.07.2021
6	21-KTÇ-S10	4374643	686027	564	185	85	128.00	16.08.2021	18.08.2021
7	21-KTÇ-S8	4374847	686168	692	195	73	106.00	18.08.2021	24.08.2021
8	21-KTÇ-S10A	4374612	685970	563	180	57	73.00	19.08.2021	21.08.2021
9	21-KTÇ-S2	4377306	688495	716	212	70	126.50	20.08.2021	26.08.2021
10	21-KTÇ-S11	4374633	685977	547	190	75	122.00	22.08.2021	24.08.2021
11	21-KTÇ-S6	4374628	685967	559	250	67	68.00	24.08.2021	26.08.2021
12	21-KTÇ-S8A	4374836	686165	683	185	50	94.30	25.08.2021	1.09.2021
13	21-KTÇ-S6A	4374628	685967	559	255	83	106.40	26.08.2021	28.08.2021
14	21-KTÇ-S1	4377274	688445	714	70	60	100.00	27.08.2021	31.08.2021
15	22-KTÇ-S10	4374594	686018	567	195	80	167.00	9.09.2022	13.09.2022
16	22-KTÇ-S10A	4374594	686018	567	180	88	87.00	14.09.2022	17.09.2022
17	22-KTÇ-S10B	4374594	686018	567	210	65	123.00	17.09.2022	19.09.2022
18	22-KTÇ-S10C	4374594	686018	567	210	80	117.00	19.09.2022	20.09.2022
19	22-KTÇ-S10D	4374594	686018	567	210	55	99.00	21.09.2022	22.09.2022
20	22-KTÇ-S15	4374636	685895	561	180	75	135.00	23.09.2022	25.09.2022
21	22-KTÇ-S16	4374613	685942	557	180	70	36.00	26.09.2022	27.09.2022

Çizelge 2'in devamı

SIRA NO	SONDAJ NO	X	Y	Z	YÖN	EĞİM	SONDAJ DERİNLİĞİ (M)	BAŞLANGIÇ TARİHİ	BİTİŞ TARİHİ
22	22-KTÇ-S16A	4374613	685942	557	195	75	32.50	27.09.2022	28.09.2022
23	22-KTÇ-S16B	4374613	685942	557	245	80	186.00	28.09.2022	3.10.2022
24	22-KTÇ-S17	4374457	685502	523	180	60	198.00	28.09.2022	3.10.2022
25	22-KTÇ-S12	4374579	685506	564	180	70	201.00	23.11.2022	30.11.2022
26	22-KTÇ-S14	4374602	685592	557	180	83	63.00	23.11.2022	25.11.2022
27	22-KTÇ-S14A	4374602	685592	557	180	88	54.00	26.11.2022	27.11.2022
28	22-KTÇ-S11	4374574	685467	570	180	88	146.00	28.11.2022	3.12.2022
29	22-KTÇ-S22	4374468	685316	572	100	75	177.00	1.12.2022	5.12.2022
30	22-KTÇ-S21	4374512	685370	571	135	67	126.00	6.12.2022	9.12.2022
31	22-KTÇ-S14B	4374602	685592	557	75	65	111.30	6.12.2022	8.12.2022
32	22-KTÇ-S12A	4374579	685506	564	180	77	150.00	10.12.2022	13.12.2022
33	23-KTÇ-SR4	4374615	685506.9	592	170	82	202.40	14.08.2023	18.08.2023
34	23-KTÇ-S25	4374580	686389	678	220	85	209.40	22.08.2023	25.08.2023
35	23-KTÇ-SR1	4374617	686019	564	198	87	101.40	27.08.2023	28.08.2023
36	23-KTÇ-S2	4374618	686070	593	190	85	122.40	29.08.2023	31.08.2023
37	23-KTÇ-S5	4374544	686050	567	200	85	95.20	31.08.2023	01.09.2023
38	23-KTÇ-SR8	4374596	686059	572	200	80	100.00	02.09.2023	04.09.2023
39	23-KTÇ-S9	4374563	686134	594	195	85	98.00	05.09.2023	06.09.2023
40	23-KTÇ-S9A	4374563	686134	594	195	90	60.00	06.09.2023	07.09.2023
41	23-KTÇ-S9B	4374563	686134	594	195	75	60.00	07.09.2023	08.09.2023
42	23-KTÇ-S8	4374587	686241	626	190	85	150.00	09.09.2023	11.09.2023

Çizelge 3'in devamı

SIRA NO	SONDAJ NO	X	Y	Z	YÖN	EĞİM	SONDAJ DERİNLİĞİ (M)	BAŞLANGIÇ TARİHİ	BİTİŞ TARİHİ
43	23-KTÇ-SR2	4374653	685979.3	567	187	80	120.00	13.09.2023	17.09.2023
44	23-KTÇ-SR2A	4374653	685979.3	567	187	90	41.40	17.09.2023	18.09.2023
45	23-KTÇ-S15	4374628	685967	559	-	90	100.00	19.09.2023	20.09.2023
46	23-KTÇ-SR6	4374636	685895	561	200	80	120.00	21.09.2023	23.09.2023
47	23-KTÇ-SR6A	4374636	685895	561	55	87	100.00	24.09.2023	24.09.2023
48	23-KTÇ-S13	4374643	686027	564	-	90	80.00	25.09.2023	26.09.2023
49	23-KTÇ-S10	4374579	686240	618	185	80	170.00	02.10.2023	03.10.2023
50	23-KTÇ-S23	4374645	685798	559	190	85	176.00	06.10.2023	08.10.2023
51	23-KTÇ-S7	4374637	685669	546	-	90	59.00	08.10.2023	09.10.2023
52	23-KTÇ-S11	4374617	686019	564	198	80	75.00	11.10.2023	13.10.2023

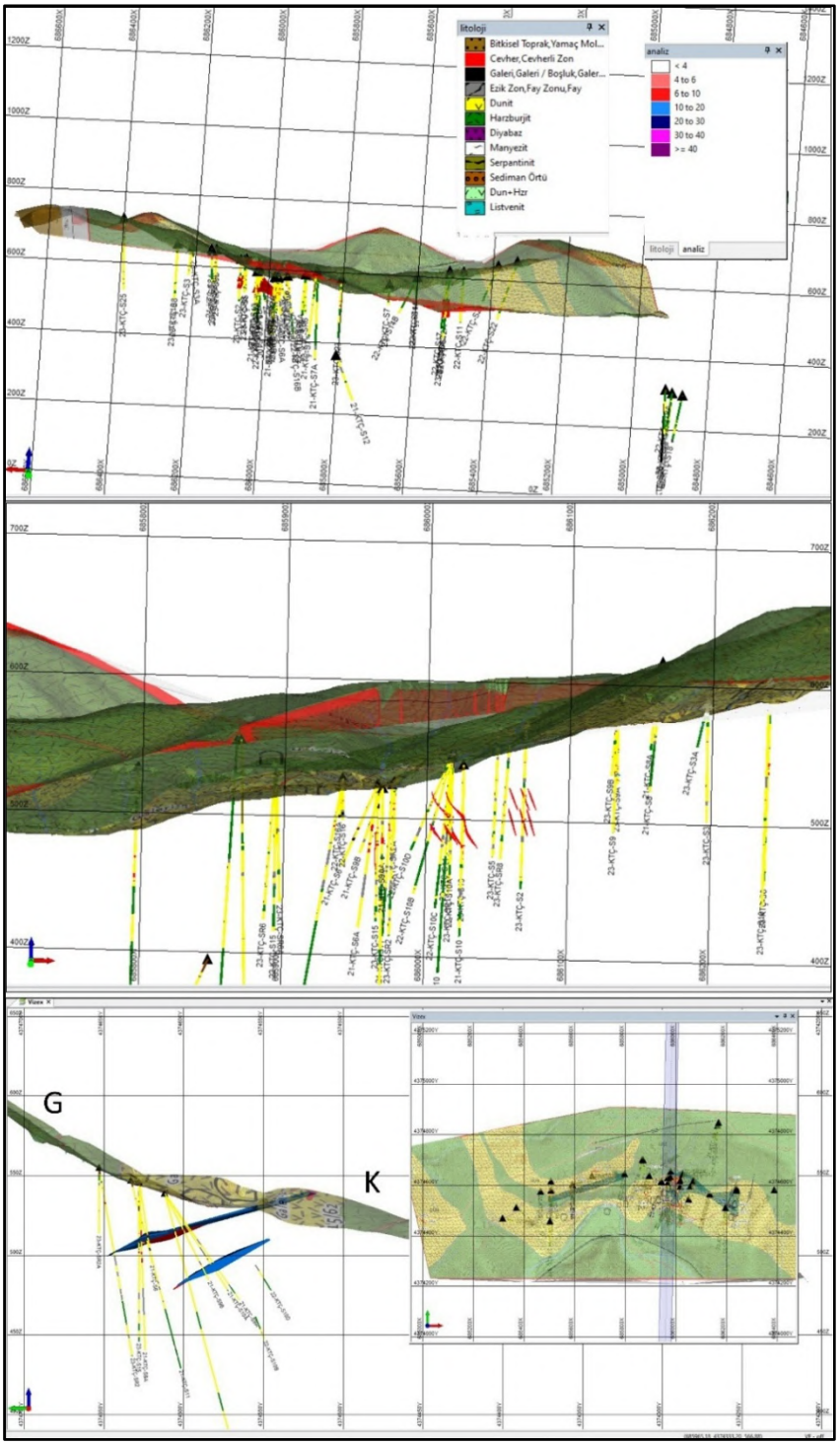


Şekil 6. Sondajlarda tespit edilen bazı cevherli seviyelerin tenör ve kalınlık dağılımları

Bu sondajlarda yüzeyde ince mostralar halinde görülen kromit cevherlerinin farklı doğrultu ve eğim boyunca kalınlıkları tespit edilmiştir (Şekil 6). Sondaj çalışmaları sonucunda üst manto tektonitleri içinde merceksi dunitik birimler içinde yüzeyde 530 metre kotundaki cevher 492 metre kota kadar devam etmektedir. Yeraltındaki cevheri kesen fayla 505 metre kotuna kadar çıkıp sonra tekrar 490 metreye kadar inmektedir. İkinci bir fayla 530 m kotuna kadar tekrar çıkan cevher 514 metre kotuna kadar devam etmektedir.

Çalışma alanında 1km^2'lik alanda ekonomik bir potansiyel ortaya koymak adına elde edilen tüm veriler Micromine programına veritabanı olarak yüklenmiştir. Kaynak/Rezerv hesabı yapılacak alanın jeoloji ve topoğrafik haritaları yüklenerek 3-boyutlu olarak çalışılmıştır (Şekil 7). Kaynak/Rezerv hesabında yapılan sondaj hatlarına yani sondaj

doğrultularına paralel kesitler atılarak (cevher merceksi olduğu için 5 metre ara ile sık aralıklı) cevherli alanlar belirlenmiştir.



Şekil 7. Kaynak/Rezerv hesabı yapılan alandaki sondaj litoloji, tenor dağılımı, yüzey-derinlik cevheri katı model bağlantısı ve sondajlardan geçen G-K yönlü kesit

Daha sonra cevherli alanların doğrultu ve eğim yönünde etki alanları belirlenmiş olup her kesit hattındaki cevherli alanlar birleştirilerek cevher katı model (wireframe, solid model) oluşturulmuştur (Şekil 7).

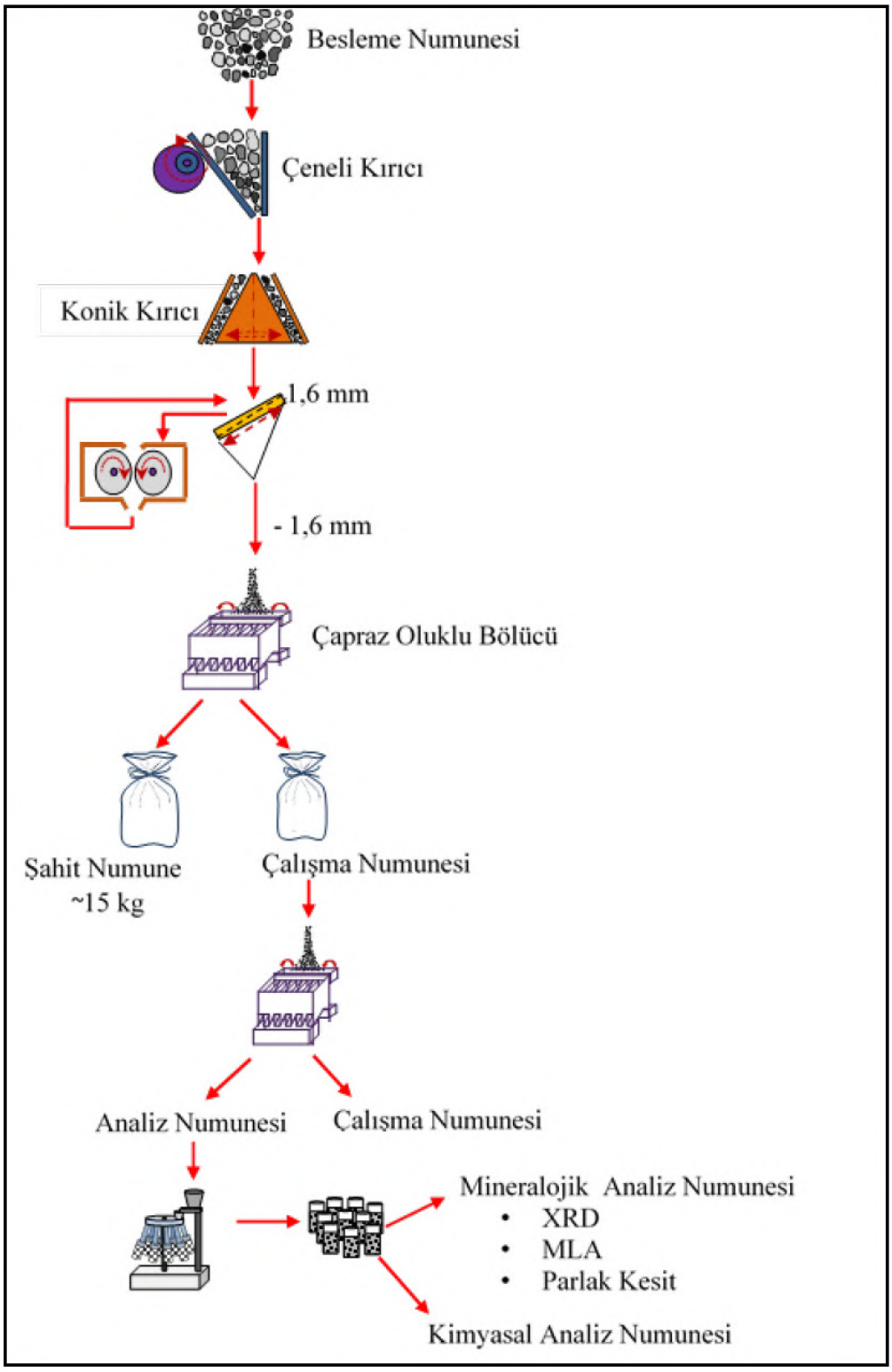
Böylece yüzeydeki cevherleşmenin yeraltındaki 3–boyutlu katı modeli ortaya çıkarılmıştır. Krom içeriğine göre hesaplanan yoğunluk değerleri (3.1 gr/cm3) belirlenen katı modelin hacmi ile çarpılarak cevherli zonun tonajı belirlenmiştir. Oluşturulan katı modelin ortalama tenörü, weight field (Cr2O3) weighting metod ile hesaplanmıştır.

Çalışma sahasında ortaya konulan bu cevherin ekonomik olup olmadığını ve cevherleşme özelliklerini ortaya koymak için MTA'da teknolojik test çalışmaları yürütülmüştür (Tekeş ve Kocausta, 2024). Teknolojik çalışmaları yapılan numune, 2023-KTC-1 Teknoloji işareti ile Kütahya'nın Tavşanlı ilçesi, Çaltılı Köyü'nden alınarak analize gönderilmiştir. Teknolojik test numuneleri proje yürütücüsü tarafından sistematik olarak hazırlanıp toplam 58 kg karot örneğinden oluşmaktadır. Analize giden numuneden el örnekleri alındıktan sonra, numune önce çeneli, sonra konik ve merdaneli kırıcıda kırıldıktan sonra numunenin tamamı -1,6 mm'nin altına öğütülerek bir dizi analizleri yapılmıştır.

Hazırlanan numuneler Şekil 8'de verilen akım şemasına uygun olarak analizleri yapılmıştır. XRD sonuçlarına göre kromit cevherleri, serpantin grubu mineral (lizardit), spinel, dolomit, brusit, kuvars, manyezit ve kil minerali içerdiği tespit edilmiştir. Cevher mikroskopisi çalışmalarında kromit mineralleri genelde özşekilli-kataklastik, yer yer de yarı özşekilli taneler halindedir.

Bu tanelerden ölçülebilen tane boyu aralığı 30-600 mikron'dur. Ayrıca bazı tanelerin az miktarda manyetite, bazı tanelerinde de az miktarda kromspinele dönüşüm gösterdiği tespit edilmiştir. Kromit minerallerine

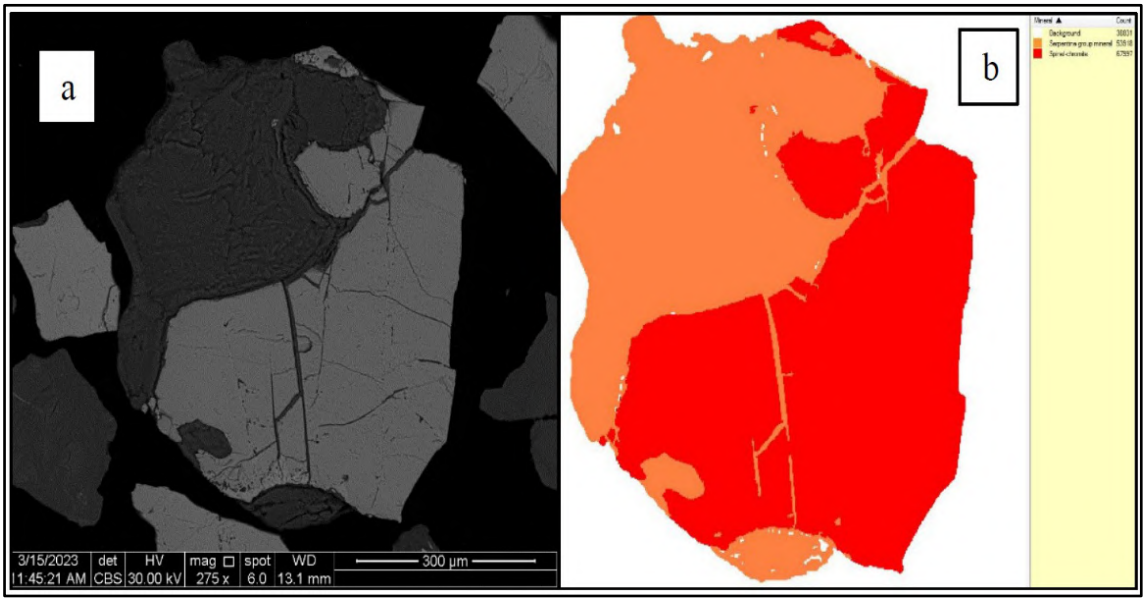
manyetit, pirit, kalkopirit gang mineralleri eşlik etmiş olup kırık ve çatlaklarda limonitleşme ve hematitleşmeler yaygın olarak görülmüştür.



Şekil 8. MTA numune hazırlama akım şeması (Tekeş ve Kocausta, 2024)

MLA analizlerinde serbestleşme tane boyu analizi için, temsili olarak alınan numune ile yaş elek analizi yapılmış ve elde edilen fraksiyonlar, MLA analizleri için -300+212 µm, -212+150 µm, -150+106 µm, -106+75 µm, -75+53 µm, -53+38 µm olmak üzere altı fraksiyon hazırlanmıştır. Yapılan analizlerde, modal mineralojik analiz tablosuna (Çizelge 2) bakıldığında, tüm numunelerde spinel-kromit ve serpantin grubu minerallerin baskın olduğu, çok az miktarda dolomit, kuvars, brusit, manyezit, klinoklor ve diğer minerallerin bulunduğu görülmektedir (Tekeş ve Kocausta, 2024).

Spinel kromit için oluşturulmuş serbestleşme derecesi ve mineral birliktelik tablolarına bakıldığında, tüm fraksiyonlarda spinel kromitin baskın olarak spinel grubu mineraller, az oranda klinoklor, dolomit, eser oranda da diğer cevher ve gang mineralleri ile ikili ve/veya çoklu kenetli oldukları görülmektedir. Spinel kromitin, serbestleşme derecesi ile mineral birliktelik ve serbest yüzey oranları Çizelge 3'de verilmiştir. Analiz edilen kromit cevherinin SEM-BSE ve MLA görüntüsü de Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. İkili bağlı serpantin-spinel kromit birlikteliğine ait görüntüler (a) SEM-BSE, (b) MLA görüntüsü (-300+212 µm).

Çizelge 4. Modal mineralojik bileşim tablosu (MAT Dairesi)

							Ortalama
	-300+212 µm	-212+150 µm	-150+106 µm	-106+75 µm	-75+53 µm	-53+38 µm	-300+38 µm
Spinel-kromit	29,99	50,64	46,30	45,71	23,35	40,88	39,48
Serpantin grubu mineral	59,89	41,11	45,00	45,13	64,62	49,77	50,92
Brusit	1,21	0,47	0,59	0,57	0,68	0,54	0,68
Klinoklor	0,99	0,68	0,84	0,72	1,05	0,96	0,87
Dolomit	1,48	1,85	1,92	1,99	2,07	1,82	1,85
Kuvars	1,32	0,93	1,02	1,21	1,45	1,14	1,18
Manyezit	4,13	3,71	3,60	3,84	5,27	3,70	4,04
Diğer min.	1,00	0,62	0,73	0,83	1,51	1,19	0,98
Toplam	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Çizelge 5. Spinel kromitin, serbestleşme derecesi ile mineral birliktelik ve serbest yüzey oranları

	-300+212 µm	-212+150 µm	-150+106 µm	-106+75 µm	-75+53 µm	-53+38 µm
Serbest (%)	85,81	90,56	90,82	91,41	90,49	91,79
Ikili kenetli (%)	13,89	8,97	8,94	8,26	9,02	7,61
Çoklu kenetli (%)	0,30	0,48	0,24	0,33	0,49	0,60

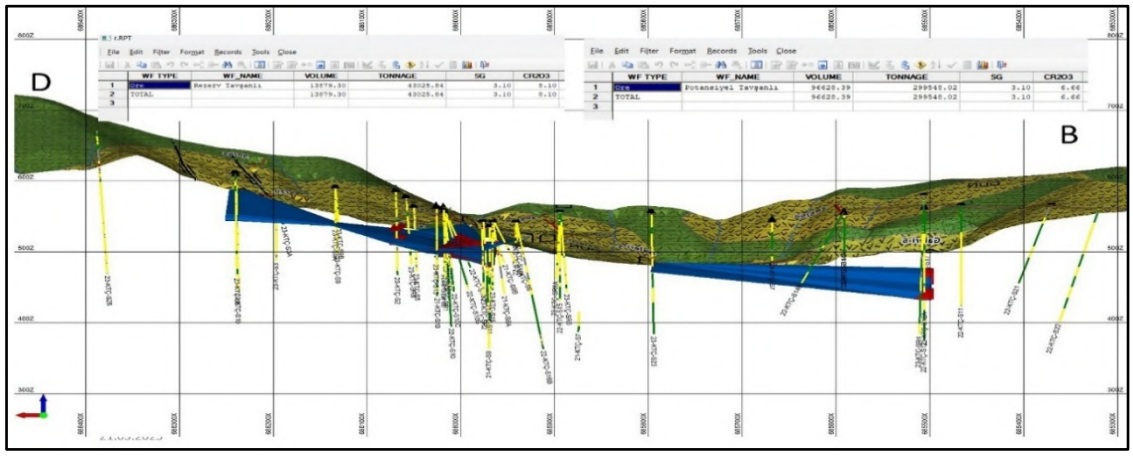
4. SONUÇLAR

Bu çalışma, zmir-Ankara-Erzincan okyanusunun Geç Kretase'de kuzeye dalması sonucu oluşan okyanus içi yitim üzerinde gelişim gösteren ve sonrasında güneye doğru kıta kabuğu üzerine yerleşen Tavşanlı/Dağardı Ofiyoliti'nin (Kütahya) manto peridotitlerindeki (harzburjit, dunit) kromit cevherini ortaya koymaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir.

Okyanus içi yitim zonunda oluştuğu düşünülen yüksek MgO ve düşük TiO_2 içerikli bu ofiyolitler (Sarıfakıoğlu vd., 2009) Doğu Akdeniz Ofiyolit Kuşağı'nda gözlenen diğer okyanus içi dalma-batma zonunda oluşmuş ofiyolitlere (Kızıldağ, Semail ve Troodos gibi) benzerlik göstermektedir. Dilek ve Flower (2003), ofiyoliti oluşturan kayaçların daha çok yay önü tektonik ortamında oluştuğunu belirterek, Mirdita (Arnavutluk), Troodos (Kıbrıs) ve Semail (Umman) ofiyolit kayaçlarına benzerlik gösterdiklerini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, Kütahya yöresindeki ofiyolitik kayaçlar Erken/Geç Kretase ofiyolitlerinin, Üst Triyas-Alt Kretase Neotetis okyanus içi yitim zonu üzerinde oluşan ve ardından kıta üzerine yerleşen dalma-batma zonu üstü ofiyolitlerine aittir (Sarıfakıoğlu vd., 2009).

Sahada okyanus içi dalma-batma zonu üstü ofiyolitlerine ait kayaçlar içerisinde dissemine, bantlı ve merceksi kromit cevherleşmesinin doğrultu ve derinlik devamlılıkları Tavşanlı-Çaltılı köyünün yaklaşık 1 km güneyinde sürdürülen 52 farklı lokasyonda toplam 6185,35 metre sondaj çalışması ile ortaya konulmuştur. Ruhsat sahasının diğer bölümlerinde sondajlarla tespit edilen kromit cevheriin modelleme çalışmaları devam etmektedir. Yüzeyde 568 metre kotundaki KB-GD doğrultulu ve KD'ya doğru 62^0 eğimli kromit cevherlerinin sondajlarla 492. Metre kota kadar indiği görülmektedir. Yeraltında sondajlarla tespit edilen eğim atımlı faylar ile 505 metre kota kadar çıkmaktadır (Şekil 7). Sonra eğim devamında fayların etkisi ile 490

m kotuna kadar inmektedir. İkinci fay ile 568 metre kotuna tekrar çıkan cevher eğim boyunca 471 metre kotuna kadar 98 m devam etmektedir. Çalışma sahasında ocak civarında kaynak/rezerv hesabı yapılan 1 km^2'lik alan Krom içeriğine göre hesaplanan yoğunluk değerleri (3.1 gr/cm^3) belirlenen katı modelin hacmi ile çarpılarak cevherli zonun tonajı belirlenmiştir. Böylelikle ruhsat sahasının güneyinde 1 km2'lik alan içinde kapalı işletme ile %8.10 Cr_2O_3 tenörlü 43.025 ton görünür rezerv ve %6.66 Cr_2O_3 tenörlü 299.548 ton potansiyel kaynak hesaplanmıştır (Şekil 10). Oluşturulan katı modelin ortalama tenörü, weight field (Cr2O3) weighting metod ile hesaplanmıştır.



Şekil 10. Sahanın güneyinde elde edilen katı cevher modeli ve hesaplanan kaynak/rezerv bilgileri

Teknolojik test çalışmaları ile bu cevherleşmenin ekonomik olarak üretilebilirliği ortaya konmak istenmiştir. Tekeş ve Kocausta, (2024) tarafından yürütülen tüm laboratuvar deneylerinden sonra sallantılı masa ile zenginleştirme deneyleri için numune, merdaneli kırıcı yardımı ile kapalı devre olarak -500 µm'ye indirilmiştir. Daha sonra numune sınıflandırılarak -500+300 µm, -300+100 µm, -100+36 µm ve -36 µm olmak üzere dört fraksiyona ayrılmış, -36 µm şlam olarak ayrılırken diğer fraksiyonlarla sallantılı masa deneyleri yapılmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 6. Sallantılı masa deney sonuçları (Birleştirilmiş ara ürün ve konsantre)

Boyut Aralığı (µm)	Giriş Ağırlığı (%)	Giriş Cr_2O_3 tenörü (%)	Ürünler	Ürün Ağırlık (%)*	Cr_2O_3 tenörü (%)*	Fraksiyonel Verim (%)	Girişe Göre Ağırlık (%)	Girişe Göre Verim (%)
-500 +300	32,14	9,95	Konsantre	16,89	**50,60**	85,85	5,43	24,23
			Ara Ürün	35,07	3,06	10,77	11,27	3,04
			Atık	48,04	0,70	3,38	15,44	0,95
			Giriş**	100,00	10,00	100,00	32,14	28,22
-300 +100	36,31	13,36	Konsantre	25,42	**50,86**	96,79	9,23	41,40
			Ara Ürün	9,78	2,40	1,76	3,55	0,75
			Atık	64,80	0,30	1,46	23,53	0,62
			Giriş**	100,00	13,40	100,00	36,31	42,77
-100 +36	13,44	14,09	Konsantre	22,14	**50,20**	78,88	2,98	13,18
			Ara Ürün	13,33	11,20	10,59	1,79	1,77
			Atık	64,53	2,30	10,53	8,67	1,76
			Giriş**	100,00	14,10	100,00	13,44	16,71
-36 (Şlam)	18,11	7,70					18,11	12,30
Giriş*	100	11,34					100,00	100,00

*Hesap Yoluyla Bulunmuştur (MAT Dairesi)
** Fraksiyonel giriş

Çizelge 4'de verilen deney sonuçlarına bakıldığında -500+300 µm fraksiyonunda %85,85 verimle %50,60 Cr_2O_3 tenörlü konsantre, -300 +100 µm fraksiyonunda %96,79 verimle %50,86 Cr_2O_3 tenörlü konsantre ve -100+36 µm fraksiyonunda %78,88 verimle %50,20 Cr_2O_3 tenörlü konsantre elde edilmiştir. Fraksiyonların ortalama % tenör ve % verim değerleri Çizelge 5'de verilmiştir (Tekeş ve Kocausta, 2024).

Çizelge 7. Fraksiyonların ortalama % tenör ve % verim değerleri

	%Ağırlık	**% Tenör**	**% Verim**
Σ Konsantre	17,63	50,67	78,80
Σ Ara Ürün	16,61	3,80	5,56
Σ Atık	47,64	0,79	3,34
Şlam (-36µm)	18,11	7,70	12,30
Giriş	100,00	11,34	100,00

Girişe göre üç fraksiyonun toplamında %78,80 verimle %50,67 Cr_2O_3 tenörlü malzeme elde edilmiştir. Kromun sınıflandırılmasında Cr/Fe oranı önemli parametrelerden biridir. Çizelge 6'da görüldüğü gibi elde edilen konsantrelerin Cr/Fe oranları yani rasyo değerleri 3/1'den büyük olup satılabilir bir cevherdir.

Çizelge 8. Konsantrelerin Cr/Fe oranlarının hesaplanması

	Fe_2O_3 (%)	**Cr_2O_3 (%)**	**Fe**	**Cr**	**Cr/Fe**
-500 +300 µm K	15,7	50,6	10,98	34,62	3,15
-300 +100 µm K	16,07	50,86	11,24	34,80	3,1
-100 +36 µm K	16,10	50,20	11,26	34,35	3,05
Toplam Konsantre	15,93	50,65	11,14	34,66	3,11

MLA sonuçlarını sallantılı masa ile karşılaştırdığımızda, MLA sonuçlarına göre malzemenin -300+212 µm fraksiyonunda %85,81 oranında serbest olduğu görülmüş ve deneyler bir üst fraksiyon aralığından (-500+300 µm) başlatılmıştır. -500+300 µm boyut aralığında elde edilen %85,85 verimden sonra öğütme maliyetleri göz önünde bulundurularak daha üst boyutların da denenmesine karar verilmiştir. Bu sebeple giriş numunesi 1600 mikronun altına indirilerek -1600+1000 µm, -1000+500 µm, -500+300 µm, -300+100 µm ve -100 µm olmak üzere sınıflandırılmış ve sallantılı masa deneyleri tekrar edilmiştir. -100 µm şlam olarak atılmıştır (Tekeş ve Kocausta, 2024).

Sonuç olarak yapılan deneylerde fraksiyonel olarak bakıldığında 1600+1000 µm ve -1000 +500 µm fraksiyonlarıda % Cr_2O_3 tenörü sırasıyla %17,90 ve %29,90'da kalmıştır. Bu tenör değerleri satılabilir konsantre değerlerinin çok altındadır. Numunenin 500 µm'nin altına indiği daha ince fraksiyonlarda -500+300 µm ve -300 +100 µm için sırasıyla % Cr_2O_3 tenörü sırasıyla %48,4 ve fraksiyonunda %50,6'a yükselmiştir. Bu fraksiyonlarda verimde yükselerek sırasıyla %85,94 ve %97,32'ye ulaşmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma MTA Genel Müdürlüğü'nde yürütmüş olduğum Türkiye Geneli Ofiyolitik Kayaçlara Bağlı Krom-Nikel Aramaları Projesi (proje kod no:2021-32-13-02-3, 2022-32-13-07-1, 2023-32-13-06-1) kapsamında desteklenmiştir. Projenin devamlılığını sağlayan Maden Etüt Ve Arama Dairesi Başkanlığı'na, cevher zenginleştirme ve analiz çalışmalarını yürüten tüm MAT Dairesi çalışanlarına (özellikle Tekeş ve Kocausta, 2024), proje aşamasında emeği geçen tüm MTA Genel Müdürlüğü personellerine, bu

makalenin gelişmesini sağlayan, değerli katkılarını sunan hakemlere ve sempozyum editörlüğüne teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Arni, P., 1942. Tavşanlı (Kütahya) linyit yatakları raporu maden tetkik ve arama genel müdürlüğü Rapor No 1373, Ankara, (yayımlanmamış).

Bacak, G. & Uz, B., 2003. Dağardı güneyi (Kütahya) ofiyoliti' nin jeolojisi ve jeokimyasal özellikleri. İTÜ Dergisi, Cilt:2, Sayı:4, 86-98.

Çiftçi, Y., Dönmez, C., Çolakoğlu A.O. & Odabaşı, İ., 2017. Türkiye Krom Envanteri, 341 sf, MTA, Ankara.

Dilek, Y., & Flower, M. F. J., 2003, Arc-trench rollback and forearc accretion: 2. A model template for ophiolites in Albania, Cyprus, and Oman, in Dilek, Y., and Robinson, P.T., eds., Ophiolites in Earth History: Geological Society, London, Special Publication, v. 218, p. 43–69.

Keskin, S., 2024. Tetis ofiyolit kuşağı boyunca yüzlek veren kromit cevherleşmelerinin ekonomik potansiyeli (Kütahya-Muğla). MTA Kültür Sitesi 14-18 Şubat, Sözlü sunum. Bildiri özleri Kitabı 15-16. s., Ankara.

Keskin, S., Oğuzarık, U., & Zimitoğlu, O., 2024. Yitim zonu üzerinde gelişen ofiyolitik kayaçlar içindeki kromit potansiyaline örnekler: Kütahya-Tavşanlı, Erzurum-Aşkale Ve Bayburt-Kop Kromit Cevherleşmeleri. Bildiri Özleri Kitabı Sayfa No:40. MTA Bilimsel Etkinlikler Haftası, 04-08 Mart 2024. Sözlü Sunum. Bildiri Özleri Kitabı Sayfa:40, Ankara.

Konak, N., 2002. Türkiye jeoloji haritasý, Ýzmir paftasý 1:500 000. MTA Genel Müdürlüðü, Ankara.

Okay, A.I. & Tüysüz, O., 1999. Tethyan sutures of northern Turkey. In The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine orogeny (eds. B. Durand, L. Jolivet, F. Horváth ve M. Séranne), Geological Society of London, Special Publication 156, 475-515.

Okay, A.I., 1981. Kuzeybatı Anadolu'daki ofiyolitlerin jeolojisi ve maviþist metamorfizması (Tavşanlı - Kütahya). (Geology and blueschist metamorphism of ophiolites in northwest Anatolia (Tavşanlı-Kütahya). Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 24, 85-95.

Okay, A. I., 2011. Tavşanlı Zonu: Anatolid-Torid Bloku'nun Dalma-Batmaya Uğramış Kuzey Ucu. MTA Dergisi, 142, 195-226.

Önen A. P., 2003. Neotethyan ophiolitic rocks of the Anatolides of NW Turkey and comparison with Tauride ophiolites. Journal of the Geological Society, London, 160, 947-962.

Önen, A. P., & Hall, R., 1993. Ophiolites and related metamorphic rocks from the Kütahya region, north-west Turkey. Geological Journal, 28, 399-412.

Ortalan, F., Seçer, Y., & Özen, H. 1984. Harmancık - Orhaneli (Bursa), Tavşanlı-Emet (Kütahya) Dursunbey (Balıkesir) yöresinin krom prospeksiyon raporu: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 7640, Ankara, (yayımlanmamış).

Özen, H. 1993. Alabarda-Dongurdakdere (Alabarda-Tavşanlı/Kütahya) krom sahasının maden jeolojisi raporu: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 9502, Ankara, (yayımlanmamış).

Özen, H., Gültaslı, Ö. F., Çolakoğlu, A. O., & Sayak, H., 2011. The Geology and Metallogenesis of Ophiolites of Tavsanli-Domaniç (Kütahya), and Sivrihisar-Beylikova-Mihalicçik-Saricakaya (Eskisehir) Surroundings: Ankara, Turkey, General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) Report 11458-11459.

Parlak, O., Çolakoğlu, A., Dönmez, C., Sayak, H., Yıldırım, N., Türkel, A., & Odabası, İ., 2013. Geochemistry and tectonic significance of ophiolites along the Izmir-Ankara-Erzincan suture zone in northeastern Anatolia, in Robertson, A.H.F., Parlak, O., and Ünlügenç, U.C., eds., Geological Development of Anatolia and the Easternmost Mediterranean Region: Geological Society, London, Special Publication 372, p. 75–107.

Sarıfakıoğlu, E., 2006. Petrology and origin of plagiogranites from the Dağkuplu (Eskişehir) ophiolite along the İzmir-Ankara-Erzincan Suture Zone, Turkey. Ofioliti 32, 39–51.

Sarıfakıoğlu, E., Özen, H., & Winchester, J.A. 2009. Whole rock and mineral chemistry of ultramafic-mafic cumulates from the Orhaneli (Bursa) Ophiolite, NW Anatolia, Turkish Journal of Earth Sciences, Vol.18, Issue 1, P.55-83, Tübitak, Ankara.

Sarıfakıoğlu, E., Dilek, Y., & Sevin, M., 2017. New synthesis of the Izmir-Ankara-Erzincan suture zone and the Ankara mélange in northern Anatolia based on new geochemical and geochronological constraints. The Geological Society of America Special Paper 525.

Şengör, C., & Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach, Tectophysics, 75, 181-241.

Tekeş., B. E., & Kocausta, G. 2024. Ofiyolitik Kayaçlara Bağlı Cr-Ni Aramaları (Ofiyolitik Kayaçlara Bağlı Cr-Ni Aramaları Kampı), Kütahya Tavşanlı Çaltılı Köyü Krom Cevheri Zenginleştirme Çalışmaları Bitirme Raporu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü,71 s., Ankara (yayımlanmamış).

Yılmaz, Y., 1981. Sakarya kıtası güney kenarının tektonik evrimi, İstanbul Üniversitesi erbilimleri Dergisi, 1, 33-52.

AÇIK OCAK MADENCİLİĞİ FİLO YÖNETİMİNDE, KAMYON SEVKİYATI İÇİN BİLGİSAYARLI GÖRÜ VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONUN ENTEGRASYONU

INTEGRATION OF COMPUTER VISION AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FOR TRUCK DISPATCHING IN OPEN-PIT MINING FLEET MANAGEMENT

Kürşat Hasözdemir, Mert Meral, Muhammet Mustafa Kahraman
İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZ: Bu çalışma, açık ocak madenciliğinde filo yönetimini geliştirmek amacıyla bilgisayarlı görü ile çok amaçlı optimizasyonu entegre etmektedir. Amaç, kamyon-ekskavatör atamalarını optimize ederek ekskavatörlerin boşta kalma süresini ve üretim hedeflerinden sapmaları azaltmaktır. Altı saatlik maden videosu görüntüleriyle eğitilmiş YOLO v8 modeli, ekskavatörler ve döküm sahalarındaki araçları gerçek zamanlı izlemek için kullanılmıştır. Kamyon atamaları ve ekskavatör hazır olma süreleri gibi veriler, ekskavatör bekleme sürelerini ve hedef kamyon atamalarındaki farklılıkları en aza indirmeyi amaçlayan çok amaçlı ikili tamsayılı programlama modeline girdi olarak kullanılmıştır. Epsilon kısıt yöntemi ile bu hedefler arasındaki ilişkiyi gösteren Pareto sınırı oluşturulmuştur. Gerçek zamanlı görüntü analizinin optimizasyon ile entegrasyonu, operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırarak uyarlanabilir kamyon-ekskavatör tahsislerini mümkün kılmaktadır. Bu çalışma, gelişmiş bilgisayarlı görü ve optimizasyon tekniklerinin madencilik filo yönetimini iyileştirme potansiyelini vurgulayarak daha maliyet etkin ve veri odaklı karar alma süreçlerine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayarlı Görü, Filo Yönetimi, Çok Amaçlı Optimizasyon

ABSTRACT: *This study integrates computer vision with multi-objective optimization to enhance fleet management in open-pit mining. The objective is to optimize truck-to-excavator assignments, thereby reducing excavator idle time and deviations from production targets. A YOLO v8 model, trained on six hours of mine video footage, identifies vehicles at excavators and dump sites for real-time monitoring. Extracted data—including truck assignments and excavator ready times—is incorporated into a multi-*

objective binary integer programming model that aims to minimize excavator waiting times and discrepancies in target truck assignments. The epsilon-constraint method generates a Pareto frontier, illustrating trade-offs between these objectives. Integrating real-time image analysis with optimization significantly improves operational efficiency, enabling adaptive truck-excavator allocation. This study highlights the potential of advanced computer vision and optimization techniques to enhance fleet management in mining, leading to more cost-effective and data-driven decision-making.

Keywords: *Computer Vision, Fleet Management, Multi-Objective Optimization*

1. GİRİŞ

Sensör teknolojilerindeki gelişmeler, artan işlem gücü ve depolama kapasiteleri sayesinde veri toplama yöntemleri her geçen gün daha da ilerlemektedir. Bu ilerlemeyle birlikte madencilik ve diğer endüstriler, verileri kullanmanın birçok yenilikçi yolunu araştırmaktadır.

Son yıllarda maliyetlerinin önemli ölçüde düşmesi, dijital kamera sistemlerini madencilik faaliyetlerini izlemek için pratik ve etkili bir araç haline getirmiştir. Güvenlik ve gözetim başlıca kullanım alanları olsa da kameralar, yalnızca izleme ile sınırlı kalmayan çok daha geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Madencilik sahasına yerleştirilen kameralar tarafından çekilen görüntüleri analiz eden bilgisayarlı görü algoritmaları, ekipman hareketleri, operasyonel koşullar, trafik düzenleri ve altyapı durumu hakkında temel bilgiler çıkarabilir. Ekipman yollarına yerleştirilen kameralar, araç konumu, hızı ve faaliyetleri hakkında veri toplayarak takip imkanı sağlar. Bu sayede, hız kurallarına uyum, trafik yoğunluğu ve yol koşullarının değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir. Ayrıca elde edilen

bu bilgiler, operasyonel içgörüler sunarak karar alma süreçlerinin başarısını artırmaya yardımcı olma potansiyeline sahiptir.

CCTV kamera teknolojisi madenlerde güvenlik önlemi olarak giderek daha fazla kullanılmasına rağmen bu kameraların sağladığı geniş veri havuzunun maden yönetiminde nasıl değerlendirilebileceğine dair çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu çalışma, bu boşluğu doldurmayı amaçlamakta olup, özellikle YOLO modeli oluşturularak bilgisayarlı görünün, bir maden işletmesindeki kamyon sevkiyat algoritmalarına gerçek zamanlı girdi verisi sağlamadaki katkısını araştırmaktadır. Bu sayede, malzeme akışının optimize edilmesi ve operasyonel performansın iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

1.1. Bilgisayarlı Görü Teknolojisinin Uygulamaları

(Ellinger vd., 2023) bilgisayarlı görü kullanarak havadan çekilen görüntülerde dökme malzeme yığınlarını segmentlere ayırmayı önermekte ve böylece madencilik ve inşaat gibi sektörlerde envanter kontrolünü otomatik hale getirmektedir. Bu yöntem, yığın şekilleri veya malzeme türü hakkında varsayımlara dayanmak yerine renk, doku ve yüzey topografyasını girdi olarak kullanmaktadır. Yöntem, yapay yığınları doğal özelliklerden ayırabilir, aynı maddeye ait yakındaki yığınları işaretleyebilir ve düzensiz şekilli yığınları bölebilir. Piksel bazlı segmentasyon için 0.90 ve nesne tanıma için 0.70 F1 puanları, yöntemin potansiyelini göstermektedir.

(Abrarov, 2023; Bendaouia et al., 2024) Görüntü işleme ve derin öğrenme teknikleriyle mineral konsantre derecelerini tahmin ederek madencilik endüstrisinde köpüklü flotasyon sürecinin kontrolüyle ilgili zorlukları ele almaktadır. Çinko (Zn), kurşun (Pb), demir (Fe) ve bakır (Cu) konsantrasyonları için endüstriyel değerlendirmelerde, köpük özellikleri (doku, kabarcık boyutu, hız ve renk dağılımı gibi) görüntü işleme ile

çıkarılmış ve %94'e varan doğruluk oranları elde edilmiştir. Ayrıca, hassasiyet hataları %4.53'ün altında tutulmuştur. Bu sonuçlar, yöntemin, karmaşık polimetalik flotasyon devrelerinin performansını iyileştirmek ve gerçek zamanlı kontrolünü sağlamak için yapay zeka destekli bir çevrimiçi analiz aracı olarak potansiyelini ortaya koymaktadır.

Singh et al. (2024) dragline yöntemiyle örtü kazısında döküm yığın yüksekliklerinin uygun şekilde izlenmesinin önemine değinmektedir. Bu uygulama, ocak içi alan optimizasyonu ile birlikte madencilik operasyonlarında güvenlik ve verimlilik açısından kritik bir öneme sahiptir. Döküm yığın yüksekliklerinin gerçek zamanlı izlenmesi, dragline dengeleme diyagramlarına uygun stabil yığın profillerinin sağlanmasını hedeflemektedir. Önerilen yöntem, YOLO modelini kullanılarak döküm yığın yüksekliklerini %84.6 F1 güven skoru ve %99.49 ortalama hassasiyet (mAP) ile gerçek zamanlı olarak tahmin etmektedir. 2D bilgisayarlı görü ile simüle edilmiş video verileri kullanılarak geliştirilen bu yöntem, hızlı, düşük maliyetli ve gerçek zamanlı bir yığın profili tanıma ve yükseklik tahmin sistemi sunmaktadır. Bu yenilik, stabil ve güvenli yığın yüksekliklerinin tasarım kriterlerine uygun şekilde korunmasını sağlayarak dragline madenciliğinin üretkenliğini artırmaktadır.

2042 eğitim görüntüsü ve 68 farklı taş türünden 284 yeni görüntü kullanarak, (Chow & Reyes-Aldasoro, 2022) bilgisayar görüşüne dayalı bir teknolojiyle değerli taşları otomatik olarak sınıflandırmıştır. Sadece 0.0165 saniyede analiz edilen görüntülerde %69.4 doğruluk oranı elde etmiştir. Bu oran, aynı taşları manuel olarak 42 ila 175 dakika içinde sınıflandıran uzmanların %42.6 ile %66.9 arasındaki doğruluk oranlarıyla karşılaştırıldığında ne kadar etkili olduğunu ortaya koymaktadır. İnsan uzmanların daha yavaş olmasına rağmen, bilgisayar destekli

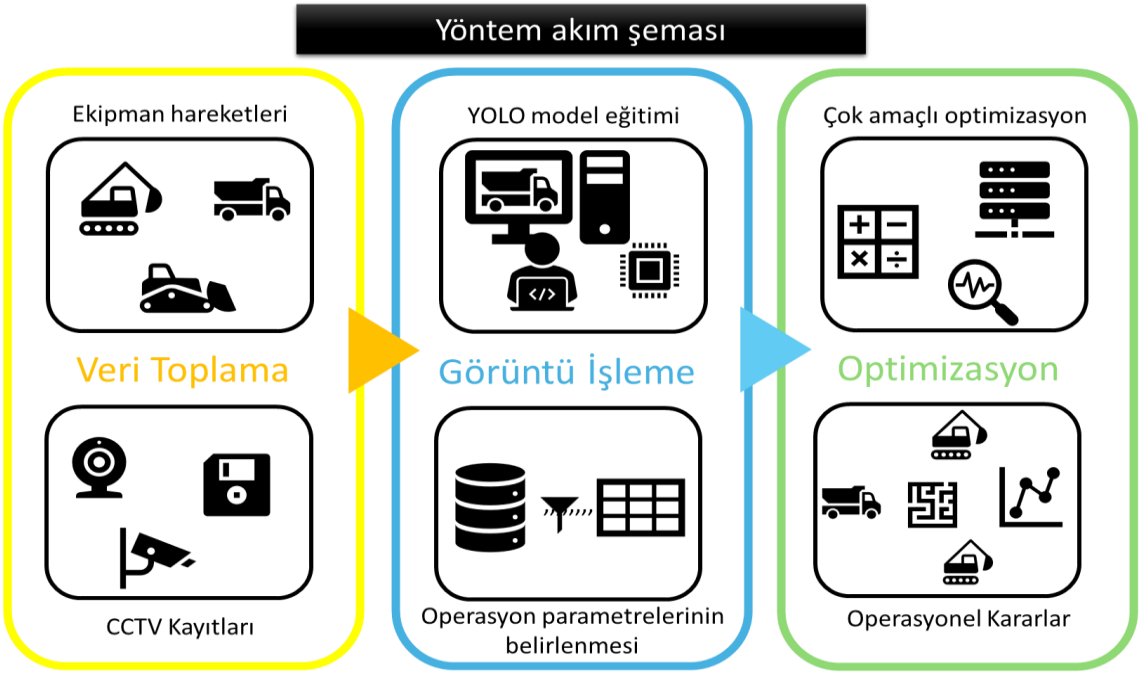
sınıflandırmanın daha doğru sonuçlar verdiği gösterilmiş ve bu teknolojinin taş bilimi ve benzeri alanlarda ne kadar faydalı olabileceği ortaya konmuştur.

Derin madenlerde insan hareketlerini tespit etmek için bilgisayarlı görüş tabanlı çarpışma önleme sistemlerini inceleyen (Imam et al., 2023), zayıf görüş koşulları ve kör noktalar gibi önemli güvenlik risklerine dikkat çekmektedir. PRISMA kılavuzlarına uygun olarak gerçekleştirilen kapsamlı bir inceleme, geçmiş sistemleri kullanılan sensör türüne (kamera veya lidar) göre sınıflandırarak performanslarını değerlendirmektedir.

2. MALZEME ve YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında kullanılabilecek bir filo yönetim sistemi geliştirilmesi için, operasyonlardan elde edilen video kayıtlarından veri toplamak ve kullanmak kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, kamyonları ve ekskavatörleri tanımlamak için nesne tespiti amacıyla CCTV kayıtlarının kullanılması planlanmıştır. Bu sayede ekipman konumları ve etkileşimleri analiz edilecek ve yükleme, taşıma veya kuyrukta bekleme gibi faaliyetleri sınıflandırmak mümkün olabilecektir. Görsel verileri analiz etmek için, açık ocak madeninde faaliyet gösteren bir sistemden elde edilen veriler üzerinde, bir nesne tespit algoritması olan YOLO modeli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemin adımları Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu yöntem, ekskavatörlerin ve kamyonların sistem içerisindeki durumlarını belirlemeye odaklanarak en uygun kamyon-ekskavatör eşleşmelerinin seçiminde kullanılabilecek girdi verileri oluşturmayı amaçlamaktadır.

Bu karar süreci, iki hedefli bir optimizasyon modeli olarak formüle edilmiştir. Hedefler ekskavatörlerin bekleme süresini azaltmak ve günlük hedeflerden sapmayı en aza indirmek olarak belirlenmiş ve bu hedefler arasındaki dengeyi değerlendirmek için epsilon sınır yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1. Yöntem akım şeması

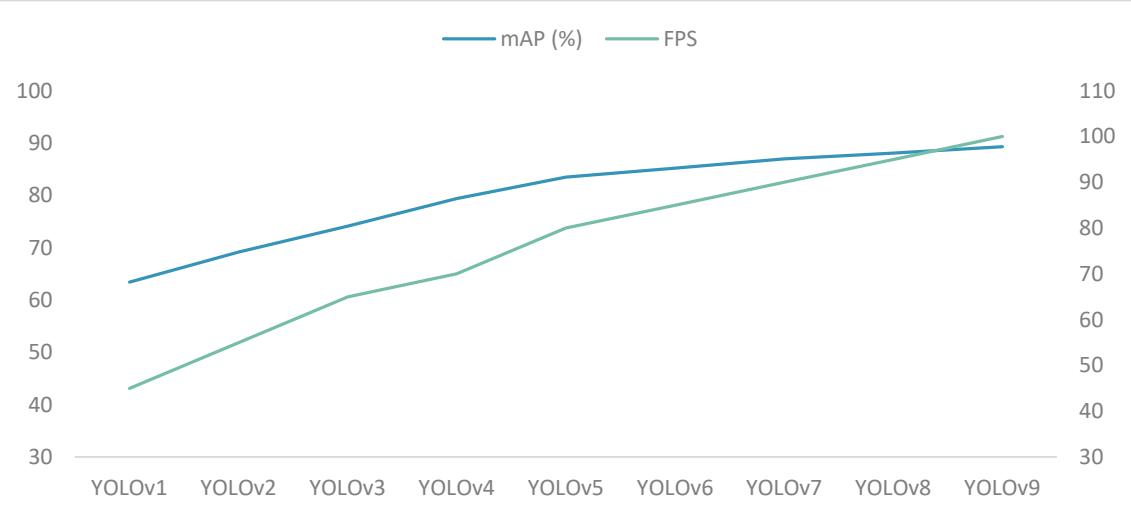
2.1. YOLO modeli ile görüntü işleme

Ultralytics tarafından piyasaya sürülen YOLOv8, daha verimli bir omurga ve başlık mimarisi gibi güncel derin öğrenme yeniliklerini kullanarak özellik tespiti ve küçük ya da birbiriyle örtüşen nesnelerin tanınma sürecinin iyileştirilmesini sağlamaktadır (Terven & Cordova-Esparza, 2023). Bunun yanı sıra, YOLOv8 modern makine öğrenimi sistemleri ile entegrasyon sağlayarak, çok çeşitli uygulamalarda nesne tespiti için etkili bir araç olarak kullanım alanı bulmaktadır (Maity ve diğerleri, 2023). YOLO modellerinin tespit performanslarındaki iyileşme Şekil 2'de paylaşıldığı gibidir.

Bu çalışmada YOLOv8, faal bir açık ocak madeninden elde edilen görsel verileri analiz etmek için kullanılmaktadır. Modelini eğitim sürecine hazırlık için, Roboflow platformunda görüntü etiketleme ve segmentasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

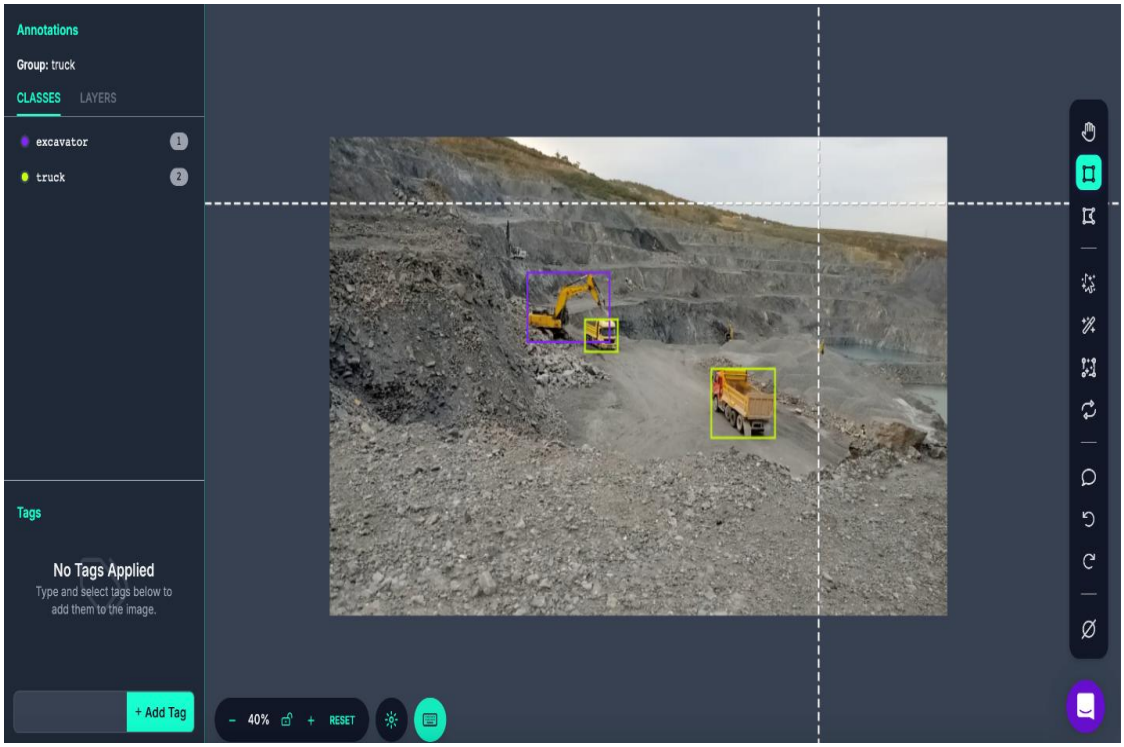
Bu platform, nesne sınıflarını -boşta, yükleme, döküm sahasındaki kamyon ve kuyruktaki kamyon- hassas bir şekilde etiketlemeye olanak

tanıyarak veri seti hazırlığını kolaylaştırmaktadır. Model eğitimi sürecinde 2.480 video karesi etiketlenirken bunlardan 1.880'i ekskavatör ve 1.901'i kamyon nesnesi içermektedir. Örnek bir etiketleme Şekil 3'te görülebilir. YOLOv8 modelinin en iyi performansı göstermesi için veri setine ön işleme yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemler arasında, görüntülerin yeniden boyutlandırılması, daha hızlı ve kararlı bir model eğitimi için piksel değerlerinin normalizasyonu ve veri setinin çeşitliliğini artırmak amacıyla döndürme, çevirme ve parlaklık değişikliği gibi yöntemler yer almaktadır. Bu teknikler, veri setinin kalitesini ve eğitilen modelin doğruluğunu önemli ölçüde artırrmaktadır. Video karelerinden oluşturulan veri seti, uygun model değerlendirmesi sağlamak ve aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla %70 eğitim, %20 doğrulama ve %10 test olarak üç alt kümeye ayrılmıştır.



Şekil 2. YOLO modellerinin kesinlik performansları (Terven & Cordova Esparza, 2023)

Model, maden operasyonundaki kamyonların konumlarını tespit etmek, ekskavatörde ve döküm sahasındaki kamyonları tespit etmek ve bu araçların ne zaman kullanılabileceğine dair bir değerlendirme sunmak amacıyla kullanılmaktadır.

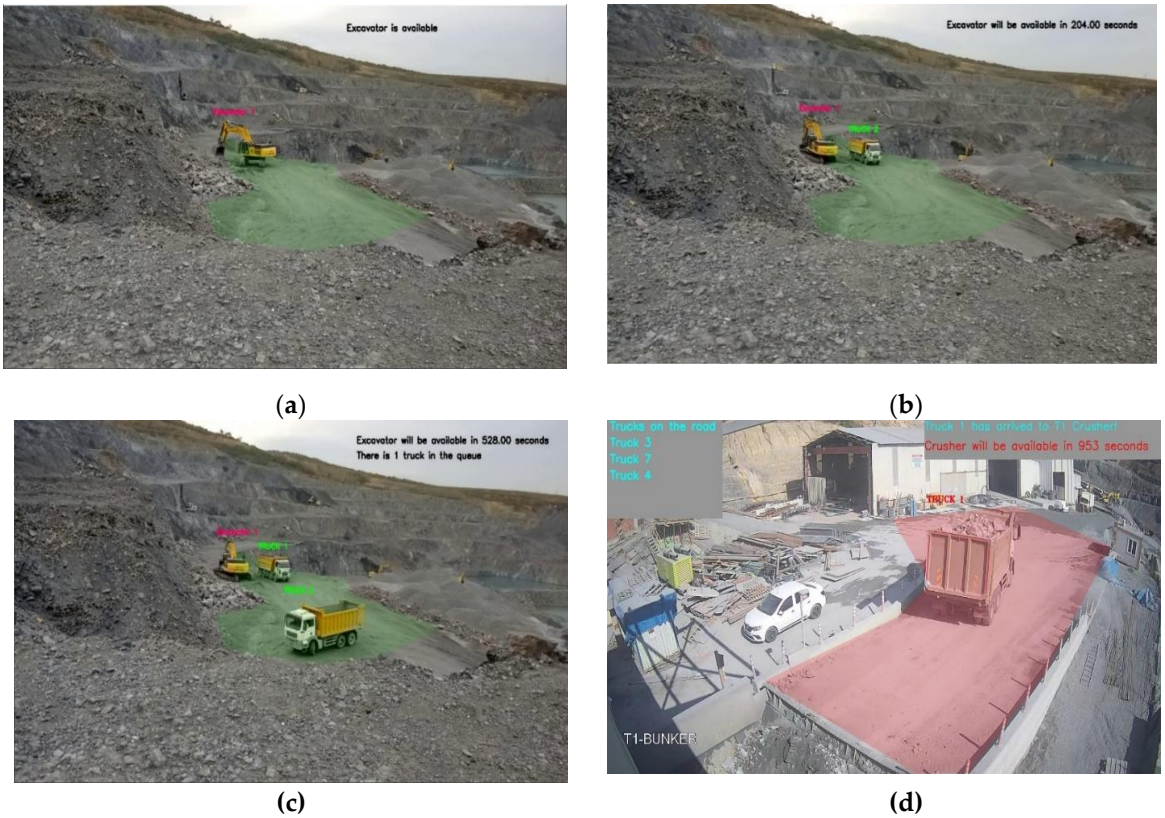


Şekil 3. Roboflow platformunda nesne etiketleme örneği

Şekil 4.'te değerlendirilen bir ekskavatör yer almaktadır. Bir ekskavatörün değerlendirme süreci için etki alanını ifade eden yeşil bir alan belirlenmekte ve bu alan içerisinde yer alan kamyon sayısına göre 3 farklı durum ortaya konmaktadır. Bu durumlar:

- **Yeşil alanda kamyon yok:** Eğer yeşil alanda hiç kamyon bulunmuyorsa, ekskavatör çalışmaya hazır kabul edilir. Bu durumda, hazır olma süresi sıfır saniye olarak atanır.
- **Yeşil alanda bir kamyon:** Yeşil alanda tek bir kamyon bulunduğunda, ekskavatörün hazır olma süresi, kamyonun dolma süresine karşılık gelir. Bu vaka çalışması için yükleme süresi 300 saniye olarak standartlaştırılmıştır.
- **Yeşil alanda birden fazla kamyon:** Yeşil alanda birden fazla kamyon bulunuyorsa, fazladan kamyonlar "kuyrukta" olarak sınıflandırılır. Bu durumda, ekskavatörün hazır olma süresi, kuyruktaki her kamyonun manevra ve yükleme sürelerinin toplamı kadar artırılarak uzatılır.

Bu sınıflandırma yöntemi, bir ekskavatörün ne zaman hazır olacağının hesaplanmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, model, döküm sahalarındaki kamyonları da tespit ederek hangilerinin yeni atamaya ihtiyaç duyduğunu da belirlemektedir. Şekil 4., madencilik operasyonunun dört farklı senaryosunu göstererek sistem içindeki ekskavatör kullanılabilirliği ve operasyonel dinamiklerin kapsamlı bir tasvirini sunmaktadır.



(**a**) (**b**)

(**c**) (**d**)

Şekil 4. Maden operasyonlarının farklı senaryoları: (a) Senaryo 1 (Yeşil alanda kamyon yok); (b) Senaryo 2 (Yeşil alanda bir kamyon); (c) Senaryo 3 (Yeşil alanda birden fazla kamyon); (d) Boşaltma alanındaki kamyon

Şekil 4a'da, ekskavatör boşta; belirlenmiş bekleme alanında (yeşil nokta) hiç kamyon yok. Şekil 4b, bir kamyonun yeşil noktayı işgal ettiği ve ekskavatörün yükleme yaptığı aktif bir yükleme operasyonunu gösterirken. Şekil 4c, yeşil noktada yoğunluk nedeniyle bir kamyonun beklediği kuyruk senaryosunu tasvir etmekte ve birden fazla kamyonun yeşil alanda

bulunmasının etkisini ortaya koymaktadır. Şekil 4d ise boşaltma alanında bir kamyonun olduğunu ve hemen müsait bir ekskavatöre yönlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Şekil 5, tespit edilen kamyon ve ekskavatörlerin güven düzeylerini sergileyerek tespit sisteminin etkinliğini ortaya koymaktadır. İşlenen görüntüler, ekskavatörlerin üretim oranlarını, döküm sahalarındaki boş kamyon sayısını, yeni atamaya ihtiyaç duyulan kamyonları içeren kapsamlı bir veri seti oluşturulmasını sağlamaktadır. Daha sonra, bu veri seti, boş kamyonların ekskavatörlere atanma sürecini optimize edecek bir modelde kullanılıyor. Bir sonraki bölümde detayları paylaşılan model, ekskavatörlerin bekleme sürelerini minimize etmenin yanında, planlanan üretim hedeflerinden sapmayı da en aza indirmeyi hedeflemektedir.

Şekil 5. İşlenmiş bir görüntüdeki tahmin güvenilirlik değerleri

2.2. ε -Kısıtlama Yaklaşımı İle Pareto Sınır Analizi

Pareto sınır analizi, çok amaçlı optimizasyon için temel bir kavramdır ve birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesi sürecinde hedeflerin birbiri üzerindeki etkilerini ifade etmek için kullanılır. İki hedefli bir durumda,

Pareto sınırı hedef uzayında bir eğri, 3 hedefli bir durumda ise yüzey olarak ortaya çıkar. Çok amaçlı optimizasyonda yaygın olan epsilon-kısıt yaklaşımı, çok amaçlı bir problemi, bir hedef optimize edilirken diğerlerinin belirli epsilon değerleriyle belirlenmiş kısıtlamalar olarak modele dahil edildiği tek amaçlı birden fazla probleme dönüştürür (Zhou ve diğerleri, 2021). Bir hedef fonksiyonu, üst sınırı ε olan bir kısıtlamaya dönüştürülür ve ardından iki hedef arasındaki ilişkiyi araştırmak için bu sınır değiştirilerek Pareto sınırı oluşturulur.

2.2.1. İkili tamsayı programlama modeli ve parametrelerin tanımı

Parametreler:

$\boldsymbol{P_e}$ **:** Ekskavatör e için üretim hedefi.

$\boldsymbol{RT_e}$ **:** Ekskavatör e'nin belirli bir zamandaki hazır olma süresi.

$\boldsymbol{TT_{de}}$**:** Döküm sahası d'den ekskavatör e'ye seyahat süresi.

Karar Değişkenleri;

$\boldsymbol{x_{tde}} \in \{0, 1\}$: İkili karar değişkeni

$$\boldsymbol{x_{tde}} = \begin{cases} 1, \text{eğer } d \text{ boşaltma alanındaki } t \text{ kamyonu } e \text{ ekskavatörüne atanmışsa} \\ 0, \quad \text{aksi halde.} \end{cases}$$

$\triangleq_{\boldsymbol{e}}$: Ekskavatör e için üretim hedefinden sapma..

Hedef fonksiyonlar:

Üretim hedeflerinden toplam sapmanın en aza indirilmesi.

$$\boldsymbol{Minimize}: \boldsymbol{Z_1} = \sum_{e \in E} \triangleq_e^+ + \triangleq_e^-$$

Ekskavatörlerin toplam hazır olma süresinin en aza indirilmesi.

$$\boldsymbol{Minimize}: \boldsymbol{Z_2} = \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} x_{tde} \cdot (RT_e + TT_{de})$$

Kısıtlar:

Her kamyon yalnızca bir ekskavatöre atanabilir.

$$\sum_{e \in E} \sum_{d \in D} x_{tde} = 1 \qquad \forall\, t \in T$$

Her boşaltma alanı aynı anda yalnızca bir talep eden kamyona sahip olabilir.

$$\sum_{e \in E} \sum_{t \in T} x_{tde} \leq 1 \qquad \forall\, d \in D$$

Yoldaki kamyonlara ait karar değişkenleri, verilen zamanda sıfır olarak ayarlanır.

$$x_{tde} = 0 \qquad \forall\, t \in T.\ \forall\, d \in D, \forall\, e \in E$$

Sapma kısıtlamaları:

$$\triangle_e^+ \geq P_e - \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} x_{tde} \qquad \forall\, e \in E \text{ Pozitif Sapma}$$
$$\triangle_e^- \geq \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} x_{tde} - P_e \qquad \forall\, e \in E \text{ Negatif Sapma}$$

İkili değişken kısıtlaması:

$$x_{tde} \in \{0, 1\} \qquad \forall\, t \in T, \forall\, e \in E, \forall\, d \in D.$$

Epsilon kısıtlaması:

$$\sum_{e \in E} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} x_{tde} * (RT_e + TT_{de}) \leq \varepsilon.$$

2.3. Önerilen Yöntemin Bir Açık Ocak Sahasında Uygulanması

Bu yaklaşımın uygulanabilirliğini göstermek amacıyla, faal bir açık ocak madencilik projesinde uygulaması yapılmıştır. Buna göre söz konusu işletmedeki 10 saatlik bir vardiyada yapılması gereken kamyon atamalarında

önerilen yöntemden faydalanılmıştır. Optimizasyon modelinin birincil hedefi, ekskavatörler için gerekli atama sayılarından sapmayı en aza indirerek üretim hedeflerinin karşılanmasını sağlamaktır. İkincil hedef ise ekskavatörlerin toplam hazır olma süresini en aza indirmek ve böylece kamyonların kuyruk süresini azaltmaktır. Hedeflere öncelik vermek için ikincisi, bağımsız bir hedef olarak değil, model içinde bir kısıt olarak ele alınır. Bu yaklaşım, modelin öncelikle gerekli atamaları başarmaya odaklanmasını sağlarken, hazır olma süresinin en aza indirilmesini koşullu bir faktör olarak dahil eder.

Uygulamanın yapıldığı madencilik operasyonu her biri 40 ton taşıma kapasitesine sahip 25 kamyon, 5 ekskavatör ve 7 döküm sahasında yürütülmektedir. Her ekskavatörün vardiya başında gerekli atama sayısı, Çizelge 1, toplam üretim hedefinin, kamyonların taşıma kapasitesine bölünmesiyle elde edilmiştir.

Çizelge 1. Ekskavatör başına ihtiyaç duyulan kamyon atama sayısı

Ekskavatör numaraları	0	1	2	3	4
Gerekli atama sayısı	280	74	50	249	246

Çizelge 2'de paylaşılan süreler döküm sahaları ve ekskavatörler arasındaki seyahat sürelerini ifade etmektedir. Bu süreler sayesinde herhangi bir zaman dilimi içinde birden fazla kamyonun atanması gerektiğinde ekskavatörlerin hazır olma sürelerini güncellemek için kullanılmaktadır. Bu sayede, ardışık kamyon atamalarından kaynaklanan gecikmeler hesaba katılarak ekskavatör kullanılabilirliğinin daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlanmıştır.

Çizelge 2. Döküm sahası ve ekskavatörler arasındaki mesafe (saniye)

Ekskavatör numaraları / **Döküm sahası numaraları**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
0	230	250	300	450	500
1	250	350	500	400	200
2	350	500	500	400	200
3	500	370	700	650	550
4	1000	500	200	500	750
5	500	1000	500	210	1000
6	210	500	1000	210	500

Bilgisayarlı görü sayesinde elde edilen ve kamyon konumları, atamaya ihtiyaç duyulma durumları ve ekskavatör hazır olma sürelerine dair bir örnek, Çizelge 3'te sunulmuştur. Buna göre her sütun, vardiya içindeki belirli bir saniyeyi temsil etmektedir. Eğer bir araç belirli saniyede atama gerektiriyorsa, ilgili kamyona ait hücrede kamyon numarası yer almaktadır. Öte yandan, bir aracın atamaya ihtiyacı yoksa hücresi boş bırakılır ve 0 değeriyle işaretlenir. Ekskavatörlerin tahmini hazır olma süreleri herhangi bir ekskavatörün başka bir kamyona hizmet vermeden önce kalan süreyi gösterir. Bu yapı, kamyon taleplerinin ve ekskavatör kullanılabilirliğinin açık ve senkronize bir şekilde tasvir edilmesiyle, ikili tamsayı programlama modeli ile karar almayı mümkün kılar.

Ayrıca incelenen vardiya sırasında döküm sahasındaki kamyonların konumları da belirlenmiştir. Her kamyona karşılık gelen hücre, o anda kamyonun bulunduğu boşaltma alanının numarasıyla doldurulur. Yolda olan kamyonlar, kodlama amacıyla 99 sayısı ile işaretlenir. Bu kodlama şeması, kamyonların bir döküm sahasında mı yoksa yolda mı olduğunu ifade etmektedir. Kamyonların mekânsal dağılımının hesaba katılması, açık ocak

maden operasyonunda kamyon hareketlerinin ve atamalarının dinamik doğasını yansıtarak ekskavatör kullanılabilirliğinin doğru bir şekilde temsil edilmesini amaçlamaktadır.

Çizelge 3. Bilgisayarlı görü ile oluşturulmuş örnek bir veri seti

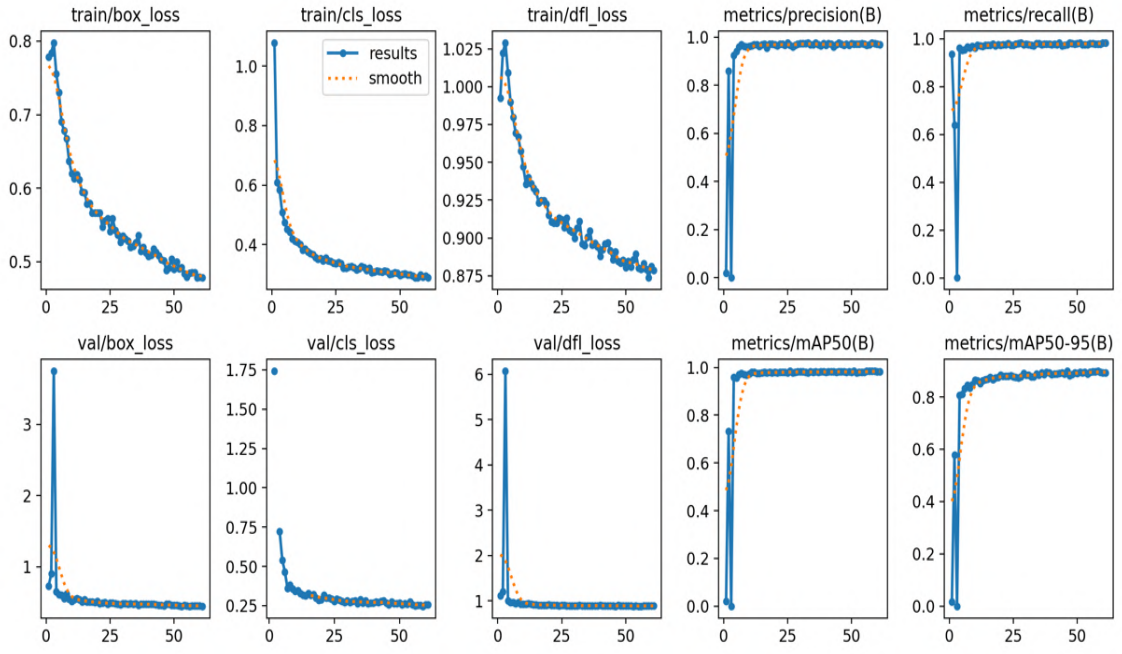
	Vardiya saniyesi	**25560**	**25680**	**25800**	**26040**	**26160**
Kamyon numaraları (atama)	3	0	0	0	3	0
	5	0	5	0	0	0
	9	0	0	0	9	0
Ekskavatör hazır olma süreleri						
	0	138	18	2	36	116
	1	4268	4148	4028	3788	3668
	2	3633	3513	3393	3153	3033
	3	93	72	33	36	71
	4	91	222	102	93	36
Kamyon lokasyonları (döküm)						
	3	99	99	99	1	99
	5	99	1	99	99	99

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Eğitilmiş modelin performans analizi

60 turluk bir eğitim sürecinden geçen modelin "Kamyon" ve "ekskavatör" tespitindeki başarısını ölçmek için hassasiyet (precision), geri çağırma (recall) ve ortalama Hassasiyet Ortalaması (mAP) gibi temel test puanları hesaplanmıştır. Şekil 6, modelin eğitim ve doğrulama sırasındaki performans iyileşmelerini gösterilmiştir. Train/box_loss, Train/cls_loss ve Train/dfl_loss grafikleri, çerçeve uyumunun, doğru sınıf seçiminin ve kenar detaylarının eğitim süresince daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Val/box_loss, Val/cls_loss ve Val/dfl_loss

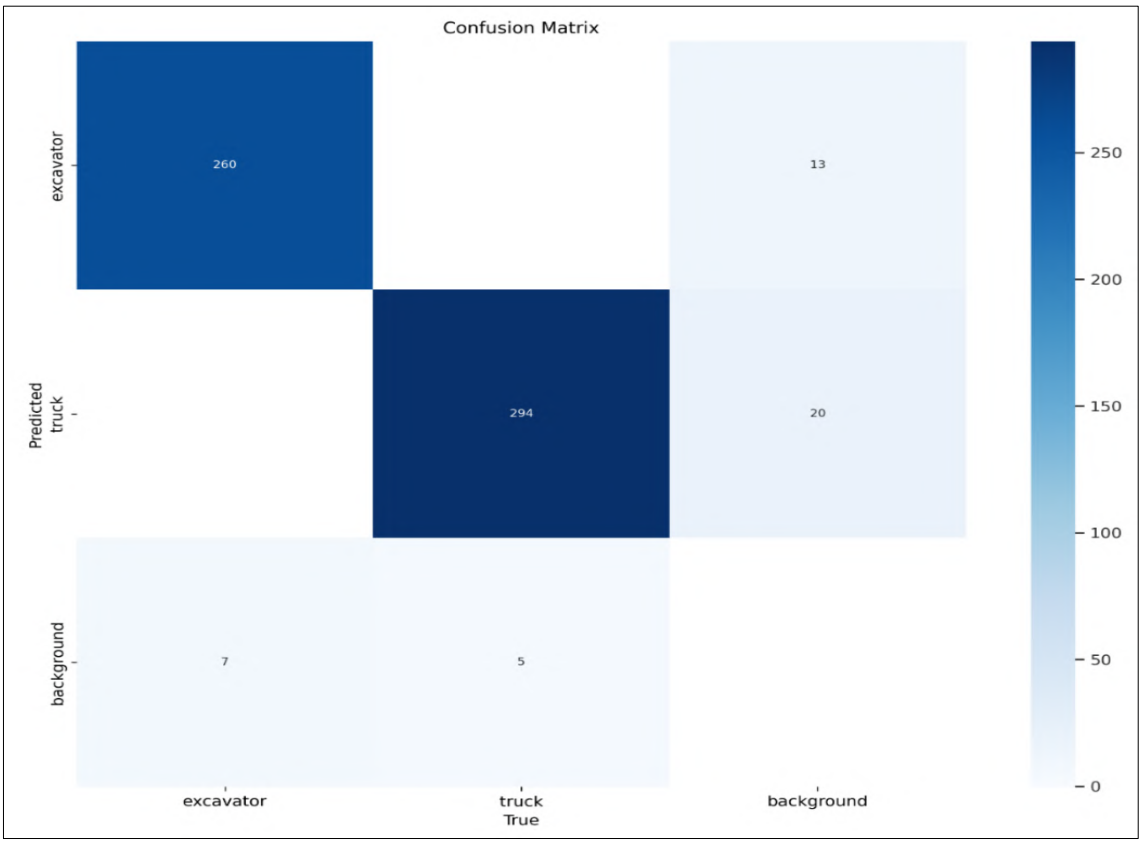
doğrulama grafikleri, hatalarda tutarlı bir azalma olduğunu göstererek modelin görülmemiş verilere genelleme yaptığını doğrulamaktadır. Metrics/precision(B) ve Metrics/recall grafikleri, modelin tahminlerinin daha istikrarlı ve keskin hale geldiğini göstermekte ve ayrıca, Metrics/mAP50(B) grafiği, ortalama hassasiyetin %95'e yakın olduğunu belirtirken, Metrics/mAP50-95(B) grafiği, farklı test seviyelerinde güçlü skorlar elde edildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Eğitilmiş modelin nesne tespit doğruluk metrikleri

Şekil 7'deki karışıklık matrisi, modelin ekskavatörleri ve kamyonları sınıflandırmada iyi bir performans sergilediğini göstermek amacıyla hazırlanmıştır. Buna göre sırasıyla 260 ekskavatör ve 294 kamyon doğru tahmin edilmiştir. Fakat bu matristen de anlaşılacağı üzere 7 arkaplan görüntüsü ekskavatör, ve 5 arkaplan görüntüsü ise kamyon olarak sınıflandırılmıştır. Yine 15 ekskavatör ve 20 kamyon görüntüsü de arkaplan olarak sınıflandırılmıştır. Modelin tahmin performansı tatmin edici olmakla

beraber bahsi geçen hataların azaltılması için, değişik koşullar ile veri artırma ve sınıflandırma eşiklerinin ince ayarının yapılması gibi yöntemlerden faydalanılabilir.

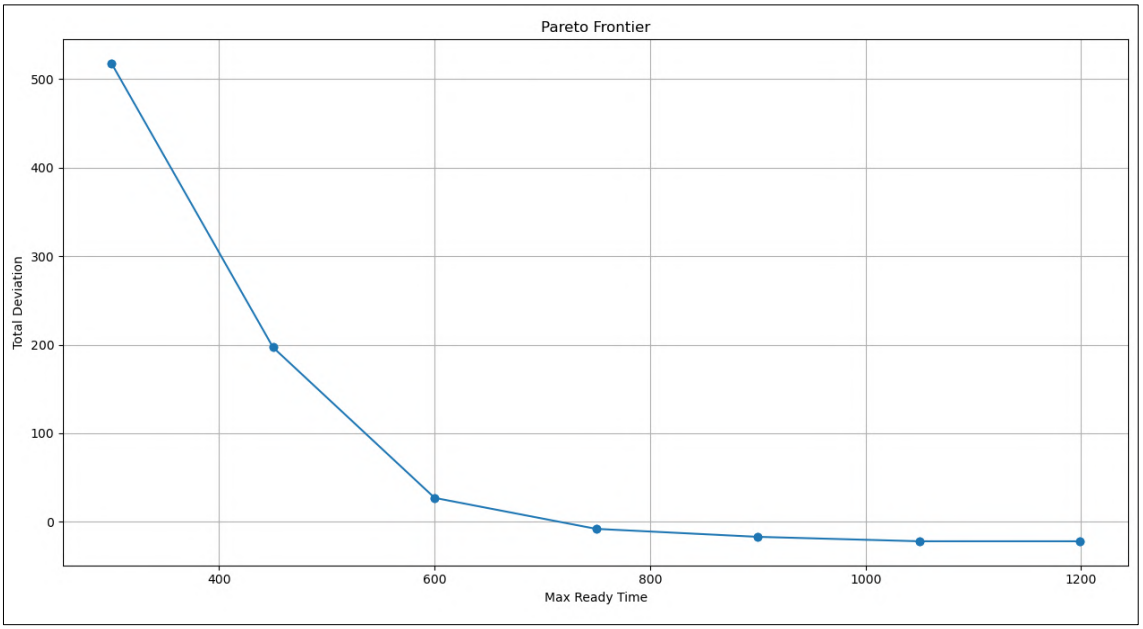


Şekil 7. Eğitilmiş modelin karışıklık matrisi

3.2. Çok Amaçlı Optimizasyon Probleminin Sonuçları

Optimizasyon problemi, kamyon-ekskavatör atamalarındaki hedeften sapmayı en aza indirmeyi ve aynı zamanda ekskavatörlerin toplam hazır bekleme süresini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu iki hedef arasındaki dengeyi sistematik olarak incelemek için, epsilon kısıt yöntemi uygulanmış ve buna göre ekskavatör hazır bekleme süresi bir kısıt olarak ele alınırken atama sapması optimize edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, ekskavatör bekleme sürelerinin sıkı bir şekilde uygulanmasının atama hedeflerini ve genel sistem verimliliğini nasıl etkilediği ortaya konmuştur. Şekil 8'deki

Pareto sınırı, toplam ekskavatör bekleme süresini en aza indirmenin atama sapmasını önemli ölçüde artırdığını ve en kısıtlı senaryoda yaklaşık 500 birime ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu, ekskavatör bekleme süresini azaltmanın, hedef atama sayısından önemli ölçüde sapma gösteren kamyon atamalarına sebep olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi en kısa sürede boşalacak ekskavatöre atamanın önceliklendirilmesinden kaynaklanmaktadır.

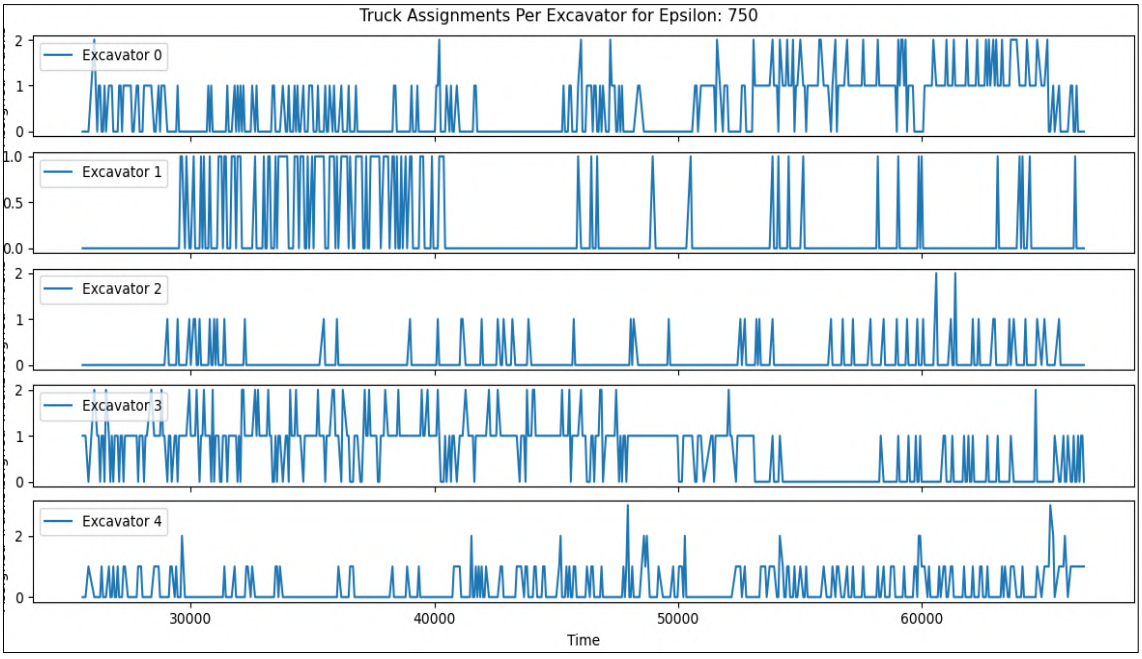


Şekil 8. 2 hedef fonksiyonun Pareto sınırı

Bekleme süresi üzerindeki kısıt kademeli olarak gevşetildiğinde, toplam sapma keskin bir şekilde azalır ve yaklaşık 600 saniyelik hazır bekleme süresinde neredeyse sıfıra ulaşır. Bu, dengeli bir atama dağılımı elde etmenin daha yüksek kamyon kuyruk sürelerine izin vermeyi gerektirdiğini ve bu da ekskavatör bekleme sürelerini artırarak kamyonların atama hedeflerinin sağlanması gerektirdiğini göstermektedir. Ayrıca 600-700 saniyelik hazır bekleme süresinin ötesinde, toplam sapma sıfıra yakın kalır; bu da ekskavatör bekleme süresini daha fazla artırmanın atama

doğruluğunda ek bir fayda sağlamadığını göstermektedir. Bu sayede, ek bekleme süresinin atama dengesini iyileştirmeye katkıda bulunmadığı ve gereksiz operasyonel gecikmelere yol açtığı kritik eşiği vurgulanmaktadır.

Toplam ekskavatör bekleme süresi için kullanılan 750 saniyelik epsilon sınırı ile elde edilen ve Şekil9.'da gösterilen kamyon-ekskavatör atama sonuçları, açık ocak madenlerinde filo yönetimi için kullanılan atama algoritmasına bilgisayarlı görme tabanlı giriş değişkenlerinin dahil edilebilirliğini göstermektedir. Gerçek zamanlı görüntü işleme sayesinde, kamyon ve ekskavatör pozisyonları doğru bir şekilde belirlenmekte ve filo operasyonlarını optimize etmek için otomatik ve veri odaklı bir yaklaşım sağlanmıştır.



Şekil 9. 10 saatlik bir vardiya boyunca yapılan kamyon-ekskavatör atamaları

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, madencilik sektöründe toplanan veriler kullanılarak operasyonel karar arama sürecinde yapay zeka uygulamalarına bir örnek teşkil

etmektedir. Bu süreci otomatik hale getirmek, madencilik endüstrisinin daha az insan ihtiyacı duymasına, maliyetleri düşürmesine ve daha çevreci bir madencilik yöntemine geçmesine yardımcı olmaktadır. Madencilik sektörü, bilgisayarlı görü alanındaki yeni teknolojileri akıllı planlarla birleştirerek yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojisini zorlu iş sorunlarıyla başa çıkmak için daha fazla kullanabilir ve böylece sektörün daha verimli olması sağlanabilir.

Bilgisayarlı görü teknolojisini dezavantajları düşük kaliteli görüntüler, yetersiz kamera sayıları ve tozdan kaynaklanan görsel sorunlar olarak sıralanabilir. Bu zorluklara rağmen, kamera teknolojisindeki gelişmeler bu sorunları kontrol edilebilir hale getirmeye yardımcı olmaktadır.

Epsilon-kısıt yönteminin kullanımı, daha düşük ekskavatör boşta kalma süresi ile günlük üretim hedeflerine ulaşma arasındaki dengeleri göstermiştir. Bu sayede, yakıt tüketimini ve trafiği azaltmanın yanısıra operasyonel karar verme sürecinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Tesislerdeki kuyruk yoğunluklarını ölçmek ve kamyonları buna göre yönlendirmek, gerçek zamanlı trafik yönetimi verilerini karar vericilere göndermek, iç iletişimi iyileştirmek ve operasyonel veri toplamayı otomatikleştirmek, bu çalışmanın madencilik sektörüne olası avantajları olarak sıralanabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, açık ocak madenciliği filo yönetiminde bilgisayarlı görünün entegrasyon potansiyelini ortaya koymakta ve elde edilen verilerin çok amaçlı bir optimizasyon modelinde kullanımını örneklendirmektedir. Pareto sınırı analizi ile, ekskavatör bekleme süresi ve üretim hedeflerini sağlamak arasında hassas bir dengenin var olduğu da vurgulanmıştır. Gerçek zamanlı araç algılama için YOLO v8 modelinin kullanımı ve çok amaçlı tamsayılı programlama modeli, genel operasyonel verimliliği arttırabilecek bir kamyon-ekskavatör atama prosedürünün daha düşük ilk yatırım maliyetleriyle elde edilebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

Abrarov, A. 2023. Flotation froth monitoring using unsupervised multiple object tracking methods. Journal of Mineral and Material Science (JMMS), 4(1). https://doi.org/10.54026/jmms/1054

Bendaouia, A., Abdelwahed, E. H., Qassimi, S., Boussetta, A., Benzakour, I., Benhayoun, A., Amar, O., Bourzeix, F., Baïna, K., Cherkaoui, M., & Hasidi, O., 024. Hybrid features extraction for the online mineral grades determination in the flotation froth using Deep Learning. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 129. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107680

Chow, B. H. Y., & Reyes-Aldasoro, C. C. (2022). Automatic gemstone classification using computer vision. Minerals, 12(1). https://doi.org/10.3390/min12010060

Ellinger, A., Woerner, C., & Scherer, R., 2023. Automatic segmentation of bulk material heaps using color, texture, and topography from aerial data and deep learning-based computer vision. Remote Sensing, 15(1). https://doi.org/10.3390/rs15010211

Imam, M., Baïna, K., Tabii, Y., Ressami, E. M., Adlaoui, Y., Benzakour, I., & Abdelwahed, E. hassan. (2023). The future of mine safety: a comprehensive review of anti-collision systems based on computer vision in underground mines. In Sensors (Vol. 23, Issue 9). https://doi.org/10.3390/s23094294

Maity, S., Chakraborty, A., Singh, P. K., & Sarkar, R., 2023. Performance Comparison of Various YOLO Models for Vehicle Detection: An Experimental Study. Lecture Notes in Networks and Systems, 787 LNNS. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6550-2_50

Singh, P., Murthy, V. M. S. R., Kumar, D., & Raval, S.2024). Enhancing dragline operations supervision through computer vision: real time height measurement of dragline spoil piles dump using YOLO. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 15(1). https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2322492

Terven, J., & Cordova-Esparza, D., 2023. A comprehensive review of YOLO: from YOLOv1 and beyond. Computer Vision and Pattern Recognition.

Zhou, J., Zou, J., Zheng, J., Yang, S., Gong, D., & Pei, T., 2021. An infeasible solutions diversity maintenance epsilon constraint handling method for evolutionary constrained multiobjective optimization. Soft Computing, 25(13). https://doi.org/10.1007/s00500-021-05880-5

ALTIN MADENİ İŞLETMELERİNDE GERÇEKLEŞTİRİLEN REHABİLİTASYON FAALİYETLERİNİN TÜRMES PROJESİ KAPSAMINDA İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF REHABILITATION ACTIVITIES CARRIED OUT WITHIN IN GOLD MINE OPERATION THE SCOPE OF TÜRMES PROJECT

Fatih Pekdemir, Behzat Gökçen Demir, Özgün Türkeli, Selçuk Bostancı
Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara

ÖZ: Madencilik, antik dönemlerden günümüze kadar tarihsel süreç içerisinde önemli bir faaliyet alanı olmuştur. Ülkemizin birçok bölgesinde de antik dönem madenciliğinin örnekleri bulunmaktadır. Bu örnekler, ülkemiz sınırlarında da madenciliğin oldukça eski zamanlara dayandığını göstermektedir. Ancak, geçmişi çok eskilere dayanan bir faaliyet alanı olan madencilik ile ilgili son yıllarda olumsuz algılar oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu olumsuz algıların başında, madenciliğin çevreye kalıcı zarar verdiği düşüncesiyle hareket eden grupların yönlendirdiği ve kamuoyunu etkilediği hususlar yer almaktadır. Bu olumsuz algıların ortadan kaldırılması amacıyla Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG) tarafından Türkiye Geneli Rehabilite Edilmiş Maden Sahaları ile Madencilik Sosyal Sorumluluk Çalışmalarının Tespiti Projesi (TÜRMES) projesi ortaya konulmuştur. Bu proje ile ülkemizde maden sahalarında gerçekleştirilen rehabilitasyon faaliyetleri ile ilgili bir envanter oluşturulması amaçlanmıştır. Bu çalışmada, TÜRMES Projesi kapsamında tespit edilmiş altın üretimi yapılan maden sahalarındaki veriler değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: MAPEG, TÜRMES, Rehabilitasyon, Altın Madenciliği

ABSTRACT: *Mining has been an important field of activity throughout history from ancient times to the present. There are examples of ancient mining in many regions of our country. These examples show that mining dates back to very old times within our country. However, in recent years, negative perceptions have been created regarding mining, which has a very old history. At the forefront of these negative perceptions are the issues directed by groups acting with the idea that mining causes permanent*

damage to the environment and affects the public opinion. In order to eliminate these negative perceptions, the Türkiye-wide Rehabilitated Mining Fields and Mining Social Responsibility Activities Idendification Project (TÜRMES) project was put forward by the General Directorate of Mining and Petroleum Affairs (MAPEG). This project aimed to create an inventory regarding the rehabilitation activities carried out in mining in our country. In this study, the data from the mining fields where gold production was carried out within the scope of the TÜRMES Project were evaluated.

Keywords: *MAPEG, TÜRMES, Rehabilition, Gold Mining*

1. GİRİŞ

Rehabilitasyon, son yıllarda daha fazla ön plana çıkarılan çevre hassasiyeti ve sürdürülebilirlik kavramlarının etkisiyle madenciliğin en az arama ve işletme faaliyetleri kadar önemli bir aşaması haline gelmiştir. Madencilik faaliyetlerinin sona erdirildiği alanlar, maden işletme projelerine uygun olarak rehabilite edilmektedir. Rehabilitasyon kapsamında, yine projesine uygun olarak fidan dikimi, tohum serimi gibi ağaçlandırmaya yönelik faaliyetler yapılabildiği gibi sahaların ikincil kullanımına yönelik rekreasyon alanları da oluşturulabilmektedir. Ülkemizde maden sahalarının rehabilitasyonu, bugüne kadar rehabilite edilecek alanın mülkiyet durumu da dikkate alınarak maden şirketleri, Orman Bölge Müdürlükleri, belediyeler gibi kişi veya kurumlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Bugüne kadar, rehabilitasyon faaliyetlerini gerçekleştiren gerçek, özel veya tüzel kişiler ile kamu kurum ve kuruluşları kendi kayıtlarını oluşturmuştur. Bu nedenle rehabilitasyon faaliyetleri ile ilgili ulusal düzeyde bir arşiv oluşmadığından bu faaliyetler ile ilgili bilgi eksikliği ortaya çıkmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen başarılı rehabilitasyon faaliyetlerinin tanıtımındaki eksiklikler madenciliğin bu yönü ile ilgili bir birikim oluşmasını da engellemiştir. Böylece madenciliğin çevre boyutu, madenciliğin çevreye kalıcı zarar verdiği

düşüncesiyle hareket eden grupların yönlendirdiği ve kamuoyunu etkilediği bir konu haline gelmiştir (Türkeli, 2022).

Maden sahalarının işletme faaliyetleri sonrasında terk ve iptal edilmesi durumunda yapılması gerekli olan çalışmalar genel olarak, 3213 sayılı Maden Kanunu ile 11.12.2022 tarih ve 32040 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Maden Yönetmeliği'nde yer almaktadır. 3213 sayılı Maden Kanununun 32'nci maddesinde yer alan "…Herhangi bir nedenle hükümden düşmüş veya ruhsat hukuku yürürlükte olan sahalarda terk edilen alanlarda ruhsat sahibi gerekli emniyet tedbirlerini almak ve sahanın son durumunu gösterir teknik belgeleri Genel Müdürlüğe vermek zorundadır. Ruhsat sahibi yukarıda belirtilen tedbirleri en geç bir yıl içinde almak ve işletme faaliyetinde bulunulan alanı işletme projesi doğrultusunda çevreye uyumlu hale getirmek zorundadır. Verilen bu sürede çevre ile uyum planı çerçevesinde gerekli güvenlik önlemlerinin ve çevresel önlemlerin alınmaması durumunda tedbir alınana kadar sorumluluk ruhsat sahibinin olması şartıyla, bu durum valiliğe bildirilir. Çevre ile uyum çalışması için gerekli tedbirler, çevreye uyum planına uygun olarak orman arazilerinde ilgili orman idaresi, diğer alanlarda il özel idareleri veya valilikler tarafından yerine getirilir…" hükümlerinde, maden ruhsat hukuku sonrasında yapılacak çalışmaların süresi ve yöntemi belirlenmiştir. Rehabilitasyon çalışmalarının mali alt yapısını oluşturabilmek üzere, işletme ruhsatlı sahalar için alınacak teminat ise, Maden Kanununun 3'üncü maddesinde tanımlanan ruhsat bedeli kavramı içerisinde yer almaktadır. Kanunda ruhsat bedeli; "taban bedelinin, ruhsatın yürürlükte kaldığı takvim yılı sayısı, maden grubu, cinsi ve alan büyüklüklerine göre belirlenen katsayılarla çarpılarak ekli (1) ve (2) sayılı tablolarda gösterildiği şekilde hesaplanarak her yıl ocak ayının sonuna kadar; arama ruhsatlarında tamamı Genel Müdürlüğün bütçesine ve işletme ruhsatlarında ise %30'u çevre ile uyum planı çalışmalarını temin etmek üzere

teminat olarak, %20'si Genel Müdürlüğün bütçesine, %50'si ise genel bütçeye gelir kaydedilmek üzere Genel Müdürlüğün muhasebe birimi hesabına yatırılması gereken tutar" şeklinde tanımlanmıştır (Maden Kanunu, 1985). Ayrıca, rehabilitasyon faaliyetleri, Maden Yönetmeliğinin ruhsatın hükümden düşmesi ve terk edilen alanlarda alınacak tedbirler başlıklı 83'üncü maddesinde detaylı olarak yer almaktadır (Maden Yönetmeliği, 2022).

MAPEG, kamuoyundaki olumsuz madencilik algısını tersine çevirmek, madencilik faaliyetlerinin çevre hassasiyeti gözetilerek yapılabileceğini göstermek amacıyla 2022 yılında Türkiye Geneli Rehabilite Edilmiş Maden Sahaları ile Madencilik Sosyal Sorumluluk Çalışmalarının Tespiti Projesini (TÜRMES) başlatmıştır. TÜRMES ile ülkemizde maden sahalarında gerçekleştirilen rehabilitasyon faaliyetlerinin yerinde incelenip görüntülenerek, ulusal anlamda maden sahaları ile ilgili bir rehabilitasyon envanteri oluşturulması amaçlanmaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

TÜRMES Projesinde, rehabilitasyon terimi madencilik faaliyetleri sonucunda bozulan arazinin doğaya kazandırılması veya farklı kullanım alanları oluşturulması amacıyla yapılan tüm çalışmalar için kullanılmıştır. Madencilik faaliyetlerinin tamamlandığı sahalarda yapılan rehabilitasyon faaliyeti "tam rehabilitasyon", madencilik faaliyetlerinin sürdürüldüğü sahalarda yapılan rehabilitasyon faaliyeti ise "kısmi rehabilitasyon" olarak tanımlanmıştır. Projede, "tarım alanı"; rehabilitasyon faaliyetleri sonucunda, araziden ürün elde edilmesi için dikim yapılan alan; "ağaçlandırma/bitkilendirme alanı"; rehabilitasyon faaliyetleri sonucunda, orman veya ağaçlık oluşturulması için dikim yapılan alan, "rekreasyon alanı"

ise rehabilitasyon faaliyetleri sonrasında arazinin ağaçlandırma ve tarım alanı haricindeki farklı kullanılması için oluşturulan alan olarak tanımlanmıştır.

TÜRMES projesi kapsamında, Mart 2025 tarihi itibarıyla 21 metalik maden sahası incelenmiştir. Bu sahalar içinde en fazla sayıda incelenen sahalar, altın madenciliğine yönelik faaliyette bulunulan sahalardır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında altın üretimi yapılan maden sahalarındaki rehabilitasyon verileri sunulmuştur. İlk olarak, ön çalışma kapsamında sahaların bulunduğu konum tespit edilmiştir. Arazi çalışmalarında ise tespit edilen bu sahalar yerinde incelenerek insansız hava araçlarıyla görüntülenmiştir. Ayrıca, envanter oluşturulması kapsamında dikilen ağaç sayısı, ağaç türü, dikim alanı vb. bilgiler edinilmiştir. TÜRMES projesi kapsamında, rehabilite edilen alandaki ekosistemin özellikleri ve gelişimi izlenmediğinden, bu çalışma kapsamında sunulan sahalarda da bu yönde bir değerlendirmede bulunulmamıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

TÜRMES Projesi kapsamında, 13.06.2022-01.03.2025 tarihleri arasında; 46 ilde, 136 adet rehabilite edilmiş maden sahası yerinde incelenmiştir (TÜRMES, 2024a, 2024b). Bu sahalarda 9.845 hektarlık alana 21.171.340 adet ağaç/bitki dikildiği bilgisine ulaşılmıştır. TÜRMES projesi kapsamında, bugüne kadar incelenen 21 metalik maden sahasının 10'u altın madenciliğine yönelik sahalardır. Bu sayı, TÜRMES projesinde incelenen saha sayısının yaklaşık yüzde %7,3'üdür. İncelemeye konu olan on adet altın maden sahasında üretim ve pasa döküm alanı gibi farklı alanlarda gerçekleştirilmiş rehabilitasyon faaliyetlerinin toplam alanı ise 263,5 hektardır (Çizelge 1). Bu sahalarda, kısmi ve tam rehabilitasyon türlerinin uygulandığı, üretim ve pasa

döküm alanı gibi farklı alanlarda, madencilik faaliyetleri sonrasında kullanımın tarım, bitkilendirme ve ağaçlandırma alanı olarak farklılık gösterdiği gözlenmiştir (Çizelge 2), (Şekil 1, 2, 3, 4). Tarım alanı olarak kullanılan alanların toplam 93 hektar, bu alanlarda dikilen bitki sayısının 135.200, ağaçlandırma alanlarının 65,5 hektar, gözlenen ağaç sayısının 273.700, bitkilendirme alanının 105 hektar, bu alanda dikilen bitki sayısının ise 102.000 olduğu bilgisine ulaşılmış ve gözlenmiştir.

Çizelge 1. TÜRMES Projesi kapsamında incelenen altın madeni işletmelerindeki rehabilitasyon faaliyetlerinin büyüklük, tür ve uygulandığı yer yönüyle sınıflandırılması

İl-İlçe	**Rehabilitasyon Alanı (ha.)**	**Rehabilitasyon Türü (Kısmi/Tam)**	**Rehabilitasyon Alanı (Üretim/Pasa)**
İzmir-Menderes	34,5	Kısmi	Pasa Döküm
Uşak-Eşme	105	Kısmi	Pasa Döküm
Izmir-Bergama	35	Kısmi	Üretim
Balıkesir-Havran	33	Kısmi	Üretim
Erzincan-Iliç	6,5	Kısmi	Üretim
Gümüşhane-Merkez	9	Tam	Üretim
Ordu-Fatsa	25	Kısmi	Üretim
Balıkesir- Ivrindi	11	Kısmi	Pasa Döküm
Balıkesir-Sındırgı	14	Kısmi	Pasa Döküm
Eskişehir-Sivrihisar	25	Kısmi	Üretim

Şekil 1. İzmir-Menderes'te bulunan bir maden sahasının pasa döküm alanında ağaçlandırma yöntemi uygulanmış rehabiltasyon alanının görünümü

Çizelge 2. TÜRMES Projesi kapsamında incelenen altın madeni işletmelerindeki rehabilitasyon alanlarının arazi kullanım durumu, dikilen ağaç/bitki sayısı ve türü olarak sınıflandırılması

İl-İlçe	Arazi Kullanım Durumu	Dikilen Ağaç/bitkisayısı (adet)	Dikilen Ağaç/Bitki Türü
İzmir-Menderes	Tarım	90.000	Üzüm, ceviz, zeytin, biberiye, kekik
Uşak-Eşme	Bitkilendirme	102.000	Tavşanak,biberiye, kekik, lavanta, çam, ıhlamur, kestane, akasya
İzmir-Bergama	Tarım	9.000	Çam, zeytin
Balıkesir-Havran	Tarım	36.200	Çam, zeytin, akasya, iğde
Erzincan-İliç	Ağaçlandırma	3.150	Elma, armut, vişne, akasya, dut, çınar, sedir, ladin
Gümüşhane-Merkez	Ağaçlandırma	1.200	Çam
Ordu-Fatsa	Ağaçlandırma	200.000	Kızılağaç,akçaağaç,ceviz, çim tohumu
Balıkesir-İvrindi	Ağaçlandırma	46.000	Ceviz, kestane, badem
Balıkesir-Sındırgı	Ağaçlandırma	23.350	Çam, akasya
Eskişehir-Sivrihisar	Tarım	0	1.5 milyon metreküp pasa dolgu ve tohumlama

Şekil 2. İzmir-Bergama'da bir maden sahasının üretim alanında, ağaçlandırma yöntemi uygulanmış rehabiltasyon alanının görünümü

Şekil 3. Balıkesir-Sındırgı'da bulunan bir maden sahasının pasa döküm alanında ağaçlandırma yöntemi uygulanmış rehabiltasyon alanının görünümü

Şekil 4. Uşak-Eşme'de bulunan bir maden sahasının pasa döküm alanında bitkilendirme yöntemi uygulanmış rehabiltasyon alanının görünümü

4. SONUÇLAR

Ülkemizde, maden sahalarında gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmekte olan rehabilitasyon faaliyetlerinin veri, bilgi ve belgelerini içeren ulusal bir envanter bulunmamaktadır. TÜRMES projesi ile bu konudaki eksikliğin

giderilmesi ve kamuoyundaki olumsuz madencilik algısının ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

TÜRMES Projesi kapsamında, farklı maden sahalarında uygulanmış çok sayıda farklı rehabilitasyon yöntemi yerinde incelenerek görüntüleri alınmıştır. Altın maden sahalarında, kısmi ve tam olmak üzere farklı rehabilitasyon türlerinin uygulandığı, arazi kullanımlarının ağaçlandırma, tarım ve bitkilendirme alanı gibi farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Bu gözlemler dikkate alındığında, rehabilitasyon faaliyetinin tek bir uygulama alanı veya yönteminin olmadığı, maden sahalarının farklı şekillerde rehabilitasyonun yapılabileceği sonucunu ortaya koymaktadır.

İncelemeye konu alanlarda gerçekleştirilmiş rehabilitasyon faaliyetlerinin küçük bölgesel alanlardan ziyade geniş alanlar kapladığı görülmüştür. Özellikle incelemeye konu sahalardan Uşak-Eşme'de yer alan bir maden sahasında tek bir alanda, 105 hektarlık pasa döküm alanının rehabilite edilmesi göz önüne alındığında çok geniş alanlarda da rehabilitasyon yapılabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

Türkeli, Ö., 2022. Kamuoyundaki madencilik algısının iyileştirilmesi üzerine belirlenebilecek stratejiler, MAPEG uzmanlık tezi, 71 s., Ankara.

Maden Kanunu, 1985. T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi, Erişim Adresi: https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=3213&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5

Maden Yönetmeliği, 2022. T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi, Erişim Adresi: https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=39873&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5

TÜRMES, 2024a. Türkiye geneli rehabilite edilmiş maden sahaları ile madencilik sosyal sorumluluk çalışmalarının tespiti projesi. TÜRMES e-katalog, Erişim Adresi: https://mapeg.gov.tr/uploads/dosyalar/TurmesKatalog/index.html

TÜRMES, 2024b. Türkiye geneli rehabilite edilmiş maden sahaları ile madencilik sosyal sorumluluk çalışmalarının tespiti projesi, TÜRMES Bilgi Haritası, Erişim Adresi: https://www.mapeg.gov.tr/

YERALTI ALTIN MADENİNDE KOMBİNE ATEŞLEME SİSTEMİ KULLANIMI İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF THE RESULTS OBTAINED FROM THE USE OF A COMBINED INITIATION SYSTEM IN AN UNDERGROUND GOLD MINE

Kıvılcım Toprakçı Özdal, Andrey Rapokhin, Fatih Akgün
Nitromak DNX Kimya San. A.Ş., Ankara

ÖZ: Son yıllarda patlayıcı madde ve patlatma teknolojilerinde önemli gelişmeler yaşanmış, özellikle ateşleme sistemlerinde kayda değer ilerlemeler görülmüştür. Elektronik ateşleme sistemleri, madenlerin operasyonel ihtiyaçlarına etkili çözümler sunarak yerüstü ve yeraltı madenciliğinde hızla yaygınlaşmaktadır. Bu sistemler, sundukları yüksek güvenlik ve teknolojik avantajlarla, plansız infilak risklerini ortadan kaldırmakta ve operasyonel süreçlerde önemli maddi kazançlar sağlamaktadır. Bahsi geçen avantajlar, madencilik sektöründe giderek daha fazla tercih edilmesine yol açmaktadır.

Bu çalışmada, ilerleme aynasında elektriksiz kapsüllerin yanı sıra Blastweb merkezi elektronik ateşleme sistemi vasıtası ile elektronik kapsüllerin çevre deliklerinde, uygulanabilirliği ele alınmış, bu uygulamanın kesit dışı kazıda ve titreşim başta olmak üzere çevresel etkilerde meydana getirdiği azalma ortaya konmuştur. Ayrıca sistemlerin güvenlik ve üretim süreci verimliliğine katkıları değerlendirilerek etkinlikleri gösterilmiştir. Hali hazırda kullanımı en yaygın sistem olan elektriksiz ateşleme sistemleri ile elektronik ateşlemenin bir arada kullanılmasının, madencilik sektöründeki genel verimliliği ve güvenliği artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektronik Ateşleme Sistemi, Kesit Dışı Kazı, Çevre Delikleri, Patlatma Teknolojileri, Titreşim, Kombine Ateşleme Sistemi

ABSTRACT: *In recent years, significant advancements have been made in explosives and blasting technologies, particularly in ignition systems. Electronic ignition systems are rapidly becoming widespread in both surface and underground mining, offering effective solutions to meet the operational needs of mines. These systems eliminate the risks of unintended detonations*

by providing high safety and technological advantages, meanwhile delivering substantial operational cost savings. The safety, efficiency, and cost benefits of electronic ignition systems have led to their increasing adoption in the mining sector.

This study examines the applicability of both non-electric detonators in the development face and electronic detonators in the perimeter holes via the Blastweb central electronic initiation system. The implementation of this approach is shown to reduce environmental impacts, particularly in terms of blast-induced ground vibrations and overbreak. The reduction in the overbreak and environmental impacts, predominantly vibration, caused by this application is demonstrated. Additionally, the contribution of the systems to safety and production process efficiency is evaluated, showing their effectiveness. The combination of the currently most widely used non-electric initiation system with electronic initiation illustrates the potential to enhance overall efficiency and safety in the mining sector.

Keywords: *Electronic İnitiation System, Overbreak, Perimeter Holes, Blasting Technology, Vibration, Combined İnitiation System*

1. GELENEKSEL ATEŞLEME SİSTEMLERİ

Yeraltı metal madenciliğinde, ateşleme sürecini 2 aşamaya ayırmak mümkündür – ayna/kat arası delik grubu ateşlemesi ve ilk ateşleme.

1.1. Delik Grubu Ateşlemesi

Yeraltı metal madenciliğinde birçok işletmede delik grubu ateşlemesinde delik içi elektriksiz kapsül ve infilak iletim aracı olarak infilaklı fitil kullanılmaktadır. İnfilaklı fitil, düşük maliyetli olup aynı zamanda yıllar boyu kullanımın verdiği güven ve kullanıcı alışkanlığı sebepleriyle öne çıkarken, elektriksiz (Nonel) kapsüller ise sabit gecikmeler ile kullanım kolaylığı sunmaktadır. Ancak bu kombinasyon zorlu ve değişkenliği yüksek olan formasyonlarda çözüm olmaktan uzaktır. Bu konuyu başlıca 2 sebeple özetleyebiliriz;

1.1.1. Sabit nonel gecikmelerinin şok dalgası yayılma hızı üzerindeki etkisi

Patlayıcı maddelerin infilak anında yarattığı şok dalgasının yayılma hızı, kayaç formasyonlarına göre farklılık göstermektedir. Atım grubunda yer alan deliklerin infilak zamanlaması (Nonel gecikmeleri), şok dalgasının ilerleme hızı ile ne kadar uyumlu olursa, patlatma uygulaması sonuçları o kadar başarılı olacaktır. Elektriksiz kapsül gecikmelerinin etki ettiği kriterler arasında, parça-boyut dağılımı ve sağlanan üretim ilerlemesi sayılabilir. Elektriksiz kapsüllerin sabit olan ve seri halde artan gecikmeleri, belirli durumlar için gerekli esnekliği sağlayamamaktadır. (Aksoy, Aksoy, 2020)

1.1.2. Gecikme sapmalarının patlatma verimine etkileri

Elektriksiz kapsüller nominal gecikmeden sapabilmekte olup, bu sapma üreticiden üreticiye farklılık göstermektedir ve sektör ortalaması ±%10 olarak kabul edilmektedir (Aksoy, 2019). İnfilak zamanlamasının net olarak tespit edilememesi, hedeflenen parça-boyutunda malzeme alınamamasına sebep olabilmektedir. Ayrıca fazla kazı ve kirlenme oranında artış meydana gelebilmektedir. Buna ek olarak; çevre deliklerinin infilak zamanlamasının sapması, planlanan kesitin dışında kalan kayaçta çatlakların oluşumuna sebep olup, tahkimatlandırma maliyetlerinin artmasına ve ara katlı kazı esnasında delme-patlatma uygulamalarının zorlaşmasına yol açmaktadır. (Holmberg, Lee, Persson, 2001)

Özetlemek gerekirse; sektörde kullanılan elektriksiz kapsül ve infilaklı fitil kombinasyonu, kullanıcı alışkanlığı ve kullanım kolaylığı noktalarında belirli avantajlara sahip olmakla birlikte, yeraltı üretim operasyonlarının gereksinimlerine karşı zayıf kalmaktadır.

1.2. İlk Ateşleme

Patlatma uygulamalarında ele alınması gereken bir diğer konu da ilk ateşlemedir. Ateşleyici ilk ateşlemeyi, işletme tarafından belirlenen emniyetli lokasyondan gerçekleştirmektedir. İlk ateşleme elemanı, infilakı atım grubuna iletmekte ve grup ateşlemesini başlatmaktadır. Ateşleme; vardiya sonu atımlarda ocak tahliyesi tamamlandıktan sonra, vardiya içi atımlarda ise atım bölgesi tahliye edildikten sonra yapılmaktadır. İlk ateşleme için genellikle aşağıda sıralanan 2 yöntemden biri uygulanmaktadır:

1.2.1. Yeraltında emniyetli lokasyondan ilk ateşleme

Uzun metrajlı elektriksiz veya gereken uzunlukta zil teli bağlanan elektrikli kapsül vasıtası ile ilk ateşleme güvenli lokasyondan yapılmaktadır. Çoklu grup atımlarında ateşleyiciler aşağı katlardan yukarıya doğru ilerleyerek atım gruplarını sıra ile tek tek ateşlemektedirler. Bu yöntem ciddi zaman almasıyla birlikte patlatma uygulamasının verdiği titreşim ile oluşabilecek göçük ihtimaline karşı emniyet zaafiyeti ve kaza riski taşımaktadır.

1.2.2. Sabit kablo sistemi ile yüzeyden ilk ateşleme

Ocak içerisine sabit bir ateşleme kablo sistemi döşenir. İlk ateşleme, bu kablo sistemine bağlanan elektrikli kapsül vasıtası ile yüzeyden yapılmaktadır. Bu yöntemde, patlatma esnasında yeraltında herhangi bir personel bulunmadığı için ilk metoda göre tartışmasız daha güvenli olmakla birlikte, elektrostatik deşarj ve elektromanyetik etkileşim olması durumunda plansız ateşleme riski taşımaktadır.

İlk ateşleme elemanının atım grubuna bağlantısı, uzun süreli kullanıma bağlı olarak kazanılan el alışkanlığı sayesinde zaman tasarrufu sağlamaktadır. Ancak yukarıda belirtilmiş aksaklıkların bu süreçte

yaşanması, ciddi emniyet risklerini beraberinde getirmekte ve/veya büyük zaman kayıplarına sebebiyet vermektedir.

Görüldüğü üzere iki yöntem de tek başına uygulandığında emniyet, pratiklik ve operasyonel verimlilik sunamamaktadır.

2. DYNO NOBEL ELEKTRONİK KAPSÜLLER VE ATEŞLEME SİSTEMİ

Teknolojik olarak Elektronik Ateşleme Sistemleri (EIS) bugün itibari ile mevcut olan en gelişmiş ve emniyetli ateşleme sistemleridir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen Dyno Nobel firmasına ait sistemin birkaç ana özelliği ve bileşeni bulunmaktadır;

2.1. Özel Başlık Mimarisi

Elektronik kapsüllerin başlıkları özel olarak tasarlanmıştır ve aşağıdaki yapılardan oluşur (Şekil 1)

Şekil 1. Elektronik kapsül iç yapısı

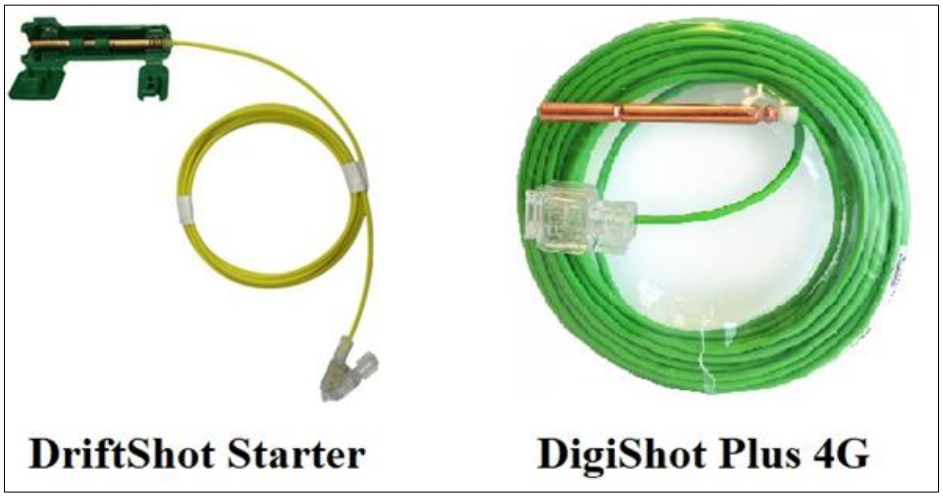
- Bakır Kovan
- Yüksek Voltaj Koruması
- Aşırı Akım Koruması

- Statik – Elektrostatik Boşalım (ESD) koruması
- Elektromanyetik Darbe (EMP) koruması
- Şifreli sinyal ile ateşlenme

2.2. DriftShot Starter (Başlatıcı) ve DigiShot Plus 4G (Delik İçi) Elektronik Kapsüller

DriftShot Starter (Başlatıcı) ve DigiShot Plus 4G (Delik İçi) elektronik kapsüllerin özelikleri (Şekil 2);

- Yalnızca özel anahtar ile verilen ateşleme komutuna duyarlı olan sistem, özel başlık mimarisi sayesinde kontrolsüz ateşlenmeyi engeller.
- Esnektir. 0 ile 20000ms arasında, 1ms aralıkla gecikme atanabilir.
- Keskindir. İnfilak zamanlaması atanan gecikmeden sapmaz.



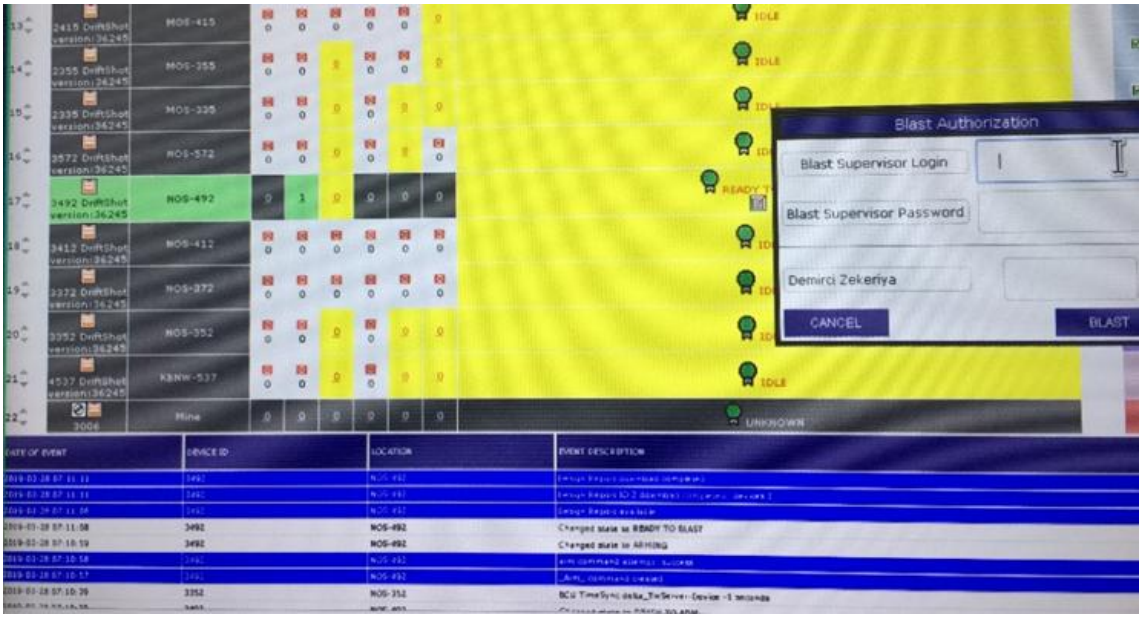
Şekil 2. DriftShot starter ve DigiShot Plus 4G kapsüller

2.3. BlastWeb – Merkezi Elektronik Ateşleme Sistemi

Merkezi elektronik ateşleme sistemi madenin iletişim ağına (fiberoptik, RF, WI-FI) entegre edilen patlatma kontrol üniteler ağını kapsar (Şekil 3).

BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi arayüzü Şekil 4'de sunulmuştur.

Şekil 3. Patlatma kontrol ünitesi



Şekil 4. BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi arayüzü

BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi arayüzünün özellikleri;

- Yerüstünden/yeraltından istenen lokasyondan ateşlemeye olanak sağlar.

- Çift yönlü iletişim ile 7 gün 24 saat iletişim kanallarının ve kapsüllerin kontrolüne olanak sağlar.
- Tekli/çoklu ateşleme olanağı sunar.
- Özel anahtar ile verilen ateşleme komutuna duyarlı olan sistem sayesinde kontrolsüz ateşlenmeyi engeller (Şekil 5).
- Detaylı raporlama özelliği mevcuttur.

Şekil 5. BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi özel anahtar çifti

3. PROJE HEDEFLERİ VE UYGULAMA

Bahsi geçen projeyi gerçekleştirdiğimiz, yurtdışında bulunan yeraltı altın madeninin cevher yataklamasında; sülfürlü cevher içerisinde 5 g/t gibi yüksek bir altın içeriği bulunduğu bilinmektedir. Buna ek olarak cevher gövdesi kalınlığının 50 metreye kadar çıkabildiği, firmanın yaptığı sondaj çalışmalarından elde edilen veriler ışığında hazırlanan blok modelde tespit edilmiştir. Cevher kalınlığının ve tenörün yüksek olması sebebiyle firma elde edebilecekleri maksimum verimlilikte çalışmayı hedeflemektedir. Bu

hedef doğrultusunda da minimum kirlenmeyle, stabilitenin korunduğu maksimum noktaya kadar kazı yapılması gerekmektedir.

Yukarıda bahsedilen kayaç yapısı ve buna bağlı hedeflerden dolayı, özellikle kat arası patlatmalarda titreşim sebebiyle stabilite riskleri öngörülmüştür. Buna ek olarak kullanılan ateşleme sisteminin tek başına yetersiz kalması sebebiyle planlanan-gerçekleşen kesit arasında ciddi farklar hesaplanmıştır. Bu da yüksek tahkimatlandırma maliyetleri ve güvenlik risklerine sebep olmuştur.

Öngörülen bu risklerin gerçekleşme olasılığını düşürmek adına bu proje oluşturulmuş ve aşağıda sıralanan 2 ana hedefe odaklanılmıştır.

- Kat arası patlatmalarda titreşimi azaltmak
- Patlatmalarda planlanan kesitin elde edilmesi

Değerlendirmeler neticesinde; işletmenin hedeflerine uygun olan sistemin, hali hazırda işletmede kullanılmakta olan elektriksiz ateşleme sistemine ek olarak, paternde ihtiyaç duyulduğu tespit edilen deliklerde elektronik kapsül kullanımına imkân sağlayan BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi olduğuna karar verilmiş ve aşağıda yazılı olan adımlar izlenmiştir.

3.1. Elektronik Ateşleme Sisteminin Devreye Alınması

Elektronik ateşleme sisteminin devreye alınması aşağıdaki aşamalar ile gerçekleşmektedir.

- Eğitimlerin verilmesi.
- Demo kapsüller ile madenin farklı lokasyonlarında ateşleme simülasyonları.
- Gerçek kapsüller ile test patlatmaları.

3.2. İlk Ateşlemesi için Driftshot Starter Kullanımı

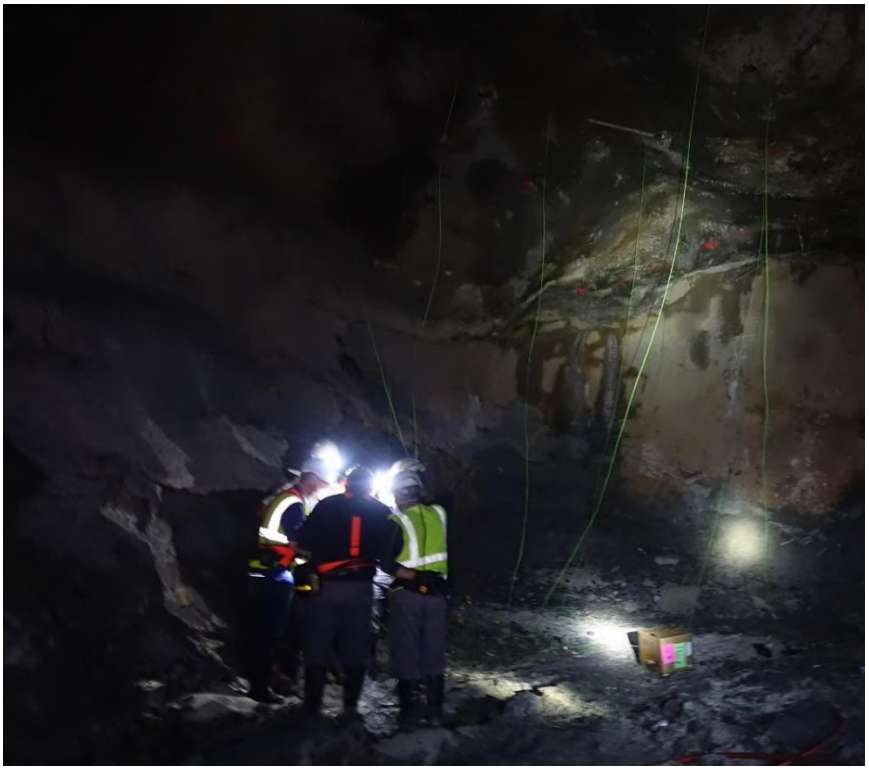
Yalnızca elektriksiz kapsül kullanılarak ilerleme aynasında gerçekleştirilen patlatmaların Driftshot starter kapsül kullanımı ile merkezi ateşleme sistemi üzerinden başlatılması.

3.3. Digishot Plus 4G Delik İçi Kapsüllerin Kullanımı

Digishot Plus 4G delik içi kapsüllerin kullanımı ile ilgili görseller aşağıda sunulmaktadır. Aşırı kazı ve tavan stabilitesini azaltacak çatlakların oluşumunu minimize etmek için çevre deliklerinde kullanılmasına ait görüntü Şekil 6'da görülmektedir.

Şekil 6. Kat arası down hole elektronik kapsül uygulaması

Şekil 7'de ise kat arası up hole elektronik kapsül uygulamasına ait bir görüntü görülmektedir.



Şekil 7. Kat arası up hole elektronik kapsül uygulaması

4. ETKİLER VE UYGULAMA SONUÇLARI

Uygulanan proje neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

4.1. Titreşimde Azalma

Elektronik kapsüllerde; gerçek gecikmenin nominal değerinden sapmaması sayesinde, her bir gecikme serisinde patlayan patlayıcı madde miktarında azalma meydana gelir.

Projenin uygulandığı işletmede; kat arası up hole ve kat arası down hole patlatmalarında, elektronik kapsüllerin sağladığı bu avantaj kullanılarak titreşimin azalması sağlanmış ve uzun vadede stabilitenin korunması hedeflenmiştir.

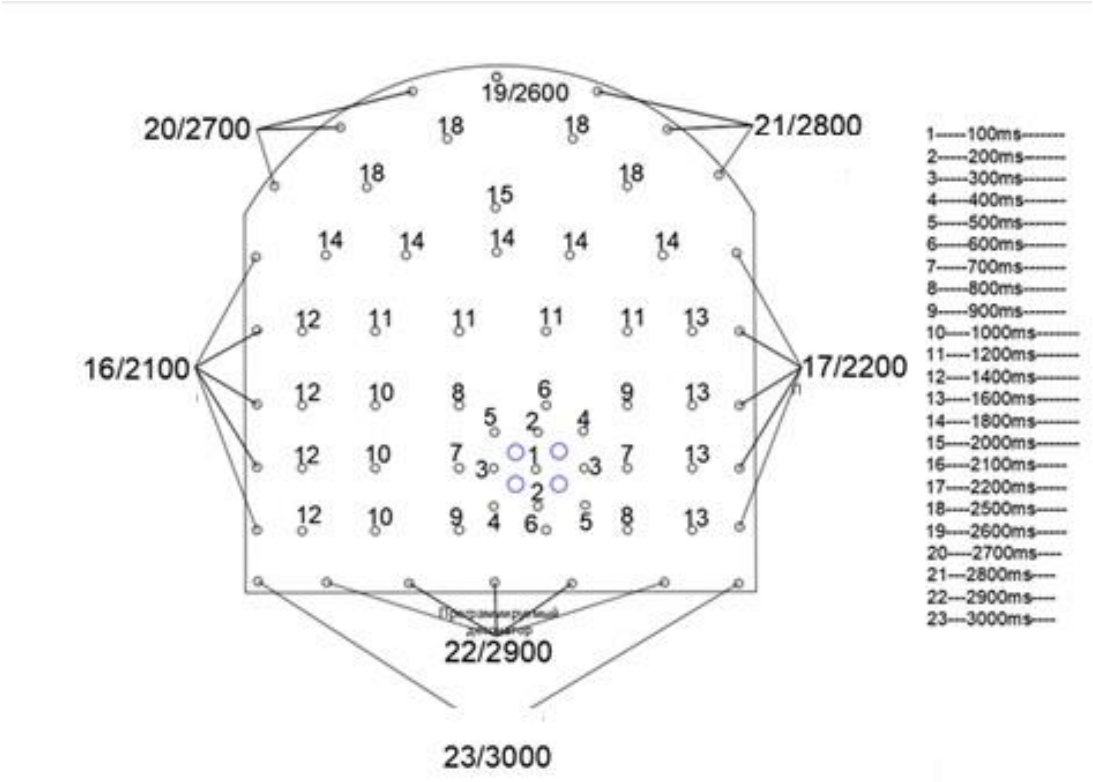
Yalnızca elektronik kapsül kullanılarak yapılan patlatmalardan alınan ölçümlerdeki titreşim değeri 0,9 mm/saniye olarak ölçülmüştür. Mevcut patlatma sistemiyle (Elektriksiz Kapsül) yapılan patlatmalardan

alınan ölçümlerde ise titreşim değerinin 1,9 mm/saniye olduğu görülmüştür. Yani elektronik kapsül kullanımı sayesinde %53 oranında bir azalma sağlanmıştır.

4.2. Planlanan Kesitin Elde Edilmesi

Projenin uygulandığı işletmede; mevcut durumda patlatmadan elde edilmek istenen parça boyutu ve ilerleme mesafesi için, delik grubu ateşlemesinde delik içi 23 seri gecikmeli elektriksiz kapsül ve infilak iletim aracı olarak infilaklı fitil kullanılmaktaydı (Şekil 8).

Çürütme bölgesi delikleri standart orta çekme metodu dizaynına sahip olup, tarama delikleri elektriksiz kapsüllerin standart gecikme süresini takip etmekte idi. Çevre delikleri ise; taban, tavan ve yan yüzeyler olarak 3 bölgeye ayrılmış, her bir grup kendi içerisinde aynı gecikme periyodunda patlatılmakta idi.

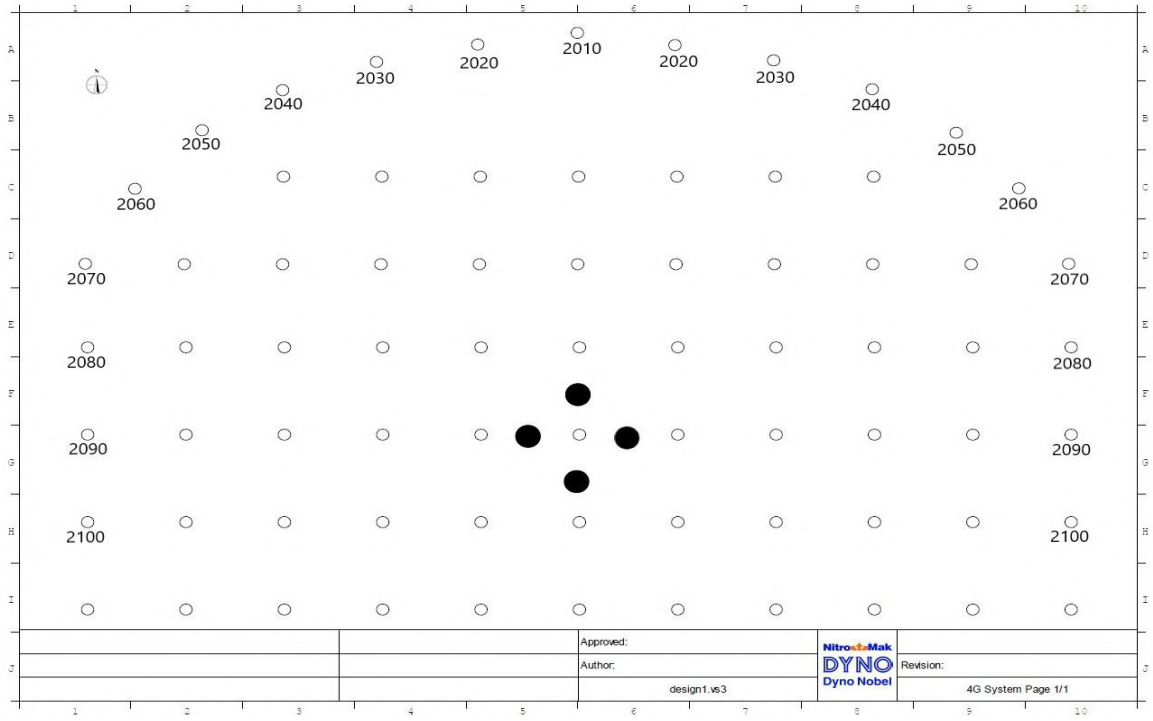


Şekil 8. İlerleme aynası mevcut dizaynı

İşletmenin talebiyle, mevcutta kullanılan gecikme dizaynı, çevre deliklerde elektronik kapsül kullanılarak uygulanmıştır. Yapılan uygulama sonucunda aşağıda da görüldüğü üzere planlanan kesit elde edilememiştir. Bunun temel sebebi, mevcut uygulamadaki elektriksiz kapsül gecikmelerinin kayaç yapısına aslında tam olarak uygun olmaması olarak yorumlanmıştır (Şekil 9).

Şekil 9. Mevcut gecikme dizaynı ile yapılan uygulama

Uygulamanın firma tarafından beklenen sonucu vermemesi neticesinde, firmamızca önerilen yeni gecikme dizaynı ilerleme aynasında denenmiştir. Bu deneme esnasında, yalnızca gecikme dizaynında değişikliğe gidilmemiş, ayrıca kombine ateşleme sistemi (elektriksiz ve elektronik kapsül) kullanılmıştır. Düzgün kesit elde edebilmek için çevre deliklerinde pre-split yöntemine benzer bir patern oluşturulmaya çalışılmıştır. Titreşim problemi yaşamamak adına, pre-split uygulamasındaki gibi aynı anda tüm çevre deliklerinin patlatılması uygun olmayacağından delikler arası gecikmeler yapılan hesaplamalar sonucunda minimumda tutularak Şekil 10'da görülen gecikme dizaynı elde edilmiştir.



Şekil 10. Firmamızca önerilen ve uygulanan dizayn

Bu deneme sonucunda istenen kesit elde edilmiş olup, patlatma sonrası kesiti gösterir fotoğraf aşağıdadır.

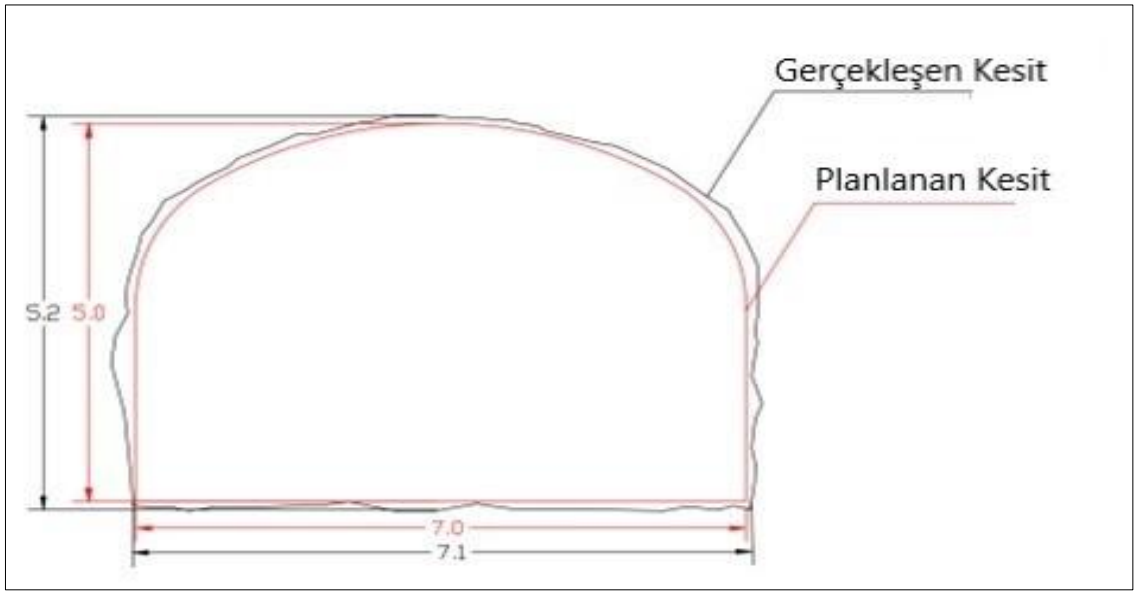
Şekil 11. Kombine ateşleme sistemi uygulanarak yapılan patlatma sonrası elde edilen kesit

5. SONUÇLAR

İşletmenin taleplerini karşılamak üzere, elektronik kapsül kullanımı önerilmiş ve kat arası patlamalarda tüm deliklerde elektronik kapsül kullanılması, ilerleme aynalarında ise kombine ateşleme sistemi uygulaması, işletmenin mevcut koşulları içerisinde en uygun çözüm olarak görülmüş ve uygulanmıştır (Şekil 12).

Kat arası patlatmalarda elektronik kapsül kullanımı sayesinde titreşimin %53 oranında azaldığı ölçümler sonucunda tespit edilmiş ve bu sayede işletmenin titreşim kaynaklı stabilite riski minimize edilmiştir.

İlerleme aynalarında ise kombine ateşleme sistemi uygulanarak elektronik kapsüllerin sağladığı gecikme esnekliği ve keskinlik sayesinde, yalnızca çevre deliklerinde kullanımı sonucu aşırı kazının %50 düştüğü firma tarafından yapılan ölçümler neticesinde tespit edilmiştir.



Şekil 12. Planlanan-Gerçekleşen Kesit

Görüldü ki; kombine ateşleme sisteminin sağladığı esneklik ile yalnızca ihtiyaç olan patlatma deliklerinde elektronik kapsül kullanımı

sayesinde maliyeti minimum düzeyde arttırarak maksimum çıktı elde edilebilmektedir. Buna ek olarak aşırı kazıdaki düşüşün, tahkimatlandırma maliyetini pozitif yönde etkileyeceği de göz önüne alınırsa, bu uygulama işletmeye ek bir maliyet yükü getirmiyor dahi olabilir.

İlerleme aynasında bu uygulama ile patlatma sonrası yapılan tarama faaliyetlerinde, ilerleme aynalarında en az 30 dakika kadar azalma olduğu, hatta bazılarında hiç gerek kalmadığı firma yetkilileri tarafından tespit edilmiş ve tarafımıza bildirilmiştir. Bunun işletmeye sağladığı fayda kabaca hesaplanacak olursa:

3 Vardiya çalışan ve her vardiyada 2 patlatma yapan bu işletmede, vardiya başına 60 dakika kazanç, günlük olarak 180 dakikaya (3 saat) denk gelmektedir. Bu kazanç yılda en az 900 saat - yaklaşık 37 iş günü olarak hesaplanabilir.

Bu süre işletmenin tercihine bağlı olarak;

- Madenin planlı duruşları için (Makine ekipman bakımı, yol düzenleme çalışmaları, alt yapı bakımları vb.)
- Üretim artışı için değerlendirilebilir.

Elde edilen olumlu sonuçlar neticesinde, işletme kat arası patlatmalarda da benzer uygulama denemeleri yapacağını bildirmiştir.

KAYNAKLAR

Aksoy, G. G., 2019. Patlatma dersi ders notları, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

Aksoy, G.G., Aksoy, O., 2020. Patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmininde sismik kalite faktörü kullanımı, MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi, 18, s.133-146

Holmberg, R., Lee J., Persson P. A., 2001. Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, New York

MADENCİLİKTE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MINING

Hüseyin Onur Dönmez, Hakan Tunçdemir, Ömür Acaroğlu Ergün
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZ: Günlük hayatta giderek artan enerji ve hammadde kullanımı bunlara olan talebi de arttırmaktadır. Artan talebin ekonomik ve çevreye duyarlı bir şekilde karşılanabilmesi için madencilik sektöründe teknolojik yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Yapay zekâ madencilik sektöründe keşif, operasyon, cevher hazırlama ve çevresel izleme alanlarında önemli yenilikler sunmaktadır. Bu çalışmada, yapay zekânın madencilik sektöründeki çeşitli uygulamaları incelenmektedir. Keşif aşamasında, büyük jeolojik veri setlerini analiz ederek mineral potansiyeli yüksek alanları belirlemekte ve keşif süreçlerini hızlandırmaktadır. Madencilik operasyonlarında, kestirimci bakım sistemleri ekipman arızalarını önceden tespit ederek bakım süreçlerini optimize ederken, otonom kamyonlar ve makineler operasyonel verimliliği ve güvenliği artırmaktadır. Cevher hazırlamada, kırma, öğütme, flotasyon ve liç işlemlerinde verimliliği artırarak metal geri kazanımını iyileştirmekte ve enerji-su tüketimini azaltmaktadır. Çevresel izleme ve sürdürülebilirlik kapsamında, atık yönetimi, su kalitesi takibi ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çözümler sunarak daha çevre dostu madencilik uygulamalarını mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekânın madenciliğe entegrasyonu, sektörün daha verimli, güvenli ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlayarak gelecekte maden mühendisliğinin ayrılmaz bir parçası olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, Madencilik, Teknoloji

ABSTRACT: *The increasing use of energy and raw materials in daily life also increases the demand for them. In order to meet the growing demand in an economically and environmentally conscious manner, technological innovations are needed in the mining sector. Artificial intelligence offers significant innovations in the fields of exploration, operations, ore processing, and environmental monitoring in the mining industry. This study examines various applications of artificial intelligence in the mining sector. At the exploration stage, it analyzes large geological datasets to identify areas with high mineral potential and accelerates exploration processes. In mining operations, predictive maintenance systems detect equipment*

failures in advance, optimizing maintenance processes, while autonomous trucks and machines increase operational efficiency and safety. In mineral processing, it improves efficiency in crushing, grinding, flotation, and leaching processes, enhancing metal recovery while reducing energy and water consumption. In the scope of environmental monitoring and sustainability, it provides solutions for waste management, water quality monitoring, and reducing carbon emissions, enabling more environmentally friendly mining practices. As a result, the integration of artificial intelligence into mining will make the sector more efficient, safe, and sustainable, becoming an indispensable part of mining engineering in the future.

Keywords: *Artificial intelligence, Mining, Technology*

1. GİRİŞ

Yapay zekâ (YZ) ve onun alt dallarından biri olan makine öğrenimi, madencilik sektöründe dönüştürücü güçler olarak ortaya çıkmıştır. Son yıllarda "akıllı madencilik" teknolojileri, madenlerin büyük miktarda gerçek zamanlı veri toplamasını sağlayarak YZ destekli analizler için verimli bir zemin hazırlamıştır. Araştırmacılar, bu veri akışını değerlendirerek 2018'den itibaren madencilikte YZ uygulamaları üzerine yapılan çalışmaları önemli ölçüde hızlandırmıştır (Jung ve Choi, 2021). Bu eğilimin arkasındaki itici güç, cevher tenörleri azalırken ve yataklar bulunması zor hale gelirken, madencilik sektörünün özellikle temiz enerji teknolojileri için kritik olan minerallere yönelik artan bir taleple karşı karşıya oluşudur (Corrigan ve Ikonnikova, 2024).

YZ, üretkenliği artırmaya ve karar alma süreçlerini iyileştirmeye yardımcı olarak şirketlerin talepleri daha verimli bir şekilde karşılamasını sağlarken, güvenlik ve sürdürülebilirlik kaygılarını da ele almaktadır. Erken dönem başarılar, YZ'nin madencilik operasyonlarında üretkenliği artırma, maliyetleri düşürme, güvenliği geliştirme ve çevresel etkileri azaltma

potansiyelini ortaya koymuştur. Örneğin, madencilikte dijital dönüşüm girişimleri, YZ ve ilgili dijital teknolojileri (örneğin Nesnelerin İnterneti) daha sürdürülebilir, verimli ve güvenli bir madencilik sektörü için temel unsurlar olarak vurgulamaktadır (Flores-Castañeda vd., 2024).

Bu çalışma, maden aramadan kaynak değerlendirmesine, madencilik operasyonlarından cevher hazırlama süreçlerine ve çevresel izleme ile sürdürülebilirliğe kadar madencilik değer zinciri boyunca YZ uygulamalarını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Madencilikte YZ'nin nasıl kullanıldığını gösteren örnek vaka çalışmalarını ele almakta, karşılaşılan zorlukları ve etik hususları tartışmaktadır. Bu gelişmeleri inceleyerek, YZ'nin madenciliğe olan dönüştürücü etkisini ve bu teknolojiden sorumlu bir şekilde yararlanmak için gereken hususları vurgulamaktadır.

2. MADEN ARAMADA YAPAY ZEKÂ

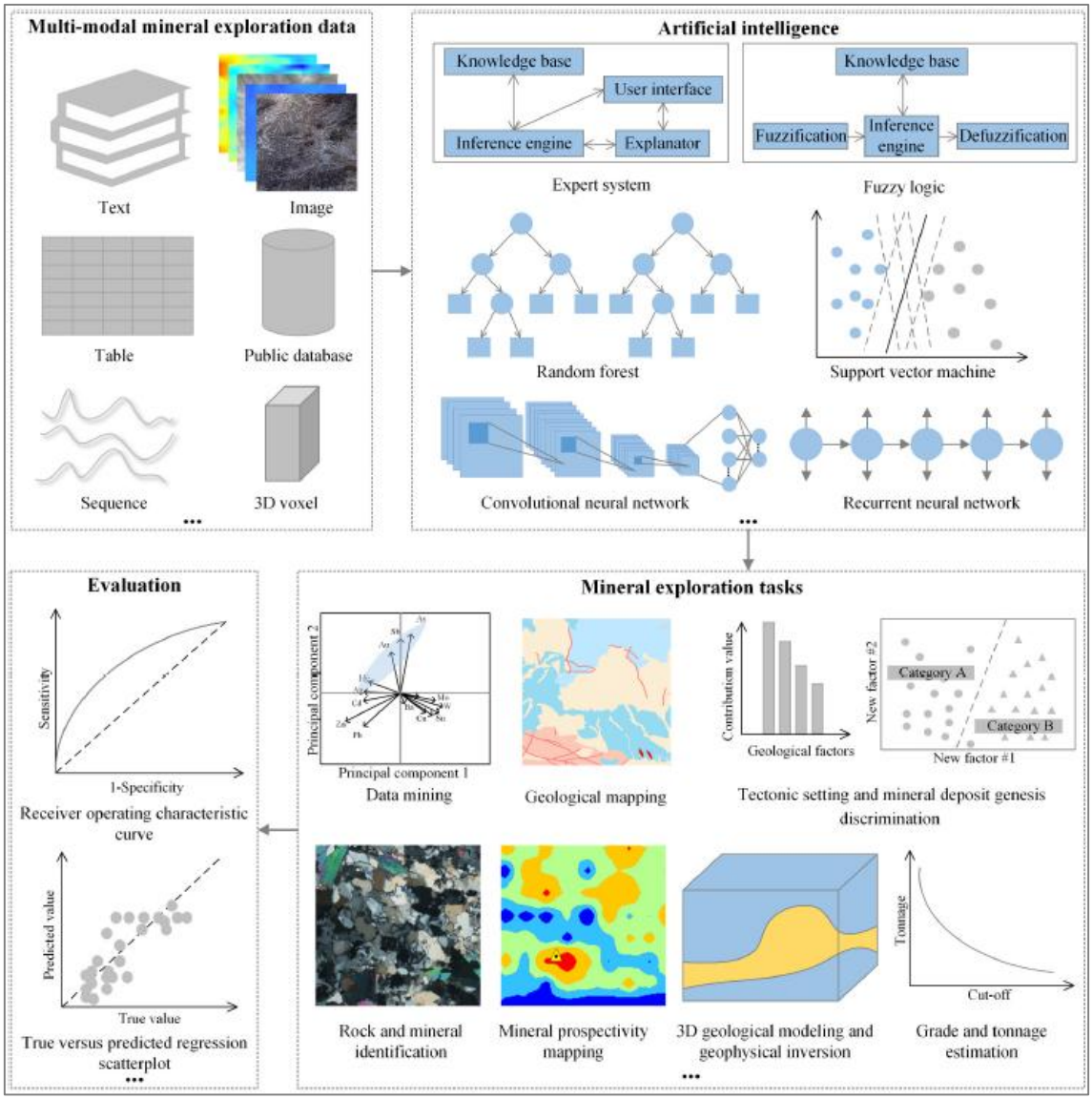
Maden arama, madencilik döngüsünün ilk aşamasıdır ve son yıllarda YZ uygulamalarının önemli bir odağı haline gelmiştir. Arama süreci, yapay zekâ algoritmalarının öğrenebileceği yer bilimi veri setlerini üretir (jeolojik haritalar, jeokimyasal analizler, jeofiziksel araştırmalar, sondaj kayıtları, mineralojik analizler, uzaktan algılama görüntüleri vb.). Geleneksel arama süreci genellikle "samanlıkta iğne aramaya" benzetilir, ancak YZ teknikleri, büyük ve çok modlu veri kümelerindeki ince desenleri ve anomalileri insan kapasitesinin ötesinde tespit edebilir (Corrigan ve Ikonnikova, 2024). Örneğin, makine öğrenimi modelleri (destek vektör makineleri, sinir ağları, rastgele ormanlar vb.), gürültülü, seyrek veya gerçek zamanlı sensör girişleri (örneğin, sondaj delik verileri veya kuyudaki sensör okumaları) üzerinde hata düzeltme ve veri tamamlama işlemleri yaparak verilerin

entegrasyonunu ve temizlenmesini sağlar. Bu YZ destekli veri işleme yöntemleri, özellikle erken aşama arama verilerinin eksik ve gürültülü doğası göz önüne alındığında, arama veri setlerinin güvenilirliğini artırır (Jung ve Choi, 2021).

YZ'nin aramadaki temel uygulamalarından biri, ekonomik mineralizasyon potansiyeli yüksek alanları tahmin etmek için yapılan prospektivite modellemesidir (Sun vd., 2019). Bilinen yataklardan ve bunlarla ilişkili jeolojik birimlerden öğrenen YZ modelleri, keşfedilmemiş yataklar için elverişli bölgeleri öne çıkarabilir. Yapılan sistematik incelemeler, mineral prospektivite haritalamanın baskın bir tema olduğunu ve makine öğreniminin mineral potansiyeli tahmininde yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir (Jung ve Choi, 2021). Bu modeller, jeoloji, jeokimya, jeofizik ve uzaktan algılama gibi çeşitli katmanlardan oluşan coğrafi verileri birleştirerek prospektivite puanları veya haritalar üretir (Şekil 1). Örneğin, bir YZ modeli belirli bir cevher yatağının jeokimyasal ve jeofiziksel "parmak izini" öğrenebilir ve ardından aynı özellikleri taşıyan diğer bölgeleri tarayabilir. Bir örnekte, hibrit bir makine öğrenimi modeli (metrik öğrenme ile rastgele ormanları birleştirerek), yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerini seyrek jeokimyasal örneklerle birleştirerek uzaktaki bir bölgedeki mineralizasyona bağlı ince litolojik varyasyonları başarıyla haritalamıştır (Yang vd., 2024).

Bir diğer önemli uygulama ise mineralojik ve tenör modellemedir. Keşif ve kaynak jeologları, sınırlı sondaj örneklerinden potansiyel yatakların tenörünü ve tonajını tahmin etmek zorundadır. YZ teknikleri, bu verileri tahmin etme ve aralarında interpolasyon yapma sürecinde yardımcı olur. Örneğin, sondaj delikleri arasındaki cevher tenörlerini tahmin edebilir veya sondaj karot görüntülerinden ve sensör kayıtlarından kaya türlerini sınıflandırabilir. Böylece, kaynak modelleme süreçleri daha hızlı ve doğru

hale gelir (Yang vd., 2024). Özellikle, cevher jeolojisi giderek daha karmaşık hale geldikçe, makine öğrenimi teknikleri, sondaj karot taramalarını, hiperspektral görüntüleri ve jeokimyasal analizleri analiz ederek mineral dağılımlarını belirlemede kullanışlı hale gelmiştir (Jooshaki vd., 2021).



Şekil 1. Maden aramada yapay zekâ kullanımının şematik gösterimi (Yang vd., 2024)

YZ'nin amacı jeologların yerini almak değil, onların karar alma süreçlerini desteklemektir. YZ modelleri, çok katmanlı arama verilerini hızla

tarayarak jeologların gözden kaçırabileceği hipotezler (hedefler) üretebilir. Yanlış tahminleri önlemek için jeoloji uzmanlığı entegrasyonu gereklidir. Gelecekteki arama çalışmalarında, veri odaklı algoritmaların jeolojik uzmanlıkla birleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Literatür, jeolojik kuralların veya uzman geri bildirimlerinin YZ modellerine entegre edildiği hibrit yaklaşımlara doğru bir kayma olduğunu göstermektedir (Yang vd., 2024).

Sonuç olarak, YZ'nin maden aramadaki uygulamaları, karmaşık veri kümelerini verimli bir şekilde analiz ederek maden yatağının değerini kanıtlamaktadır ve yeni nesil mineral yataklarının keşfinde bir paradigma değişimi yaratma potansiyeline sahiptir.

3. MADENCİLİK OPERASYONLARINDA YAPAY ZEKÂ

Bir maden yatağı belirlenip bir maden geliştirildikten sonra, YZ madencilik operasyonlarında ve üretimde de geniş bir uygulama alanı bulur. Çıkarma aşaması, cevher ve atığın kaldırılması için sondaj, patlatma, yükleme, taşıma ve diğer faaliyetleri içerir. Bu operasyonlar, ağır ekipmanlar ve madencilik sistemlerinden büyük miktarda sensör verisi üretir ve YZ bu verileri performansı optimize etmek için kullanabilir.

YZ'nin önemli bir kullanım alanı, madencilik ekipmanları için kestirimci bakımdır. Modern madenler, makinaları (yük kamyonları, ekskavatörler, sondaj makineleri, kırıcılar vb.) sürekli olarak titreşim, sıcaklık, basınç ve motor telemetrisi gibi parametreleri izleyen sensörlerle donatmaktadır. YZ algoritmaları bu veri akışlarını analiz ederek, yaklaşan mekanik sorunları gösteren desenleri veya anomalileri tespit eder. Arızaları gerçekleşmeden önce tahmin ederek, YZ duruma dayalı bakım yapılmasını sağlar ve onarımların en uygun zamanlarda planlanmasına yardımcı olur. Bu

sayede plansız duruş süreleri en aza indirilir. Araştırmalar, bu tür YZ destekli bakım sistemlerinin ekipman arızalarını ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Örneğin, bir YZ modeli, bir yük kamyonunun motorunda aşınma belirtileri tespit ederse (örneğin sıcaklık artışları veya ses anomalileri aracılığıyla), kamyon operasyon ortasında pahalı bir arıza yaşamadan önce proaktif olarak bakıma alınabilir. Genellikle zaman serisi sensör verileri üzerinde çalışan makine öğrenimi veya derin öğrenme destekli bu kestirimci bakım sistemleri, madencilikte kritik ekipmanların güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini artırmaktadır (Corrigan ve Ikonnikova, 2024).

Madencilik operasyonlarında devrim niteliğinde bir diğer YZ uygulaması, otonom araçlar ve makinelerin kullanılmasıdır. Madencilik sektörü, kontrollü maden sahası ortamlarında sürücüsüz yük kamyonları ve otonom sondaj makineleri konuşlandırmada öncü olmuştur. Rio Tinto ve BHP gibi şirketler, büyük kamyonların insan sürücüler olmadan cevher taşımasını sağlayan otonom taşıma sistemlerine büyük yatırımlar yapmıştır (Şekil 2). Bu kamyonlar, maden sahasında navigasyon, engel algılama ve rota optimizasyonu için YZ'den yararlanmaktadır. Vardiya değişimlerini ve insan yorgunluğunu ortadan kaldırarak, bu kamyonlar kesintisiz ve güvenli bir şekilde çalışabilir. Nitekim, raporlar otonom yük kamyonlarının daha düşük işletme maliyetlerine ve daha yüksek üretkenliğe ulaştığını göstermektedir; bir çalışmada, insanlı filolara kıyasla birim taşıma maliyetlerinde %15 azalma olduğu belirtilmiştir (Corrigan ve Ikonnikova, 2024). Ayrıca, bu sistemler deneme sürelerinde milyonlarca saat boyunca sıfır yaralanma kaydetmiş, tehlikeli madencilik ortamlarında çalışanları riskten uzaklaştırma potansiyelini ortaya koymuştur. İlk uygulamadan sonraki on yıl içinde, onlarca YZ destekli kamyonluk filolar, sürücü olmadan bir milyar tondan fazla malzeme taşımıştır. Bu kamyonlar, çarpışmaları

önlemek veya yükleme noktalarında verimli şekilde sıraya girmek gibi gerçek zamanlı kararlar almak için YZ kullanmaktadır (Jamasmie, 2018).

Şekil 2. Ekskavatör tarafından yüklenen otonom maden kamyonu (Jamasmie, 2018)

YZ destekli otonomi, diğer ekipmanlara da yayılmıştır. Otonom sondaj makineleri, YZ'nin arazi ve cevher modellerini yorumlamasıyla delik açma işlemlerini hassasiyetle gerçekleştirerek daha tutarlı parçalara ayırma sağlar. Yer altı yükleyicileri ve LHD (yükleme-taşıma-dökme) makineleri, uzaktan veya kablosuz rehberli modlarda çalıştırılmakta, sıkışık tünellerde ekipman çakışmalarını önlemek için trafik yönetimini YZ sistemleri denetlemektedir. Hatta madencilik demiryolları bile YZ destekli otomasyon kullanmaktadır (Rio Tinto'nun AutoHaul sistemi, otonom ağır yük demiryolu ağının en ünlü örneklerinden biridir). Bu örnekler, algılama ve karar verme için YZ'nin gücünü kullanarak madencilik lojistiğini nasıl dönüştürdüğünü göstermektedir.

YZ ayrıca, verimli cevher kırılması ve sonraki işlemler için kritik olan sondaj ve patlatma süreçlerini optimize etmek için de kullanılmaktadır. Makine öğrenimi modelleri, patlatma tasarım parametrelerine (örneğin patlayıcı miktarı, delik aralığı) ve yerel jeolojiye dayalı olarak kaya parçalılığı dağılımını veya yer sarsıntısı seviyelerini tahmin edebilir. Geçmiş patlatma verilerinden öğrenerek, YZ araçları mühendislerin istenen parçalılığı elde eden ve aşırı titreşim veya fırlayan kaya gibi istenmeyen etkileri en aza indiren patlatmalar tasarlamasına yardımcı olur. Bu, madenlerin güvenlik sınırlarına uymasına ve çevredeki altyapıya yapısal zarar riskini azaltmasına yardımcı olur (Jung ve Choi, 2021). Hüdaverdi ve Ağan (2023) yaptıkları çalışmada farklı yapay zekâ algoritmalarıyla fırlayan kaya mesafesini tahmin eden bir model oluşturmuş ve 5,36 m hata payıyla ANFIS modeli en başarılı sonucu vermiştir.

Jeoteknik güvenlik alanında, YZ teknikleri şev stabilitesi ve zemin koşullarını izleme ve tahmin etme konusunda yardımcı olmaktadır. Madencilikteki şev kaymaları veya kaya düşmeleri ciddi riskler taşır; bu nedenle sürekli izleme verileri (örneğin, şev radarı okumaları, piezometre verileri, gerilme ölçümleri), olası çökmeleri tahmin etmek için makine öğrenimi modellerine beslenebilir. Örneğin, yakın zamanda yapılan bir çalışmada, karar ağacı regresyonu kullanan bir YZ modeli geliştirilmiş ve maden şevleri için stabilite faktörlerini tahmin etmede %91 doğruluk oranı elde edilmiştir (Cemiloglu vd., 2024). Bu tür güvenlik odaklı YZ uygulamaları, madencilik çalışanlarını ve varlıklarını korumaya katkı sağlamaktadır.

Bir diğer operasyonel YZ uygulaması, madencilik süreçlerinin gerçek zamanlı kontrolü ve optimizasyonudur. YZ algoritmaları, hava kalitesi sensör verilerine dayalı olarak maden havalandırma fanlarını dinamik olarak ayarlayabilir, böylece gaz konsantrasyonlarını güvenli sınırlar içinde

tutarken enerji tasarrufu sağlar (Narkhede, 2021). Ayrıca ekipmanları gerçek zamanlı olarak yönlendirebilir ve programlayabilir. Örneğin, YZ destekli filo yönetim sistemleri, hangi kamyonun bir sonraki kepçeye gideceğine karar vererek kuyruk sürelerini ve bekleme saatlerini en aza indirir, böylece genel üretkenliği artırır (Hyder vd., 2019).

Sonuç olarak, madencilik operasyonlarında YZ, daha yüksek verimlilik ve daha fazla güvenlik hedeflerine ulaşmayı sağlar. Operasyonel verilerden öğrenerek sorunları öngörüp önlemeye yardımcı olur, fiziksel görevleri hassasiyetle otomatikleştirir ve madendeki günlük kararları sürekli optimize eder. Madenler dijitalleşmeye devam ettikçe, YZ'nin operasyonlardaki rolünün genişlemesi ve daha karmaşık alanlara yönelmesi beklenmektedir.

4. CEVHER HAZIRLAMADA YAPAY ZEKÂ

Cevher çıkarıldıktan sonra, değerli mineralleri atıktan ayırmak için işlenmesi gerekir – bu aşamada YZ, verimliliği ve geri kazanımı artırmak için giderek daha fazla benimsenmektedir. Cevher hazırlama tesisleri (kırma, öğütme, flotasyon, liç vb.) büyük hacimde veriyi ekipmanlardan ve proses kontrol sistemlerinden (örneğin besleme tenörleri, parçacık boyutu monitörleri, kimyasal analizör okumaları, akış hızları, ekipman durumu) üretir. YZ teknikleri, bu karmaşık süreçleri gerçek zamanlı olarak modellemek ve kontrol etmek için kullanılır.

YZ'nin en önemli uygulamalarından biri otomatik cevher ayırmadır. Cevher ayırma makineleri genellikle X-ışını veya optik kameralar gibi sensörler kullanarak konveyör bandı üzerindeki değerli cevher parçalarını tespit eder ve bunları atık kayalardan ayırır. Gelişmiş ayırma sistemleri artık YZ tabanlı görüntü tanıma ve sınıflandırma algoritmalarını kullanarak

cevherleri doku, renk veya element imzalarına göre ayırt edebilmektedir. Cevher ile atık arasındaki eğitim verilerinden "öğrenerek", bu ayırma sistemleri anlık kararlar vererek atıkları işlem hattına girmeden yönlendirebilir, böylece besleme tenörünü artırır ve işleme devresine giren atık miktarını azaltır (Saldana vd., 2022). Örneğin, YZ destekli ayıklama sistemleri, bakır açısından zengin kayaları atıklardan ayırmak veya altın madenlerinde cevherden kireçtaşını ayırmak için kullanılarak değirmen verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Flores vd., 2020).

YZ ayrıca, öğütme ve flotasyon devrelerinde süreç kontrolünü geliştirir. Öğütme değirmeninde amaç, minerallerin özgürleşmesini sağlamak için ideal parçacık boyutuna ulaşmak ve enerji israfına yol açan aşırı öğütmeyi önlemektir. YZ modelleri, geçmiş öğütme verileriyle eğitilerek değirmen ayarlarının (örneğin değirmen hızı, su akışı, öğütme ortamı eklenmesi) sonuçlarını tahmin edebilir. Daha sonra bu modeller operatörlere önerilerde bulunabilir veya doğrudan gelişmiş bir süreç kontrol sistemi aracılığıyla ayarları yapabilir. Bunun sonucunda daha stabil bir değirmen operasyonu, daha yüksek üretim kapasitesi ve enerji tasarrufu sağlanır.

Benzer şekilde, flotasyon işlemlerinde minerallerin kabarcıklara yapışarak ayrıldığı süreç, YZ köpük kamera görüntülerini veya kimyasal sensör verilerini analiz ederek optimum reaktif dozajını ve hava akışını koruyabilir, böylece değişken cevher beslemesine otomatik olarak uyum sağlar.

Liç ve ekstraksiyon süreçlerinde (örneğin bakır veya altın için yığın liçi), YZ liç kinetiklerini ve çözelti kimyasını modellemek için kullanılır. Asit konsantrasyonu veya yığın sulama oranı gibi parametrelerdeki değişikliklerin metal geri kazanımını nasıl etkileyeceğini tahmin edebilir, böylece operatörlerin önceden ayarlamalar yapmasına olanak tanır. YZ

tabanlı kestirimci kontrol sistemlerinin, süreci sürekli öğrenerek ve optimize ederek metal geri kazanımını artırırken reaktif tüketimini azalttığı görülmüştür. Son araştırmalar, YZ'nin proses parametrelerini en aza indirilmiş girdilerle en iyi geri kazanımı sağlayacak şekilde optimize etmeye odaklandığını göstermektedir. Örneğin, Zhang vd. (2022), YZ teknikleriyle cevher hazırlama ve hidrometalurjik devrelerin performansını artırmayı başarmışlardır.

YZ ayrıca, cevher hazırlama tesislerindeki bakım süreçlerine de katkıda bulunabilir. Örneğin, pompaların veya filtrelerin arızalarını tahmin ederek, tesisin sürekli çalışmasını sağlayabilir.

Sonuç olarak, YZ, cevher hazırlama süreçlerinde cevherden maksimum değeri çıkarmayı sağlarken, maliyetleri ve kaynak kullanımını optimize etmeye yardımcı olur. Bu, madencilik projelerinin hem kârlılığı hem de sürdürülebilirliği açısından kritik bir avantajdır.

5. ÇEVRESEL İZLEME VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİKTE YAPAY ZEKÂ

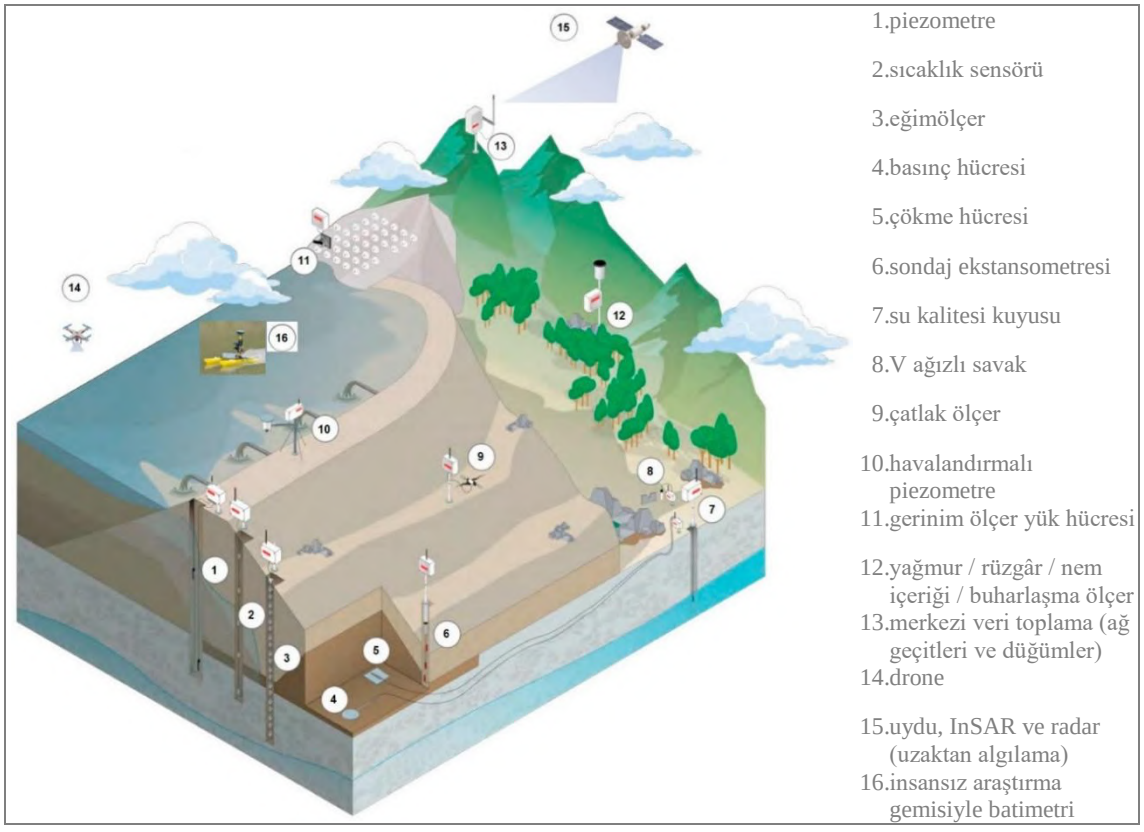
Çevresel koruma ve sürdürülebilirliği sağlamak, modern madenciliğin giderek daha kritik bir yönü haline gelmektedir ve bu zorlukların üstesinden gelmek için yapay zekâ (YZ) araçları kullanılmaktadır. Madenler, arazi bozulması, su kullanımı, atık barajları ve emisyonlar gibi çevresel etkilerini izlemek ve yönetmek zorundadır. YZ, uydulardan, dronlardan ve yerinde sensörlerden gelen verileri analiz ederek maden çevresindeki değişiklikleri veya riskleri tespit etme sürecini büyük ölçüde geliştirebilir.

Bunun bir uygulama alanı arazi örtüsü izleme ve rehabilitasyondur. Madencilik faaliyetleri sona erdikten sonra, alanların rehabilite edilmesi gerekmektedir. Drone veya uydu görüntüleri kullanan YZ destekli görüntü

analizi, rehabilite edilen maden alanlarında bitki örtüsünün yeniden büyümesini ve arazi şekillerindeki değişiklikleri otomatik olarak değerlendirebilir. Örneğin, makine öğrenimi sınıflandırıcıları, maden rehabilitasyon alanlarında sağlıklı bitki örtüsünü çıplak topraktan ayırt etmek için kullanılmış ve rehabilitasyon başarısına dair nesnel ölçümler sağlamıştır (Petropoulos vd., 2013). Sistematik bir incelemede, çeşitli çalışmaların makine öğrenimini maden kapatma süreçlerinde arazi örtüsünü izlemek için kullandığı ve altı çalışmanın özellikle maden rehabilitasyonu bağlamında toprak ve su kirliliğini tahmin etmeye veya değerlendirmeye odaklandığı belirtilmiştir (Jung ve Choi, 2021). Bu, YZ'nin madenlerden akan suyun aşağı havzalardaki kalitesini veya toprak kirliliğini izlemek için giderek daha fazla kullanıldığını göstermektedir. Geçmiş kirletici seviyelerine dair verilerle eğitilen YZ modelleri, kirletici yayılım desenlerini tahmin edebilir veya su kimyasındaki anormallikleri belirleyerek bir sızıntı veya dökülmeyi erken aşamada tespit edebilir, böylece daha hızlı müdahale edilmesini sağlar.

YZ ayrıca, çevresel güvenlik için atık barajı yönetimi ve jeoteknik izleme süreçlerinde de rol oynamaktadır. Mineral işleme atıklarının tutulduğu atık barajları, madenciliğin en büyük çevresel risklerinden biridir. Atık barajı stabilitesini izleme genellikle gözenek basıncı sensörleri, inklinometreler gibi enstrümanları ve zemin deformasyonunu tespit eden uydu radar interferometrisi gibi uzaktan algılama tekniklerini içerir (Şekil 3). YZ teknikleri, bu verileri birleştirerek baraj çökme olasılığını değerlendirebilir veya insan analistlerin kaçırabileceği uyarı işaretlerini tespit edebilir. Her ne kadar YZ'nin bugüne kadar bir atık barajı felaketini önlediğine dair kamuya açık bir örnek olmasa da anormallik tespit algoritmalarının erken uyarı sistemi olarak kullanılması konusunda araştırmalar devam etmektedir. Daha genel anlamda, maden çevresindeki

sensör ağları (hava kalitesi, su akışı vb. ölçümleri yapan) YZ'den yararlanarak gereksiz verileri filtreleyebilir ve önemli değişikliklere odaklanabilir. Örneğin, bir YZ sistemi, maden çevresindeki toz partikül seviyelerini sürekli olarak analiz edebilir ve hava koşullarına dayalı olarak toz seviyesinin yasal sınırları aşabileceğini öngörebilir. Böylece maden, bir ihlal gerçekleşmeden önce yolları su ile spreyleyerek toz baskılama önlemlerini alabilir (Cacciuttolo vd., 2024).



Şekil 3. Atık barajı yapısal sağlık ve güvenlik yönetimi izleme için farklı sensörlerin kullanımına ilişkin örnekler (Cacciuttolo vd., 2024)

Sürdürülebilirlik açısından önemli bir başka zorluk, madencilikte su yönetimidir. YZ, su tüketimini üretim metrikleri ve çevresel koşullarla ilişkilendirerek optimize etmek için kullanılmaktadır. Hyder vd. (2019) yaptıkları çalışmada bir cevher hazırlama tesisinde YZ destekli su yönetimi araçlarının kullanılmasının, kırma ve öğütme işlemlerinde su verimliliğini

artırarak enerji maliyetlerini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Suyun daha iyi yönetilmesi, madenlerin hem değerli bir kaynağı korumasına hem de işleme verimliliğini artırmasına olanak tanır; bu, sürdürülebilirlik ve maliyet açısından çift taraflı bir kazanç sağlar. YZ, yağış miktarı ve yeraltı su seviyeleri gibi hidrolojik verileri operasyonel verilerle birlikte analiz ederek su temin ihtiyacını veya atık barajlarında su fazlasını tahmin edebilir, böylece su kıtlığı veya taşkınları önlemeye yardımcı olur. Ayrıca, YZ modelleri asidik maden drenajı potansiyelini tahmin edebilir ve atık kaya yığınlarının jeokimyasal verilerini analiz ederek, asidik akış oluşmadan önce önleyici tedbirler (örneğin karışım ayarlamaları veya arıtma) önererek olası çevresel etkileri azaltabilir (Betrie vd., 2013).

Emisyonlar açısından, YZ bir madenin karbon ayak izini izlemeye ve azaltmaya yardımcı olur. Örneğin, YZ, kamyonların rotalarını optimize ederek rölanti süresini ve yakıt tüketimini en aza indirebilir, böylece dizel emisyonlarını düşürür (bu aynı zamanda maliyet tasarrufu da sağlar). YZ destekli enerji tüketim analizleri, madencilik operasyonlarında yenilenebilir enerjiye geçiş fırsatlarını veya talep yönetimi iyileştirmelerini belirleyebilir. Bazı madenler, yüksek enerji gerektiren görevleri (örneğin kırma işlemlerini) yenilenebilir enerjiye erişimin olduğu zaman dilimlerinde veya enerji fiyatlarının düşük olduğu saatlerde gerçekleştirmek için YZ kullanmaktadır. Ayrıca, yer altı madenlerinde YZ destekli talebe bağlı havalandırma – yani hava akışının insan ve dizel ekipmanın konumuna göre dinamik olarak ayarlanması – enerji tüketimini azaltırken hava kalitesini iyileştirmiştir. Bu tür akıllı enerji yönetimi yaklaşımları, sera gazı emisyonlarını azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, YZ'nin madencilikte çevresel izleme ve sürdürülebilirlik alanındaki rolü giderek büyümektedir ve bu trend, düzenleyici ve toplumsal baskılarla daha da hız kazanacaktır.

6. SONUÇ

Yapay zekâ, madencilik endüstrisi için oyunun kurallarını değiştiren bir teknoloji olarak ortaya çıkmakta ve madencilik değer zinciri boyunca uzun süredir devam eden zorluklara yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada arama aşamasında, makine öğrenimi algoritmalarının gizli mineral yataklarını keşfetmeye ve cevher rezervlerini değerlendirmeye yardımcı olmasından, operasyonel aşamada ekipman bakımını optimize etmesi, maden güvenliğini artırması ve otomasyon ile veri analitiği yoluyla üretkenliği iyileştirmesine kadar YZ'nin madenciliğin farklı aşamalarındaki çeşitli uygulamaları incelenmiştir. Ayrıca, cevher hazırlama aşamasında, akıllı kontrol sistemlerinin verimliliği ve geri kazanımı nasıl artırdığı ele alınmıştır. YZ'nin çevresel izleme ve sürdürülebilirlik çabalarına nasıl katkı sağladığı, ekolojik etkileri tahmin edip azaltarak daha sorumlu madencilik uygulamalarına olanak tanıdığı gösterilmiştir.

Bununla birlikte, madencilikte YZ uygulamalarının bazı engeller olmadan gerçekleşmeyeceğini aşikârdır. Veri kalitesi, model şeffaflığı, iş gücü üzerindeki etkiler ve YZ'nin etik kullanımı gibi konuların dikkatle yönetilmesi gerekmektedir. Madencilik sektörü, veri odaklı kültürleri teşvik ederek, personeli YZ konusunda eğiterek ve teknoloji uygulamalarına etik çerçeveleri entegre ederek bu engellerin üstesinden gelmeye yönelik yatırımlar yapmalıdır.

Sonuç olarak, YZ'nin madenciliğe olan dönüştürücü etkisi, sektörde önceki teknolojik atılımlara benzemektedir, ancak etkisi muhtemelen daha da kapsamlıdır, çünkü her seviyede karar alma süreçlerini etkilemektedir. YZ kullanan madenler, yalnızca daha verimli ve güvenli olmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel ve toplumsal hususlara da daha duyarlı

hale gelmektedir. Bu da üretken, kârlı ve sürdürülebilir "akıllı madencilik" kavramını mümkün kılmaktadır.

Küresel kaynak talebi artarken ve kolay erişilebilir yataklar tükenirken, YZ bu ihtiyaçları sorumlu bir şekilde karşılamak için vazgeçilmez bir araç haline gelecektir.

Önümüzdeki yıllar, YZ'nin maden mühendisliğinin standart bir bileşeni olarak rolünü pekiştirecek, tıpkı jeoloji veya cevher hazırlama kadar madencilik planlaması ve operasyonlarının ayrılmaz bir parçası haline gelecektir. Sonuç olarak yapay zekanın madenciliğe entegrasyonu, daha güvenli operasyonlar, yeni mineral kaynakları ve geliştirilmiş sürdürülebilirlik performansı sağlayarak madenciliğin modern dünyadaki yerini sağlamlaştıracaktır.

KAYNAKLAR

Betrie, G. D., Tesfamariam, S., Morin, K. A., & Sadiq, R., 2013. Predicting copper concentrations in acid mine drainage: a comparative analysis of five machine learning techniques. Environmental Monitoring and Assessment, 185, 4171-4182. https://doi.org/10.1007/s10661-012-2859-7

Cacciuttolo, C., Guzmán, V., Catriñir, P., & Atencio, E., 2024. Sensor technologies for safety monitoring in mine tailings storage facilities: solutions in the ındustry 4.0 Era. Minerals, 14(5), 446. https://doi.org/10.3390/min14050446

Cemiloglu, A., Cao, Y., Sabonchi, A. K. S., & Nanehkaran, Y. A., 2024. Predicting stability factors for rotational failures in earth slopes and embankments using artificial intelligence techniques. Open Geosciences, 16(1), 20220730. https://doi.org/10.1515/geo-2022-0730

Corrigan, C. C., & Ikonnikova, S. A., 2024. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. The Extractive Industries and Society, 17, 101440. https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101440

Flores, V., Keith, B., & Leiva, C., 2020. Using artificial intelligence techniques to improve the prediction of copper recovery by leaching. Journal of Sensors, 2020, 1–12. https://doi.org/10.1155/2020/2454875.

Flores-Castañeda, R. O., Olaya-Cotera, S., López-Porras, M., Tarmeño-Juscamaita, E., & Iparraguirre-Villanueva, O., 2024. *Technological advances and trends in the mining industry: a systematic review*. Mineral Economics. (Advance online publication). https://doi.org/10.1007/s13563-024-00455-w

Hudaverdi, T., & Agan, Y., 2023. Application of intelligent models for flyrock prediction considering design parameters and bench face characteristics. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40, 2331–2347. https://doi.org/10.1007/s42461-023-00879-y

Hyder, Z., Siau, K., & Nah, F., 2019. Artificial Intelligence, machine learning, and autonomous technologies in the mining industry. Journal of Database Manage. 30, 2. https://doi.org/10.4018/JDM.2019040104.

Jamasmie, C., 2018. *Rio Tinto autonomous trucks now hauling a quarter of Pilbara material*, https://www.mining.com/rio-tinto-autonomous-trucks-now-hauling-quarter-pilbara-material

Jooshaki, M., Nad, A., & Michaux, S., 2021. *A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry*. Minerals, 11(8), 816. https://doi.org/10.3390/min11080816

Jung, D., & Choi, Y., 2021. *Systematic review of machine learning applications in mining: Exploration, exploitation, and reclamation*. Minerals, 11(2), 148. https://doi.org/10.3390/min11020148

Narkhede, P., Walambe, R., Mandaokar, S., Chandel, P., Kotecha, K., & Ghinea, G., 2021. Gas detection and identification using multimodal artificial intelligence based sensor fusion. Applied System Innovation, 4 (1), 3. https://doi.org/10.3390/asi4010003.

Petropoulos, G.P., Partsinevelos, P., & Mitraka, Z., 2013. Change detection of surface mining activity and reclamation based on a machine learning approach of multi-temporal Landsat TM imagery. Geocarto International, 28, 323–342. https://doi.org/10.1080/10106049.2012.706648

Saldana, M., Neira, P., Gallegos, S., Salinas-Rodriguez, E., Perez-Rey, I., & Toro, N., 2022. Mineral leaching modeling through machine learning algorithms-a review.

Frontiers in Earth Science (Lausanne) 10, 560. https://doi.org/10.3389/feart.2022.816751.

Sun, T., Chen, F., Zhong, L., Liu, W., & Wang, Y., 2019. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. Ore Geology Reviews, 109, 26–49. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.003

Yang, F., Zuo, R., & Kreuzer, O. P. 2024. Artificial intelligence for mineral exploration: A review and perspectives on future directions from data science. Earth-Science Reviews, 258, 104941. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104941

Zhang, Z., Zhang, X., Zhang, D., Zhang, X., Qiu, F., Li, W., & Tang, C., 2022. Application of machine learning in a mineral leaching process- taking pyrolusite leaching as an example. ACS. Omega 7 (51), 48130–48138. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06129.

METAL MADENCİLİĞİNDE SUSUZLAŞTIRMA VE MADENCİLİK SONRASI AKTİVİTELERİ

METAL MINING DEWATERING AND POST-MINING ACTIVITIES

Murat İşcan
Maden ve Yerbilimleri Profesyonelleri Mesleki Gelişim Derneği, Ankara

Eriz Cristobal
TH S. A. Spain

A. Halim Demirkan
Maden ve Yerbilimleri Profesyonelleri Mesleki Gelişim Derneği, Ankara

ÖZ: Metal madenciliğinde susuzlaştırma (dewatering), yalnızca madenin işletme sürecinde verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda "madencilik sonrası" (maden sonrası) rehabilitasyon ve sürdürülebilirlik çalışmalarında da büyük önem taşır. Cevher zenginleştirme aşamalarında oluşan atıkların kontrollü biçimde susuzlaştırılması, daha güvenli ve daha küçük ölçekli atık depolama tesisleri (atık barajları) inşa etme imkânı sunar. Bu sayede, yüksek inşaat maliyetleri ve uzun süren bürokratik işlemler (örneğin ÇED süreçleri) daha az karmaşık hâle gelebilir. Türkiye'deki yasal düzenlemeler ve uluslararası standartlar, atık yönetiminde susuzlaştırma uygulamalarını teşvik ederek çevre koruması ve iş sağlığı-güvenliği açısından avantajlar sağlar. Bu sunumda, susuzlaştırmanın metal madenciliğindeki rolü, yatırım maliyetleri (özellikle atık barajı inşaat maliyetlerinin yüksek olması), yasal süreçlerde yaşanan bürokratik zorluklar ve susuzlaştırmanın bu zorlukları nasıl hafifletebileceği ele alınmakta; farklı susuzlaştırma teknolojilerinin (ör. paste thickener, dekanter santrifüj, filtre pres vb.) işletme ve madencilik sonrası aşamalarındaki faydaları değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Susuzlaştırma, Metal Madenciliği, Yatırım Maliyetleri, ÇED Süreci

ABSTRACT: *In metal mining, dewatering not only increases operational efficiency during the mine's active phase but also plays a crucial role in post-mining rehabilitation and sustainability efforts. Controlled dewatering of tailings generated in ore processing enables the construction of safer and*

smaller-scale tailings storage facilities (e.g., tailings dams). In this way, high construction costs and lengthy bureaucratic procedures (such as EIA processes) can be simplified. Turkish regulations and international standards encourage dewatering practices in waste management, providing advantages in terms of environmental protection and occupational health and safety. This presentation examines the role of dewatering in metal mining, focusing on its impact on investment costs (particularly the high construction costs of tailings dams), and discussing how it alleviates bureaucratic challenges. Various dewatering technologies (e.g., paste thickener, decanter centrifuge, filter press) are assessed in both operational and post-mining contexts.

Keywords: *Dewatering, Post-Mining, Metal Mining, Investment Costs, EIA Process*

1. GİRİŞ

Metal madenciliği faaliyetlerinde, cevherin işletmeye hazırlanması ve zenginleştirilmesi süreçlerinde yoğun bir su tüketimi söz konusudur. İşlenen cevherden geri kalan katı atıklar (tailings), çevresel ve ekonomik açıdan önemli riskler içermektedir Artan çevre bilinci, yasal mevzuat kısıtlamaları ve toplumsal baskılar, madencilik işletmelerini atıklarını daha güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir biçimde yönetmeye yöneltmektedir (Resmi Gazete, 2015).

Susuzlaştırma (dewatering), atık çamuru içinde bulunan suyun uzaklaştırılmasını sağlayarak katı madde oranı yüksek ve nispeten "kuruya yakın" malzeme elde etmeyi amaçlar. Böylece atıkların depolanması, yönetimi ve nihai rehabilitasyon süreci kolaylaşır. Susuzlaştırma, aynı zamanda atık barajlarında tutulan su miktarını da düşürerek baraj stabilitesini artırmakta ve potansiyel çevre kazalarının önüne geçmektedir. Bu uygulamalar sayesinde, yüksek inşaat maliyetlerine ve uzun süreli bürokratik

işlem süreçlerine (örneğin Çevresel Etki Değerlendirmesi- ÇED) neden olabilecek büyük ölçekli atık barajlarına duyulan ihtiyaç azalabilir.

Bu çalışmada, susuzlaştırma teknolojilerinin metal madenciliğindeki rolü ve madencilik sonrası dönemindeki katkısı ele alınacaktır. Ayrıca yatırımlar, yatırım maliyetleri, ÇED gibi yasal süreçlerin meşakkatli ve pahalı olması nedeniyle madencileri zorlayan konular tartışılacak; susuzlaştırma uygulamalarının bu zorlukları hafifletebileceği boyutlar değerlendirilecektir.

2. METAL MADENCİLİĞİNDE SUSUZLAŞTIRMANIN ÖNEMİ

2.1. Operasyonel Verimlilik ve Ekonomik Katkı

Su Geri Kazanımı: Susuzlaştırma teknolojileriyle proses suyunun geri döndürülmesi, taze su ihtiyacını azaltarak işletmenin su maliyetlerinde tasarruf sağlar.

Daha Küçük Depolama Alanı İhtiyacı: Düşük nemli atıklar daha küçük hacim kaplar, böylece atık barajlarının veya depolama sahalarının boyutu küçülebilir; bu da inşaat maliyetlerini ve işletme giderlerini azaltır.

Nakliye ve Pompalama Kolaylığı: Yoğun ya da "kuruya yakın" kıvamlı atıklar, pompalanmadan yığın olarak taşınabildiğinden enerji ve ekipman maliyetlerinde tasarruf edilebilir.

2.2. Çevresel Fayda ve Sürdürülebilirlik

Çevre Dostu Yaklaşım: Az su içeren atık barajları, ani yıkılma ya da sızıntı riskini düşürerek çevre ve toplum sağlığını korur.

Su Kaynaklarının Korunması: Geri kazanılan suyun yeniden kullanılması, özellikle su kıtlığının yaşandığı bölgelerde kaynak baskısını hafifletir.

Karbon Ayak İzinin Düşürülmesi: Su pompalama ve arıtma ihtiyaçlarının azalması, enerji tüketimi ve dolayısıyla karbon salımını düşürür.

2.3. İş Sağlığı ve Güvenliği

Baraj Stabilitesinin Artması: Kuruya yakın atıklar, baraj duvarlarına uygulanan hidrostatik basıncı azaltarak barajın bütünlüğünü güçlendirir.

Otomasyon ve İş Güvenliği: Birçok susuzlaştırma ekipmanı yüksek otomasyon seviyesine sahip olduğundan, sahada çalışan personel sayısı ve iş kazası riski de azalır.

3. TÜRKİYE'DE MEVZUAT VE BÜROKRASİNİN ETKİSİ

Türkiye'de madencilik faaliyetlerini düzenleyen en önemli yasal metinler; 3213 sayılı Maden Kanunu ve 2872 sayılı Çevre Kanunu ile bunlara bağlı ikincil mevzuattır (Resmî Gazete 1985). Özellikle Maden Atıkları Yönetmeliği ve Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği, atık yönetimi ve çevre koruması konusunda detaylı kurallar içerir.

ÇED Süreci:

- Büyük atık barajları ve baraj gövde tasarımları, ekolojik ve sosyo-ekonomik etkileri nedeniyle kapsamlı ÇED incelemesine tabidir.
- Susuzlaştırma uygulamalarıyla risk seviyesi azalabilen projeler, ÇED onay aşamasında daha avantajlı olabilir.

Bürokratik Maliyet:

- Atık barajı inşaatı; izinler, jeoteknik raporlar, sızdırmazlık malzemeleri, risk analizleri ve acil eylem planları gibi birçok bileşeni içerir.
- Kurumlar arası koordinasyon eksikliği, resmi ücretler ve danışmanlık ücretleri hem masrafları hem de proje başlama süresini artırabilir.

Susuzlaştırma ile daha küçük ve güvenli atık depolama alternatiflerinin benimsenmesi, zaman ve bürokrasi yönetimi açısından işletmelere esneklik sağlar.

4. MADENCİLİK SONRASI (MADEN SONRASI) AKTİVİTELERİ VE SUSUZLAŞTIRMANIN ROLÜ

4.1. Madencilik Sonrası Nedir?

Madencilik sonrası; bir maden sahasının ekonomik ömrünün tamamlanmasının ardından uygulanan rehabilitasyon, kapatma ve uzun vadeli izleme faaliyetlerini içerir (ICMM, 2007). Bu çalışmaların hedefi, madenin kapanışı sonrası çevreye ve topluma olan olumsuz etkileri en aza indirmek, araziyi güvenli ve yeniden değerlendirilebilir hâle getirmektir.

4.2. Susuzlaştırmanın Madencilik Sonrası Sürecine Katkısı

Atık Depolama Alanlarının Stabilitesi: Susuzlaştırılmış, su miktarı azalmış atık, baraj ya da depolama tesisinde uzun vadede istikrarı artırarak olası göçme ve sızıntı riskini düşürür.

Rehabilitasyon Kolaylığı: Yoğun kıvamlı veya kuru atıklar üzerinde bitkilendirme, toprak serme gibi işlemler, geleneksel çamura kıyasla daha az maliyetli ve daha pratik yapılır.

Uzun Vadeli İzleme ve Bakım: Su içeriği yüksek atık barajlarına göre daha düşük izleme ve bakım giderleri söz konusu olur.

Toplumsal Kabul ve İletişim: Çevre ve toplum sağlığını gözeten susuzlaştırma stratejileri, yerel halk ve sivil toplum nezdinde projeye olan güveni pekiştirir.

5. SUSUZLAŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ

Susuzlaştırma ekipman ve yöntemlerinin seçimi, madenin mineralojik özelliklerine, coğrafi konumuna ve ekonomik koşullarına bağlıdır.

5.1. Paste Thickener

Prensip: Atığın yüksek katı madde oranına sahip "paste" kıvamına getirilmesi.

Avantajlar: Yüksek su geri kazanımı, baraj stabilitesine katkı, mevzuat ve ÇED süreçlerinde düşük risk profili.

Dezavantajlar: Yüksek ilk yatırım maliyeti, özel dizayn ve mühendislik gereksinimi.

5.2. Dekanter Santrifüj

Prensip: Yüksek devirli tambur içinde katı-sıvı ayrımını sağlar.

Avantajlar: Sürekli ve otomasyona uygun çalışma, farklı cevher türlerine uyum.

Dezavantajlar: Bakım maliyetleri.

5.3. Filtre Pres

Prensip: Çamuru filtre plakaları arasında basınç altında susuzlaştırır, kuruya yakın "kek" elde edilir.

Avantajlar: Yüksek katı madde oranı, geri kazanılan suyun yüksek kalitesi, farklı otomasyon düzeylerinde modeller.

Dezavantajlar: Döngü sürelerinin uzunluğu, basınçlı çalışma nedeniyle yüksek bakım ihtiyacı.

5.4. Kuru (Dry) Yığın Depolama

Prensip: Susuzlaştırılarak elde edilen kuru veya yarı kuru atığın "yığın" şeklinde depolanması.

Avantajlar: Büyük baraj inşaat maliyetleri ve ÇED sürecindeki zorlukların minimize edilmesi.

Dezavantajlar: Proses tasarımı ve saha koşullarına uygunluk değerlendirmesi gerektirir.

6. YATIRIM MALİYETLERİ VE YASAL SÜREÇLERDE SUSUZLAŞTIRMANIN ETKİSİ

6.1 Atık Barajı İnşaat Maliyetleri

Baraj Gövdesi ve Zemin Hazırlığı: Toprak veya kaya dolgu, beton, jeoteknik analizler.

Sızdırmazlık ve Tahliye Yapıları: Jeomembran, kil tabakası gibi malzemeler.

Su Arıtma ve Geri Kazanım Sistemleri: ,Hem ilk yatırım hem de işletme sürecinde ek maliyet oluşturur.

6.2 Yasal Süreçlerin ve ÇED'in Maliyeti

ÇED Raporu Hazırlığı ve Onay Süreci: Uzun bürokratik prosedürler, uzman ekip ve laboratuvar çalışmaları gerektirir.

Kurumsal İzinler ve Bürokrasi: Çok sayıda kurum, resmi yazışma ve toplantı; ek zaman ve finansal yük doğurur.

Halkın Katılımı ve İtirazlar: Yerel toplulukların itirazları, ek masraf ve gecikmelere neden olabilir.

6.3. Susuzlaştırmanın Yatırım ve Yasal Süreçlere Etkisi

Daha Küçük Baraj veya Alternatif Depolama: Yoğun veya "kuruya yakın" atıklar, baraj ölçeğini düşürür ve inşaat ile bakım maliyetlerini azaltır.

Kolaylaştırılmış ÇED Süreci: Düşük çevresel risk taşıyan projeler, izinleri daha hızlı ve daha az itirazla alabilir.

Zaman ve Bürokrasi Yönetimi: Atık barajında ek revizyon veya fazladan güvenlik tedbiri gerektirmeyen projeler, yatırımcılara zaman kazandırır.

6.4. Toplam Yaşam Döngüsü Maliyeti (Life Cycle Cost-LCC)

İlk Yatırımın Yüksekliği: Bazı susuzlaştırma teknolojilerinde (örneğin filtre pres), büyük mühendislik yatırımları ve bakım giderleri vardır.

Uzun Vadeli Tasarruf: Düşük su tüketimi, daha küçük baraj, daha kolay rehabilitasyon ve daha düşük madencilik sonrası izleme maliyetleri toplamda avantaj getirir.

Bütüncül Yaklaşım Gerekliliği: Yalnızca ilk yatırım maliyeti değil, projenin tüm ömrü boyunca oluşacak masraflar göz önünde bulundurulmalıdır.

7. SUSUZLAŞTIRMA VE MADENCİLİK SONRASI İLİŞKİSİNDE KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR

İlk Yatırım Maliyetleri: Susuzlaştırma sistemlerinin maliyeti yüksek olabilir.

Teknoloji Seçimi ve Uzmanlık: Farklı madenler için farklı yöntemler uygundur. Yanlış seçim, maliyet ve verimlilik sorunlarına yol açar.

Mevzuat ve Kurumsal Koordinasyon: Farklı kurumlardaki çok aşamalı onay süreçleri, zaman ve kaynak kaybına neden olur.

Yerel Toplum Desteği ve İletişim: Halk ve STK'ların bilgilendirilmemesi veya endişelerinin giderilmemesi, itiraz süreçlerini tetikler ve projeleri geciktirir.

8. YURT İÇİ VE YURT DIŞINDA SUSUZLAŞTIRMANIN ARTAN ÖNEMİ VE ÖRNEK PROJE UYGULAMASI

Son yıllarda hem Türkiye'de hem de dünya genelinde, maden işletmelerinde atık ve cevher susuzlaştırmanın önemi hızla artmaktadır. Özellikle çevresel hassasiyetlerin artması, yüksek maliyetli atık barajlarının inşaat zorunluluğu ve yoğun bürokratik süreçler, susuzlaştırma teknolojilerini madencilik sektörü için kritik bir öneme taşımaktadır.

Susuzlaştırma teknolojilerindeki ilerlemeler, mühendislik uygulamaları ve otomasyon çözümleri sayesinde madenlerde ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda uluslararası başarılı uygulamalardan bir örnek olarak, TH Company tarafından gerçekleştirilen susuzlaştırma ve çamurumsu veya ince partiküllerin ayrıştırılması projesi dikkat çekmektedir.

Örnek Proje (TH Company): TH Company tarafından yürütülen bir projede, atıkların çamurumsu veya ince partiküllerin ayrıştırılması prosesi uygulanmıştır. Bu süreç, tesislerde yüksek kapasiteli hidrosiklonlar ve hızlı açılabilen otomatik filtre presleri içermektedir. Otomatik kek yıkama ve kurutma sistemleri sayesinde daha kuru ve daha stabil atıkların elde edilmesi mümkün hale gelmiştir. Projede kullanılan teknolojilerin özellikleri şöyledir:

- Yüksek kapasiteli ince partiküllerin ayrıştırılması sistemleri ile daha düşük debiler ve daha etkin filtreleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.
- Özelleştirilmiş filtre pres sistemleriyle yüksek oranda katı madde içeren atıklar oluşturulmaktadır.
- Sistemin sağladığı avantajlar arasında filtre preslerde daha düşük debiler ile çalışma, atık hacimlerinin azaltılması, daha düşük işletme giderleri ve baraj maliyetlerinde belirgin düşüş yer almaktadır.

Yurt dışı örneklerinden görüldüğü üzere, bu tür ileri teknolojiler ile donatılmış tesisler çevresel etkileri minimize ederken, madencilik projelerinin ekonomik sürdürülebilirliğine de katkı sağlamaktadır.

9. MADENCİLİK SONRASI SÜREÇLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Arazinin Yeniden Kazanılması: Susuzlaştırılmış ve stabilize edilmiş atık depolama alanları, tarım, ormancılık veya rekreasyon gibi farklı kullanımlara dönüşebilir.

Ekosistem Hizmetlerinin Geri Dönüşü: Su kaynaklarının etkin yönetimi ve atık hacminin azaltılması, bölgesel ekolojik dengelerin korunmasını destekler.

Uzun Vadeli Bakım ve İzleme: Kuru atık barajlarının kapatma sonrası yönetimi, ıslak atık barajlarına göre daha az maliyet ve risk taşır.

Gelişen Teknolojiler: Otomasyon, yapay zekâ, sensör tabanlı izleme sistemleriyle susuzlaştırma süreci daha etkin ve öngörülebilir hâle getirilebilir.

10.SONUÇ VE ÖNERİLER

Metal madenciliğinde susuzlaştırma ve madencilik sonrası aktiviteleri, madenin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan bütüncül bir yaklaşımla planlanmalıdır. Özellikle yüksek atık barajı inşaat maliyetleri ve ÇED gibi bürokratik süreçlerin meşakkatli ve pahalı olması, susuzlaştırma teknolojilerini daha cazip hale getirmektedir.

1. Bütüncül Planlama ve Uzun Vadeli Yaklaşım: Susuzlaştırma ve madencilik sonrası hedeflerinin baştan entegrasyonu, büyük atık barajı

riskini ve maliyetlerini düşürür, ÇED'i hızlandırır ve toplumsal kabulü artırır.

2. Doğru Teknoloji Seçimi: Paste thickener, dekanter santrifüj, filtre pres vb. teknolojiler arasındaki tercih; madenin jeolojik yapısı, işletme ölçeği ve rehabilitasyon planlarıyla birlikte değerlendirilmeli, mühendislik analizlerine dayandırılmalıdır.
3. Yasal Süreçleri Kolaylaştırma: Susuzlaştırma projeleri, çevresel riskin azalması sayesinde daha kolay onay alabilir. Paydaş iletişimi ve danışmanlık hizmetleri önemlidir.
4. Toplam Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (LCC): İlk yatırım maliyeti yüksek olsa da, uzun vadede daha düşük su tüketimi, küçük ölçekli baraj ve kolay rehabilitasyon avantajı, projeyi daha kârlı hâle getirebilir.
5. Sürdürülebilirlik ve Sosyal Sorumluluk: Çevre koruması, iş sağlığı ve güvenliği ile toplumsal faydayı dikkate alan işletmeler, sektörde rekabet gücünü korurken yasal ve sosyal riskleri de asgari düzeye indirir.

KAYNAKLAR

Resmî Gazete, 2015. Maden Atıkları Yönetmeliği, https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/07/20150715-3.htm. Erişim Tarihi:19.12.2024

Resmî Gazete 1985. 3213 Sayılı Maden Kanunu, https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/18785.pdf. Erişim Tarihi:19.12.2024

International Council on Mining & Metals (ICMM), 2007. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Mining.

MADEN MÜHENDİSLİĞİNİN GELECEĞİ

THE FUTURE OF MINING ENGINEERING

Ahmet İbuk, Halim Demirkan, Ergin Kahraman
Maden ve Yerbilimleri Profesyonelleri Mesleki Gelişim Derneği, Ankara

ÖZ: Madencilik insanlık tarihinde medeniyet seviyesinin gelişiminde en önemli rolü üstlenmiş bir sektördür. Mevcut durumda da, madencilik çok önemli bir rolü üstlenmektedir. Dünyadaki devam eden savaşların ve büyük politikaların arkasında madenlerin etkisi yüksektir. Teknolojideki değişime bağlı olarak gelecekte madencilikte uygulanan yöntemlerde de değişiklikler olacaktır. Madenlerin işletilmesinde en önemli görevi maden mühendisleri üstlenmektedir. Maden mühendisleri günümüzde birçok farklı sektörde farklı görevlerde yer almaktadır. Bütün mesleklerde olduğu gibi, madencilik sektörünün geleceğinde de hammaddeye olan ihtiyaç artışı ve teknolojinin değişiminin etkileri olacaktır. Maden mühendisleri gelişen ve değişen koşullara uyum sağlamak zorunda kalacaktır. Çalışma kapsamında, madencilik sektörünün ve maden mühendisliğinin mevcut durumu ve gelecekteki olası durumlar incelenmiştir. Elde edilen veriler, mesleki tecrübelerle birleştirilerek maden mühendislerinin mesleki gelişimine katkı sağlayacak bilgiler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gelecekte Madencilik, Maden Mühendisliği, Mesleki Gelişim

ABSTRACT: *Mining is a sector that has played the most important role in the development of civilization in human history. In the current situation, mining plays a very important role. The influence of mines is high behind the ongoing wars and major policies in the world. Depending on the changes in technology, there will be changes in the methods applied in mining in the future. Mining engineers play the most important role in the operation of mines. Today, mining engineers are involved in different tasks in many different sectors. As in all professions, the future of the mining sector will be affected by the increase in the need for raw materials and the change in technology. Mining engineers will have to adapt to developing and changing conditions. Within the scope of the study, the current situation of the mining sector and mining engineering and possible future situations were examined. The data obtained are combined with professional experiences and*

information that will contribute to the professional development of mining engineers is presented.

Keywords: *Mining in the Future, Mining Engineering, Professional Development*

1. GİRİŞ

Madencilik medeniyetin gelişiminde oldukça önemli bir rol üstlenmiştir. İnsanlık tarihi geldiği medeniyet seviyesine madenleri işleyerek (Cilalıtaş Devri, Bakır Devri, Tunç Devri, Demir Devri) ulaşmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. İlkçağlar ile maden ve metalürji ilişkisi (Kaya, 2022)

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td rowspan="3">Taş Devri</td><td>Eski Taş Devri
Yontma Taş Devri
Paleolitik Çağ</td></tr>
<tr><td>Orta Taş Çağı
Avrupa’ da Mezolitik Çağ
Ön Asya’ da Protoneolitik Çağ</td></tr>
<tr><td>Cilalı Taş Devri
Neolitik Kültür Evresi</td></tr>
<tr><td></td><td>Bakır Devri</td><td>Bakır Taş Çağı
Kalkolitik Çağ
Maden Taş Çağı</td></tr>
<tr><td rowspan="2">İlkçağ Antik tarih</td><td>Tunç Devri</td><td>Erken Tunç Çağı
Orta Tunç Çağı
Geç Tunç Çağı</td></tr>
<tr><td>Demir Devri</td><td></td></tr>
</table>

Günümüzün en önemli konularından olan ekonomi konusunda da madenlerin/madenlerin önemi yadsınamaz düzeydedir. Madenler birçok sektöre girdi sağlamaktadır. Bunların başında demir çelik sektörü gelmektedir. Demir-çelik sektörünün var olabilmesi için; demir cevheri,

krom cevheri ve kömüre ihtiyaç duyulmaktadır. Madenler, inşaat sektörü için de hayati önem taşımaktadır. Agrega/kum-çakıl, alüminyum ve demir inşaat sektörünün sürdürülebilirliği için oldukça önem arz etmektedir. Bunların yanında enerji sektörü, savunma sektörü, kimya sektörü, vb. gibi bütün sektörlerde madenlerin önemi büyüktür. Belirtilen nedenlerden dolayı, madencilik sektörünün ülkemiz ve Dünya için önemi ciddi düzeydedir.

Madenlerin ekonomiye kazandırılmasında en önemli görevi üstlenen meslek maden mühendisliğidir. Maden mühendisi; diğer yetkin meslek grupları ile koordineli olarak maden yataklarının aranması, bulunması, raporlanması, hazırlanması, fizibilitesi, işletilmesi ve son ürün haline gelinceye kadar olan tüm ana süreçler ve alt süreçleri kanun, tüzük ve yönetmeliklere ve standartlara uygun olarak hedef plan dahilinde katılan/yöneten akademik yetkinliğe sahip uzman kişidir. Maden mühendisliği yüksek disiplin isteyen, birtakım bilinmeyenlerin ve riskleri içeren süreçlerin yönetilmesini gerektiren bir meslektir. Multidisipliner bir meslek olan maden mühendisinin yetiştirilmesi önemli bir konudur. Ülkemizde maden mühendisliği eğitimi veren lisans programları mevcuttur.

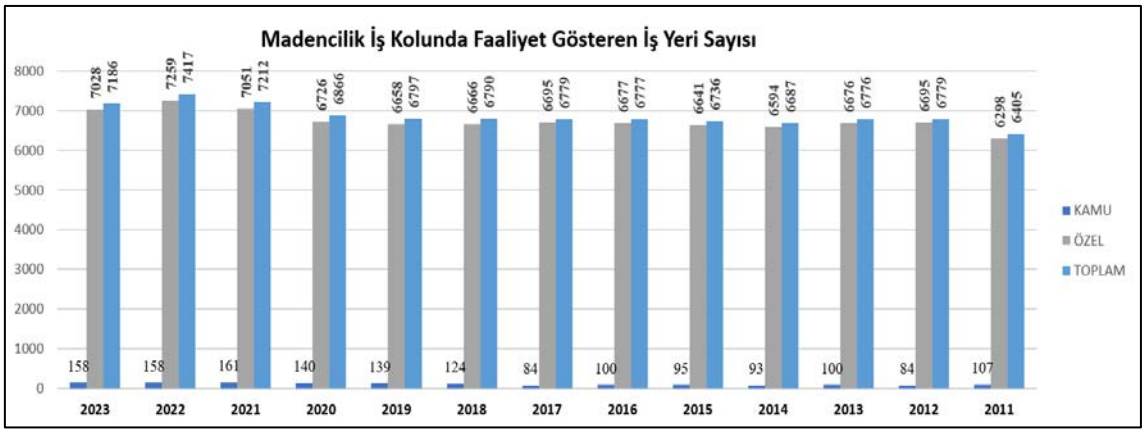
Madenlerin üretilmesinde kullanılan teknikler ve ekipmanlar, madenlerin ekonomik ve stratejik önemleri, vb. konular gelişen teknoljiye ve zamanın ihtiyaçlarına göre değişim göstermektedir. Bu değişimin doğru bir şekilde yönetimi için maden mühendisi mesleğindeki kişlerin de bu değişimi takip etmeleri ve bu değişime göre kendilerini yetiştirmeleri/ayak uydurmaları gerekmektedir.

Çalışma kapsamında madencilik sektörünün mevcut durumu ve gelecekteki muhtemel durumu genel hatları ile değerlendirilmiş ve maden mühendisliği mesleğinin geleceği üzerine elde edilen çıktılar üzerinden değerlendirme ve öneriler yapılmıştır.

2. ÜLKEMİZDEKİ MADENCİLİK SEKTÖRÜNÜN GÜNCEL DURUMU

2.1. Madencilik Sektörünün Güncel Durumu

Ülkemizde mevcut durumda, kömür, metalik madenler, endüstriyel hammaddeler, petrol, doğalgaz, mermer işletmeciliği, nadir toprak elementleri işletmeciliği gibi birçok farklı alanda yeraltı ve yerüstü madencilik yöntemleri ile madencilik çalışmaları yapılmaktadır. MAPEG verilerine göre, 2023 yılı itibariyle madencilik iş kolunda toplam 7186 işyeri bulunmakta olup, bunların % 98,5' i özel sektör işyeridir (Şekil 1). Toplam çalışan sayısı 2023 yılı için 143.504 olarak verilmiştir. (URL-1, 2025).



Şekil 1. Madencilik iş kolunda faaliyet gösteren işyeri sayısı (URL-1, 2025)

Ülkemizdeki mevcut durumda madencilik faaliyetleri olarak, geleneksel sistemler ve mekanize sistemler kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, Dünyanın farklı bölgelerinde madencilikte uygulanan bütün yöntem ve sistemler ülkemizde de uygulanmaktadır. Ülkemizde maden sahaları genel olarak çok derin olmayan (500 metreden daha az derin olan) kısımlarda yapılmaktadır. Ülkemizde az sayıda 1000 metre civarında derinlikte madencilik faaliyetlerinin yapıldığı maden

sahaları bulunmaktadır. Madencilik faaliyetleri ve çevre yönetim süreçleri bakımından uygulamada sorunlarla karşılaşılmaktadır. Sektörde iş kazalarının azaltılması ile ilgili yapılmış olan mevzuat çalışmalarına (6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve ilgili yönetmeliklerin yayımlanması) rağmen, iş kazası sayılarında arzu edilen seviyelere gerileme sağlanamamıştır. Son yıllarda madencilik alanında otomasyon, yapay zeka kullanımı, vb. uygulamaların kullanımına ülkemizdeki maden işletmelerinde başlanılmıştır. Bu uygulamalara; yerüstünde iş makinelerinin ve kamyonların trafik yönetim sürecinin yapay zeka ile yapılabilmesi, cevher hazırlama tesislerindeki parametrelerin kontrollerinde yapay zeka kullanımı, otomasyon sistemleri sayesinde yerüstünden yeraltındaki konveyör motorlarının ayarlanabilmesi gibi örnekler verilebilir.

2.2. Maden Mühendisinin Mevcut Çalışma Koşulları

Maden mühendislerinin genel çalışma alanları kamu ve özel sektörde madencilik ve yan faaliyetlerde, YTK' larda ve mühendislik ofislerinde, vb. birçok alanda farklı görev ve hizmetlerde çalışmaktadır (Çizelge 2). Maden işletmeleri genellikle yerleşim yerlerine uzak alanlarda olduğundan, bazı mühendislerin işletmelerin sosyal tesislerinde konaklamaktadır. Maden mühendisleri, genellikle madenin bulunduğu yöredeki insanlarla çalışmak zorundadır. Özellikle işletmeler bünyesinde yapılan faaliyetlerde, bütün mühendislik disiplinlerinden işlerle karşılaşmaktadır. Sosyal hayatı çalıştığı ve bulunduğu çevreye göre değişkenlik göstermektedir. Maden mühendisleri zorlu iklim koşullarına uyum göstermek zorundadır.

Maden mühendisleri çalışma koşullarından kaynaklı zorlukların yanında, çalıştıkları alanlarda yetkilendirme ve görevlendirmeleri neticesinde, mevcut maden projelerinin tehlike ve riskleri karşısında sorumluluk olgusundan kaynaklı olarak yargılanmakta ve ciddi

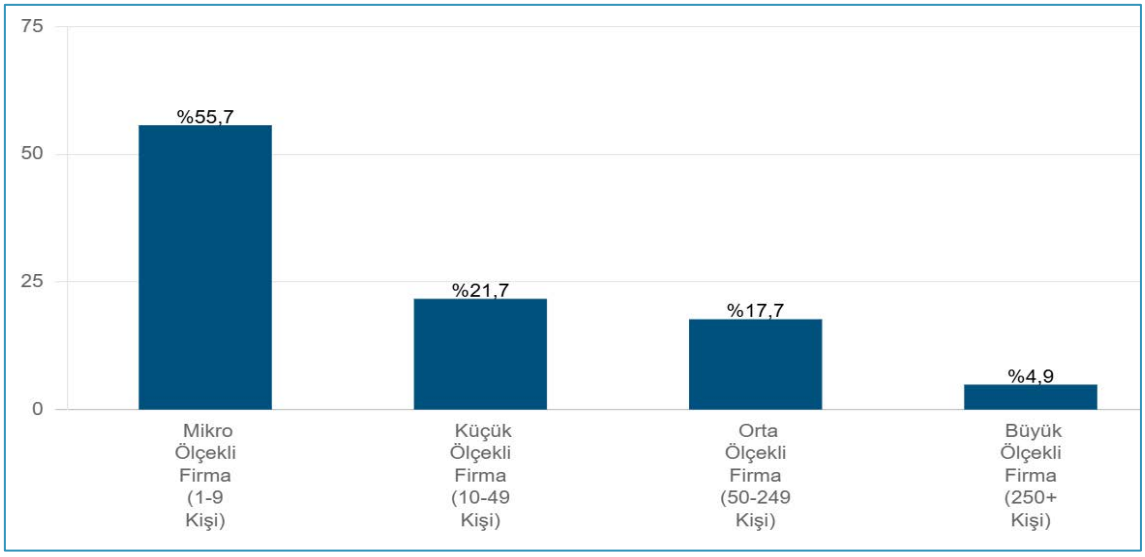
mağduriyetler yaşamaktadır. Kamuoyunda maden mühendisliği ve madencilik ile ilgili yaratılan kötü algı nedeniyle maden mühendisliğine ilgi gittikçe azalmaktadır.

Çizelge 2. Maden mühendislerinin genel çalışma alanları

İşletmeler bünyesinde (Özel/kamu)	➢ Daimi nezaretçi ➢ Teknik eleman ➢ Vardiya Amiri/mühendisi ➢ Havalandırma mühendisi ➢ Kaya mekaniği mühendisi ➢ Planlama mühendisi ➢ Birim/ünite/ocak yöneticiliği ➢ İş güvenliği uzmanı ➢ Satın alma ve malzeme yönetimi ➢ İşletme yöneticisi/üst yöneticisi, vb.
Bakanlıklar, vb. kamu kuruluşlarında	➢ Müfettiş yardımcısı, müfettiş, başmüfettiş ➢ Çeşitli departmanlarda farklı görevlerde ➢ Üniversitelerde akademisyen olarak
OSGB' ler bünyesinde	İş Güvenliği Uzmanı
YTK' lar ve mühendislik ofislerinde	➢ Yetkilendirilmiş tüzel kişilik ➢ Plan-proje mühendisi
Satış ve pazarlama firmalarında	➢ Satış ve pazarlama mühendisi ➢ Teknik destek mühendisi ➢ İşletme sahibi
Bilirkişilik çalışmaları	➢ Maden mühendisi ➢ İş güvenliği uzmanı

Maden mühendisliği mezunlarının çalışma istatistikleri ile ilgili T.C. Cumhurbaşkanlığı İnsan Kaynakları Ofisi-Üniveri kayıtları incelendiğinde, maden mühendisinin bir işte ortalama çalışma süresinin yaklaşık 20 ay civarında olduğu, işgücü piyasasında kayıtlı çalıştıkları ortalama işyeri

sayısının ortalama 5 olduğu görülmektedir. Mezunların işlerinden ayrıldıktan sonra başka bir işte çalışmaya kadar geçen sürenin dağılımları incelendiğinde; % 18,9' nun ilk 1 ay içerisinde, % 60,6' sının 1-6 ay, % 12,9' nun 6-12 ay ve %7,6' sının 12 aydan daha fazla sürdüğü, görülmektedir (URL-2, 2025). Maden mühendislerinin çalıştıkları firmalardaki kişi sayısına göre oranları da Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Maden mühendisi mezunlarının yurt içindeki mevcut işlerinde çalıştıkları firmalarda istihdam edilen kişilerin toplam sayısına göre dağılımları (URL-2, 2025)

2.3. Maden Mühendisliği Eğitiminin Güncel Durumu

Öğrenci Seçme ve Yerleştirme Merkezi (ÖSYM)' nin 2024 yılı verilerine göre, ülkemizde mevcut durumda maden mühendisliği eğitimin aktif olarak verildiği 24 bölüm bulunmaktadır (ÖSYM, 2025). Bu bölümlere yerleştirilen ve mezun olan öğrenci sayılarında son yıllarda ciddi azalma meydana gelmiştir. Maden mühendisliği bölümü birçok etkenden (istihdam sorunları, büyük maden kazaları, toplumdaki olumsuz algı, tercih aşamasına getirilen 300.000 barajı, vb. nedenler) dolayı tercih edilemez duruma gelmiştir. Bu nedenle, yıllara göre maden mühendisliği alanından mezun olan öğrenci

sayılarında azalmalar meydana gelmiştir. Maden mühendisliği bölümünün tercih edilme oranlarına ilişkin veriler Çizelge 3' de verilmiştir.

Çizelge 3. Maden mühendisliğinin tercih edilme oranlarına ilişkin bazı yıllık veriler (URL-3,2025)

Yıl	Maden Müh. kontenjanı	Başvuran öğrenci sayısı	Yerleşen öğrenci sayısı	Tercih Oranı (%)
2010	1500	1200	900	60.00
2011	1600	1400	950	59.38
2012	1700	1800	1100	64.71
2013	1800	2000	1300	72.22
2014	1900	2200	1400	73.68
2015	2000	2500	1600	80.00
2016	2000	2000	1200	60.00
2017	1800	1500	750	41.67
2018	1700	1200	600	35.29
2019	1500	1000	450	30.00
2020	1400	900	300	21.43
2021	1200	800	250	20.83
2022	1100	700	200	18.18
2023	1000	600	150	15.00

Maden mühendisliği eğitimi içeriklerinde sektördeki değişimlere göre bazı değişimler olmuştur, fakat; değişimler sektör beklentisini karşılayacak düzeyde değildir. Sektörün maden mühendisliği eğitiminden beklentileri genel olarak; mezun olmuş kişilerin işyerlerinde çalışmaya başladıklarında iş-zaman etüdü yapabilmesi, raporlayabilme becerisi, temel proses teknolojilerinden bilgi sahibi olması, analitik düşünebilmesi, yöneticilik temel bilgisine, madencilik ve İSG ile ilgili temel mevzuat bilgisine asgari düzeyde sahip olması ve madencilik sektöründe iş hayatı sırasında karşılaşılması muhtemel zorlukları/tehlikeleri öğrenmiş olması, okulda aldığı eğitimin mevcut madencilik teknolojilerini kapsayacak şekilde güncel olması, vb. olarak detaylandırılabilir. Yapılan incelemelerde, üniversitelerin maden bölümlerinde laboratuvar ve akademisyen yeterlilikleri ile ilgili genel

bir sorun bulunmadığı düşünülmektedir. Son yıllarda, üniversitelerde dış paydaş toplantıları gerçekleştirilmesi, bu toplantılarda sektör temsilcilerinin taleplerinin alınmasına bağlı olarak ders içeriklerinde birçok üniversitede değişiklikler yapılmıştır. Ancak, öğrencilerin daha fazla endüstri-üniversite işbirliklerinde sahada aktif olarak görevlendirilmesi, staj süresi ve etkinliği gibi konularda yetersizlikler bulunmaktadır.

Maden mühendislerinin ders içeriklerinin güçlendirilmesi, maden mühendisliği uygulama alanı ile tanıtıcı etkinlikler düzenlenmesi ve bu konularla ilgili üniversite-sanayi işbirliğinin sağlanması gerekmektedir. Staj süreleri ve adetlerinin tüm üniversitelerde standart bir hale getirilmesi; öğrencilerin yeraltı işletmesi, açık işletme ve cevher hazırlama/zenginleştirme deneyimleyecek şekilde mezun olmasının sağlanması gerekmektedir (Kaymakoğlu, vd., 2022).

Maden mühendisliğinin okul sonrası sürekli mesleki gelişimlerini sağlayabilecek programlar (webinar, sempozyum, kongre, panel, vb.) ve bu programlar için uygun ortamları sağlayan madencilikle ilgili sivil toplum kuruluşları ve kamu kuruluşları (TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Türkiye Madenciler Derneği, Türkiye Kömür Üreticileri Derneği, vb.) bulunmaktadır.

3. MADEN MÜHENDİSLİĞİNİN GELECEĞİ

3.1. Maden Sektörünün ve Maden Mühendisliğinin Geleceği

Madencilikten elde edilen mineraller yaşamın her alanında kullanılmaktadır. Dünyadaki nüfus artışına ve diğer nedenlere bağlı olarak gelecekte minerallere/madenlere olan ihtiyaç daha da artacaktır. Bu yüzden, maden sektörü her dönem olduğu gibi gelecekte de, sanayinin gelişmesi ve hayatın sürdürülebilirliği için en önemli sektör olacaktır. Maden sektörünün

geleceğinin iyi analiz edilebilmesi için gelecekte ihtiyaç duyulacak hammaddelerin belirlenmesi ya da pazarın bilinmesi gerekmektedir. Her dönem olduğu gibi gelecekte de enerji hammaddelerine (doğalgaz, kömür, vb.) olan ihtiyaç devam edecektir. Altının önemli bir finans aracı olması nedeni ile altına olan ihtiyacın devam edeceği ve artış göstereceği öngörülmektedir. Gelişen teknoloji ve yapay zeka uygulamaları enerjiye olan talebi daha da artıracaktır. Yapay zeka bütün mühendislik alanlarında olduğu gibi madencilikte de etkili olacaktır. Otomasyon, maden tasarım süreçlerinin optimizasyonu ve veri analitiği gibi alanlarda yapay zeka, maden mühendislerinin işlerini daha verimli hale getirecektir. Aynı zamanda süreçlerin hızlanmasına ve maliyetlerin düşmesine yardımcı olacaktır. Bunun yanında, teknolojik ekipman yapımında etkili olacak hammaddelere (nadir toprak elementleri, vb.) ihtiyacın artacağı ve özellikle savaş endüstrisinin ihtiyacı olan kritik hammaddelerin önemli olacağı tahmin edilmektedir. Tüm bu etkenler dahilinde madencilik çalışmaları ülkemizde ve Dünyada bu doğrultuda yönlenecektir (İbuk, 2024).

Maden kaynakları sınırlı kaynaklar olduğundan, üretim çalışmalarının devam etmesine bağlı olarak, yüzeye yakın ve daha kolay üretilebilir maden rezervlerimiz ve tenör değerleri azalacaktır. Hammadde ihtiyacı devam edeceğinden, daha derinlerde ve daha zor/daha özel madencilik teknikleri ile çalışacak maden işletmeleri gelecekte yaygınlaşacaktır. İşletme maliyetleri artacaktır. Hatta; hammadde ihtiyacının karşılanabilmesi için derin deniz madenciliği ve uzay madenciliği gündemi daha fazla meşgul edecek, bu kapsamda çalışmalar yapılacaktır. Maden atıklarının değerlendirilmesi, zenginleştirme süreçlerinin iyileştirilmesi ve daha az suyun kullanıldığı, daha az karbon salınımı olan sistemlerin kullanımı önem kazanacaktır.

Maden mühendisleri de, madencilikteki bu değişken hususlara ilave olarak teknolojinin gelişiminin getireceği diğer etkenleri de birlikte

yöneterek, iş/meslek yaşamını devam ettirecektir. Daha fazla veri ve yapay zekanın kullanılabildiği sistemlerde çalışacaktır. Çevre, sağlıklı ve güvenli madencilik, sürdürülebilirlik, finansman kaynaklarının doğru kullanımı, vb. gibi birçok konuda maden mühendislerinin gelişim sağlayacakları/sağlamak zorunda oldukları düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR

i. Gelecekte geleneksel madencilik yöntemlerin ötesinde, daha yenilikçi ve daha çevre odaklı yaklaşım geçerli olacaktır. Maden mühendislerinin mesleki gelişimlerini buna göre sağlamaları önem arz etmektedir.
ii. Hem İSG yönünden güvenli yönetim hem de maliyetlerin azaltılabilmesi için otonom madencilik araçlarının ve uzaktan izleme sistemlerinin kullanımı sağlanacaktır. Bu sistemler sayesinde, riskli işlemlerin insansız sistemlerle gerçekleştirilebilmesi mümkün olabilecektir.
iii. Gelecekte madencilikte çevresel etkilerin en aza indirilmesi, kaynakların verimli kullanımı önem kazanacak. Bu kapsamda sürdürülebilir madencilik ve döngüsel ekonomi kavramları ön plana çıkacak, süreçlerin bu kriterlere yönetilmesi gerekecektir.
iv. Gelecekte atıkların en aza indirildiği, su ve enerji tüketiminin optimize edildiği maden sahaları görebiliriz.
v. Bir maden mühendisi olarak, teknolojiyi yakından takip etmenin yanında, çevre dostu projeler geliştirmek ve bu yeni normlara uygun çözümler üretebilmek, mesleğin en kritik becerilerinden biri olacaktır.
vi. Gelecekte maden mühendisinden beklenen yetkinlikler; yeterli teknik bilgi, iyi bir iletişim becerisi, iyi düzeyde yabancı dil bilgisi, çevreye

duyarlılık, sosyal sorumluluk bilinci, teknolojik altyapı, bilgi ve teknolojinin takibi ve sürdürülebilirlik bakış açışına sahip olmaktır.

KAYNAKLAR

İbuk, A., 2024. Maden Mühendisliğinin Geleceği, Türkiye 2.Madencilik Kongresi ve Fuarı, Ankara.

Kaya, M, 2022. Türkiye'de Mühendislik ve Mimarlığın 250 yılı Uluslararası Sempozyumu, İstanbul, ss.1-11.

Kaymakoğlu, B., Deniz, T. ve Kara, T., 2022. Türkiye' de Maden Mühendisliği Eğitimine İstatiksel Bakış, Bilimsel Madencilik Dergisi, 2022, 61 (4), 238.

T.C. Ölçme, Seçme ve Yerleştirme Merkezi Başkanlığı (ÖSYM), 2025.

URL-1, 2025. https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik [Erişim Tarihi: 01.03.2025].

URL-2, 2025. https://www.cbiko.gov.tr/projeler/univeri?process=sectionProfile&sectionProfile=33&variables = [Erişim Tarihi:23.04.2025]

URL-3, 2025. https://yokatlas.yok.gov.tr/lisans-anasayfa.php [Erişim Tarihi: 03.03.2025].

OCAK İÇİ NAKLİYE YOLU ENERJİ OPTİMİZASYONU: BİR AÇIK METAL İŞLETMESİ UYGULAMASI

IN-PIT HAULAGE ROUTE ENERGY OPTIMIZATION: AN OPEN-PIT METAL MINE OPERATION CASE STUDY

Deniz Dündar
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir

Adnan Konuk
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ÖZ: Açık ocak maden işletmelerinde, en büyük maliyet kalemlerinden birisi, kazılan cevher ve pasanın kamyon ile döküm alanlarına nakledilmesi sırasında tüketilen enerji (akaryakıt) maliyetleridir. Enerji maliyetlerini azaltabilmek için açık ocak nakliye operasyonları ve rotalarının optimizasyonu gerekmektedir. Bu çalışmada, Acacia Maden İşletmeleri Gökırmak açık ocak bakır madeninde kamyonların farklı nakliye yolları rotalarındaki enerji (akaryakıt) tüketiminde, nakliye mesafesi, kot farkı, toplam viraj sayısı, toplam viraj mesafesi, yol eğimi, ortalama hız ve kamyon motor devri gibi parametrelerin etkisi çoklu regresyon analizi yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kot farkı, toplam viraj mesafesi ve ortalama hız faktörlerinin toplam yakıt tüketimi üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışma benzer ölçekteki açık ocak maden işletmelerinde toplam yakıt tüketimini minimize edebilecek nakliye rotalarının seçiminde ve yeni yapılacak nakliye yollarının tasarlanmasında kullanılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Açık Ocak Madenciliği, Nakliye Enerji Optimizasyonu, Çoklu Regresyon Analizi, Kamyonla Nakliye

ABSTRACT: *One of the biggest cost items in open pit mining operations is the energy (fuel) costs consumed during the transportation of excavated ore and waste to dumping areas by trucks. Optimization of open pit transportation operations and routes is required to reduce energy costs. In this study, the effects of parameters such as transportation distance, elevation difference, total number of turns, total turn distance, route gradients, road slope, average speed and truck RPMs on the energy (fuel) consumption of trucks in different transportation routes in Acacia Mining*

Operations Gökırmak open pit copper mine were investigated using multiple regression analysis method. As a result of the analyses, it was seen that the elevation difference, total turn distance and average speed factors directly affect the total fuel consumption. This study can be used in selecting transportation routes that can minimize total fuel consumption in open pit mining operations of similar scale and in designing new transportation routes.

Keywords: *Open-Pit Mining, Open-Pit Haulage Optimization, Multiple Regression Analysis, Truck Haulage*

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Açık ocak madenlerinin üretim sürecinde büyük miktarda cevher, kaya ve hafriyat nakliyesi söz konusudur ve nakliye maliyeti toplam üretim maliyetinin %40 ila %60'ını oluşturmaktadır, bu da madenin ekonomik faydaları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Xie, Y. vd., 2022). Nakliye maliyetlerinin büyük bir kısmını ise enerji maliyetleri oluşturmaktadır. Bu yüzden maden işletmelerinde nakliye ve enerji maliyetlerinin en düşük olmasını sağlayacak şekilde optimizasyon yapılması çok önemli bir husustur.

Açık ocak madenciliğinde farklı arazi koşullarına kolayca uyum sağlayabilmeleri, operasyonel olarak kolay koordine edilebilmeleri ve operasyonel esneklik sağlaması nedenleriyle, nakliye ekipmanı olarak genellikle dizel akaryakıt kullanan kamyonlar tercih edilmektedir. Bu yüzden üretim maliyetlerini düşürebilmek için kamyonların yakıt tüketimini düşürücü önlemler alınmalıdır.

Yapılan literatür araştırması sonucunda, enerji (yakıt) maliyetlerini en küçükleyecek açık ocak nakliye yolu optimizasyonunda etkili olan parametreler araştırıldığında;

- Nakliye yolu özelliklerinden yol uzunluğu, kot farkı, yol eğimi, yol direnci ve kalitesi, kurba ve/veya virajların uzunluğu, sayısı ve yarı çapı vb. (Wicaksana vd., 2011; Vukovic, 2013; Sahoo vd., 2014; Soofastaei, vd., 2016; Menezes ve Torres, 2021; Wang vd., 2021; Torres ve Paniz, 2022; Xie vd., 2022; Meneses ve Sepúlveda, 2023; Das vd., 2024),
- Nakliye aracı özellikleri (yük miktarı, hız, motor devri, rölantide kalma süresi vb. (Vukovic, 2013; Sahoo vd., 2014; Siami-Irdemoosa ve Dindarloo, 2015; Soofastaei, vd., 2016; Menezes ve Torres, 2021; Torres ve Paniz, 2022; Xie vd., 2022),

Olmak üzere iki grupta toplamanın mümkün olduğu belirlenmiştir. Literatürde, enerji (yakıt) maliyetlerini en küçükleyecek açık ocak nakliye yolu optimizasyonunda, regresyon modelleme, doğrusal programlama, yapay sinir ağları ve genetik algoritmaların kullanıldığı belirlenmiştir. Literatür araştırması sonucunda enerji (yakıt) maliyetlerini en küçükleyecek açık ocak nakliye yolu optimizasyonunda çoklu regresyon modellerinin araştırılmadığı tespit edildiğinden, nakliye yolu ve nakliye aracı özelliklerini dikkate alan çoklu regresyon modellerinin araştırılmasına karar verilmiştir. Yapılan literatür araştırmalarında, toplam viraj sayısı ve toplam viraj mesafesinin toplam yakıt tüketimi üzerindeki etkisine değinilmediği belirlenmiştir.

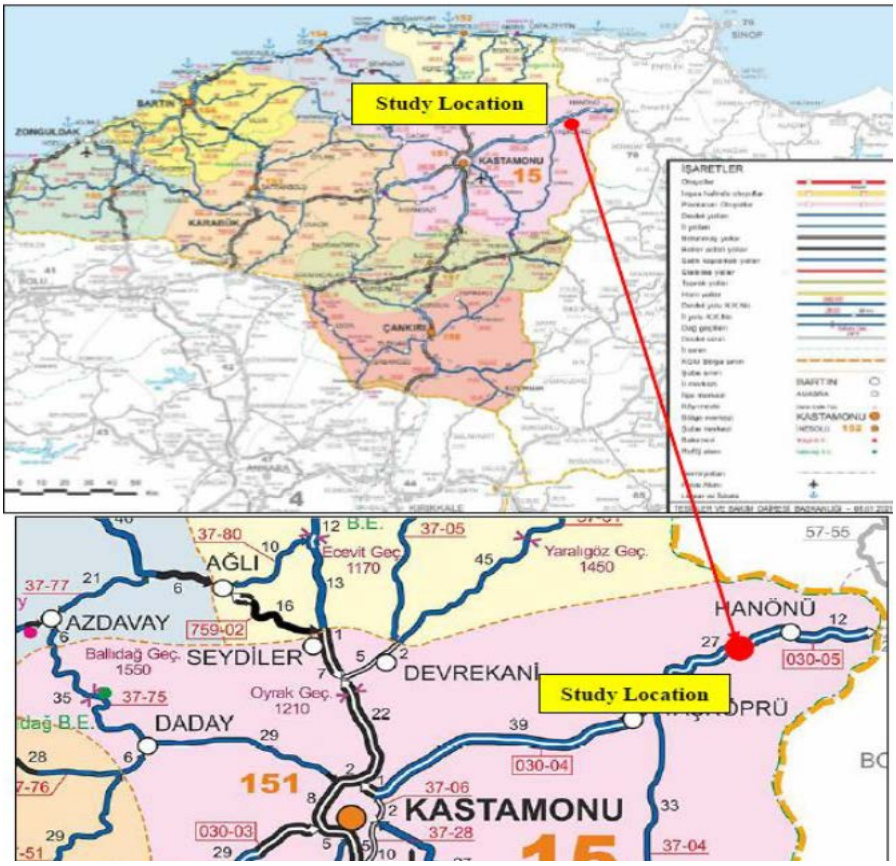
Bu çalışmada, Acacia Maden İşletmeleri Gökırmak açık ocak bakır madeninde kamyonların farklı nakliye yolları rotalarındaki enerji (akaryakıt) tüketiminde, nakliye mesafesi, kot farkı, toplam viraj sayısı, toplam viraj mesafesi, yol eğimi, ortalama hız ve kamyon motor devri gibi parametrelerin etkisi çoklu regresyon analizi yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

2.1.1. Çalışma sahası

Bu çalışmada, Acacia Maden İşletmeleri A.Ş.'nin Kastamonu il merkezinin 70 km doğusunda bulunan Hanönü ilçesi sınırlarındaki GÖKIRMAK BAKIR MADENİ'nde mevcut durumda söz konusu olan çalışma kotlarındaki yol güzergahlarında açık ocak nakliye yolu enerji optimizasyonunda etkili olan değişkenleri belirlemek için araştırmalar yapılmıştır (Şekil 1).

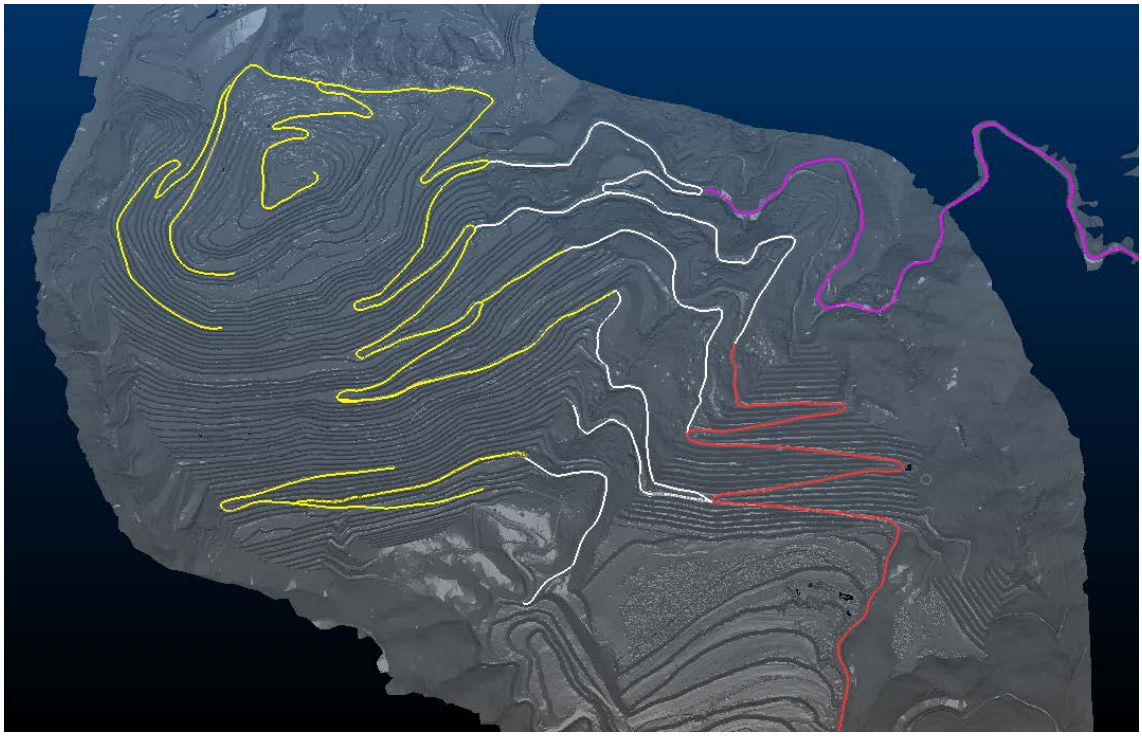


Şekil 1. Çalışma sahası

Açık ocak sahasının en yüksek noktası 960 m ve en düşük 330 m kotlarındadır (Şekil 2).

Şekil 2. Açık ocak sahası

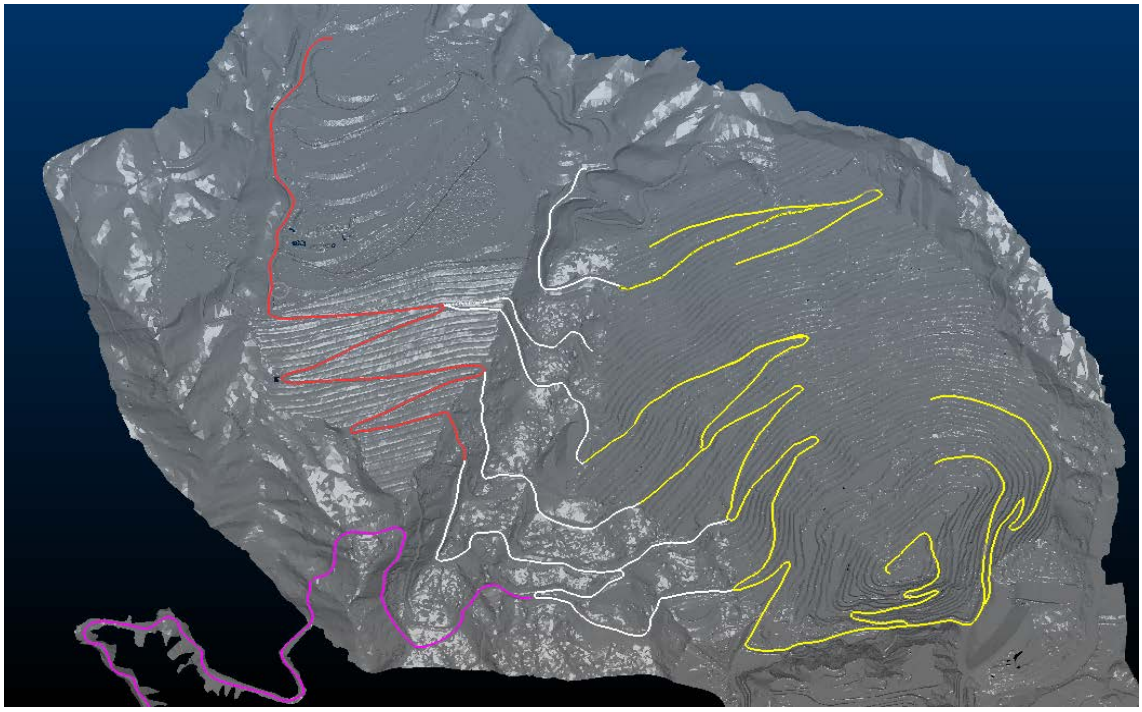
Gökırmak Bakır Madeni İşletmesinde biri dökümü bitirilip rehabilitasyonu tamamlanmış 1. döküm sahası (Şekil 2) ve mevcut durumda döküme devam edilen 2. bir döküm sahası bulunmaktadır. Ayrıca sahadan malzeme taşınan diğer bir döküm olarak da cevher stok sahası bulunmaktadır. Bu döküm sahalarına malzeme ocak içi, saha dış yolları ve pasa sahası yolları kullanılarak taşınmaktadır. Saha dışı yollar ve cevher nakil yolu sabittir ve ocak içi yollar kazı çalışmasına uygun olarak değişmektedir. Açık ocağın yapısı, yüzey alanının çok büyük olması ve kazı bölgelerinin nakliye yoluna konumunun dinamik olarak değişkenlik göstermesi nedeniyle ocak içi yolları ve nakliye güzergahları çalışmaya uygun olarak değişkenlik gösterir. Ocak içi yolların uzunluğu 300 m – 3500 m arası değişmekte olup yaklaşık toplam 10500 metrelik ocak içi yol ağı bulunmaktadır (Şekil 3). Şekil 3. ve Şekil 4. de görüldüğü üzere saha içi yolları sarı renkli çizgilerle ve saha dış yollar beyaz renkli çizgilerle gösterilmiştir. Saha içi yolları eğimleri %5-%10 arasında değişmektedir. Ortalama eğim %7 dir.



Şekil 3. Ocak içi yol ağı üstten görünüşü

Ocak kazı bölgeleri dışında kalan 6 farklı yol güzergahı ile döküm sahası yollarına bağlanır. Uzunlukları 450m – 2200m arası değişen toplam 6000 metrelik saha dışı yol ağı bulunur. Saha dış yol eğimleri %6,5 - %8 arasında değişir. Burada saha dış yollarındaki bazı güzergahlar 2-3 ay gibi çok kısa zaman dillimlerinde kullanılır. Sürekli kullanımda olan saha dış yolların ortalama eğimi %7,5 tur.

Pasa sahası yolları, mevcut dökümde genellikle 2 farklı kotta zaman zaman (yapılan moment hesabına ve operasyonel nedenlerden dolayı) daha fazla kotta yapılan döküme tek ana yol bulunur. Şekil 3 ve Şekil 4'den görüldüğü gibi pasa sahası yolları kırmızı renkli çizgilerle gösterilmiştir. Dökümlere ayrılan veya sahadan gelen yollar bu ana yola bağlanıp, bu yoldan ayrılır. Döküm yolu mesafesi mevcut döküm yüksekliğinde yaklaşık 3500 metredir, zamanla projeye göre yükselmeye devam etmektedir. Pasa sahası yolları eğimleri %6,5 - %8,5 arasında olup ortalama %7,5 tur.



Şekil 4. Maden nakliye yol ağı

Cevher zenginleştirme tesisine giden cevher nakil yolu sabittir. Şekil 3 ve Şekil 4 de görüldüğü üzere cevher zenginleştirme tesisine giden yol pembe çizgilerle gösterilmiştir. Tesise tek bir yoldan nakil yapılmaktadır. Bu yolun mesafesi 4000 metredir. Cevher nakil yolu eğimi ortalama %4'tür.

2.1.2. Nakliye kamyonlarının özellikleri

Sahada kullanılan ana nakliye ekipmanı dizel akaryakıt kullanan hafriyat kamyonlarıdır. Sahada kullanılan kamyonlar Mercedes Arocs marka olup 3 farklı motor gücündedir. Kamyon motor güçleri 420-480 hp arası değişmektedir. Kamyon kasa hacimleri 22 – 26 m^3 arasında değişmektedir. Kamyonlara ortalama 17 m^3 malzeme taşınmaktadır. Sahada ortalama 125 kamyon çalışmaktadır ve dönemlik olarak kazı planına göre artış azalış göstermektedir. Bu tezde veri toplamak için kullanılan kamyonlar 480 hp (beygir gücü) gücündedir (Şekil 5).

Şekil 5. Açık ocakta kullanılan nakliye kamyonu

2.1.3. Toplam yakıt tüketimini etkileyebilecek değişkenler

Açık ocak madenciliğinde kamyonla nakliyatta kamyonların yakıt tüketimini (TYT) temel olarak, nakliye yolu ve kamyonların teknik-kullanım özellikleri ile ilgili değişkenleri etkileyebileceği düşünülmektedir. Uygulama çalışması yapılan Gökırmak Bakır Madeni açık işletmesinde yapılan araştırmalar sonucunda aşağıdaki değişkenler belirlenmiştir

Toplam yakıt tüketimi (TYT): Toplam yakıt tüketimi değişkeni mobiliz sistemi üzerinden elde edilmiştir. Toplam yakıt tüketimi birimi litre olarak alınmıştır.

2.1.3.1. Nakliye yolu özellikleri ile ilgili değişkenler

Sahadaki bütün yollar ve analiz edilen nakliye rotalarının mesafeleri, kot farkları, yol eğimleri, toplam viraj sayı ve mesafeleri GIS tabanlı madencilik yazılımı Datamine üzerinden ölçülmüştür.

- **Nakliye Mesafesi (MES):** Açık ocakta kazı ve yükleme yapılan noktadan boşaltım noktasına kadar olan basamaklar arasında açılmış toplam nakliye mesafesinin (m), kamyonun dolu gidişinde harcayacağı toplam yakıt miktarını etkileyebileceği öngörülmektedir.
- **Kot Farkı (KOT):** Açık ocakta kazı ve yükleme yapılan noktadan boşaltım noktasına kadar olan basamaklar arasında açılmış yolların kot farkının (m) toplam yakıt miktarını etkileyebileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada malzeme alt kotlardan üst kotlara doğru nakledilmiştir.
- **Yol Eğimi (EGİ):** Açık ocakta kazı ve yükleme yapılan noktadan boşaltım noktasına kadar olan basamaklar arasında açılmış yolların kot farkının (m) toplam yol uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanan ortalama yol eğiminin (%), toplam yakıt miktarını etkileyebileceği öngörülmektedir. Yol güzergahlarının eğimi, seçilmiş olan nakliye yolu güzergahının başlangıç ve bitiş noktaları dikkate alınarak hesaplanmıştır.
- **Toplam Viraj Sayısı (TVS):** Açık ocakta kazı ve yükleme yapılan noktadan boşaltım noktasına kadar olan basamaklar arasında açılmış yollarda, yolun belirli bir eğimi (%8-12 arası) aşmadan oluşturulabilmesi için, basamaklar arasında virajların oluşturulması gerekmektedir. Açık ocakta kamyonla nakliyatta kamyonların, nakliye yolundaki virajlara geldiğinde merkezkaç kuvvetinin etkisiyle

devrilmemesi için düz yolda uyguladıkları hızlarını azaltmaları gerekmektedir.

- **Toplam Viraj Mesafesi (TVM):** Nakliye yolu üzerinde basamaklar arasında açılan virajların viraj yarı çapına bağlı olarak her bir virajın uzunluğu (mesafesi) değişebilmektedir. Toplam viraj mesafesi, belirlenen güzergahların geçmiş olduğu virajların uzunlukları toplanarak elde edilmiştir. Her bir viraj dönüşe başlandığı ve bitirildiği noktalar arasındaki mesafe ayrı ayrı ölçülmüştür ve toplanmıştır.

2.1.3.2. Kamyonların teknik ve kullanım özellikleri ile ilgili değişkenler

Bu çalışma kapsamında her bir kazı-yükleme noktasından boşaltım noktasına nakliye gerçekleştirildiğinde, kamyonların bilgisayar kayıtlarından yakıt tüketimi ile birlikte anlık olarak hız (km/s), yakıt seviyesi (%), motor devri (devir/dak) ve gaz pedalı pozisyonu (%) gibi değişkenlere ait veriler elde edilmiştir. Bu değişkenler derlendikten sonra, değişkenlerin nakliye yolu başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki ortalama değerleri hesaplanabilmektedir. Bu değişkenlerden ortalama hız ve motor devri değişkenlerinin, kamyonların yakıt tüketimi üzerinde etkili olabileceği öngörülmüştür.

- **Ortalama Nakliye Hızı (HIZ):** Bu çalışmada ortalama hız bağımsız değişkeni bulunurken Datamine madencilik yazılım programı ve mobiliz araç takip sistemi kullanılmıştır. Nakliye yolunda belirlenen güzergahta alınan noktalar arasındaki mesafe (MES) datamine yazılım programında belirlenmiş, sonrasında noktalar arası nakliye süresi (SÜR) mobiliz sistemi üzerinden dakika olarak ölçülerek elde edilmiştir. Ortalama hızın birimi km/saat olup, Eşitlik 2.1'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$HIZ = (\frac{MES}{1000})/(\frac{SÜR}{60}) \quad (2.1)$$

- **Ortalama Motor Devri (DEV):** Ortalama devir yine mobiliz sistemi üzerinden gelen verilerden elde edilmiştir.

2.1.4. Kamyonla nakliyatta toplam yakıt tüketimini etkileyen değişkenlerin ölçümü

Bu çalışmada kullanılan veriler kamyonlarda kurulu olan mobiliz sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Mobiliz sistemi, araç takip ve filo yönetimi çözümleri sağlayan bir telematik sistemidir. Bu sistem, özellikle işletmelerin araç filolarını daha etkin bir şekilde yönetmelerine, maliyetleri azaltmalarına ve güvenliği artırmalarına yardımcı olur. Sistem, şu şekilde çalışır; araçlara GPS modülü ve OBD-II (On-Board Diagnostics) cihazı entegre edilerek çalışmaktadır. Bu cihazlar, aracın konumunu, hızını, yakıt tüketimini, motor arızalarını ve sürücü davranışlarını gibi önemli verileri toplar. Toplanan veriler, GSM, 3G/4G veya uydu iletişimi kullanılarak bulut tabanlı bir sunucuya iletilir. Sistem gerçek zamanlı iletişim için sık sık güncelleme yapar. Sistemde verilerin geliş zamanı kullanıcının istediği hassasiyete göre 10 – 60 saniye aralıklı olarak alınabilecek şekilde ayarlanabilir. Veriler sunucuda işlenerek, kullanıcıların erişebileceği bir yazılım platformuna veya mobil uygulamalara gönderilir. Sistem verileri analiz eder ve raporlar oluşturur. Bu yazılım sayesinde araçların anlık konumları, sürüş analizleri ve yakıt tüketimi takibi yapılabilir.

Gökırmak Bakır Madeni açık ocak çalışma kotları yol güzergahlarında yapılan araştırmalar sonucunda, açık ocak kamyonlarının yüklü halde ocak tabanından yeryüzünde boşaltım noktasına kadar süren sefer başına toplam

yakıt tüketimini (TYT) etkileyebilecek değişkenler 2 ay süreyle ölçüldükten sonra Çizelge 1'de verildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 1. Açık ocak çalışma kotlarında açılan yol güzergahlarında nakliye kamyonlarının toplam yakıt tüketimini (TYT) etkileyebilecek değişkenler

Kotlar	Yol Güzergahı	Top.Yakıt Tüketimi (lt)	Nakliye Mesafesi (m)	Kot Farkı (m)	Ort. Yol Eğimi (%)	Top. Viraj Sayısı	Top. Viraj Mesafesi	Ort. Nakliye Hızı (km/s)	Ort. Motor Deviri (devir/dak)
		TYT	MES	KOT	EGİ	TVS	TVM	HIZ	DEV
340-910	R500	24.6	8160	570	6.99	28	1470	17.49	1329
430-840	R500	19.52	5915	410	6.93	19	975	16.9	1405
470-840	R500	17.22	5215	370	7.09	17	895	17.38	1397
470-910	R500	18.2	6070	440	7.25	20	1165	19.17	1349
470-840	R550	16.26	5610	370	6.6	15	785	18.7	1332
520-840	R550	12.86	4965	320	6.45	14	745	19.86	1368
520-910	R550	17.78	5820	390	6.7	17	1015	17.46	1372
550-840	R550	12.03	4520	290	6.42	13	690	19.37	1339
550-910	R550	16.56	5375	360	6.7	16	960	17.92	1289
430-910	R650	19.85	6935	480	6.92	19	1115	18.09	1345
470-910	R650	17.77	6235	440	7.06	17	1035	18.71	1377
560-840	R650	12.89	4000	280	7	11	650	18.46	1322
570-910	R650	14.76	4855	340	7	14	920	19.42	1400
340-840	R750	21.35	7255	500	6.89	20	875	17.41	1389
560-840	R750	11.18	3905	280	7.17	9	455	19.03	1293
560-910	R750	14.29	4760	350	7.35	12	725	19.04	1383

2.2. Yöntem

Bu çalışmada, açık işletme kamyon nakliyatında toplam yakıt tüketimini (TYT) etkileyen değişkenlerin belirlenebilmesi için çoklu regresyon analizinin yapılması tasarlanmıştır. Çoklu regresyon analizi yapılmadan önce, değişkenlerin tanımlayıcı istatistik parametreleri hesaplanacak, değişkenlerin normal dağılım gösterip göstermediği Kolmogorov-Simirnov testi yöntemiyle araştırılacak, basit doğrusal regresyon yöntemiyle değişkenler arası korelasyonlar araştırılarak korelasyon matrisi

oluşturulacak, bağımsız değişkenler arasında çoklu bağlantı olup olmadığı varyans artış faktörleri (VIF) hesaplanarak belirlenecek, çoklu bağlantı bulunan bağımsız değişkenlerin modelden çıkarılması sonrasında "ileriye doğru regresyonla seçme-eleme", "geriye doğru regresyonla seçme-eleme" ve "adım adım regresyonla seçme-eleme" yöntemleri uygulanarak, toplam yakıt tüketimini (TYT) güvenilirlikle etkileyen değişkenler belirlenecektir. Bu çalışmada uygulanacak yöntemler aşağıdaki bölümlerde ele alınmıştır.

2.2.1. Çoklu doğrusal regresyon analiz modeli

Çoklu doğrusal regresyon analizi, bağımlı değişkeni etkilediği düşünülen bağımsız değişkenlerden hangisi ya da hangilerinin bağımlı değişkeni daha çok etkilediğini bulmak için gerçekleştirilir (Konuk vd., 2021). Bu çalışmada, bağımlı değişken olarak toplam yakıt tüketimi ve bağımsız değişkenler olarak nakliye yolu özellikleri, kamyonların teknik ve kullanım özellikleri ile ilgili değişkenlerin ele alındığı çoklu doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilecektir. Çoklu doğrusal regresyon modeli Eşitlik 2.2'de verildiği gibi tanımlanabilir.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \cdots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_{ij} \qquad (2.2)$$

Burada, Y_i: bağımlı değişkeninin gözlenen i'nci değerini, X_{ij}: j'inci bağımsız değişkenin i'nci düzeyindeki değerini, β_j: j'inci regresyon katsayısını (modelin parametrelerini), ε_{ij}: hata terimini ve k: bağımsız değişken sayısını göstermektedir.

Çoklu doğrusal regresyon modelleri parametrelerinin tahminde en küçük kareler yöntemi kullanılmakla birlikte, en küçük kareler yönteminin uygulanabilmesi için ve elde edilecek tahmin modeliyle yanlış tahminler yapılmaması için bir takım varsayımların yerine getirilmiş olması

gerekmektedir. Bu varsayımlar: hata terimlerinin varyansının sabit olması ve birbirinden bağımsız olmaları, hata terimlerinin beklenen değerinin "0" olması ve bağımsız değişkenler arasında bir ilişki olmamasıdır (Konuk vd., 2021). Bunun için hata terimlerinin normal dağılıp dağılmadığının, gözlemler arasında ardışık bağımlılığın (otokorelasyonun) bulunup bulunmadığının, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantının olup olmadığının mutlaka test edilmesi gerekir (Konuk vd., 2021).

2.2.2. Çoklu doğrusal bağlantının varyans artış faktörünü (VIF) ile belirlenmesi

Çoklu doğrusal bağıntı, bağımsız değişkenler arasında iki ya da daha fazla değişkenin doğrusal bir ilişki içinde olması durumunu ifade eder. İki bağımsız değişken arasında yüksek bir korelasyon bulunduğunda, her ikisi de benzer bilgileri aktarmaktadır. Bu durumda her iki bağımsız değişkenin de modele dahil edilmesi, hatalı değerlendirmelere neden olabilmektedir.

Bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantının varlığını belirlemek için, çoklu regresyon modelindeki varyans artış faktörü (VIF) kullanılabilir. Tek bir bağımlı değişken için VIF değeri, bu değişkenin diğer tüm bağımsız değişkenlere karşı regresyonunun R^2 değeri kullanılarak Eşitlik 2.3'deki gibi hesaplanır (Konuk v.d., 2021)

$$V\dot{I}F_j = \frac{1}{1-R_j^2} \tag{2.3}$$

VIF değeri 5'ten küçük olan değişkenler arasında çoklu bağlantı olmadığı; 5 ile 10 arasında olanlar için ise bu olasılığın zayıf olduğu ve 10'dan büyük olan değişkenlerin ise diğerleriyle arasında güçlü bir çoklu bağlantı bulunduğu sonucuna varılabilir (Konuk v.d., 2021). VIF değeri

10'un üzerindeki en yüksek VIF değerine sahip bağımsız değişkenleri modele dahil etmeyerek, elde edilecek regresyon modelinde çoklu doğrusallık sorunu ortadan kaldırılabilir.

2.2.3. Aşamalı regresyonla eleme ve seçim

Bu çalışmada aşamalı regresyon ile eleme ve seçim yöntemlerinden ileriye doğru, geriye doğru ve adım adım olmak üzere üç farklı yöntemin uygulanması ve elde edilen sonuçların yorumlanarak en uygun modelin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2.2.3.1. İleriye doğru regresyonla seçme-eleme

İleriye doğru seçme-eleme yönteminde değişken seçimine, yalnızca sabit terimin bulunduğu bir denklemle başlanır ve modelde en uygun kombinasyonu sağlayana kadar değişkenler tek tek eklenir. İlk olarak modele dahil edilmesi düşünülen bağımsız değişken, bağımlı değişkenle en yüksek korelasyona sahip olan ve aynı zamanda Y bağımlı değişkeni ile en yüksek F istatistiğini üreten değişkendir. Hesaplanan F istatistiği, önceden belirlenmiş α önem düzeyinde anlamlı bulunursa, bu değişken modele dahil edilir ve ileriye doğru seçim süreci devam eder. Bu işlemler, herhangi bir bağımsız değişken için hesaplanan F istatistiği değerinin, belirlenen α önem düzeyindeki F istatistiği değerini aşamadığı durumlarda veya modele son bağımsız değişken eklendiğinde sona erer (Konuk vd., 2021).

2.2.3.2. Geriye doğru regresyonla seçme-eleme

Geriye doğru eleme yönteminde, süreç başlangıçta tüm aday bağımsız değişkenlerin modele dahil edilmesiyle başlar ve daha sonra her aşamada en düşük kısmi F istatistik değerine sahip bağımsız değişken, belirlenen α önem

düzeyi F istatistiği değerine göre önemsiz ise modelden çıkarılarak işlem devam eder (Konuk vd., 2021)

2.2.3.3. Adım adım regresyonla seçme-eleme:

Adım adım eleme yöntemi, regresyon analizinde kullanılan ileriye doğru seçim ve geriye doğru eleme yöntemlerinin bir kombinasyonunu temsil eder. Bu yöntemle, her değişkenin modelde yer alabilmesi için gerekli olan en düşük F değeri (veya p değeri) belirlendikten sonra, her seferinde bir değişken modele eklenir. Eklenen değişkenin modelde kalıp kalmayacağına ise F değeri üzerinden karar verilir. Adım adım regresyon sürecinde, en son eklenen değişken hariç tüm bağımsız değişkenlerin kısmi korelasyonları hesaplanır ve test edilir. Bu kısmi korelasyon katsayılarının incelenmesinin amacı, modelde kesinlikle kalması gereken en güçlü değişken sabit tutulduğunda, bağımlı değişken Y üzerindeki en büyük etkiye sahip değişkenin bulunmasıdır (Konuk vd., 2021).

2.2.4. Durbin-Watson (DW) testi ile otokorelasyonun belirlenmesi

Elde edilen çoklu doğrusal model, sapmasız ve anlamlı olsa bile, istatistiksel açıdan anlamlı tahminler yapıyor gibi görünse de, otokorelasyonun varlığı durumunda yanıltıcı sonuçlar verme olasılığı nedeniyle modelin otokorelasyon içerip içermediğini belirlemek için test edilmesi gerekmektedir. Örneklenen veri sayısının 15'den büyük olduğu durumlarda otokorelasyonun belirlenmesinde Durbin-Watson testi kullanılmakta olup, bu çalışmada da elde edilen modellerin otokorelasyon içerip içermediğini belirlemede Durbin-Watson testi kullanılmıştır.

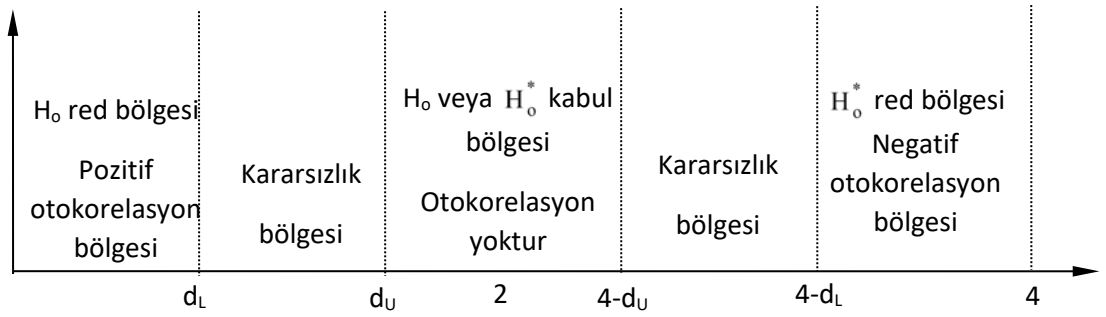
Durbin-Watson testinde, öncelikle örnek büyüklüğüne (n), regresyon modelindeki bağımsız değişken sayısına (k) ve güvenirlik seviyesine (α)

bağlı olarak Durbin-Watson tablolarından alt ve üst sınır değerler (d_L ve d_U) belirlenir.

Kritik oran olan Durbin-Watson d istatistiği, regresyon modeli tahmin hatalarından (e_t 'lerden) faydalanılarak Eşitlik 2.4'den hesaplanmaktadır (Konuk ve Önder, 1999; Uysal ve Günay, 2001).

$$d = \frac{\sum_{t=2}^{n}\left(e_t - e_{t-1}\right)^2}{\sum_{t=1}^{n} e_t^2} \tag{2.4}$$

DW testinde, otokorelasyon olup olmadığı kararı Şekil 6'da açıklanan koşullara göre verilmektedir (Konuk ve Önder, 1999; Uysal ve Günay, 2001).



Şekil 6. DW karar tablosu (H_o: pozitif otokorelasyon yoktur, H_o^*: negatif otokorelasyon yoktur)

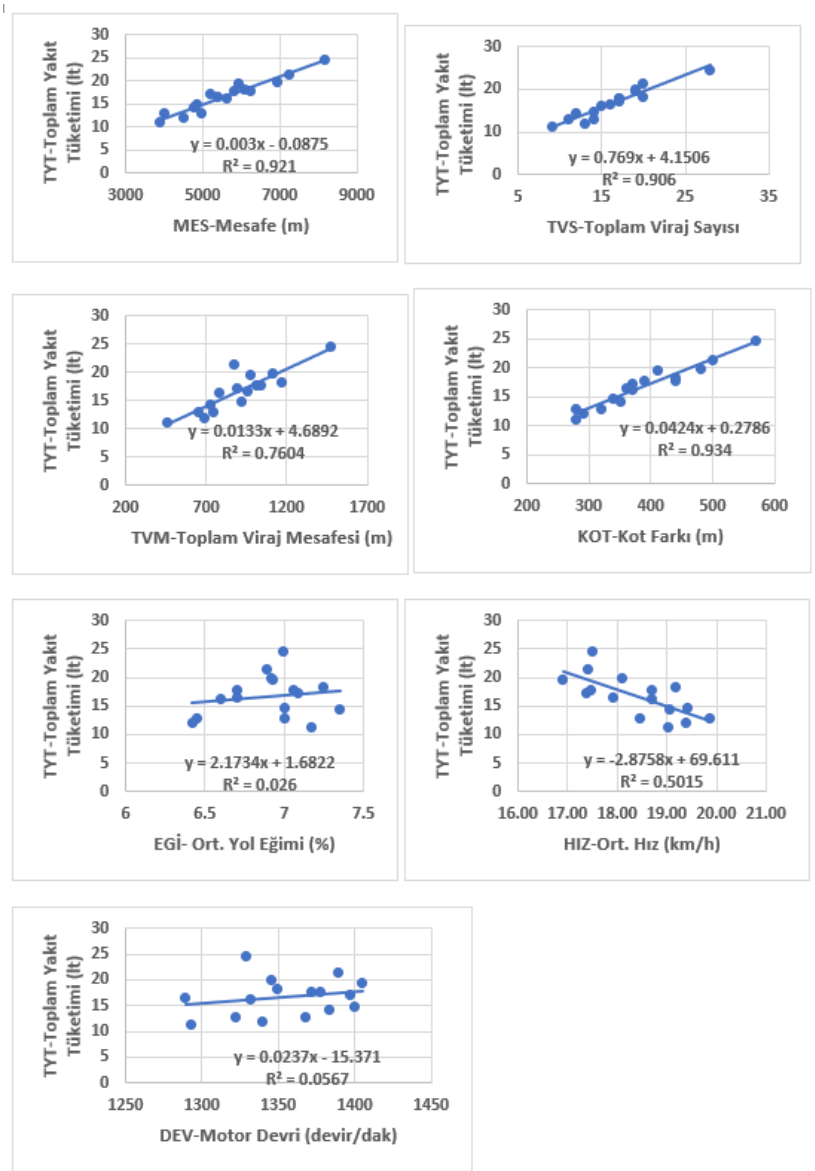
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Bulgular

Gökırmak Bakır Madeni açık ocak çalışma kotları yol güzergahlarında kamyonla nakliyatta toplam yakıt tüketimi (TYT) ile ilişkili değişkenler Çizelge 2'de ve Şekil 7'de verildiği gibidir.

Çizelge 2. Kamyonla nakliyat değişkenlerinin tanımlayıcı istatistikleri

Değişken	Birimi	Örnek Sayısı (N)	Ortalama	Std. sapma	En Küçük	En Büyük
TYT	litre	16	16,695	3,634	11,180	24,600
MES	metre	16	5600	1164	3905	8160
TVS	sayı	16	16,31	4,50	9,00	28,00
TVM	metre	16	904,7	238,8	455,0	1470,0
KOT	metre	16	386,9	82,8	280,0	570,0
EGİ	%	16	6,90	0,27	6,42	7,35
HIZ	km/saat	16	18,40	0,895	16,900	19,860
DEV	dev/dak	16	1355,6	36,6	1289,0	1405,0



Şekil 7. Kamyonla nakliyatta toplam yakıt tüketimi (TYT) ile ilişkili değişkenler

Çoklu doğrusal regresyon analizinde bağımlı değişken olarak TYT ve bağımsız değişkenler olarak MES, TVS, TVM, KOT, EGİ, HIZ ve DEV kullanılacağından, Gökırmak Bakır Madeni açık ocak çalışma kotları yol güzergahlarında kamyonla nakliyatta 2 ay süreyle elde edilen verilerin tanımlayıcı istatistikleri belirlenmiştir (Çizelge 3). Değişkenlerin normal dağılım gösterip göstermediklerini belirlemek için, tekli örneklemelerde yaygın kullanılan Kolmogorov-Smirnov (KS) testi yapılmıştır. Çizelge 3'de verildiği gibi, KS testi sonuçlarına göre bağımlı ve bağımsız değişkenlerin tümü normal dağılım göstermektedir.

Çizelge 3. Kamyonla nakliyat değişkenlerinin KS normallik testi sonuçları

Değişken	Birimi	Örnek Sayısı (N)	KS Değeri	P-Değeri	Sonuç
TYT	lt	16	0.102	>0,150	Normal dağılım
MES	m	16	0.105	>0,150	Normal dağılım
TVS		16	0.112	>0,150	Normal dağılım
TVM	m	16	0.105	>0,150	Normal dağılım
KOT	m	16	0.112	>0,150	Normal dağılım
EGİ	%	16	0.162	>0,150	Normal dağılım
HIZ	km/s	16	0.158	>0,150	Normal dağılım
DEV	devir/dak	16	0.133	>0,150	Normal dağılım

Değişkenler arası çoklu bağlantı bulunup bulunmadığını belirlemek için öncelikle değişkenler arası korelasyonlar hesaplanarak korelasyon matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 4). Çizelge 4'e göre, TYT ile EGİ ve DEV

değişkenleri arasında zayıf korelasyon bulunmakla birlikte, diğer bağımsız değişkenler arasında ise güçlü korelasyonlar bulunmaktadır.

Çizelge 4. Korelasyon matrisi

	TYT	**MES**	**TVS**	**TVM**	**KOT**	**EGİ**	**HIZ**	**DEV**
TYT	1							
MES	0.960* (0.000)**	1 0.000)						
TVS	0.952 (0.000)	0.941 (0.000)	1					
TVM	0.872 (0.000)	0.855 (0.000)	0.929 (0.000)	1				
KOT	0.966 (0.000)	0.986 (0.000)	0.934 (0.000)	0.863 (0.000)	1			
EGİ	0.161 (0.551)	0.037 (0.891)	0.052 (0.847)	0.123 (0.649)	0.201 (0.455)	1		
HIZ	-0.707 (0.002)	-0.540 (0.031)	-0.569 (0.022)	-0.440 (0.088)	-0.540 (0.031)	-0.100 (0.714)	1	
DEV	0.238 (0.375)	0.181 (0.503)	0.178 (0.508)	0.159 (0.555)	0.206 (0.444)	0.159 (0.556)	0.178 (0.509)	1

*Korelasyon katsayısı ** p olasılık değeri

TYT ile değişkenler arası en yüksek korelasyona KOT değişkeni sahiptir. KOT ile diğer değişkenler arası çoklu bağlantı (VİF) değerleri incelendiğinde Çizelge 5'deki değerler elde edilmiştir. Çizelge 5'den de izlendiği gibi KOT ile TVS ve MES ile TVS arasında VIF>10 olduğundan çok güçlü bir çoklu bağlantı olduğunu söylemek mümkündür. Bu nedenle, çoklu regresyon modelinin araştırılmasında, TVS değişkeninin modele dahil edilmemesi kararına varılmıştır. VIF değeri 10'dan küçük ve 5'den büyük olduğu göz önüne alındığında, KOT ile MES ve TVM arasında ve MES ile TVM arasında zayıf da olsa çoklu bağlantı olasılığının bulunduğunu söylemek mümkün olmakla birlikte, MES ve TVM değişkenlerinin çoklu regresyon modeline girip girmeyeceği kararının, seçme-eleme yöntemlerinin uygulanması sonrasında verilmesine karar verilmiştir.

Çizelge 5. Bağımsız değişkenler arası doğrusal bağlantıların varyans artış faktörleri (VIF)

	KOT	MES	TVS	TVM	HIZ
MES	8.9				
TVS	20.6	10.1			
TVM	8.7	8.5	1.3		
HIZ	1.7	1.7	1.3	1.0	
DEV	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0
EGİ	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0

MINITAP 14 istatistik yazılımı kullanılarak Adım Adım (Stepwise), İleriye Doğru (Forward) ve Geriye Doğru (Backward) seçme-eleme yöntemleriyle çoklu regresyon analizleri gerçekleştirildiğinde Çizelge 6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Tüm seçme-eleme yöntemlerinde de TYT bağımlı değişkenini etkileyen bağımlı değişkenlerin seçimi 3.adımda gerçekleşmiş olup, TYT bağımlı değişkenini etkileyen bağımsız değişkenler Çizelge 6'da verildiği gibidir.

Çizelge 6. Seçme ve eleme yöntemleriyle elde edilen çoklu doğrusal regresyon denklemlerinin analiz sonuçları

Yöntem	**Bağımsız Değişkenler**	**Katsayı**	**t**	**p**	**VIF**	R^2_{adj}	**F**	**DW**
Adım adım	Sabit KOT HIZ TVM	22,9270 0,0294 -1,0888 0,0027	8,00 11,22 -7,98 3,13	0,000 0,000 0,000 0,009	- 4,5 1,4 3,9	0,988	413,93	1,474
İleriye doğru	Sabit KOT HIZ TVM	22,9270 0,0294 -1,0888 0,0027	8,00 11,22 -7,98 3,13	0,000 0,000 0,000 0,009	- 4,5 1,4 3,9	0,988	413,93	1,474
Geriye doğru	Sabit MES TVM HIZ EGİ	14,0440 0,0021 0,0028 -1,0647 1,1884	3,35 11,03 3,25 -7,66 3,02	0,006 0,000 0,008 0,000 0,012	- 4,4 3,9 1,4 1,0	0,988	302,71	1,316

Seçme-eleme yöntemleri ile elde edilen en iyi modeler için otokorelaston testi yapıldığında, Çizelge 7'de verildiği gibi Adım Adım, İleriye ve Geriye Doğru seçme-eleme yöntemleriyle seçilen çoklu regresyon modellerinin otokorelasyon içerip içermedikleri konusunda kararsızlık sözkonusudur.

Çizelge 7. Seçme-eleme yöntemleri ile elde edilen en iyi modeler için otokorelaston testi sonuçları

Yöntem	**Hesaplanan DW**	**d_L**	**d_U**	**4-d_U**	**4-d_L**	**Karar**
Adım adım	1,474	0,857	1,728	2,272	3,143	Kararsızlık
İleriye	1,474	0,857	1,728	2,272	3,143	Kararsızlık
Geriye	1.316	0,734	1,935	2,065	3,266	Kararsızlık

Not: α=0,05 güven seviyesi, n=16 ve k=modeldeki bağımsız değişken sayıları dikkate alınarak d_L ve d_U sınır değerleri https://www.real-statistics.com/statistics-tables/durbin-watson-table/ sitesinden elde edilmiştir.

3.2. Tartışma

Çizelge 3.5'den de görüldüğü gibi, Adım Adım ve İleriye Doğru seçme-eleme yöntemlerine göre TYT bağımlı değişkenini KOT, HIZ ve TVM bağımsız değişkenlerinin etkilediği belirlenmişken, Geriye Doğru yönteminde ise TYT bağımlı değişkenini MES, TVM, HIZ ve EGİ bağımsız değişkenlerinin etkilediği belirlenmiştir.

Adım Adım, İleriye ve Geriye Doğru seçme-eleme yöntemleriyle seçilen çoklu regresyon modellerinin tüm katsayıları için p değerleri α=0,05'den küçük olduğundan, bu çoklu regresyon denklemleriyle yapılacak tahminlerin güvenilir ve anlamlı olması söz konusudur. Adım Adım ve İleriye doğru şeçme-eleme yöntemleriyle elde edilen denklemler aynı olup, varyans analizi sonucunda hesaplanan F değeri 413.93'dür. Geriye doğru seçme-eleme yöntemiyle elde edilen denklemin varyans analizine göre F değeri 302.71 olarak hesaplanmıştır. F=413,93 > F=302,71 olduğundan,

TYT tahmininde, Adım Adım ve İleriye doğru seçme-eleme yöntemleriyle elde edilen aşağıdaki çoklu regresyon denklemi ile varyansı daha küçük tahminlerin yapılabileceğine karar verilmiştir.

$$TYT = 22{,}927 + 0{,}0294\,KOT - 1.0888\,HIZ + 0{,}0027\,TV \qquad (3.1)$$

$$S = 0{,}3975 \quad R^2 = 0{,}990 \quad R^2(adj) = 0{,}988$$

Eşit 3.1'den de görüldüğü gibi, Gökırmak Bakır Madeni açık işletmesinde kamyonla nakliyatta, kamyonların dolu gidişinde toplam yakıt tüketimi (TYT), KOT ve TVM arttıkça artarken, HIZ arttıkça azalmaktadır. Bu durumda, belirli bir kottan sürdürülen nakliyat sırasında emniyet limitleri içerisinde kalmak şartıyla kamyon hızının (HIZ) arttırılması ve toplam viraj mesafesi (TVM) daha kısa olan alternatif yolun seçimi halinde, en küçük (optimum) enerji tüketimli (toplam yakıt tüketimli) nakliyat gerçekleştirilebilecektir.

Eşitlik 3.1'den de görüldüğü gibi, TYT üzerinde TVS, MES, EGİ ve DEV değişkenlerinin doğrudan etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. TVS değişkeni ile diğer değişkenler arasında çoklu bağlantı bulunması nedeniyle modelde yer almamıştır. Özellikle MES değişkeninin modelde yer almamasının nedeninin ise, Çizelge 3.3'de verilen korelasyon matrisinden de görüleceği gibi KOT ile MES arasındaki korelasyonun oldukça güçlü (r=0.986) olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nakliye yolu eğimi (EGİ) değişkeni KOT/MES ile hesaplanmış olmakla birlikte, yol eğimlerinin %6-8 aralığında oluşturulması ve nakliye yol güzergah alternatiflerinde büyük değişkenlik göstermemesi nedeniyle TYT üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı düşünülmektedir. Kamyonla nakliyeler sırasında motor devirlerinde (DEV), yol koşullarına bağlı olarak önemli sapmalar olmaması nedeniyle de, DEV değişkeninin TYT'yi etkilemediği belirlenmiştir.

Literatürde kamyonla nakliyatta enerji tüketiminin nakliye mesafesinden doğrudan etkileneceği belirtilmiş (Emmanuel v.d., 2010; Sahoo v.d., 2014; Wang v.d., 2021) olmakla birlikte, yapılan bu çalışmada, nakliye mesafesinin doğrudan etkisinin olmadığı, ortalama hız üzerindeki etkisi nedeniyle enerji tüketimini (toplam yakıt tüketimini) etkilediği belirlenmiştir. Literatürde kamyonla nakliyatta enerji tüketiminin yol eğiminden etkileneceği belirtilmiş (Wicaksana v.d., 2011; Menezes ve Torres, 2021; Torres ve Paniz, 2022; Xie v.d., 2022) olmakla birlikte, yapılan bu çalışmada yol eğimlerinin nakliye yol güzergah alternatiflerinde büyük değişkenlik göstermemesi nedeniyle TYT üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Açık işletmelerde yakıt verimliliğinde kavşak (viraj) düzenlerinin (Vukovic, 2013), kurp (viraj) yarıçapının önemli etkiye sahip olduğu belirtilmekte olup, yapılan bu çalışmada, toplam viraj mesafesinin (TVM) toplam yakıt tüketimi üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Gökırmak Bakır Madeni açık ocağında çalışan kamyonların, kullandıkları nakliye yolları dikkate alınarak tüketilen yakıt miktarları ölçülmüş ve yakıt tüketimini en çok etkileyen değişkenler tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan çoklu regresyon analizi sonucunda, toplam yakıt tüketimini (TYT) etkilediği düşünülen bağımsız değişkenlerden KOT, TVM ve HIZ değişkenleri ile varyansı daha düşük tahminler yapılabileceği görülmüştür. Regresyon denkleminden anlaşıldığı üzere kot farkının ve toplam viraj mesafesinin artması toplam yakıt tüketimi üzerinde artırıcı bir etkiye sahiptir. Ortalama hızın artması toplam yakıt tüketimi üzerinde azaltıcı bir etkiye sahiptir.

Buradan yola çıkarak döküm sahaları seçilirken kazı bölgeleri ile olabildiğince kot farkının az olması gereklidir. Bilindiği üzere döküm sahası seçerken, taşınacak malzeme miktarı, döküm alanının cevher rezervinin dışında olması, orman izinleri, D.S.İ. izinleri vb. izinlerin verilebildiği alanlarda olması gibi kısıtlar vardır. Bu zorunluluklar karşılandıktan sonra taşınacak malzemenin olabildiğince daha az kot çıkması elzemdir.

Toplam viraj mesafesinin artmasının toplam yakıt tüketini arttırmasından dolayı kazı bölgeleri ve döküm sahaları arasında yapılması planlanan nakliye yollarının tasarımı yapılırken en az viraj sayısı ile gidilebilecek güzergahlar seçilmelidir. Planlanan güzergahta yapılacak viraj mesafelerinin nakliye ekipmanlarının sınılarları dikkate alınarak viraj dönüş mesafesini en aza indirelecek şekilde tasarlanlamıdır. Sahadaki kazı alanlarından döküm alanına giden birden çok güzergah olması durumunda diğer etmenler de göz önünde bulundurularak nakliye güzergahının en az toplam viraj mesafesine sahip güzergahın tercih edilmesi gereklidir.

Ortalama hızın artmasının toplam yakıt tüketimini azaltıcı etkiye sahip olması nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği riskleri de dikkate alınarak sahada yapılması planlanan nakliye yollarının ortalama nakliye hızını arttırabilecek geometride tasarlanmalıdır. Yollar, daha az viraj sayısı ve viraj mesafesine sahip ve trafik düzeni, kavşak düzeni nakliye çalışmasını kesintiye uğratmayacak, yavaşlatmayacak biçimde tasarlanmalıdır. Ayrıca ortalama hızın yüksek olmasın için yolların kaplamaları zemine, iklime nakliye ekipmanlarına uygun çabuk bozulmayacak şekilde olmalı ve bakım ve iyileştirilmeleri sürekli olmalıdır. Bu hususta teknolojik gelişmeler takip edilmeli, çalışma güvenliği ve riskleri de dikkate alınarak ortalama hızı arttırabilecek çalışmalar yapılmalıdır.

Burada tespit edilen faktörlerden yararlanılarak yakıt tüketimini en aza indirebilecek nakliye rotaları seçilebilecek ve yeni yapılacak nakliye yolu projeleri için bu faktörler referans olacaktır.

KAYNAKLAR

Das, R., Topal, E., & Mardaneh, E., 2024. Concurrent Optimisation of Open Pit Ore and Waste Movement With Optimal Haul Road Selection. Resources Policy 91, 104834. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104834

Dindarloo, S. R., & Siami-Irdemoosa, E., 2016. Determinants of Fuel Consumption in Mining Trucks. Energy, 112(1), 232-240. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.085

Konuk, A., Aksoy, M., & Ak, H., 2021. Çoklu bağlantı durumunda kentleşme göstergelerinden agrega üretim miktarının tahmini. Bilimsel Madencilik Dergisi, 60(2), 97-106. https://doi.org/10.30797/madencilik.889661

Konuk, A., & Önder, S., 1999. Maden İstatistiği Ders Kitabı. Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

Meneses, D., & Sepúlveda, F. D., 2023. Modeling Productivity Reduction and Fuel Consumption in Open-Pit Mining Trucks by Considering the Temporary Deterioration of Mining Roads through Discrete-Event Simulation. Departamento de Ingeniería en Minas, Mining,3(1), 96-105. https://doi.org/10.3390/mining3010006

Menezes, D. S., & Torres, V. F. N., 2021. Influence of Mine Road Grade and Rolling Resitance on Haulage Productivity and Costs. REV. MAMYM, 6(2). https://www.researchgate.net/publication/364937777

Sahoo, L. K., Bandyopadhyay, S., & Banerjee, R., 2014. Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines. Applied Energy 113,1382-1396

Siami-Irdemoosa, E., & Dindarloo, S. R., 2015. Prediction of fuel consumption of mining dump trucks: A neural networks approach. Applied Energy 151, 77-84. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.064

Soofastaei, A., Aminossadati, S., Kizil, M. S., & Knights, P., 2016. Reducing Fuel Consumption of Haul Trucks in Surface Mines Using Artificial Intelligence Models. Coal Operators' Conference. Faculty of Engineering and Information Sciences. https://www.researchgate.net/publication/294573240

Torres, V. F. N., & Paniz, I. L., 2022. Rolling resistance analysis in open pit mining hauling, International Journal of Development Research, 12(10), 59499-59503.

Uysal, M., & Günay, S., 2001. Durbin-Watson ölçütüne göre kararsızlık bölgesinde bulunan negatif otokorelasyon için bazı testler. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2(2), 277-284.

Vukovic, V., 2013. Reducing Haul Truck Fuel Consumption İn Open Pit Mines by Strategic Changes To The Haulage Cycle. Queen's Üniversitesi Kingston, Ontario, Kanada (Eylül 2013). Copyright ©Vladimir Vukovic. https://www.researchgate.net/publication/294573240

Wang, Q., Zhang, R., Lv, S., & Wang, Y., 2021. Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based onmulti-dimensional features and XGBoost. Sustainable Energy Technologies and Assessments 43, 100977. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100977

Wicaksana, Y., Widodo, N. P., Kramadıbrata, S., Wattimena, R. K., Sigalingging, J. W., Rizky, M., & Nardono., 2011. Determining Rolling Resistance Coefficient on Hauling Road Using

Xie, Y., Miao, Z., Li, K., Wang, M., & Tang, Y., 2022. Optimized application of GIS and CGA in transportation path planning of open-pit mines. ISCTT 2022, Xishuangbanna, China. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10071876

ACID MINE DRAINAGE IN METALLIC MINES

Nil Yapıcı
Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

Hande Sonsun
Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

ABSTRACT: In recent years, increasing environmental awareness and a series of negative incidents have brought mining activities under close scrutiny, leading to the implementation of stricter regulatory measures. One of the most recent and critical environmental concerns is Acid Mine Drainage (AMD), which is now a key consideration in the Environmental Impact Assessment (EIA) reports required for mining permits—especially for sulfide-rich and complex ore deposits. AMD poses significant threats to aquatic ecosystems, potentially eliminating plant and animal species, simplifying or collapsing food chains, and rendering aquatic environments lifeless. Its formation is influenced not only by geochemical reactions but also by physical factors such as host rock composition, faults, fractures, porosity, and permeability. Moreover, the size and physical characteristics of waste rock and tailings, resulting from ore processing, play a critical role in the rate and extent of AMD generation. To prevent the deterioration of chemical, physical, and ecological balances in receiving environments, AMD must be accurately characterized and continuously monitored through effective management strategies. Properly designed geochemical models are essential in mitigating long-term environmental damage and avoiding unexpected costs for mining operations. Environmental planning plays a vital role in identifying and addressing potential impacts early on. When executed within the framework of environmental legislation and best practices, mining operations can be aligned with sustainable development goals. Rehabilitation of acidic, metal-rich water bodies is essential for protecting both human and environmental health. Therefore, the proactive management of AMD is not only an environmental necessity but also an economic imperative for the future of responsible mining.

Keywords: Acid Mine Drainage (AMD), Environmental Impact, Sulfide Minerals, Environmental Risk Assessment, Mine Waste Management

1. INTRODUCTION

Following a series of environmental incidents and the increasing awareness of environmental protection, mining activities have come under scrutiny, leading to the implementation of numerous sanctions by political authorities. One of the most recent measures involves the necessity to determine whether Acid Mine Drainage (AMD) may occur during mining operations—especially in mines containing sulfide ores and complex ore deposits. As a result, obtaining mining operation permits now often requires the preparation of Environmental Impact Assessment (EIA) reports.

Acid Mine Drainage (AMD) has particularly adverse effects on river and lake ecosystems. It can eliminate plant and animal species, simplify or even collapse food chains, and completely eradicate aquatic life. Physical factors also play a significant role in its formation. The initial geological setting of the mine, the composition of the host rock, faults and discontinuities, interlayer voids, and permeability all influence AMD development. Additionally, the physical properties and particle sizes of the ore, waste rock, and tailings—left after various ore processing operations—greatly affect the rate at which AMD develops. Sources such as ore stockpiles, active or abandoned open-pit and underground mine surfaces, and tailings storage facilities may generate AMD, and its acidic nature may lead to the contamination of groundwater. To prevent chemical, physical, and ecological imbalances—and thus avoid negatively impacting living organisms, including humans—AMD must be accurately characterized, continuously monitored, and effectively managed through well-designed procedures. Proper characterization and geochemical modeling of AMD are

essential not only for environmental protection but also to help mining operations avoid long-term issues and unforeseen financial burdens.

2. MATERIALS AND METHODS

This study was conducted through a comprehensive review and synthesis of current literature focusing on acid mine drainage (AMD) and its geochemical and environmental dynamics. The primary sources include peer-reviewed journal articles, technical reports, and international guidelines published over the last three decades, particularly those addressing the physicochemical processes, mineralogical controls, and mitigation strategies associated with AMD. A qualitative meta-analysis approach was adopted to evaluate and categorize the scientific data under four thematic areas:

1. Environmental impacts of AMD, particularly on soil, surface water, and groundwater systems.
2. Physicochemical factors controlling AMD generation, including pH, redox potential, sulfide oxidation, and acid-neutralization balance. 3.
3. Mineralogical processes involved in AMD generation and natural attenuation, focusing on sulfide and carbonate-bearing minerals.
4. Management strategies and preventive techniques, such as passive/active treatment systems, source control, and predictive tests.

The analysis emphasized interdisciplinary integration by comparing findings from geochemistry, environmental engineering, and hydrogeology. Priority was given to case studies and reviews that included detailed

mechanistic explanations, field observations, and laboratory findings. No original experimental or field data were generated in this study.

3. FINDINGS AND DISCUSSION

3.1 Acid Mines and Acid Mine Drainage

Primarily due to the oxidation of sulfide-bearing metallic minerals—such as pyrite—exposure to atmospheric conditions and microbial activity during mining operations causes the pH of surrounding drainage waters to decrease, making them acidic. These acidic waters easily dissolve and mobilize toxic and heavy metals from the surrounding geological formations. This environmental phenomenon is defined as Acid Mine Drainage (AMD) (Yörükoğlu, 2003). The influence of microbial activity on AMD has also been demonstrated by Balcı (2014), who showed that microorganisms active in sulfur and iron cycles play a major role in both the formation and composition of acidic waters at a Pb/Zn waste site.Physical factors are critically important in the formation of AMD. Key factors include the original condition of the mine site, host rock composition, faults and discontinuities, bedding-plane voids, and permeability. In order to preserve ecosystems and rehabilitate affected environments, AMD must be managed using accurate geochemical models.In recent years, common preventative measures have included constructing drainage channels around mining sites and using limestone backfill. In AMD prediction, static tests have been proposed and improved by researchers such as Miller (1996), Morin and Hutt (1997), White et al. (1999), Paktunç (1999), Jambor et al. (2000, 2002), and Weber et al. (2006) as rapid assessment methods.

3.1.1. Mechanism of Acid Mine/Rock Drainage Formation

Acid mine/rock drainage is an environmental issue directly or indirectly associated with the mineral paragenesis found in the ore or host rock. It particularly affects river and lake ecosystems, potentially eliminating flora and fauna, simplifying food chains, and even destroying aquatic life. As previously mentioned, sulfide-bearing metallic minerals, primarily pyrite, oxidize due to exposure to air and water, aided by microbial activity. This leads to the generation of acidic drainage waters, which dissolve and transport heavy and toxic metals. This process is defined as Acid Mine Drainage (AMD). Key physical contributors include the mine's original setting, host rock composition, faulting, discontinuities, bedding-plane voids, and permeability. The management of AMD through reliable geochemical models is essential for environmental protection and ecological rehabilitation. The first reaction initiating acid rock/mine drainage involves the oxidation of pyrite, expressed by the following chemical equation:

$$2\ FeS_2 + 7\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ FeSO_4 + 2\ H_2SO_4$$

Pyrite and similar sulfide minerals react with water and oxygen to produce sulfuric acid and iron hydroxide. The iron sulfate produced can be further oxidized as follows:

$$12\ FeSO_4 + 6\ H_2O + 3\ O_2 \rightarrow 4\ Fe_2\ (SO_4)_3 + 4\ Fe\ (OH)_3$$

Humidity, oxygen, and sulfide minerals are primary factors in acid production. In contrast, minerals such as calcite and dolomite—carbonates that neutralize the acid—along with less reactive silicate minerals, are

secondary factors. Materials that transport or consume the acid are considered tertiary factors. These react with the acid released during oxidation, raising the pH and reducing dissolution.

This can be summarized by the reaction:

$$CaCO_3 + 2\ H^+ \rightarrow H_2CO_3 + Ca^{2+}$$

Thus, depending on the mineralogical composition of the environment, both oxidation and neutralization reactions may occur. AMD, which often develops independently of human activities, can result in low pH (high acidity), high ion concentrations (metal-rich content), and the presence of suspended and dissolved solids—causing significant environmental impacts (5). However, asserting that all mines containing sulfide minerals will produce AMD without determining the characteristics of gangue and host rocks is not scientifically accurate.

Tertiary factors—such as the physical structure, texture, and tectonic features of the ore or host rock and the prevailing climatic conditions—also significantly influence the formation of AMD. Additionally, the ore beneficiation method, particle size, and chemicals used during processing play roles in acid generation. The site's topography is another key factor. The AMD process begins with the oxidation of sulfide minerals such as pyrite, pyrrhotite, and marcasite, followed by their dissolution and dispersion in the environment. It ends with pH elevation and the precipitation of secondary minerals.

3.2. Ore Characterization and Environmental Factors

Considered as a tertiary factor in acid rock/mine drainage, the physical structure, texture, tectonic features of the host or surrounding rocks where

the mine is located, as well as the prevailing climatic conditions in the region, significantly influence the resulting drainage. Moreover, if ore is subjected to beneficiation processes after extraction, the chosen method, particle size, and chemicals used in the process undoubtedly affect this acid drainage. The topographic characteristics of the mining site are also an important factor.

The initial step of acid mine drainage is the oxidation of sulfur-bearing iron minerals (such as pyrite, pyrrhotite, and marcasite), which then dissolve and spread into the environment. As the pH rises, secondary minerals precipitate, completing the process. This situation, known as an iron cap (also called "gossan"), typically develops in metallic ore deposits close to the surface and has long been used by geologists in mineral exploration, both through aerial photography and more recently via satellite imagery.

These iron caps, marking the beginning of the oxidation zone, initiate acidic drainage due to the activity of atmospheric waters on the surface. Although acid drainage has become a major environmental concern in the last 60 years, it is now known that such phenomena have existed in nature for millions of years. In many cases, natural buffering reactions have neutralized the acidity, while in unbalanced systems, contamination has persisted.

It would be realistic to limit the concept of acid mine drainage to metallic ores—particularly sulfur-phase metals like iron—during both mining and ore processing stages. During ore extraction, acid rock drainage forms when atmospheric water and oxygen-rich air (including wind) interact with the excavation face, stockpile areas, or waste dumps and tailings dams, causing the pH to drop and acidity to increase. Some microorganisms may also play a role in this process. Therefore, what

begins as a chemical reaction ultimately takes on a physicochemical, geochemical, and biochemical character (Karadeniz, 2008).

3.3. Conditions Leading to Acid Rock (Mine) Drainage

Not every sulfide-bearing ore deposit causes acid drainage. Similarly, the presence of pyrite, pyrrhotite, or marcasite in a mine does not necessarily mean acid drainage will form. One of the essential conditions for the oxidation of sulfur-bearing minerals, particularly iron sulfides, is the presence of abundant oxygen. The second is moisture, which can occur through direct contact with water or humid atmospheric conditions. Without the simultaneous effect of both factors, oxidation cannot fully proceed.

According to EPA (1994) standards, as previously mentioned, the oxidation of sulfide minerals involves primary agents (sulfide minerals + water + air), secondary agents (such as calcite and dolomite or certain silicate minerals that neutralize the resulting acid or react with newly formed secondary minerals), and tertiary agents (which help transport or consume the acid along its path).

Reactions occurring in oxidation and cementation zones, which have been known for at least a century, reveal that acid rock/mine drainage primarily forms as a result of changes in these zones.

The chemical processes observed in the oxidation zone closely resemble the transformations previously mentioned for sulfur-bearing minerals. Among the most common sulfide minerals in oxidation zones, pyrite undergoes alteration in this zone.

The boundary between oxidation and cementation zones, according to Garrels (1953), is defined by an Eh-pH diagram for Cu-Pb-Zn minerals,

where a straight line connects the points pH = 2, Eh = 0.2 and pH = 10, Eh = -0.2.

These reactions, extending down to the cementation zone and ultimately concluding with karstification, are governed by very specific conditions involving Eh, pH, temperature, pressure, partial CO_2 pressure, and the presence of sulfur in solution (Garrels, 1953).

Considering these conditions, the system can be described thermodynamically as follows:

$CO_2 = MHCO_3^- + MH_2CO_3 + MCO_3^{2-} = 10^{-1.5}$ mol/l (if the environment is only influenced by CO_2 partial pressure)

$S = MSO_4^{2-} + MS + MHS^- + MH_2S = 10^{-1}$ mol/l (if sulfur is present in the environment)

It is possible to compare the sensitivity fields of Pb and Zn under the pH-Eh conditions in karstic processes (Figure 1).

To enable sulfur-bearing metals to become sensitive within the wetting zone of karstification, the following conclusions are required:

1. There must be sufficient sulfur available for sulfidation, as the geochemical processes of karst waters increasingly trend toward sulfate formation.
2. For sulfates to be reduced into sulfide forms, reaction rates must be rapid.

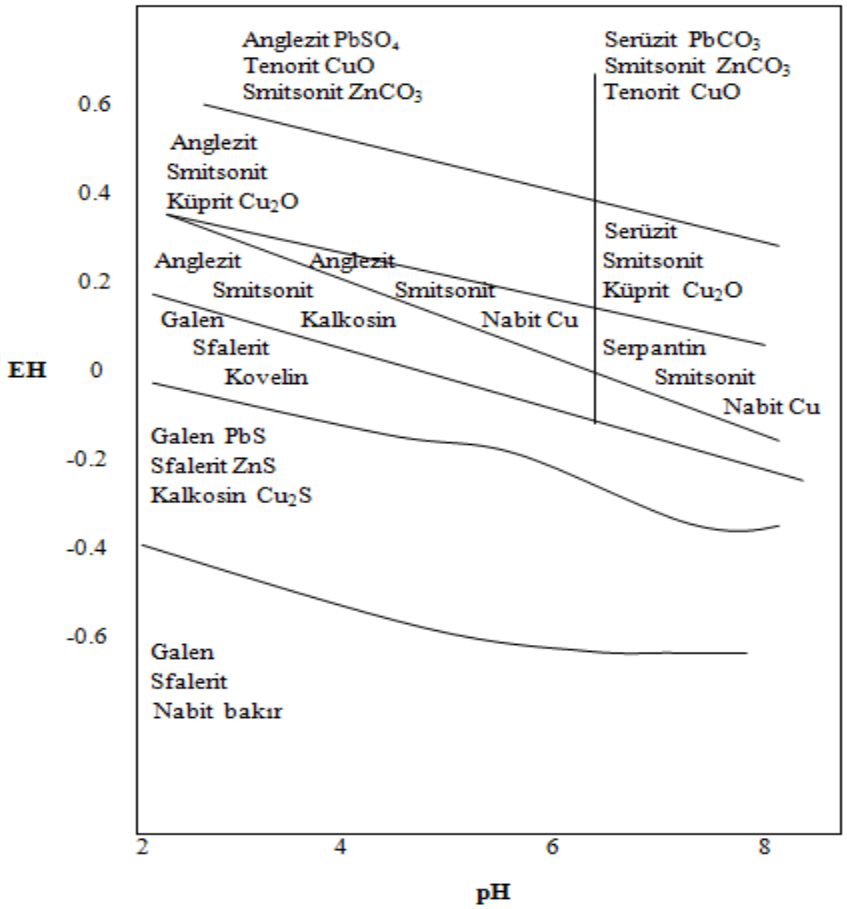


Figure 1. Stability Fields of Some Copper, Lead, and Zinc Minerals (Garrels, 1953).

Physical factors also play a significant role in acid drainage. The initial state of the ore body, host rock composition, faults and other discontinuities, interlayer voids, and permeability are important characteristics. On the other hand, the particle size and other physical properties of the remaining waste material—such as overburden, residue, and tailings—after the ore is extracted and processed, also affect the development rate of the drainage.

Each piece of data obtained through field and laboratory studies holds great importance for the final assessment. However, the data relied upon to determine the site's acid-generating and neutralization potential, and to characterize the drainage, are obtained through geochemical static

and kinetic (dynamic) tests or mathematical modeling studies, the details of which are presented in this section. This stage is the main determinant in predictions, as simulating potentially occurring natural processes in the laboratory—especially through kinetic tests—offers critical insights.

For a sulfide ore site where acid mine drainage formation is possible, the data obtained through field and laboratory-based observation, monitoring, measurement, analysis, and testing are complemented by desk-based studies. At this point, the site is defined and its characteristics are revealed. The final step, which determines whether mitigation measures are required and, if so, what strategy to follow, is the completion of geochemical static and kinetic testing.

3.4. Estimation of Acid Mine Drainage Potential and Drainage Quality

Estimation involves evaluating whether acid rock/mine drainage potential exists, and if so, its magnitude, persistence, potential for metal release into the environment, and long-term effects. Methods used in such estimation include geochemical static and dynamic (kinetic) tests, geochemical modeling, leaching tests, geostatistical modeling (3D modeling), and interpretation of data from field and laboratory studies. Additionally, data derived from monitoring and observations at other mine sites with similar characteristics may also be used.

Among the most frequently used methods, geochemical static tests are based on the interpretation of the algebraic difference or ratio between the acid generation potential and the acid-neutralizing potential of the sampled sites. These tests largely rely on chemical and mineralogical analyses and simple procedures, and are preferred due to their ease of application, low cost, and ability to deliver rapid results.

In contrast, obtaining results from geochemical kinetic tests takes longer. However, since they are based on simulating natural conditions in the laboratory, they provide more reliable values compared to static tests. Mathematical models aiming for the fastest results simplify the mechanisms of acid drainage formation through a series of assumptions. While they reduce time and cost, they also reduce reliability. Their use is not yet widespread, as these models are still in development.

3.4.1 Geochemical Static Tests

According to the Mine Waste Management Regulation (Official Gazette Date: 15/07/2015), in addition to the above analyses, static testing must be conducted for mine wastes containing sulfur if the sulfide-sulfur (S^2) content exceeds 0.1% (e.g., pr EN 15875, ASTM standards). “Analyses related to the characterization of mine wastes shall be conducted in laboratories authorized by the Ministry. Until the Ministry grants authorization for sulfide-sulfur (S^2) analyses, static and kinetic tests may be conducted by national/internationally accredited/qualified/authorized institutions or by university laboratories.”

Static test results and their classification can provide site-specific information regarding the validity and approval of the results, the definition of sulfur oxidation and acid generation rates, the neutralization rate and exhaustion, the presence of NP, understanding the temporal structure of AMD, selection and development of AMD control methods, prediction of drainage water quality, and comparison of mitigation strategies.

The geochemical static test is a predictive method aimed at partially calculating and partially testing the maximum acid generation and maximum acid neutralization potentials of samples considered representative of the site, then comparing these values to determine the

likelihood of acid generation. These are preliminary screening tests used at the beginning of prediction studies. They are easier to implement, short-term, low-cost, and guide the next stages. Acid generation potential is calculated based on the sulfide minerals in the sample's mineralogical composition, while neutralization potential is determined experimentally through simple tests, which vary depending on the selected method. In static tests, results from both directions are compared and interpreted using mathematical expressions. Since these are hypothetical tests, they serve as indicators of capacity.

Static tests only measure acid generation and neutralization capacities. They do not consider the differences in dissolution rates between acid-producing and neutralizing minerals (Lapakko, 2002; Karadeniz, 2008).

In static tests, the probability of acidic drainage formation is estimated by comparing the maximum acid generation potentials of the samples with their maximum neutralization potentials. Acid Generation Potential (AGP – also known as Maximum Potential Acidity) is calculated by multiplying the percentage of sulfur or sulfide compounds in the sample (depending on the selected test) by a conversion factor (31.2S*%S). Neutralization Potential (NP – acid neutralization capacity) is the measure of carbonate minerals present in the sample that have the capacity to neutralize acid. NP is determined by adding acid to the sample, titrating the remaining acid, or directly titrating the sample with acid. Net Neutralization Potential (NNP – also known as Net Acid Generation Potential) or the Acid/Base Account is calculated either by subtracting AGP from NP or by dividing NP by AGP. Static test results are expressed as the mass of calcium carbonate (kg, ton, etc.) required per 1,000 tons of rock to neutralize the generated acid (Karadeniz, 2008).

Static tests estimate acid generation potential either based on total sulfur or sulfide mineral content. When calculations are based on total sulfur content, minerals that do not generate acid, such as barite and gypsum, are also included, leading to an overestimation. Conversely, if the calculation considers only sulfide minerals, acid-generating minerals like melanterite and jarosite are excluded, resulting in underestimation. The conclusion here is that different static test methods may yield inconsistent neutralization potential values for the same sample. Contributing factors may include particle size of the mine waste, type of acid used, amount of acid added (pH of the environment), temperature, duration, and final pH in back titration (if conducted). The most influential factors are particle size, acid addition, and the implementation of back titration. The magnitude of the resulting discrepancy depends on the mineralogy of the sample.

3.4.2. Acid-Base Accounting Methods

Acid/base accounting (ABA) tests are commonly employed due to their quick results and relatively low cost. These tests, although frequently modified with minor adjustments, are widely used in acid rock/mine drainage (ARD/AMD) assessments. Various types of these tests were previously discussed in detail. In the present study, the standard acid-base accounting method will be applied. This method does not involve any experimental procedures; instead, the sulfur content in the samples is determined analytically. The acid generation potential (AGP) is calculated based on the assumption that the sulfur present in the solid phase is entirely in the form of sulfide sulfur (S^2), originating solely from pyrite. It is further assumed that all sulfur will react and be oxidized to sulfate (SO^{2-}). The reaction predicts that one mole of sulfur will generate four moles of protons (H^+), i.e., two moles of acid. Additionally, it is assumed that the only

oxidizing agents are oxygen and water, and that the iron released from pyrite is fully oxidized to Fe^{3+} and precipitated as $Fe(OH)_3$ (Marin and Hutt, 1997):

$$FeS_2\ (s) + 3.75\ O_2 + 3.5\ H_2O \rightarrow 4H^+ + 2SO_4^{2-} + Fe(OH)_3$$

Sulfur (S) Analysis:

In ARD prediction, the determination of potential acidity is based on sulfur analysis. Sulfur may be present in various forms within different minerals, including sulfides, sulfates, and organic compounds. Depending on the static prediction method, the calculation may require either total sulfur content or only sulfide-bound sulfur. Therefore, understanding both the quantity and the form of sulfur in the sample is essential.

Carbon (C) Analysis:

The second step in static acid-base prediction tests involves determining the neutralization potential (NP). Carbonate minerals play the main role in neutralization reactions. However, not all carbon is carbonate-bound; it may also exist as graphite or organic carbon. One of the analytical methods for determining total carbon content (e.g., ASTM E-1915-17 (ASTM 2000a), BS-1377-3/1990) involves combustion of the sample in an oxygen-rich atmosphere at high temperature, where it is assumed all carbon is converted to CO_2. The resulting gas is collected and filtered, and the CO_2 content is measured (Lapakko, 2002; Karadeniz, 2008).

To achieve reliable results, chemical analyses must be supported by mineralogical and petrographic analyses.

Standard ABA

The first step in the standard ABA method is the calculation of the AGP. No experimental procedures are involved at this stage. The sulfur

content in the sample is determined analytically. While calculating AGP, it is assumed that all sulfur exists as disulfide (S^{2-}), originates from pyrite, and will completely react by oxidizing into sulfate.

Among the tests that allow static prediction of acid generation potential, the ABA method and its variations are the most widely interpreted. According to this approach, if a sample has a net acid generation potential greater than zero, it is considered potentially acid-generating. If the result is equal to or less than zero, the sample is considered non-acid generating. In practice, values near zero (e.g., -2 < result < +2) are regarded as a zone of uncertainty. Furthermore, in Net Acid Generation (NAG) tests, if the final measured pH is greater than 4, the sample is considered non-acid generating; if the pH is ≤ 4, the oxidation of sulfur is assumed to produce a significant amount of acid, and the sample is classified as high-risk (Karadeniz, 2008).

The neutralization of acidity caused by sulfur-bearing iron minerals is most effectively achieved by carbonate minerals, which are widespread in the Earth's crust. In addition to carbonates, silicates, oxides, hydroxides, and oxyhydroxides are also mineral groups that contribute to neutralization capacity. Some of these minerals are listed in Table 1, and their respective neutralization capacities are presented in Table 2.

Table 1. Some Minerals with Neutralizing Potential for Produced Acidity (Paktunç, 1998).

Mineral	Chemical Formula	Mineral	Chemical Formula
Calcite	$CaCO_3$	**Kaolinite**	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	**Albite**	$NaAl_3O_8$
Ankerite	$(CaFe(CO_3)_2)$	**Chlorite**	$Mg_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$
K-Feldspar	$KAlSi_3O_8$	**Anorthite**	$CaAl_2Si_2O_8$
Biotite	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	**Olivine**	$(Mg,Fe)_2SiO_4$
Muscovite	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	**Brucite**	$Mg(OH)_2$

Table 2. Maximum Neutralization Potential of Some Minerals (Paktunç, 1998).

Mineral	Chemical Formula	Required Moles to Neutralize 1 Mole of H_2SO_4
Calcite	$CaCO_3$	1
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	1
Ankerite	$CaFeMgCO_3$	1.25
Chlorite	$Mg_3Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$	0.125
Muscovite	$KAl2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	0.2
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	0.67
Olivine	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	0.5
Hornblende	Ca1.7 Mg3.5 Fe1.3 Al1.3 Si7O22(OH)2	0.11
K-Feldspar	$KAlSi_3O_8$	0.5
Plagioclase (Ano)	$NaAlSi_3O_8$	0.5
Plagioclase (Anioo)	$CaAlSi_3O_8$	0.25
Goethite	$Fe(OH)_3$	0.67
Brucite	$Mg(OH)_2$	1
Gibbsite	$Al(OH)_3$	0.67

* It is assumed that the mineral completely dissolves and secondary phases are not affected by precipitation.

3.4.2.1. Kinetic Tests

The selection, design, and execution of the most suitable tests for field and operational purposes, along with validating the tests using geochemical models, are critical. Advanced expertise is required to support the potential drainage chemistry and mitigation structures (e.g., isolation, chemical-physical barriers, gas barriers to prevent oxidation) through empirical and mechanistic geochemical models (PHREEQC). These models are essential in the design and operational processes of treatment plants, based on treatment scenarios and ensuring the validity of the tests.

3.4.2.2. Column Test (Tremblay and Hogan, 2000)

Column tests can predict drainage chemistry for site-specific projects, supported by data such as site hydraulics, hydrogeology, and climate.

Depending on the required objective and data, drainage chemistry, primary reaction rates, element leaching, acid and neutralization reactions, etc., can be simulated using a column test under various scenarios, such as different material particle sizes, oxygenated-anoxic conditions (EH), and acid or neutral pH variations. These simulations provide valuable data for specific activities such as waste piles, excavation ponds, exhausted ore materials, closed mine leakage, filling, and dewatering.

3.4.2.3. Humidity Cell Test (Sobek et al., 1978)

This test predicts primary reaction rates and element leaching under oxygenated air conditions with varying pH levels. It helps to understand acid and neutralization reactions, interpret ABA data, and provides site-specific NPR criteria, AP-NP depletion times, etc. However, it does not predict potential drainage chemistry but simulates extreme reactive conditions.

3.4.2.4. Field Lysimeter Test (LISITEST)

This test considers the changes in water quality over time due to precipitation or surface and groundwater infiltration at storage and excavation sites. It can be designed for seasonal or multi-year periods. By providing both leakage rates and water quality data, it is highly beneficial in environmental impact assessments (EIA) and monitoring studies, providing experimental data for future simulation models.

3.4.2.5. Wall Leach Station (Morin and Hutt, 2006)

The wall leach station allows for the understanding of the long-term behavior of water that may interact with mine walls and its effects on water quality. This test is used in cases where other kinetic tests cannot provide

effective data, simulating special conditions in a manner similar to the HCT test.

3.4.2.6. Field Test Pads

Field test pads are based on the application of column tests in actual field conditions at a real scale. They are used to determine drainage quality under field conditions.

3.4.2.7. Full-Scale Field Monitoring Data for Unit-Based Operations (Storage, Dewatering, Excavation Ponds, Closed Mines, etc.)

Field monitoring data from unit-based operations can be compared with test results. If the characteristics of the monitoring points are predictable (e.g., representing the whole, homogeneity, heat differences, isolation, and regular climatic factors), they can provide crucial data such as primary mineral weathering rates, metal leaching trends, solubility constraints, isolation due to secondary mineral precipitation, unit-based drainage chemistry, and correlations with predicted contaminants. The operational drainage monitoring data collected during the mine's operational life is often a primary source for reviewing closure plans.

4. RESULTS

Mining activities are typically large-scale projects with high initial risks. Additionally, environmental concerns are increasing, putting pressure on investors to show more sensitivity to nature. As a result, the miner must identify the potential negative environmental impacts of the activity and develop solutions for potential issues, while also aiming for quick results for economic reasons. Therefore, time is a critical parameter in the early

detection of potential environmental impacts and taking necessary precautions.

By identifying the potential adverse effects of mining activities in advance through environmental planning, it is possible to minimize or eliminate these effects. Mining activities lead to numerous environmental issues, both directly and indirectly, and the economic consequences can be surprisingly large. All activities, from the initial phase to the post-closure period of the mine, must be planned in advance. With increasing environmental awareness, mining activities must be carried out within the framework of laws and standards enforced through penalties. Acid mine drainage (AMD) issues should be removed as environmental concerns. The rehabilitation of lakes with low pH, high acidity, and high metal concentrations is of great importance for human and environmental health.

REFERENCES

Balcı, Ç., N., Gül, S., Kılıç, M. M., Karagüler, N. G., Sarı, E., & Sönmez, M. Ş., 2014. Balya (Balıkesir) Pb-Zn Madeni Atık Sahasının Biyojeokimyası ve Asidik Maden Drenajı Oluşumuna Etkileri, Türkiye Jeoloji Bülteni, 57(3), 1-24.

Garrels, R. M., 1953. Mineral species as functions of pH and oxidation - reduction potentials, with special referenceb to the zone of and secondary enrichment of sulfide ore deposits : Geochim. Cosmoschim- Acta, 5, 4, 153-158.

Jambor, J. L., Dutrizac, J. E., & Chen, T. T., 2000. Statik Testlerde Belirli Minerallerin Nötralizasyon Potansiyeline Katkıları. s. 551-565. İn Proc. 5th Int. Conf. Acid Rock Drainage, Denver. 21–24 Cilt. 1. Soc. Madencilik Metal. Keşfedin, Littleton, CO.

Jambor, J. L., & Dutrizac. J. E., 2002. Asit Drenajının Statik Test Tahminlerinde Partikül Boyutunun Nötralizasyon Potansiyeli Üzerindeki Etkisi. 651-663.

Karadeniz, M., 2008, Sülfürlü Madenlerin Sorunu Asit Maden Drenajı ve Çözümü, MMO Yayını, 231 s, Ankara

Lapakko, K. A., 2002. Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview, International Institute for Environment and Development, No:67.

Miller, S. D., 1996. Advances in Acid Mine Drainage: Prediction and Implication for Risk Management. Proceeding of the 3 rd International and 21 st Annual Minerals Council of Australia Environmental Workshop. Sf. 149-157.

Morin, K. A., & Hutt, N. M., 1997. Environmental Geochemistry of Minesite Drainage; Practical Theory and Case Studies. Canada.

Morin, K. A. & Hutt, N. M., 2006. Ambiguities in scaling of ARD predictions from hand sample to full-size minesite component. In: Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (these proceedings, March 26-30, 2006, St. Louis, MO, USA).

Paktunç, A. D., 1999. Minerological Constrains on the Determination of Neutralization Potential and Prediction of Acid Mine Drainage. Environmental Geology. Sayı: 38. Sf. 82-84.

Paktunç, A. D., 1998. Characterization of Mine Wastes for Prediction of Asid Mine Drainage, Environmenta Impacts of Mining Activities, Azcue, J. M.,(Ed). 19-40.

Sobek, A., Schuller, W., Freemen, J. & Smith, R., 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. Industrial Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. Environmental Protection Technology Series, Report EPA-600/2-78-054. 216 p.

Tremblay, G. A. & Hogan, C. M. 2000. MEND Manual, Volume 3 – Prediction. Natural Resources Canada. MEND Report 5.4.2c. 105 p.

Weber, P. A., Hughesu, J. B., Conner, L. B., Lindsay, P., & Smart, R. C., 2006. Shortterm Acid Rock Drainage Characteristics Determined by Paste Ph and Kinetic Nag Testing: Cypress Prospect. New Zealand

White, W. W. III., Lapokko, K. A., & Cox, R. L., 1999. Static Test Methods Most Commonly Used to Predict Acid Mine Drainage: Practical, Guidelines for Use and Interpratation. Sf. 325-338.

Yörükoğlu, A., & Karadeniz, M., 2003. Asit Maden Drenajı Kestirim Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Türkiye 18 Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi - IMCET2003 & 2003, ISBN 975-395-606-1.

KROM ENDÜSTRİSİNİN GELECEK STRATEJİLERİ

FUTURE STRATEGIES OF THE CHROME INDUSTRY

Bülent Aksu, Mehmet Özyurt, G. Şeyda Çağlayan, Selçuk Ünal, Mustafa Boyraz

Türkiye Krom Üreticileri Derneği (Kromder), Ankara

Madencilik, insanlık tarihinin en eski ekonomik faaliyetlerinden biridir. Sadece uygarlıkların gelişiminde değil, toplumsal, kültürel ve teknolojik ilerlemelerde de önemli bir rol oynamıştır. Günümüzde de modern ekonomilerin vazgeçilmez bir parçası olmayı sürdürmektedir. Yaklaşık 90 değerli maden türünün 70'ine ev sahipliği yapan Türkiye, madencilik çeşitliliği açısından dünya sıralamasında 8. sıradadır. Ancak, bu zenginlik sadece bir fırsat değil, aynı zamanda sorumluluk anlamına gelir. Bu kaynakların etkin, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesi, kamu, özel sektör ve akademi iş birliğiyle mümkün olacaktır.

Dünya tarihine baktığımızda, sanayi devrimleri ve ekonomik sıçramalar çoğu zaman madencilikle başlamıştır. Avrupa Birliği'nin temeli bile kömür ve çelik iş birliğiyle atılmıştır. Ancak ülkemizde krom madenciliği başta olmak üzere bazı alanlarda ilerleme sınırlıdır. Nedenleri arasında derinleşen ocaklar, azalan kaliteli rezervler, sanayi ile entegrasyon eksikliği ve uzun süren izin süreçleri yer almaktadır. Mevzuattaki belirsizlikler de yatırımcı güvenini azaltmakta, sektörün gelişmesini yavaşlatmaktadır.

Sektör yüksek yatırımlar ve uzun geri dönüş süreleri gerektirir. Buna rağmen kısa vadeli kazanç arayışı, plansızlık ve aramaya yeterli önem verilmemesi, sektörün yapısını zayıflatmaktadır.

1. **Toplumsal farkındalık artırılmalı:** İlkokuldan üniversiteye kadar yeraltı kaynaklarının önemi anlatılmalı. Görsel ve dijital materyallerle, madenciliğin çevreyle uyumlu bir faaliyet olabileceği vurgulanmalıdır.
2. **Çevresel duyarlılık güçlendirilmeli:** Rehabilitasyon projeleri artırılmalı, çevreyle uyumlu faaliyetlerin önemi topluma anlatılmalıdır.
3. **Mevzuat çalışmaları tüm paydaşlarla yapılmalı:** Yalnızca Enerji Bakanlığı değil, diğer bakanlıklar, akademi, sektör temsilcileri ve meslek odaları sürece dahil edilmelidir.
4. **Tabii Kaynaklar Bakanlığı kurulmalı:** Maden, jeotermal, petrol, su gibi doğal kaynak izinleri tek çatı altında toplanmalı; süreçler sade, şeffaf ve öngörülebilir hale gelmelidir.
5. **Otomatik onay sistemi getirilmeli:** İzinler süresinde sonuçlanmazsa, sistem otomatik olarak onay verebilmelidir.
6. **Ruhsat güvencesi sağlanmalı:** Kazanılmış haklar korunmalı, ruhsat sahipleri daha sonra çıkan kanunlardan olumsuz etkilenmemelidir.
7. **ÇED süreçleri sadeleştirilmeli:** Kurum sayısı azaltılmalı, karar mekanizmaları hızlandırılmalıdır.
8. **Yatırımlar teşvik edilmeli:** Özellikle uzun vadeli geri dönüşlü projeler için özel teşvikler sağlanmalıdır.
9. **Vergi borçları nedeniyle ruhsat iptali önlenmeli:** Diğer faaliyetlerden kaynaklı borçlar nedeniyle ruhsatların iptal edilmemesi sağlanmalıdır.
10. **"5 yılda 3 yıl üretim" şartı esnetilmeli:** Ekonomik koşullar ve piyasa dalgalanmaları dikkate alınarak daha esnek bir uygulama getirilmelidir.

11. **Sektörlere özel yönetmelikler çıkarılmalı:** Metalik madenler, agrega ve kömür gibi farklı maden gruplarının ayrı mevzuatlarla düzenlenmesi gereklidir.
12. **Ferrokrom sanayi desteklenmeli:** Krom madenlerimizin potansiyelinden tam yararlanmak için ferrokrom üretimi artırılmalıdır.

Türkiye madencilikte büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak bu potansiyeli değerlendirmek için güçlü bir vizyon, toplumsal destek, yatırım güvenliği ve modern bir mevzuat yapısı şarttır.

TMMOB

MADEN MÜHENDISLERI ODASI

ÇUKUROVA ÜNIVERSITESI,MITHAT ÖZSAN AMFISI, ADANA/TÜRKIYE