9. ULUSLARARASI MADEN MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ KONGRESİ BİLDİRİLER KİTABI

PROCEEDINGS OF 9th INTERNATIONAL CONGRESS OF MINING MACHINERY & TECHNOLOGIES

13-15 EYLÜL SEPTEMBER 2023

İZMİR / TÜRKİYE



EDİTÖRLER/EDITORS

Fırat BURAT | Tülay SUİÇMEZ | Kemal BARIŞ

TMMOB

MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI

MİNEX | MADENCİLİK, DOĞAL KAYNAKLAR VE TEKNOLOJİLERİ FUARI

MINING, NATURAL RESOURCES AND TECHNOLOGIES FAIR

PROCEEDINGS OF
9th INTERNATIONAL CONGRESS OF MINING MACHINERY & TECHNOLOGIES

9. ULUSLARARASI MADEN MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ KONGRESİ BİLDİRİLER KİTABI

13-15 September / Eylül 2023
İzmir – Türkiye

Editors / Editörler

Fırat BURAT
Tülay SUİÇMEZ
Kemal BARIŞ

UCTEA, Chamber of Mining Engineers of Türkiye
TMMOB, Maden Mühendisleri Odası

PROCEEDINGS OF
9th INTERNATIONAL CONGRESS OF MINING MACHINERY
& TECHNOLOGIES

9. ULUSLARARASI MADEN MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ
KONGRESİ BİLDİRİLER KİTABI

13-15 September / Eylül 2023
İzmir – Türkiye

Website / İnternet Sitesi: www.immat.org.tr

All rights reserved © 2023
No parts of this book may be reproduced in any forms any means, without written permission of The Chamber of Mining Engineers of Turkey.

Tüm Hakları Saklıdır © 2023
TMMOB MadenMühendisleri Odası'nın yazılı izni olmaksızın bu kitap veya bu kitabın herhangi bir kısmı yayınlanamaz.

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

Editors / Editörler: Fırat BURAT, Tülay SUİÇMEZ, Kemal BARIŞ

Layout / Dizgi : Fırat BURAT

ISBN: 978-605-01-1578-9

Kongre kitabının – flaşh belleğin baskısı;
LABRİS Maden ve Makina Sanayi AŞ.
katkılarıyla gerçekleştirilmiştir.

SUNUŞ

Birincisi 2007 yılında düzenlenen 9. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi'nin (IMMAT 2023) bu kadar kalıcı, dönemsel ve başarılı bir geçmişe sahip olmasını pek fazla delegenin hayal etmediğini sanıyoruz. Kongremiz; sürekli olarak büyümeyi ve sonunda 2017 yılında uluslararası bir kimlik kazanmayı başardı.

IMMAT2023 bildirilerini etkinliğin yazarlarına ve delegelerine sunmak bizim için büyük bir ayrıcalıktır. Bunu faydalı, heyecan verici ve ilham verici bulacağınızı umuyoruz. Kongre Bildiriler Kitabı, IMMAT2023 sırasında sunulan katkıların çoğunun yazılı versiyonlarını içermektedir. Bu kitap kapsamında madencilikle ilgili konular, sağlanan çözümler, madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliğinin bilimsel ve teknik yönleri ve bunların sosyal etkileri ele alınmaktadır.

IMMAT2023, dünyanın dört bir yanından uzmanların, bilim adamlarının ve endüstrinin bir araya geldiği, madencilik sektöründeki son teknolojik gelişmeler, üretim yöntemleri ile ilgili verimli tartışmalara olanak sağlayan bir platform oluşturdu. Kongre, gerek ülkemizden ve gerekse çeşitli ülkelerden gelen katılımcıların kendi araştırma alanlarındaki konuları sunmaları ve tartışmaları için de iyi bir fırsat olmuştur.

Maden mühendisliğinin, altta yatan temel ilkelerin anlaşılması ve sonuçta yeni teknolojilerin geliştirilmesi açısından diğer mühendislik konularına paralel olarak özünde geliştiğini söylemeye gerek yok. Ancak madencilik sektörü, salt teknik ve ekonomik yönlerin yanı sıra çevre, iş güvenliği, kamu denetimi ve sivil katılım konularıyla ilgili birçok zorlukla karşı karşıyadır. Bu kapsamda çözüm önerilerinin anlatılması, tartışılması ve kayıt altına alınması amacıyla IMMAT2023 düzenlenmiştir.

İMMAT2023 13-15 Eylül 2023 tarihleri arasında TMMOB Maden Mühendisleri Odası ile İzmir Büyükşehir Belediyesi birlikte düzenlenmiştir. Kongremizde 2 panel, 9 oturum düzenlenmiş olup bildiriler kitabında 2 çağrılı olmak üzere toplam 34 adet bilimsel bildiri yayına alınmıştır.

TMMOB Maden Mühendisleri Odası olarak; kongre ve fuarın düzenlenmesinde ortağımız olan İzmir Büyükşehir Belediyesi ve İZFAŞ Genel Müdürlüğü ile Maden Mühendisleri Odası İzmir Şubesi'ne, Kongre Yürütme Kurulu Başkan ve üyelerine, kongremize bilimsel zenginlik kazandıran bildiri sahipleri, kongre yürütümünde kolaylaştırıcı olan oturum başkanları ile bildirilerin değerlendirilmesinde görev üstlenen Bilimsel Kurul üyelerine teşekkür ederiz.

Saygılarımla;

Ayhan YÜKSEL

TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Yönetim Kurulu Başkanı
13 Eylül 2023, İzmir

ÖNSÖZ

TMMOB Maden Mühendisleri Odası İzmir Şubesi tarafından organize edilen 9. Uluslararası Maden Makineleri ve Teknolojileri Kongresi (İMMAT), 13-15 Eylül 2023 tarihleri arasında MINEX 2023 Madencilik, Doğal Kaynaklar ve Teknolojileri Fuarı ile eş zamanlı olarak İzmir'de gerçekleştirilecektir.

Kongre, alanında uzman seçkin mühendis ve bilim insanları ile önde gelen üreticiler ve temsilcilerini bir araya getirerek ilgili alanlarda bilimsel ve teknik gelişmelerin ve yeniliklerin tartışılacağı bir platform olacaktır. Ayrıca madencilik ve cevher işleme faaliyetlerinde yerli teknoloji geliştirme ve üretimin teşvik edilmesi de amaçlanmaktadır.

Kongre, çok daha verimli maden üretiminin geliştirilmesi, işletilmesi, cevher hazırlama ve zenginleştirme, doğal taş ve minerallerin üretiminde kullanılan tüm makine ve ekipmanların üretimi ve seçimi ile verimliliklerinin ve ekonomiye katkılarının tartışılmasına zemin hazırlayacaktır. Ayrıca bilişim teknolojileri, Nesnelerin İnterneti (IoT), kablosuz ağlar, otonom araçlar, sanal gerçeklik alanında geliştirilmiş ve güncel uygulamalar, üretim verilerinin analizinde kullanılan madencilik ekipmanları ve yöntemleri, önleyici bakım çalışmalarının tanıtılması ve ilgili alt başlıklar da kongrenin ana konularındandır. Kongre süresince, bu alandaki güncel durumların, yeniliklerin ve gelişmelerin interaktif olarak tartışılmasının, akademisyenler, devlet ve özel sektör üyeleri, imalatçı firma temsilcileri gibi ulusal ve uluslararası katılımcılar için çok daha ilgi çekici olacağı öngörülmektedir.

Ulusal ve Uluslararası davetli konuşmacılarımızın yanı sıra sektör paydaşlarımızın da desteği ve katılımı bu alandaki bilimsel ve teknik gelişmelerin etkin iletişim ve bilgi aktarımı ile gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Kongre etkinliklerinin birinci günü öğleden sonra "Madencilik ve Medeniyet" ve "Depremler ve Madenciler" konulu 2 panel oturumunda ise mesleğimiz ve meslektaşlarımızın sorunlar ile ülkemizin deprem gerçeğine ilişkin değerlendirmeler gerçekleştirilecektir.

Eş zamanlı olarak düzenlenen kongre ve fuar etkinliklerinin organizasyonunda ortağımız olan İzmir Büyükşehir Belediyesi İZFAŞ Genel Müdürlüğüne teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca bu organizasyonun ev sahipliğini yapan Maden Mühendisleri Odası İzmir Şubesi'ne, kongre yürütme kuruluna, kongremize bildirileri ile katkı koyan yazarlarımıza, bildirileri değerlendiren bilim kurulu üyelerimize ve oturum başkanlarımıza teşekkür ederiz.

Kongrenin, Ulusal Maden Sektörünün gelişmesine, iş sağlığı ve güvenliğinin artırılmasına, yerli maden makinelerinin üretimine ve bilinçli tüketimine katkı sağlamasını temenni ederiz. Katılımınız ve olumlu katkılarınız bizi büyük bir onur kaynağı olacak ve sizleri Kongremizde ağırlamaktan mutluluk duyacağız.

Kongrede görüşmek dileğiyle, Saygılar sunarız.

Prof.Dr. A.Ekrem Yüce, Ali Altıntaş

Kongre Yürütme Kurulu Adına
Kongre Başkanları
13 Eylül 2023

FOREWORD

The 9th International Congress of Mining Machinery and Technologies (IMMAT), organized by the TMMOB Chamber of Mining Engineers İzmir Branch, will be held between 13-15 September 2023 simultaneously with the **MINEX 2023** Mining, Natural Resources, and Technologies Fair in İzmir.

The Congress will bring together distinguished engineers and scientists specialized in the field and leading manufacturers and their representatives to discuss scientific and technical developments and innovations in related areas. Besides, it is also aimed to encourage domestic technology development and production in mining and mineral processing operations.

The Congress will provide a ground for developing much more efficient mine production, operation, ore preparation and enrichment, production and selection of all machinery and equipment used in the production of natural stones and minerals, and discussion of their efficiency and contribution to the economy. Furthermore, information technologies, the Internet of Things (IoT), wireless networks, autonomous vehicles, enhanced and current applications in the field of virtual reality, mining equipment and methods used for the analysis of production data, the introduction of preventive maintenance studies, and related sub-titles are also main subjects of Congress. It is foreseen that during the congress, interactive discussions of current situations, innovations, and developments in that field would be much more attractive to national and international participants including academicians, state and private sector executives, and representatives of manufacturing companies

In addition to our National and International invited speakers, the support and participation of our industry stakeholders will enable scientific and technical developments in this field to be realized through effective communication and information transfer.

In the afternoon of the first day of the congress activities, 2 panel sessions on *"Mining and Civilization"* and *"Earthquakes and Miners"* will discuss the problems related to our profession, colleagues, and the earthquake reality of our country.

We would like to thank the Izmir Metropolitan Municipality İZFAŞ General Directorate, our partner in organizing the congress and fair events held simultaneously. We would also like to thank the Chamber of Mining Engineers İzmir Branch, which hosted this organization, the congress executive committee, authors who contributed to congress with their papers, scientific committee members who evaluated the papers, and session chairs.

We hope that the Congress will contribute to the development of the National Mining Sector, to increase occupational health and safety, and to the production and conscious consumption of domestic mining machinery. Your participation and affirmative contributions shall greatly honor us and we shall be delighted to host you at Congress.

We look forward to seeing you at the Congress.
Regards.

Prof.Dr. A.Ekrem Yüce, Ali Altıntaş

On behalf of the Executive Commitee
Congress Chairs
September 13, 2023

ORGANIZED BY / ORGANİZASYON KURULU

The Chamber of Mining Engineers, Izmir Branch

TMMOB MadenMühendisleri Odası İzmir Şubesi

EXECUTIVE COMMITTEE / YÜRÜTME KURULU

Congress Chairs / Kongre Başkanları

Prof. Dr. A.Ekrem YÜCE
Istanbul Technical University / İstanbul Teknik Üniversitesi
Ali ALTINTAŞ
Chamber of Mining Engineers of Turkey / Maden Mühendisleri Odası

Co-Chairman / II. Başkan

Mustafa HACARLIOĞLU
Chamber of Mining Engineers of Turkey / Maden Mühendisleri Odası

Secretary / Yazman:

Tülay SUİÇMEZ
Chamber of Mining Engineers of Turkey / Maden Mühendisleri Odası

Treasurer / **Sayman**:

Kemal SÖYLEMEZ
Chamber of Mining Engineers of Turkey/ MadenMühendisleriOdası

Members / Üyeler

Prof. Dr. Kemal BARIŞ	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
Doç.Dr. Fırat BURAT	İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Çelik TATAR	Dokuz Eylül Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Behzad N. AKHGAR	Urmia Üniversitesi
Kemal ÇAKMAK	Maden Müh. Odası İzmir Şube
Tevfik Can GÜNAY	Maden Müh. Odası İzmir Şube
Ergin KAHRAMAN	Polyak Eynez Enerji Üret. Mad. San. ve Tic. A.Ş.
Hakan ÜRÜN	Ege Bölge Sanayi Odası
Rüstem ÇETİNKAYA	İstanbul Maden İhracatçıları Birliği
Seyhan DERBENTOĞLU	İZFAŞ
Ekincan ÖZTEKİN	İZFAŞ

THE EXECUTIVE BOARD OF THE CHAMBER OF MINING ENGINEERS
TMMOB MADEN MÜHENDİSLERI ODASI YÖNETİM KURULU

***President* / Başkan**	**:** Ayhan YÜKSEL
***Vice President* / II. Başkan**	**:** Veyis SIR
***Secretary* / Yazman**	**:** Mehmet Erşat AKYAZILI
***Treasurer* / Sayman**	**:** Mehmet ZAMAN
***Members* / Üyeler**	**:** Cemal LAFÇI
	: Gözde DALAK
	: H. Baran KIRMAÇ

THE EXECUTIVE BOARD OF İZMİR BRANCH OF THE CHAMBER OF MINING ENGINEERS
TMMOB MADEN MÜHENDİSLERI ODASI İZMİR ŞUBE YÖNETİM KURULU

***President* / Başkan**	**:** Aykut AKDEMİR
***Vice Presiden t*/ II. Başkan**	**:** Mustafa HACARLIOĞLU
***Secretary* / Yazman**	**:** Mevlüt Kemal ÇAKMAK
***Treasurer* / Sayman**	**:** Kemal SÖYLEMEZ
***Members* / Üyeler**	**:** Arzu Oğuzkurt DOĞAN
	: Gül Uzun AYDIN
	: Yaşar YAKAN

***SCIENTIFIC COMMITTEE*/ BİLİMSEL KURUL**

Doç. Dr. Deniz ADIGÜZEL	*İstanbul Üniversitesi*
Prof. Dr. Nuri Ali AKÇIN	*TMMOB Maden Müh. Odası*
Prof. Dr. Fatma ARSLAN	*İstanbul Teknik Üniversitesi*
Dr. Deniz AYDIN	*Dicle Üniversitesi*
Doç. Dr. Hüseyin BAŞTÜRKÇÜ	*İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. İrfan BAYRAKTAR	*TMMOB Maden Müh. Odası*
Prof. Dr. Ahmet Hakan BENZER	*Hacettepe Üniversitesi*
Prof. Dr. Murat M. Volkan BOZKURT	*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*
Doç. Dr. Fırat BURAT	*İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR	*İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Ahmet DAĞ	*Çukurova Üniversitesi*
Prof. Dr. Nuray DEMİREL	*Orta Doğu Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Bülent ERDEM	*Sivas Cumhuriyet Üniversitesi*
Prof. Dr. Murat ERDEMOĞLU	*İnönü Üniversitesi*
Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN	*Hacettepe Üniversitesi*
Doç. Dr. Yavuz GÜL	*Sivas Cumhuriyet Üniversitesi*
Prof. Dr. Özcan Y. GÜLSOY	*Hacettepe Üniversitesi*
Prof. Dr. Lütfullah GÜNDÜZ	*İzmir Kâtip Çelebi Üniveristesi*
Prof. Dr. Taki GÜLER	*Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi*
Prof. Dr. Osman Zeki HEKİMOĞLU	*Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi*
Prof. Dr. Melih İPHAR	*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*
Prof. Dr. Sair KAHRAMAN	*Hacettepe Üniversitesi*
Ergin KAHRAMAN	*Polyak Eynez Enerji Üretim Mad. San. Tic. A.Ş.*
Prof. Dr. Ali KAHRİMAN	*İstanbul Okan Üniversitesi*
Prof.. Dr. Doğan KARAKUŞ	*Dokuz Eylül Üniversitesi*
Prof. Dr. Celal KARPUZ	*Orta Doğu Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Muammer KAYA	*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*
Prof. Dr. Özen KILIÇ	*Çukurova Üniversitesi*
Prof. Dr. Sait KIZGUT	*Bülent Ecevit Üniversitesi*
Prof. Dr. Turgay ONARGAN	*Dokuz Eylül Üniversitesi*
Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR	*Dokuz Eylül Üniversitesi*
Prof. Dr. M. Kemal ÖZFIRAT	*Dokuz Eylül Üniversitesi*

Prof. Dr. Şafak Gökhan ÖZKAN	*İstanbul Üniversitesi*
Dr. Öğr. Üyesi K. Tahsin PEREK	*İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Okan SU	*Bülent Ecevit Üniversitesi*
Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ	*Dokuz Eylül Üniversitesi*
Prof. Dr. Tuğrul ÜNLÜ	*TMMOB Maden Müh. Odası*
Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER	*Hacettepe Üniversitesi*
Doç. Dr. Özgür YILMAZ	*Bülent Ecevit Üniversitesi*
Necati YILDIZ	*Bemad Madencilik*
Prof. Dr. A. Ekrem YÜCE	*İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Caner ZAMBAK	*Türkiye Madenciler Derneği*

CONTENTS / İÇİNDEKİLER

SUNUŞ iii
ÖNSÖZ..... iv
FOREWORD..... v
ORGANIZED BY/ ORGANİZASYON KURULU vi
EXECUTIVE BOARD of UCTEA/ TMMOB YÖNETİM KURULU vii
SCIENTIFIC COMMITTEE/ BİLİMSEL KURUL viii
PROCEEDINGS / BİLDİRİLER x

PROCEEDINGS / BİLDİRİLER

Maden Üretiminde ve Tünel Açmada Kullanılan Yeni Kazı Teknolojileri
New Excavation Technologies in Mining and Tunnelling
N. Bilgin (Çağrılı konuşmacı / Invited speaker) 1

A Short Pragmatic Overview on The Development of Flotation Machines from Historical, Mechanical, and Metallurgical Perspectives
Flotasyon Makinelerinin Gelişimine Tarihsel, Mekanik ve Metalurjik Açılardan Kısa Pragmatik Bir Bakış
A. Hassanzadeh (Çağrılı konuşmacı / Invited speaker) 10

Günümüzde Kullanılan Tam Cephe Tünel Açma Makinelerinin Kesici Kafa Tasarımlarının Değerlendirilmesi
Evaluation of Cutter Head Design of Current Tunnel Boring Machines (TBM)
O. Z. Hekimoğlu 16

Polyak Eynez'de Tam Mekanize Uzunayak Madenciliğinde Konveyör Motorlarında Sürücü Kullanımın Avantajlarının İncelenmesi
Investigation of the Advantages of Using Drives in Conveyor Motors in Fully Mechanized Longwall Mining in Polyak Eynez
E. Kahraman, E. Elban, E. Çelik 25

Optimization of Production Dozing in Open Cut Mines
Açık Ocak Kömür Madenciliğinde Dozerle Yığın Öteleme Optimizasyonu
M. Doktan, Y.S. İnci 36

Investigation The Effect of Permeability and Fracturing Parameters on CO_2 Capture in Aquifer Reservoirs
Akifer Rezervuarlarında Geçirgenlik ve Kırılma Parametrelerinin CO_2 *Yakalanması Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*
P. Zafar, E. Moosavi 47

Döner Kepçe Ekskavatör Kazı Sistemi İyileştirmelerinin Üretim Kapasitesine Etkisinin Araştırılması
Investigation of the Effect on Bucket Wheel Excavator Improvements on Production Capacity
T. Mallı 51

Yerli Bir İnklinometre Cihazının Tasarımı ve Üretimi
Design and Production of a Domestic Inclinometer Device
Ö. Öztürk, V. Özacar, T. Özacar Öztürk, S. Eren Özacar 61

Kalite Kontrol Grafikleri ve Pareto Analizinin Hazır Beton Tesisinde Uygulanması
Application of Quality Control Graphs and Pareto Analysis in the Ready Concrete Plant
V. Arslan 69

Trakya Bölgesinde Galeri Hazırlık Çalışmalarının Performansının İncelenmesi
Investigation of the Performance of the Gallery Preparation Works ın The Trakya Region
O. Yazıcı, S. Sarımehmet, C. Yılmaz, T. Parlak, B. Bozdağ 79

Application of Directional Drilling Technology for Gas and Water Hazard Control in Underground Coal Mine
Yeraltı Kömür Madeninde Gaz ve Su Tehlike Kontrolü için Yönlü Sondaj Teknolojisinin Uygulanması
Qianhhui Ji 89

Yeraltı Linyit İşletmesinde Gaz Kromatografisi Kullamının Önemi
Application and Importance of Gas Chromatography in Underground Mining
E. Kahraman, A. R. Rend 98

Yeraltı Kömür Madenlerinde Paletli Yükleyicilerin Hareket Kaabiliyetinin Tasarımı
Mobility Design of Crawler Loaders in Underdround Coal Mines
G. Bayar, O. Su, A. Özarslan, A. Topuz, B. Erdoğan, U. Sakız, H. Kaya, M. Kiraz, H. Yıldırım.. 108

Eva Esaslı Su Yalıtım Membranlarının Nem Transferi ve Tünel Yapı Performansına Etkileri
The Effects of Eva Based Waterproofing Membranes on Moisture Transfer and Tunnel Construction Performance
C.M. Cısdık, S.N. Bıçakçı, H.K. Akkoyun, U.A. Doğan 118

Metal Supported Rubber Coating (MSRC) Method In Flotation Cells
Flotasyon Hücrelerinde Metal Destekli Kauçuk Kaplama (MDKK) Yöntemi
B. Tüfekçioğlu, Ö. Y. Gülsoy 128

Dense Medium Separation Testing in A Base Metal Beneficiation Application
Bir Baz Metal Zenginleştirme Uygulamasında Yoğun Ortam Ayırma Testi
N. van Vuuren 140

Effects Of Parameters On Screening Aggregate Material By High-Frequency Screen For Sand Washing: A Case Study And Comparison With Sand Washing Equipment
Parametrelerin Kum Yıkama İçin Yüksek Frekanslı Elek ile Agrega Malzemesinin Elenmesi Üzerindeki Etkileri: Bir Vaka Çalışması ve Kum Yıkama Ekipmanları ile Karşılaştırma
O. Başaran 149

Leonarditlerin ve Linyitlerin Kurutulmasına Yönelik Kurutucu Tasarımı
Evaporator Design for the Dehumidification of Leonardites and Lignites
G. Yapıcı, E. Kulaç, M. Bilen, S. Kizgut, I. Toroğlu, B. Akkaya, S. Yılmaz 156

Trakya Bölgesinde Tam Mekanize Uzunayakların Üretim Hızının İncelenmesi
Investigation of the Production Speed of Fully Mechanized Longwall System in The Thrace Region
O. Yazıcı, S. Keskin, T. Parlak, G. Karşı 165

Akışkan Yataklı Kurutucu Teknolojisi
Fluidized Bed Dryer Technology
A.S. Satılmış, Z.E. Savcı 173

Türkiye Stratejik Hammaddelerinin Fiziksel Zenginleştirme Olanakları
Possibilities of Physical Beneficiation of Strategic Raw Materials of Türkiye
G. Ersever Angur, T. Uysal, C. Erust Ünal 181

Kızıldağ (Karaman-Türkiye) Şeyl Cevherinin NTE Kazanımı İçin Karakterizasyonu
Characterization of Kızıldağ (Karaman-Türkiye) Shale Ore for REE Recovery
T. Uysal, T. Kıyak, C. Erust Ünal, H. Sis, M. Erdemoğlu 187

HPGR Influences on Downstream Ball Mill According Bond Tests and Energy Calculations
Bond Testleri ve Enerji Hesaplamalarına Göre HPGR'nin Bilyalı Değirmen Üzerindeki Etkileri
F. Heinicke, H. Lieberwirth, M. Pfeifer 196

Madencilikte Karıştırmalı Değirmen Kullanımı
Use of Stirred Mills in Mining
B. Akkaya, I. Toroglu, S. Kizgut, M. Bilen, S. Yılmaz 206

Effects and Sequencing of Grinding Parameters for Ultrafine Talc Grinding in a Vibrating Ball Mill: A Tests-Based Approach
Titreşimli Bilyalı Değirmende Ultra İnce Talk Öğütme için Öğütme Parametrelerinin Etkileri ve Sıralaması: Test Tabanlı Bir Yaklaşım
O. Başaran, A. E. Yüce 216

Preparation of NZVC from Industrial Solvent Extraction Process through Green and Chemical Methods
Yeşil ve Kimyasal Yöntemlerle Endüstriyel Solvent Ekstraksiyon Prosesinde NZVC Hazırlanması
B. N. Akhgar, M. Kavanlouei 225

Altın Madenciliğinde Yığın Liçi Uygulamalarında Mobil Teleskopik Konveyör Uygulamaları
Mobile Telescopic Conveyors Used in Gold Mines for Heap Leaching Applications
O. Toprak 233

Hibrit Aşınma Plakalarının Darbeli Abrazyon Aşınma Davranışlarının Laboratuvar Ölçeğinde İncelenmesi
Investigation of Impact Abrasive Wear Behavior of Hybrid Wear Liners at Laboratory Scale
T. Dokuz, İ. C. Duman, G. Pürçek 242

Akülü Elektrikli Lokomotiflerde Değişken Anahtarlama Frekansının Motor Ömrü ve Güç Elektroniği Bileşenlerine Etkisi
Effect of Variable Switching Frequency on Motor Life and Power Electronic Components in Battery Electric Locomotives
E. Eren, S.B. Öztürk, H. Kaya 250

Yerden Kumandalı Hava Araçlarının (Drone) Patlatma Verimliliğinin Değerlendirilmesinde Kullanımı
Applications of Drones in Evaluation of Blasting Efficiency
T. Hüdaverdi, Y. Ağan 260

Bilgisayarlı Görü Teknolojisi ile Ocak İçi Yol ve Trafik Yönetimi
In-Pit Road and Traffic Management with Computer Vision Technology
E. F. Tünay, M. A. Tanyer, M. M. Kahraman 268

Hidroelektrik Santralı Tünel İnşaatı İş Güvenliği Risk Değerlendirmesi: Hata Türü ve Etkileri Analizi Uygulaması
Occupational Safety Risk Assessment in Hydroelectric Power Plant Tunnel Construction: An Application of Fault Mode and Effects Analysis
A.K. Eyüboğlu, M.K. Özfırat 278

Yer altı Metro İstasyonlarında Karşılaşılan Riskler ve Değerlendirilmesi
Risks Faced in Underground Metro Stations and Their Assessment
A. Özırmak, M. Kun 286

Bataryalı Elektrikli Transmikser Kullanımı ile Dizel Tüketiminin, Karbon Salımının ve Birim Maliyetin Azaltılması
Reducing Diesel Consumption, Carbon Emission and Unit Cost with the Usage of Battery-Electric Transmixer
T. Kibar, E. Üçok, M. Bilgiç..... 299

MADEN ÜRETİMİNDE VE TÜNEL AÇMADA YENİ KAZI TEKNOLOJİLERİ

NEW EXCAVATION TECHNOLOGIES IN MINING AND TUNNELLING

N. Bilgin

İTÜ, Maden Mühendisliği Bölümü, Emekli Öğretim Üyesi
(bilgin@itu.edu.tr)

ÖZ

Dünya maden ekipmanları pazarının 2021'de 114,61 milyar ABD dolarından 2028'de %4,0'lık bir yıllık artış hızı ile 151,25 milyar ABD dolarına çıkması beklenmektedir. Son verilere göre küresel maden ekipmanlarının pazar payı, 2020 de kömür madenciliği için %37, doğal gaz ve petrol çıkarma için %26, metal cevheri madenciliği için %25, metal dışı madencilik için %12 olarak gerçekleşmiştir. İnşaat ve tünel açma endüstrilerinin, madencilik endüstrisi ile kullanılan birçok ortak ekipmana sahip olduğu göz önünde alındığında, maden ekipmanı pazarının 2028'de 300 milyar ABD doları civarında olması beklenmektedir. Bu makale, 1956'da Macaristan ve Rusya'da kömür madenciliğinde çalışmaya başlayan kollu galeri açma makinelerinin şaşırtıcı serüvenleri ile başlayacak, daha sonra Türkiye'de şild içerisinde sert kaya kazısında daha sonra 2023'te İngiltere'de derin kuyu delme teknolojisinde kullanılmalarının bir özeti ile devam edecektir. Daha sonra bu çalışma tünel açma makinelerin (TBM), madencilik sektöründe kullanımlarının irdelenmesi ile sonlanacaktır.

Anahtar Sözcükler: Kollu galeri açma makineleri, tünel açma makineleri, kuyu açma,

ABSTRACT

The global mining equipment market is projected to grow from USD 114.61 billion in 2021 to USD 151.25 billion in 2028 at an annual grow rate of 4.0%. The global mining equipment market share by application, in 2020 it was 37% for coal mining, 26% for gas and oil extraction %25 for metal ore mining, 12 for non metal mining. Bearing in mind that the construction and tunnelling industries have several common equipment used with mining industry it is expected that mining equipment market will be exceeded to be around USD 300 billion in 2028. This paper will start with the astonishing adventure of roadheaders starting in Hungary and Russia in coal mining in 1956 and later, to hard rock mining with shielded roadheaders in Turkey in 1980 and deep shaft boring technology in 2023 in England. Later this paper will continue with tunnel boring machines, used in mining.

Keywords: Roadheader, tunnel boring machines, shaft boring.

GİRİŞ

Dünya nüfus artışına paralel olarak maden üretimi ve inşat sektörü faaliyetleri de artmaktadır. İnsan var oldukça madene ihtiyacı olacaktır. Yeryüzüne yakın cevherlerin rezervleri ise gittikçe azalmaktadır. Bu nedenle derinlerde olan minerallere ve endüstriyel ham maddelere hızlı ve emniyetli bir şekilde ulaşmak için gerekli olan maden kuyularını açmada kullanılacak yeni teknolojilere ihtiyaç vardır. Dünya maden ekipmanları pazarının 2021'de 114,61 milyar ABD dolarından 2028'de %4,0'lık bir ortalama yıllık artış hızı ile 151,25 milyar ABD dolarına çıkması beklenmektedir. Son verilere göre küresel maden ekipmanlarının pazar payı, 2020 de kömür madenciliği için %37, doğal gaz ve petrol çıkarma için %26, metal cevheri madenciliği için

%25, metal dışı madencilik için %12 olarak gerçekleşmiştir. İnşaat ve tünel açma endüstrilerinin, madencilik endüstrisi ile kullanılan birçok ortak ekipmana sahip olduğu göz önünde alındığında, maden ekipmanı pazarının 2028'de 300 milyar ABD doları civarında olması beklenmektedir (Url-1 ve Url-2). Maliyetleri düşürmek için teknoloji sınırlarını zorlamaktadır. Maliyetlerin önemli bir kısmı kazı için kullanılan ekipmanlar teşkil etmektedir. Bu nedenle bu makalede kollu galeri açma makinelerine, madenlerde kullanılan tünel açma makinelerine, roadheadelarla donatılmış derin kuyu açma makinelerine yer verilecektir.

ROADHEADER LARIN (KOLLU GALERİ AÇMA MAKINALARI) GELİŞME SERÜVENİ

Bunlar ilk olarak F2 ticari adıyla 1950 de Macar Kömür Madenlerinde kullanılmıştır (Bilgin, 1989). Batı Avrupa'da kullanılan ilk makineler ise 1961 yılında İngiliz Kömür Madenlerinde Sovyetler Birliği'nden ithal edilen PK3 lerdir. Bunların arına dik ve paralel hareket edenleri vardır (transverse ve aksiyal tipler). Daha sonraları İngiltere'de Dosco, Almanya'da Eickoff, Demag, Paurat, Westfalia ve Avusturya'da Voest-Alpine, Deilman Haniel ve NGH gibi bazı Rus Firmaları tarafından piyasaya sürülmüştür. Bu makineler Çayırhan Kömür ocaklarında oldukça fazla kullanılmıştır (Bilgin, 1989). Son zamanlarda Türkiye'de başarı ile kullanılan bazı kollu galeri makinelerini özet listesi aşağıda verilmiştir.

Çizelge 1. Son 11 senedir Türkiye'de kullanılmaya başlanan ve Labris tarafından tedarik edilen galeri açma makineleri

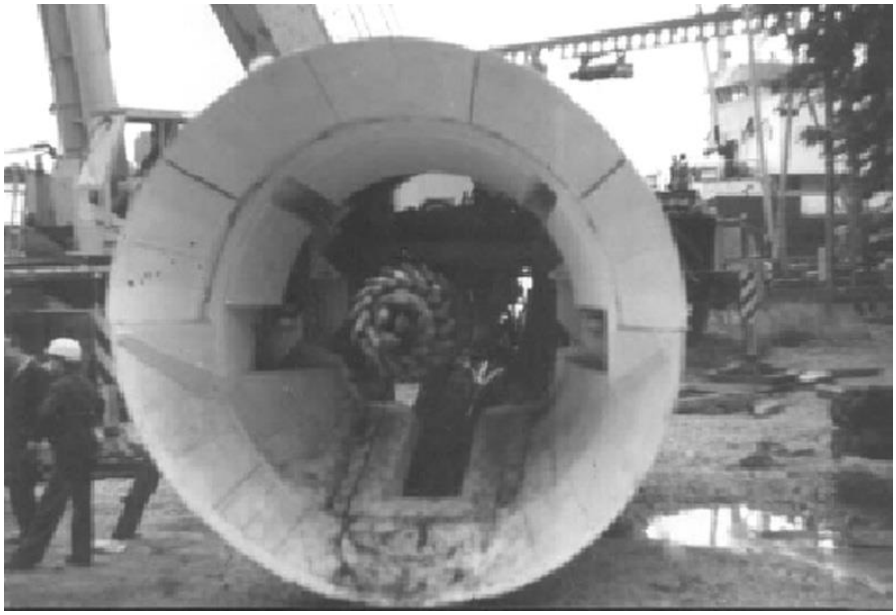
No	Firma Adı	Ürün	Modeli	Yılı	Adet	Tipi	Maks. (m^2)	Kurulu Güç (kW)	Mak. Ağ. t	Max (MPa)
1	Demirexport – Fernas Ort.	MSB-IBS	SM130	2012	1 Set	Transverse	19,4	207	35	70
2	Demirexport – Fernas Ort.	MSB-IBS	SM130	2013	1 Set	Transverse	19,4	207	35	70
3	Demirexport – Fernas Ort.	MSB-IBS	SM130	2014	1 Set	Transverse	19,4	207	35	70
4	Hema-Hattat	Deilmann-Haniel	R60	2016	1 Set	Transverse	34	295	60	90
5	Hema-Hattat	Deilmann-Haniel	R75	2016	2 Set	Transverse	31	355	75	110
6	Polyak	MSB-IBS	SM130	2018	1 Set	Transverse	19,4	207	35	70
7	DEFAŞ Madencilik	NHG	EBZ200E	2020	3 Set	Aksiyal	30	285	55	80
8	Özşen Mad.	NHG	EBZ132	2020	2 Set	Aksiyal	22.5	207	36	60
9	İmbat. Mad.	NHG	EBZ200H	2021	2 Set	Aksiyal	30	285	78	100
10	Polyak Mad.	NHG	EBZ200E	2021	3 Set	Aksiyal	30	285	55	80
11	Fernas İnşaat	NHG	EBZ200E	2021	3 Set	Aksiyal	30	285	55	80
12	Fernas İnşaat	NHG	EBZ200H	2021	1 Set	Aksiyal	30	285	78	100
13	İmbat Mad.	NHG	EBZ320	2022	1 Set	Aksiyal	40	520	112	120
14	Yatağan Ter.	NHG	EBZ160	2022	2 Set	Aksiyal	27	250	45	70
15	Batı Köm. İş	NHG	EBZ132	2022	2 Set	Aksiyal	22,5	207	36	60
16	Özşen Mad.	NHG	EBZ132	2023	1 Set	Aksiyal	22,5	207	36	60

Roadheaderların çalışma sınırları formasyonların dayanımları, kırıklı çatlaklı olma durumlarına, ve eğimlerine göre sınırlıdır. Performanslarının tahmini ile ilgili birçok model geliştirilmiş, inşaat sektöründe ve

madencilikte oçdukca fazla kullanım alanları bulmuşlardır (Bilgin, 1989; Ocak ve Bilgin, 2010). Roadheaderlarda ikinci büyük aşama bunların bir şild içerisinde çalışacak şekilde tasarımlandırılmış olmalarıdır. Bunlardan 10 civarında Haliç ve Küçüksu atıksu tünellerinde kullanılmış ve aynı güçte diğer roadheaderlarla karşılaştırıldığında üretim hızları aynı formasyonlar için daha fazla olmuş ve daha sert formasyonları başarı ile kazabilmişlerdir (Bilgin vd., 2005).



Şekil 1. Kozyatağı-Kadıköy Metro Projesinde istasyon tünellerinde kullanılan transvers tip bir Roadheader (Ocak ve Bilgin, 2010)



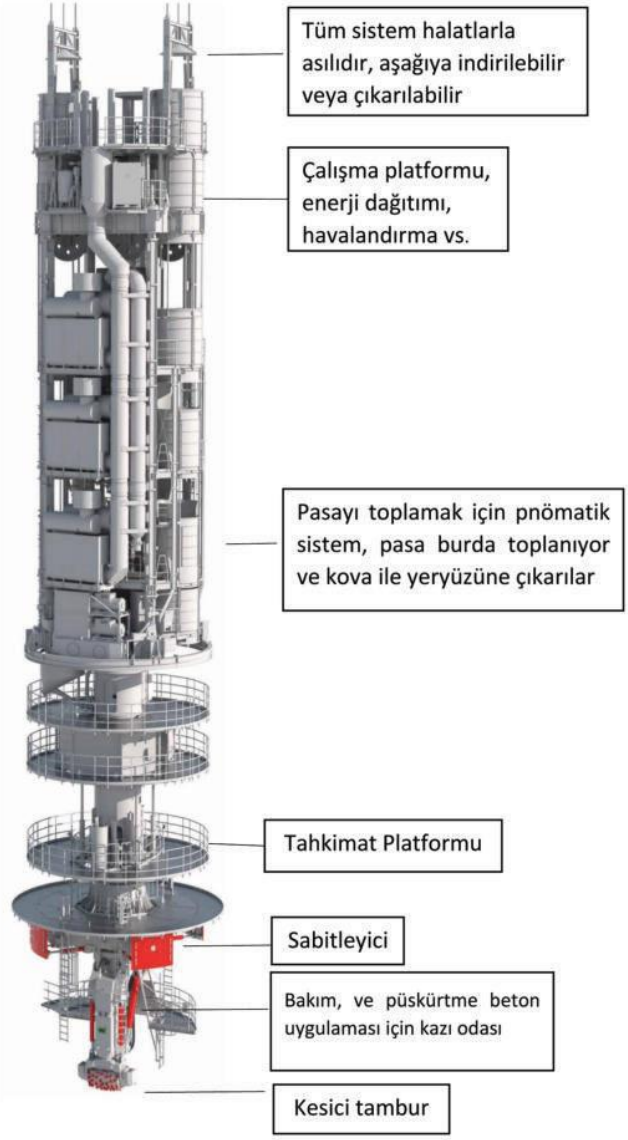
Şekil 2. Haliç ve Küçüksu tünellerinde kullanılan radyal tip şildli bir Roadheader (Bilgin vd., 2005)

Roadheader'ların Derin Kuyu Teknolojilerinde Kullanılması

İngiltere'deki son uygulama Avrupa artık madencilikten vazgeçti ön yargısını da ortan kaldırmıştır. İngiltere'de Woodsmith madeninde polihalit cevherini çıkartabilmek için bugün 1600 m derinliğe kadar ulaşacak iki kuyu Herrenknecht'in geliştirdiği iki adet SBR (Shaft Boring Roadheader) kuyu açma makinesi ile açılmaktadır (Herrenknecht, 2021). Polihalit, bitkiler için dört önemli besin maddesi içerdiği ve klorür oranı düşük olduğu için gübre olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de de derinlerde çok önemli stratejik madenlerin olduğu bilinmekte ve rezerv geliştirmeleri için derin sondaj çalışmalarına devam edilmektedir. Şartlar uygun olduğunda bu teknolojinin Türkiye'de de uygulanması kaçınılmaz olacaktır. SBR teknolojisinin avantajlarını şu şekilde sıralamak mümkündür, hızlı ve emniyetli kazı, işlerin sürekli olması, delme patlatma olmadığı için aşırı söküm olmaması ve buna bağlı olarak tahkimat masraflarının azalması, çevre dostu bir teknoloji olmasıdır. Dezavantajı ise basınç dayanımı 120 Mpa a kadar olan jeolojik formasyonlarda kazı yapabilmesidir.SBR kuyu açma makinesinin genel bir görünüşü Şekil 3 ve 4'de verilmektedir. Tüm sistem 2600 ve 1800 kW gücünde iki adet vinç ve halat sistemi ile kuyu içerisinde aşağı yukarı hareket ettirilebilmektedir. Şekil 3 ve 4'de görüldüğü gibi sistemin en alt kısmında 0-90 dev/dak hızda dönebilen, 1200 mm bom uzunluğunda ve 600 kW gücünde kuyuyu tarayarak kazı yapan bir roadheader/kesici tambur vardır. Kesilen malzeme 50 m^3/h kapasiteli bir pnömatik sistemle 30 m yüksekliğe çıkarılır ve oradan da yer üstüne kovalarla taşınır, insan taşıma da ayrı bir bölümde ayrı kovalarla yapılabilmektedir. Belirli noktalarda aşırı su gelişini önlemek için zemin dondurma işinin yapıldığı bir ortamda da SBR kazı yapabilmektedir. Kazı yapılırken tahkimat platformundan, aynı anda püskürtme beton atılabilir, tavan cıvatası ve tel hasır uygulanabilir ve segment yerleştirilebilir (Url-3). SBR kuyu açma teknolojisinin uygulandığı madenler ise Çizelge 2'de özetlenmiştir.



Şekil 3. Kuyu ekipmanını en altına yerleştirilmiş roadheader



Şekil 4. Woodsmith Poihalit Madeninde kullanılan Roadheader ile kazı yapan derin kuyu açma ekipmanı

Çizelge 2. SBR derin kuyu açma makinesinin kullanıldığı madenler

Parametre	Jansen Madeni	Nezhinsky Madeni	Woodsmith Madeni
Maden	Potas	Potas	Polihalit
Kuyu dondurma	Evet	Evet	Yok
SBR ağırlığı	380 t	400	350 t
Kuyu çapı	12.3 m	12 m	10.5
Kuyu derinliği	1000 m	730 m	1600 m

SBR derin kutu açma sisteminin kullanıldığı mademler ve ekpmanın performansı hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir (Wallis, 2018; Otten and Greinacher, 2019; Herr, 2020).

Jansen Madeni

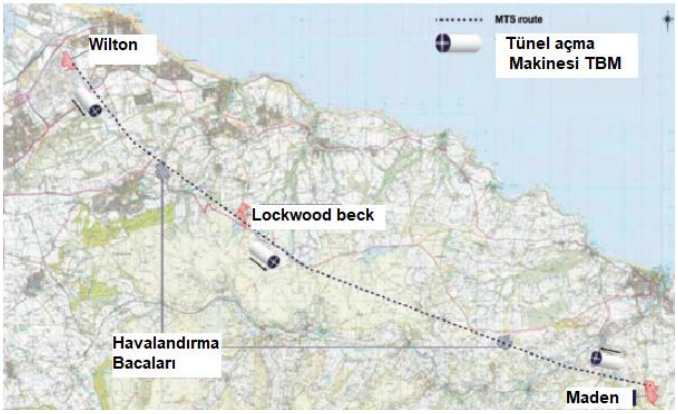
Kanada'da Saskatchewan da bulunan ve Bhp Billiton şirketine ait bir potas madeninde "DMC Mining Services" şirketi 2018'in ağustos ayında 975 ve 1005 m derinliğindeki iki maden kuyusunu bu teknoloji ile tamamlamış ve buradaki başarı sistemin daha da geliştirilmesini sağlamıştır. Bu madenden yılda 3.5-4 Milyon ton cevher çıkarılması planlanmaktadır. Kazı sırasında 450 m derinlikte çok sert bir formasyonla karşılaşılmış, bununla başa çıkabilmek için kesici kafanın tasarımı değiştirilmiş ve tork miktarı iki katına çıkarılmıştır. Yüksek basınçta su ihtiva eden Blairmore akiferinin kuyuya zarar vermemesi için 2011 yılında kuyu 650 m kadar dondurulmuştur. Bu zor jeolojide en büyük başarı ring erektörleri kullanılarak yüksek hassasiyette çelik ringleri yerleştirmesi olmuştur.

Nezhinsky Madeni

Nezhinsky Madeni, Belarus'da Lyuban Bölgesindedir ve maden Rus Şirket IOOO Slavkaliy tarafından yılda 7 Milyon ton potas üretilecek şekilde planlanmıştır (Url-4). Bu da yıllık 2.2 Milyon ton gübre demektir. 2016 yılının ortalarında 697 ve 750 m derinlikte iki kuyunun SBR tipi bir sistemle açılmasına ve bunun Herrenknecht tarafından planlanması ve inşasına karar verildi. Maden şirketi 697 ve 750 m derinliğindeki iki adet kuyunun dondurulması dahil açma ve 9 km galeri sürme işini Haziran 2017 de Redpath Deilmann Gmbh şirketine verdi.3600 kW kapasiteli altı adet soğutma tesisi hemen yüklenici tarafından sahaya kuruldu ve kuyular dondurulmaya başlandı ve bu iş Kasım 2017'den Şubat 2018'e kadar sürdü. SBR kuyu açma sisteminin Herrenknecht Fabrikalarında tamamlanması ve kabulü Eylül 2018 de yapıldı. SBR kuyu açma tesisi kazıya bir Şaftta Aralık 2018 diğer şaftta ise Ocak 2019 da başladı. Nisan 2020 de aylık 144 m kuyu derinleştirme ile rekor kırıldı ve ortalama günlük 3 m ilerleme ile her iki kuyunun tamamlanması fiili kazı günlerinde 17 ayda bitti.

Woodsmith Madeni

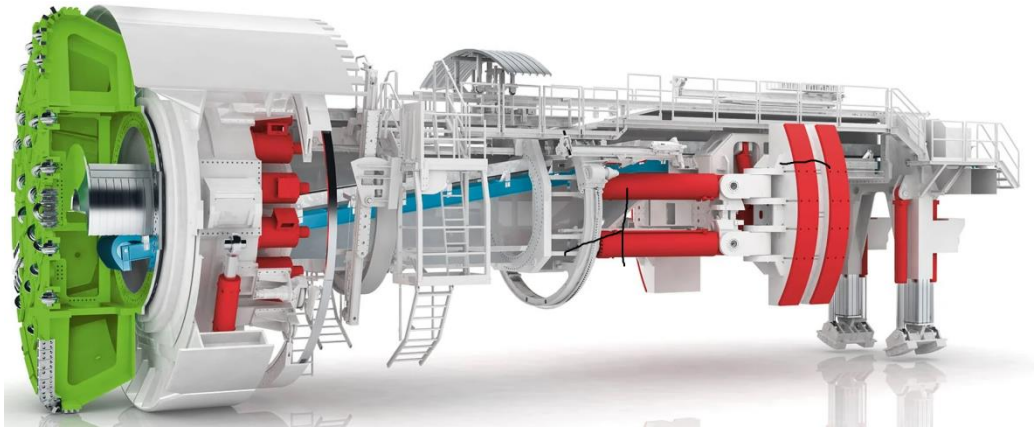
İngiltere'de North Yorkshire Bölgesinde bulunmaktadır. Maden dünyanın en zengin polihalit mineraline sahiptir. Anglo American şirketi tarafından işletilecek olan maden 1600 m derinliğe kadar inecek olan madende servis ve üretim kuyuları Herrenknecht'in geliştirdiği SBR kuyu açma sistemi ile açılmaya başlanmıştır. Çalışmalar çok sıkı çevre koruma şartlarında sürdürülmektedir. Çıkarılan cevher bir tünel vasıtası ile 37 km Kuzey doğuda buluna bir limana bir tünel içerisinde bulunan bantlı konveyör ile taşınacaktır. Şekil 5'te görüldüğü şekilde, tünel şu anda 4,5 m çapında 3 adet TBM ile açılmaktadır. Tünel 37 km'dir ve İngiltere'nin en uzun tünelidir, cevher bant ile taşınacaktır Madeninin çalışma süresinde İngiliz ekonomisine 100 Milyar dolar katkı sağlayacağı hesaplanmıştır. Bu örnek Madencilik ve Tünelciliğin ne kadar iç içe olduğunu gösteren tipik bir örnektir.



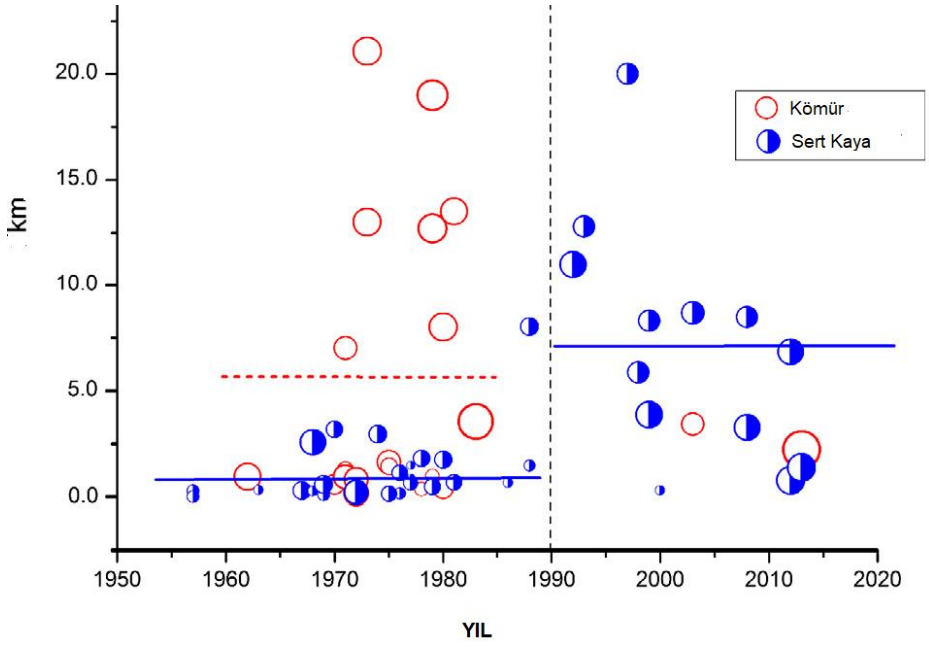
Şekil 5. Woodsmith madeninden Wilton Limanına cevherin taşınması için 3 adet TBM le açılan tünel

MADENLERDE KULLANILAN TÜNEL AÇMA MAKİNALARI (TBM)

Tünel açma makineleri Dünyada ve Türkiye'de inşaat sektöründe uzun zamandır başarı ile kullanıla gelmiştir (Bilgin vd., 2016). Bu makinelerin madencilik sektöründe kullanımları ise daha yenidir. Yukarıda woodsmith madeni buna tipik bir örnektir. Madenlerde genelde Şekil 6'da görüldüğü gibi Gripper-pabuçlu TBM ler kullanılmaktadır. Zeng ve arkadaşları Madende kullanılan 100'e yakın TBM i incelemişler ve bunların inşaat sektöründe olduğu kadar neden madenlerde de kullanılmadığının irdelemesini yapmışlar, madenlerde kullanım oranlarının ilerideki yıllarda daha da artacağını ileri sürmüşlerdir (Zeng vd. 2016). Şekil 7'de bu araştırmacıların madenlerde yıllara göre, kömür ve sert kayada TBM'lerin kullanıldıkları mesafeye bağlı olarak dağılımlarını vermektedir. Şekildeki daireler en büyüğü 8 m çaplı olmak üzere, değişimleri orantılıdır.



Şekil 6. Bir Grpper-pabuçlu TBM (Url-3)



Şekil 7. Madenlerde TBM'lerin , kömür ve sert kayada yıllara göre açtıkları uzunluk bazında değişimi (Zeng vd., 2016).

Tünel Açma Makinelerinde Madenlerdeki Galeri Açma işlerini Etkileyecek Gelişmeler

Şimdiye kadar birçok TBM üretici firma dikdörtgen kesitli tünel açabilecek TBM yaptıklarını iddia etmişlerdir. Ama bugüne kadar basınç dayanımı 200 MPa kadar formasyonda denenmiş dikdörtgen kesitli bir TBM ile ilgili verilere literatürde rastlanmamıştır. Meksika'da Fresnillo gümüş madeninde ise MDM5000 Robbins TBM 200 MPa dayanımlı bir formasyonda bir haftada 52m, bir ayda 191 m yapabilmiştir. Makinenin genel görünümü Şekil 8 de, açılan galeri ise Şekil 9 da görülmektedir. Bu başarı inşaat sektörü için de önemli bir adımdır. Artık kare kesitli karayolu tünellerini de bu tür TBMlerle açılmaları mümkün gözükmektedir (Url-5)



Şekil 8. Fresnillo gümüş madeni için geliştirilen dikdörtgen kesitli galeri açabilen TBM MDM5000



Şekil 9. TBM MDM5000 ile Frenillo gümüş madeninde açılan galeri

SONUÇLAR

İnsan var oldukça madenlere ihtiyacı olacaktır. Yeryüzüne yakın cevherlerin rezervleri ise gittikçe azalmaktadır. Bu nedenle derinlerde olan minerallere ve endüstriyel ham maddelere hızlı ve emniyetli bir şekilde ulaşmak için yeni teknolojilere ihtiyaç vardır. Dünya maden ekipmanları pazarının 2021'de 114,61 milyar ABD dolarından 2028'de %4,0'lık bir yıllık artış hızı ile 151,25 milyar ABD dolarına çıkması beklenmektedir. Kazıcı ekipmanlar bu maliyetlerin önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Bu nedenle bu makalede ilk olarak kollu galeri makineleri-Roadheader, bunların gelişme serüvenleri ve derin kuyu kazma ekipmanları (SBR-Shaft Boring roadheader) ile beraber kullanımları ele alınmıştır. SBR lerin İngiltere de Woodsmith polihalid madenindeki uygulaması Dünya madenciliği açısından çevre etkenlerin ön planda alındığı önemli bir örnektir. Biz bu projeyi bu yönüyle çok önemsiyoruz. Polhalid gübre olarak kullanılan önemli bir madendir ve evaporitlere bağlı olarak gelişmektedir, Türkiye'de polihalid oluşumları vardır ve bu konuda çalışılmaktadır, Eroğlu ve Şahiner (2000). Şu an 10,5 m çapında ve 1600 m derinliğine bir kuyu bu ekipmanla açılmaktadır. Madenin İngiliz ekonomisine 100 Milyar dolarlık bir katkı sağlayacağı hesaplanmıştır. Cevher elenerek doğrudan gübre olarak kullanılabilmektedir. Cevher üretildiğinde, çevreye zara vermemek için 37 km bir tünel vasıtası ile en yakın limana nakledilecektir. Bir Milyar dolar maliyetinde olacağı tahmin edilen bu tünel üç adet tünel açma makinesi ile açılmaktadır. Topluma madenciliği sevdirmek için, kullanılan TBM ler okullarda açılan bir yarışma ile öğrencilere isimlendirilmiştir. Bu proje TBM lerin madenlerde de kullanılmasına tipik bir örnektir. Buna paralel olarak TBM'lerdeki son gelişmelerde bu makalede yer almıştır.

TEŞEKKÜRLER

Türkiye'de kullanılan roadheader'ların envanterlerini bize sağlayan Labris Madencilik ve San. Ltd. Şti'den Kayıhan OĞUZ'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

KAYNAKLAR

Bilgin, N. (1989). İnşaat ve maden mühendisleri için uygulamalı kazı mekaniği, İstanbul, Birsen yayınevi.

Bilgin, N., Tumac, D, Feridunoglu, Karakas, A.R., Akgul, M. (2005). The performance of a roadheader in high strength rock formations in Küçüksu tunnel. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future – Erdem & Solak (eds)© 2005 Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537 452 9.

Bilgin, N., Çopur,H., Balcı, C. (2016). TBM excavation in difficult ground conditions, case studies from Turkey, Wiley, Ernst and Sohn, 335.

Eroğlu, G., Şahiner, M. (2020). Dünya'da ve Türkiye'de polihalit, Ankara, MTA Fizibilte Etütleri Daire Başkanlığı.

Herr, R. (2020). Driving MTS progress at Woodsmith Mine. *TunnelTalk*.

Herrenknecht, 2021. Teamwork into depths, All around N0 13 by Herrenknecht.

Ocak, İ ve Bilgin, N. (2010). Comparative studies on the performance of a roadheader, impact hammer and drilling and blasting method in the excavation of metro station tunnels in Istanbul, *Tunnelling and Underground Space Technology,* 25, 2, 181-187.

Url-1, https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/mining-equipment-market-99264577.html,

Url-2, https://www.fortunebusinessinsights.com/mining-equipment-market-104970.

Url-3, https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/shaft-boring-roadheader-sbr/, Temmuz 2023.

Url-4, https://www.nsenergybusiness.com/projects/nezhinsky-potash-mine/, Temmuz 2023.

Url-5, https://www.miningmagazine.com/innovation/news/1417023/robbins-mdm5000-makes-headway-at-fresnillo-mine, Temmuz 2023.

Wallis, S. (2018). Shaft sinking operations at UK potash mine. *TunnelTalk.*

Zheng, Y.L., Zhang,Q.B., Zhao. (2016). Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology,* 57, 287–299.

A SHORT PRAGMATIC OVERVIEW ON THE DEVELOPMENT OF FLOTATION MACHINES FROM HISTORICAL, MECHANICAL, AND METALLURGICAL PERSPECTIVES

A. Hassanzadeh [1,2]

Maelgwyn Mineral Services Ltd, Ty Maelgwyn, 1A Gower Road, Cathays, Cardiff, CF24 4PA, United Kingdom
Department of Geoscience and Petroleum, Faculty of Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim 7031, Norway
(ahmad.hassanzadeh@ntnu.no)

ABSTRACT

A long-standing principal challenge of mineral processing industries is losing millions of tons of precious liberated fine and ultrafine particles to tailings due to the lack of knowledge and serious technological issues eventually leading to severe environmental impacts. The current work introduces and underlines the key industrial obstacles of froth flotation as the only widespread practical separation technology for processing such particle size ranges. Historical aspects of pneumatic flotation cells were presented together with metallurgical responses obtained for three different industrial operations.

HISTORICAL OVERVIEW

Historical Overviews of Flotation Concept and Technology

Historical overview of flotation as a concept and technology. The concept was understood a very long time ago according to the book written by Hellmut Ritter, a German orientalist who specialized in Arabic, Persian, and Turkish as a professor at Istanbul University (1926-1949). Persians used tar-covered feathers to clean up the surface of lapis lazuli a metamorphic rock used as a semi-precious stone valued based on its dark-blue colour. The second perception of the concept refers to the Herodotus (around 450 BC) using a similar process for cleaning gold grains. According to the description, feathers daubed with pitch were dipped by young women into mud containing gold where the gold adhered to the pitch while the other substances present did not. Over a long period of time, greasy fleeces were used to collect particles of gold from moving streams of water-borne sand (Mavros, 1992). However, history of the froth flotation as a technology goes back to the 1880s and the invention most likely in 1898 when Francis (Frank) and Stanley Elmore established the first concentration plant integrating the flotation unit to extract copper from ore broken near Dolgellau, North Wales, in 1898 (Almond, 2000).

Historical Background of Pneumatic Flotation Cells

Unlike the common belief in the development of flotation machineries, pneumatic flotation cells were developed in the 1920s (Harbort, 2019) but they were taken out of the market due to some difficulties in their operations and maintenance. They indeed could not be competitive over the tank cells due to the easiness of their fabrication and operation. They became a matter of usage due to the inefficiency of the mechanical and column flotation cells in recovering fine and ultrafine particles. Figure 1 displays the historical elaboration of pneumatic flotation cells.

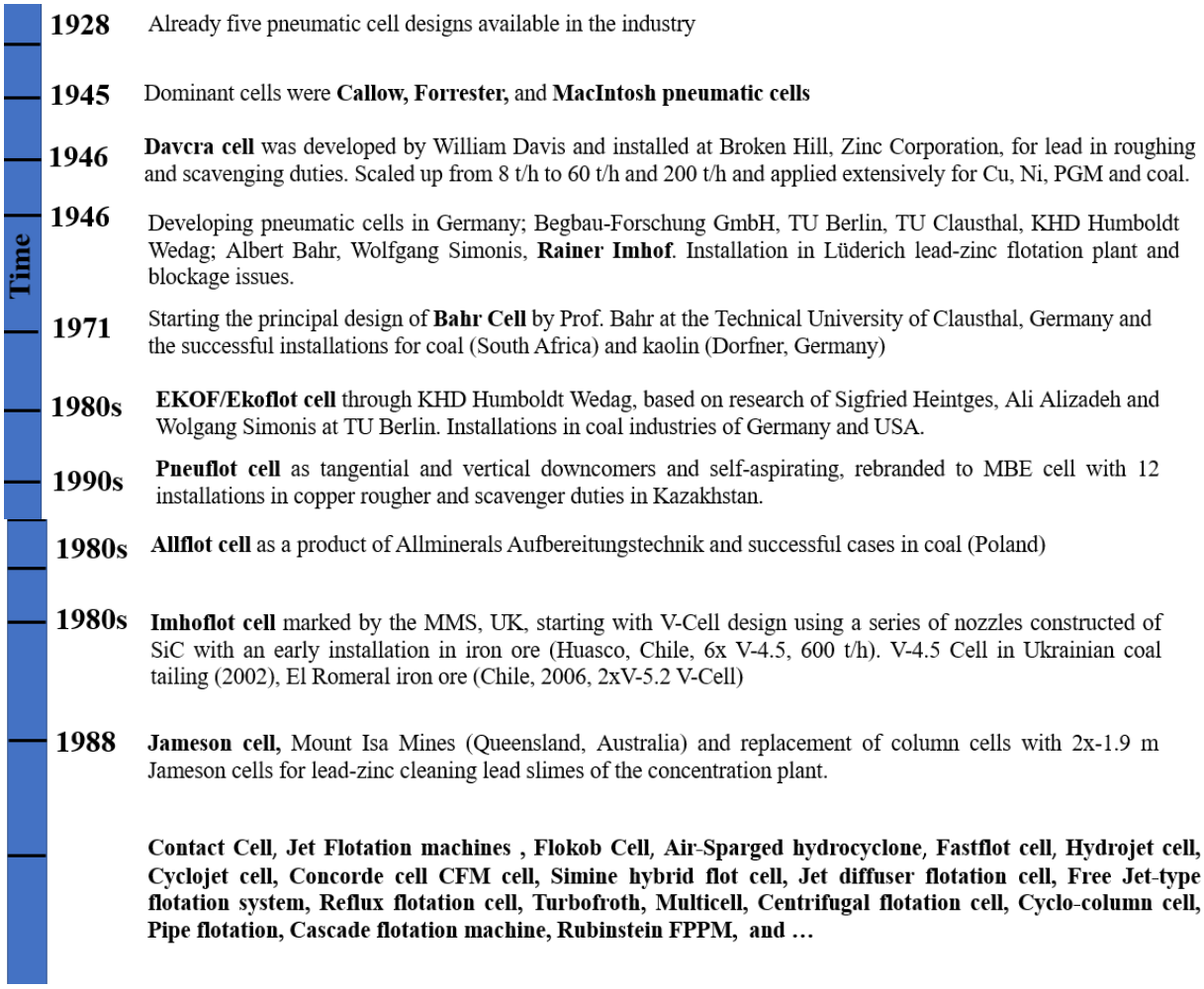


Figure 1. A historical overview on the development of pneumatic flotation cells

CELL VOLUME AND ITS ENLARGEMENT

The mechanical flotation machine invented in 1989-1905 was based on an agitator to well suspend solid-liquid-water within a cell and aspiration of air on the hydrophobized target minerals to attach them to the air bubbles and float to the launders. This concept has not changed over more than a century although its efficiency significantly drops for extreme-particle sizes i.e., fine/ultrafine and coarse sizes (Trahar, 1981). Mineral processing industries have enlarged the flotation cell volumes and consequently, the feed throughput to compensate for the sharp reduction of mine cut-off grades. However, it is now proven that the carrying capacity of the cells cannot be increased if the cell size is over 600 M^3 (Yianatos and Vallejos, 2022; Finch and Tan, 2023). For these reasons and along with inefficiency of recovering fine and ultrafine particles, high energy consumption and low flotation kinetics, the mineral industries look for application of intensified flotation cells instead of conventional cells. Figure 2 presents the list of some of current reactor-separator flotation machines in the market.

Another factor is the energy consumption of mechanical cells for recovering different range of particles. It is now proven that such cells consume extensive amount of energy which is mainly used for suspending the materials rather than creating a well particle-bubble capture efficiency. For instance, the followings show the energy consumption of a mechanical cell to obtain an acceptable recovery for fine,

intermediate and coarse particle sizes. As it can be also seen from Figure 3, the suitability of the pneumatic flotation cells becomes more favorable for fine and ultrafine particles.

- Coarse particle size flotation (100-200 µm): ca. 1 W/kg
- Intermediate particle size flotation (50-100 µm): ca. 5-10 W/kg
- Fine and ultrafine particle size flotation (<50 µm): ca. 50-100 W/kg

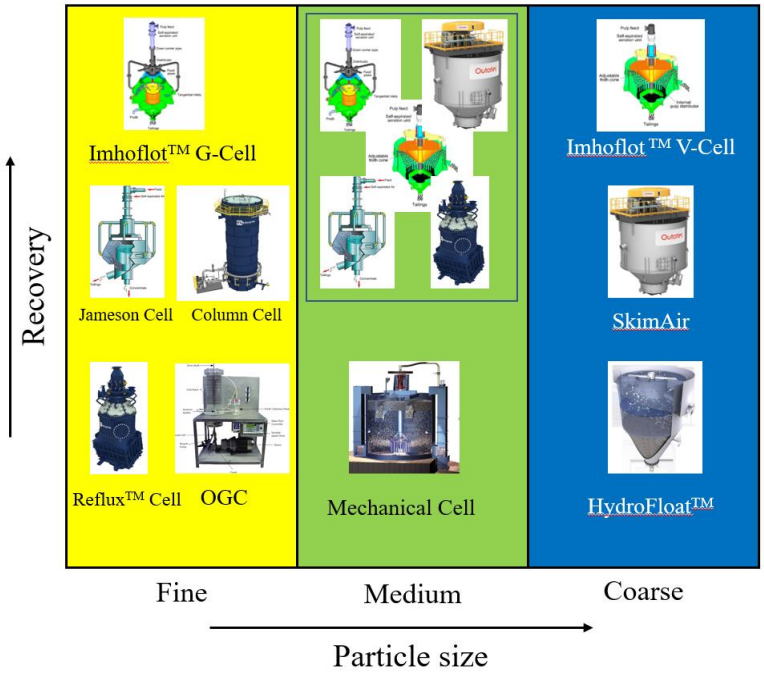


Figure 2. Schematic illustration of mostly commonly used flotation machines in the market as a function of particle size (Hassanzadeh et al., 2022)

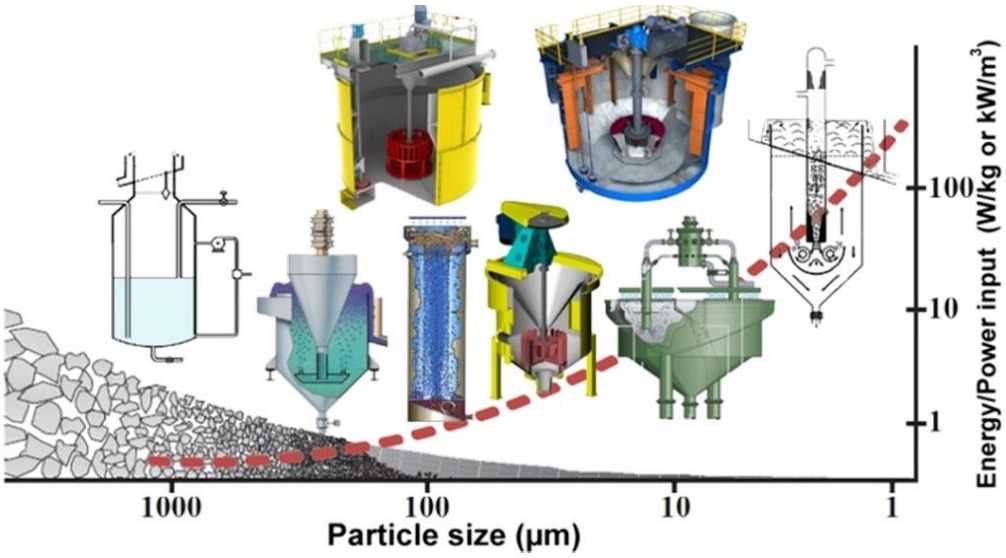


Figure 3. Energy consumption of different flotation cells as function of particle size (Hassanzadeh et al., 2021)

METALLURGICAL INSTANCES

This section contains two examples of using pneumatic flotation cells including i) iron Quadrangle ore (Brazil) and ii) a gold beneficiation plant in Kazakhstan. The first is the work performed by Lima et al., (2018) who employed a lab (11 L) and industrial (25 m^3) forced-air pneumatic flotation cells very similar to the V-Cell type Imhoflot^{TM} cell on the iron Quadrangle ore (Brazil) aiming at reaching the SiO_2 level below 2% at the final Fe concentrate and <10% Fe in the final tailing. The industrial performance was compared between the pneumatic cell and a circuit of five and four 14 m^3 tank cells respectively positioned at the rougher and scavenger stages. The reverse flotation results showed that iron contents in the final tailing using mechanical and pneumatic cells were 13% and 8%, respectively while lower water recovery of 35% was achieved by the pneumatic cell compared to the mechanical ones (75%) indicating a significant lower entrainment in case of using only one pneumatic cell. They also noted that the residence time was three times shorter than that required for conventional mechanical cells.

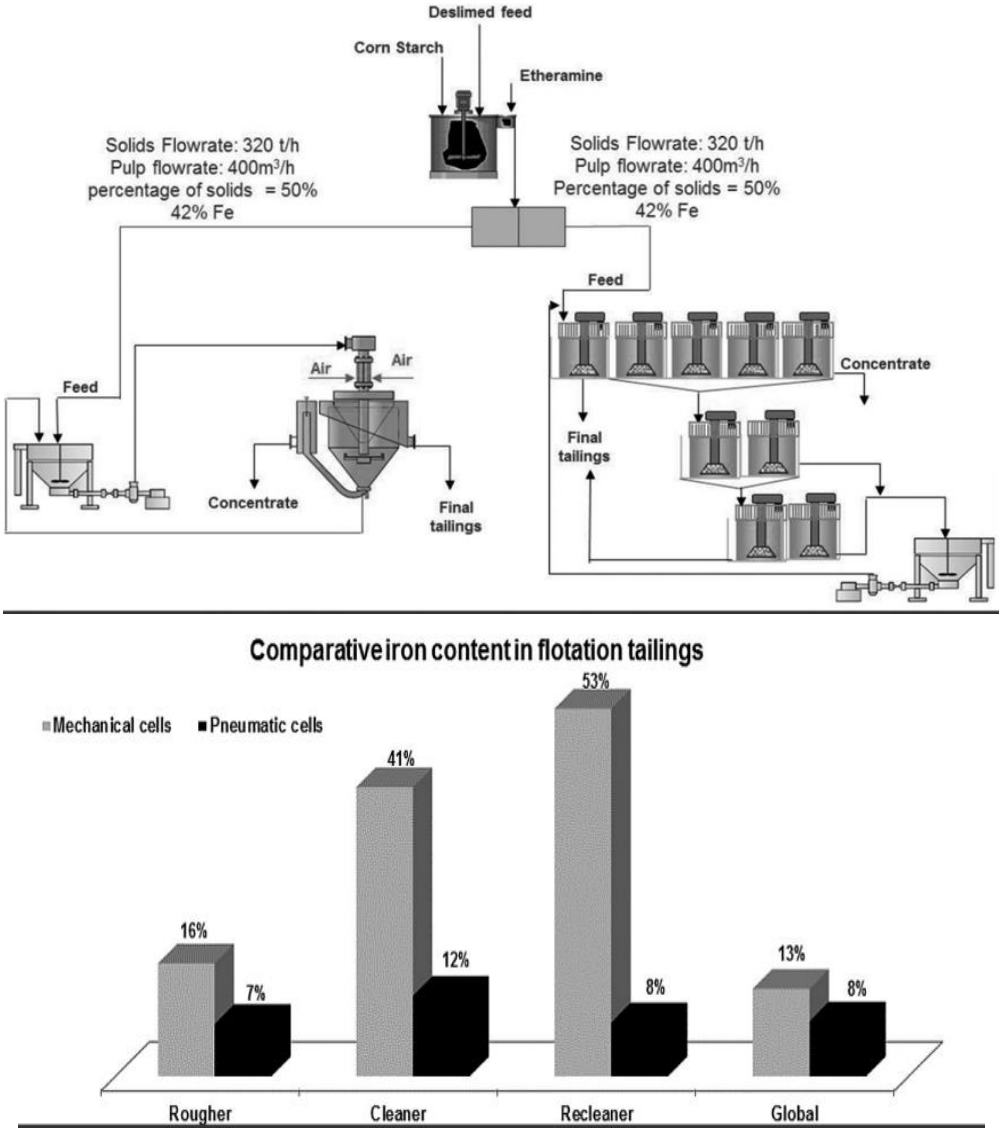


Figure 4. Flowsheet of operating iron ore in pilot scale using mechanical and a pneumatic cell Lima et al., (2018)

The latter is the work carried out by Hoang et al., (2022) who presented the results of installing two G-14 cells in series with a throughput of 30-40 m^3/h at hydrocyclone overflow for recovering gold in a beneficiation plant in Kazakhstan. They reported a high recovery of 65–68% for the particle size fraction of <20 µm where the gold content for those particle fractions in the tailings was about 0.36 g/t, which was lower than in the existing flotation circuit (0.47 g/t). Additionally, Battersby et al., (2011) reported an improvement in the recovery of Ni through the installation of three G12-Cells in series at the Aguablanca Nickel-Copper Mine, Spain, particularly for particles finer than 11 µm.

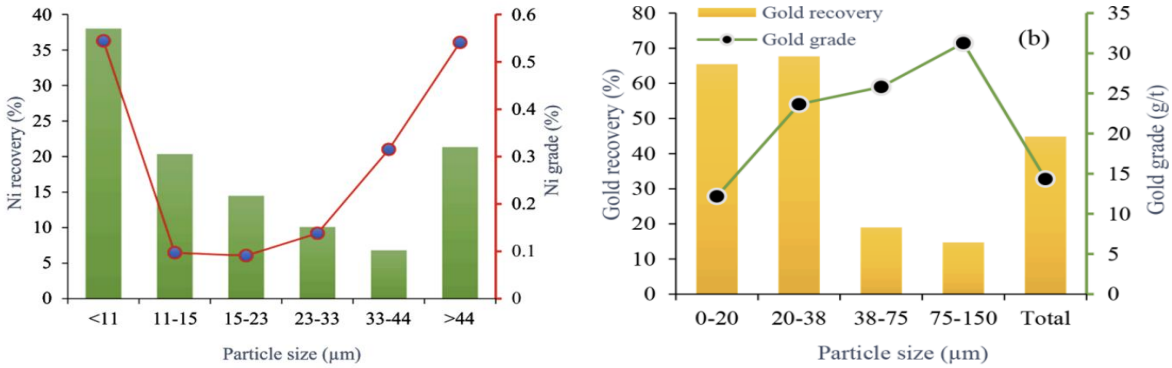


Figure 5. Metallurgical outcomes of two operations, Aguablanca Nickel-Copper Mine (Spain) Battersby et al., (2011) (left) and a gold operation (Kazakhstan) (right) Hoang et al., (2022)

CONCLUSIONS

The present work highlighted the historical overview of the pneumatic flotation cells and their developments. The current limitation regarding the particles and conventional flotation machines were found the applicability of using pneumatic cells particularly for fine and ultrafine particles. Three operational examples were presented to exemplify the effective role of pneumatic flotation cells in recovering fine and ultrafine particles for hematite, gold and nickel type ores.

REFERENCES

Almond, J.K., The Elmore brothers and the flotation process for separating minerals, *Historical Metallurgy* 34(1) 2000, 31-46.

Battersby, M., Battersby, R.M., Flatman, S., Imhof, R., Sprenger, H., Bragado, T., 2011. Recovery of ultrafines using Imhoflot pneumatic flotation–Two pilot plant case studies recovering nickel and zinc from tailings streams. https://www.maelgwyn.com/wp-content/uploads/2016/04/Recovery_of_Ultra_fines.pdf

Finch, J.A., and Tan, Y.H., 2023, On limits to flotation cell size, Minerals 2023, 13(3), 411; https://doi.org/10.3390/min13030411Trahar, W.J., 1981. A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *Int. J. Miner. Process*. 8 (4), 289–327. https://doi.org/10.1016/0301-7516(81)90019-3

Harbort, G., Pneumatic Flotation, Chapter 7.3. SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook, *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)*, 931-957, 2019.

Hassanzadeh, A., Safari, M., Hoang, D.H., Khoshdast, H., Albijanic, B., Kowalczuk, P.B., 2022. Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems. *Minerals Engineering*, 180, 107509. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107509

Hassanzadeh, A., Safari, M., Hoang, D.H., 2021. Fine, coarse and fine-coarse particle flotation in mineral processing with a particular focus on the technological assessments, In Proceedings of the 2nd International Conference on Mineral Science, Online, 1–15 March 2021. https://doi.org/10.3390/iecms2021-09383

Hoang, D.H., Imhof, R., Sambrook, T., Bakulin, A.E., Murzabekov, K.M., Abubakirov, B. A., Baygunakov, R.K., Rudolph, M., 2022, Recovery of fine gold loss to tailings using advanced reactor pneumatic flotation Imhoflot™, Minerals Engineering, 184, 107649. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107649

Lima, P.N., Peres, A.E.C., Goncalves, T.A.R., 2018, Comparative evaluation between mechanical and pneumatic cells for quartz flotation in the iron ore industry, REM, *Int. Eng. J.* Ouro Pereto 71(3), 437-442. https://doi.org/10.1590/0370-44672016710179

Mavros, P. 1992. Mixing and Hydrodynamics in Flotation Cells. In: Mavros, P., Matis, K.A. (eds) Innovations in Flotation Technology. NATO ASI Series, vol 208. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2658-8_9

Yianatos, J., Vallejos, P., 2022, Limiting conditions in large flotation cells: Froth recovery and bubble loading, *Minerals Engineering*, 185, 107695. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107695

GÜNÜMÜZDE KULLANILAN TAM CEPHE TÜNEL AÇMA MAKİNELERİNİN KESİCİ KAFA TASARIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF CUTTER HEAD DESIGN OF CURRENT TUNNEL BORING MACHINES (TBM)

O.Z. Hekimoğlu

Emekli Öğretim Üyesi
(ozhekimoglu@gmail.com)

ÖZ

Diskli kesicilerle kazı yapan tam cephe kazı makineleri tünel açmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makinelerin kesici kafa tasarımı makinenin performansı üzerinde etkin olan önemli parametrelerden biridir. Kesici kafa tasarımında gözetilen parametreler daha çok laboratuvar bulgularına dayanır. Ancak laboratuvardan elde edilen sonuçlar her zaman uygulamadaki değerler ile örtüşmemektedir. Disklerin uygulamadaki gerçek kesme hareketleri dikkate alındığında, özellikle diskler arasındaki uzaklık ve kesme derinliği gibi temel tasarım parametrelerinin, daha farklı ve davranışlar sergilediği görülmektedir. Geçmişte kullanılan kubbeli ve konik şekilli kesici kafalar terkedilmiş ve bunların yerini düz yüzeyli kesici kafalar almıştır. Ama bu iki farklı şeklin birbirlerine göre olan üstünlükleri konusunda yeterli çalışmalar bulunmamaktadır.

Bu bildiride, tam cephe kazı makinelerinin kesici kafa tasarımları ile ilgili temel parametrelerin uygulamadaki gerçek kesme koşulları dikkate alındığında laboratuvardan elde edilen tasarım parametrelerine göre nasıl farklılık gösterdikleri anlatılmaktadır. Bunun yanı sıra, konik yüzeyli ve düz yüzeyli geometriye sahip kesici kafaların dinamik ve kinematik açıdan bir karşılaştırılması yapılmış ve düz yüzeyli kesici kafaların daha avantajlı oldukları belirtilmiştir. Yapılan yöntemler açıklanmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Tünel açma makineleri, kesici kafa tasarımı, diskli kesiciler, tünel açma, mekanik kazı

ABSTRACT

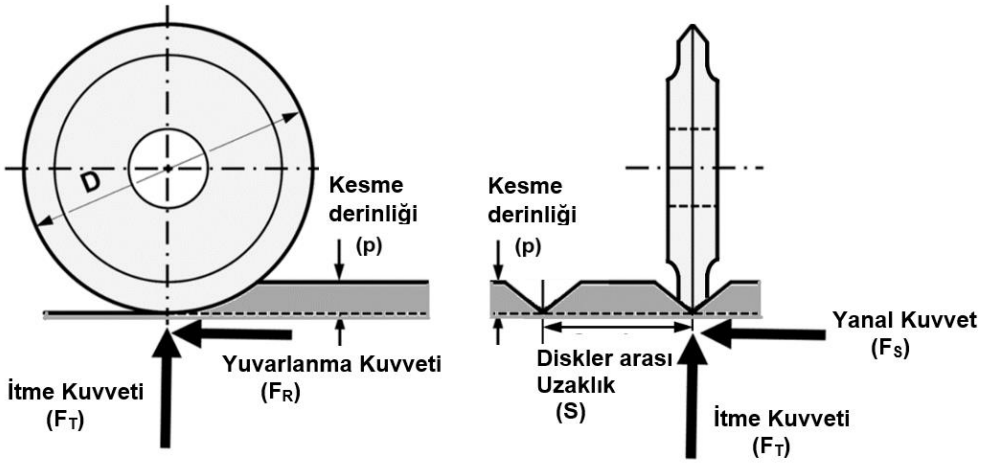
Full-face tunnel boring machines (TBMs) equıpped with disc cutters have been widely used in tunneling operations. The cutter head design of such machines is one of the important parameters affecting machine performance. Fundamental parameters considered cutter head desıgn generally rely upon the findings of laboratory rock cutting trials. The laboratory-bound results, however, are not always compatible with those of practical values, particularly with tool spacing and depth of penetration. It was shown that these fundamental parameters emerge to behave in a different manner if the actual cutting action of the discs operating in practical conditions are considered. Furthermore, cutterheads with the dome or conical geometry have been phased out, and they have, now, been replaced by flat type cutterheads. No conclusıve ınformatıon was found on the relative merits of these two different geometries.

This paper evaluates the fundamental design parameters for TBM cutter heads, and explains how some laboratory findings emerge to show different behavior when actual cutting conditions are considered. The differences between the cone type cutter heads and flat type cutterheads were also presented with a simple dynamic analysis, and it was found that flat type cutter heads exhibit better performance. The methods employed for all analyses were explained and discussed together with the results.

Keywords: Tunnel Boring machines, cutter head design, disc cutters, tunneling, mechanical excavation.

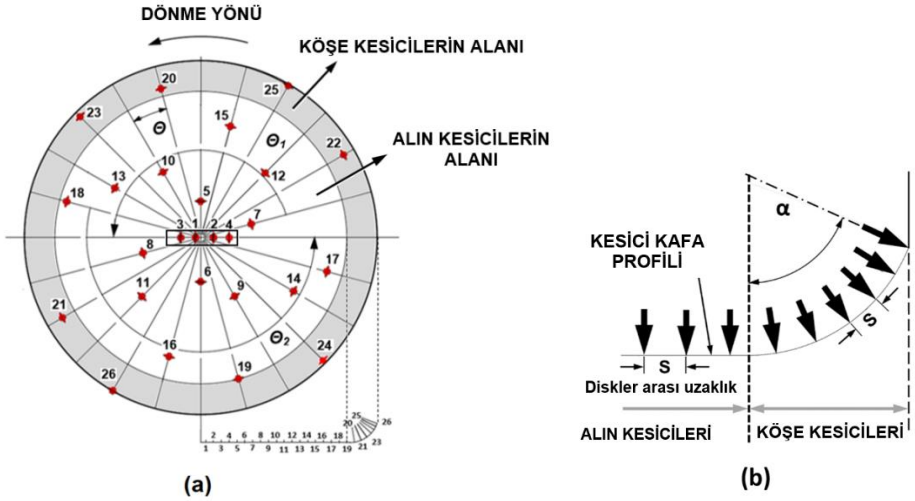
GİRİŞ

Şehir içi ve şehirlerarası hızlı ulaşım, artan nüfus artışına paralel olarak günümüzde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Ayrıca enerji ihtiyacını karşılamak için belli kapasitelerde hidroelektrik santrallerinin yapımı planlanmaktadır. Bu işler için önemli ölçüde tünel açımı gerekmektedir. Disk tipi kesicilerle donatılmış tam cephe kazı makineleri (bundan böyle bu bildiride TBM olarak söz edilecektir) günümüz tünel açma işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makinelerin seçimleri ve performansları pahalı bir işlem olan tünel açma işleminin verimliliğini etkilemektedir. Kayaç tipi ile birlikte makine ve kesici disk boyutları kuşkusuz bu alanda önde gelen faktörlerden biridir. Makinelerin kesici kafa tasarımları ise belli koşullar için seçilmiş bir tünel açma makinesinin performanslarını tayin eden ana faktörlerden biridir. Kesici kafa tasarımı kesici disklerin kafanın tüm yüzeyine belirli bir düzen içerisinde yerleştirilmesi ile ilgilidir. Disklerle ilgili bugüne değin kapsamlı laboratuvar çalışmaları yapılmıştır (Roxborough ve Rispin, 1973; Roxborough ve Philips, 1975; Ozdemir, 1977, Bilgin, 1977). Laboratuvar çalışmaları Şekil 1 de görüldüğü gibi yapılarak diske etkiyen kuvvetler ile bunlarla ilgili tasarım parametreleri arasındaki temel ilişkiler belirlenmiştir. Komşu diskler arasındaki uzaklık (s) ve kesme derinliği (p), kesici kafa tasarımında öne çıkan parametrelerdir. Diskler arasındaki uzunluğun belirlenmesinde genel olarak 's/p' oranı ile kayacın birim hacmini kesmek için gerekli enerjiyi tanımlayan özgül enerji (SE) arasındaki ilişki gözetilir. Bu oran kayaç ve disk boyutlarına bağlı olarak belli değerler arasında değişmektedir. Laboratuvar çapta yapılan kesme deneyleri sonucunda minimum SE'nin s/p=7 değerinde oluştuğu belirtilmektedir. Uygulamada s/p oranı 10 ile 20 arasında seçilmektedir.



Şekil 1. Laboratuvarda yapılan kesme deneylerinde gözetilen temel parametreler

Laboratuvar ölçekli disk kesme deneylerinde kesme sonucu oluşan olukların yatay bir düzlem ürerinde yer aldığı görülür. Ancak uygulamadaki gerçek kesme koşullarına göre bu düzlem yatay olmaktan çok eğimli konumdadır. Bu eğim disklerin ardışıklı kesme düzeninden kaynaklanmakta ve laboratuvar sonuçlarına göre tanımlanan derinlik parametresinin daha değişik boyutta ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Günümüzde kullanılan bir TBM kesici kafasındaki gerçek disk yerleşim düzeni Şekil 2 de verilmiştir. Burada makineye etkiyen yükler ezici çoğunlukla alın diskleri tarafından karşılanmaktadır. Geriye kalan diskler ise köşe kesici (gauge cutter) olarak adlandırılır ve bunlar tünel ekseni ile açı yapacak şekilde tünel duvarına doğru kademeli olarak eğilerek köşe kesmenin rahatlıkla yapılmasını sağlamaktadırlar. Burada da kesme derinliğinin (p) yanı sıra komşu diskler arasındaki uzaklık (s) ve ardışıklı diskler arasındaki çevresel açı (Θ) öne çıkmaktadır. Kesici kafadaki disk düzenine bağlı olarak uygulamada diskin gerçek kesme konumu laboratuvar deneylerindeki geleneksel konumundan çok daha farklı olmaktadır. Böyle koşullarda komşu disklerin genel anlamda birbirlerine göre asimetrik konumda kesme yaptıkları görülmektedir.



Şekil 2. Günümüzde kullanılan gerçek bir TBM kesici kafası üzerindeki disk yerleşim düzeni; (a) Alın ve köşe kesicileri, (b) Köşe kesicilerinin alın disklerine göre profil görünüşü

Disklerin asimetrik kesme konumu ile ilgili kayda değer iki adet çalışma var olup bunlardan birincisi ABD'de Colorado School of Mines'da yapılmıştır. Burada tek eksenli basma dayanımı 135 MPa olan granit örnekleri kullanılarak beş değişik simetrik ve asimetrik disk kesme konumu laboratuvar ortamında karşılaştırılmıştır (Ozdemir, 1977). Asimetrik kesmede diske etkiyen yanal kuvvet bileşeninin, simetrik kesmedeki yanal kuvvet değerinin üç katına çıktığı ve yuvarlanma kuvvetinin ise iki katına ulaştığı vurgulamıştır. İkinci çalışma ise İngiltere'de Newcastle Upon Tyne Üniversitesinde tek eksenli basma dayanımı 300 MPa olan kayaç örneklerinde yapılmıştır. Burada ise asimetrik kesmede diske etkiyen yanal kuvvet bileşeninin, simetrik kesmedeki yanal kuvvet değerinin 20 katına çıktığı belirtilmiştir (Fauvel, 1981). Ancak bu çalışmalarda belirtilen kuvvet bileşenlerindeki artışların nasıl en aza indirilmesi ve makinenin performansına olan etkisi konusunda yapılmış kapsamlı çalışmalar bulunmamaktadır.

TBM kesici kafalarının geometrileri geçmiş yıllarda kubbeli ve konik şekilli olarak tasarlanmaktaydı. Ancak son nesil makinelerde bu geometrik şekiller terkedilerek bunun yerini düz yüzeyli kesici kafalar almıştır. Düz geometrik şekilli kesici kafalarda aşınan disklerin sökülüp takılmasının ve kesici kafanın bakım ve tamirinin daha kolay olduğu belirtilmiştir (Rostami ve Chang, 2017). Düz geometrik şekilli kesici kafaların küçük kesme derinliklerinde sert formasyonların kesimine daha uygun oldukları ve kubbeli tip kesici kafaların ise kırıklı formasyonlarda daha düzgün çalıştıkları belirtilmiştir (Lislerud, 1997). Ancak literatürde, bu iki değişik şekilli kesici kafaların birbirlerine göre üstünlüklerini kapsamlı olarak açıklayan çalışmalara rastlanmamaktadır.

Bu bildiride, günümüzde yaygın olarak kullanılan tam cephe tünel açma makinelerinin (TBM) uygulamadaki kesici kafa tasarımlarının bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Kesici kafa tasarımında gözetilen keskiler arası uzaklık (s) ve derinlik (p) parametrelerin uygulamada nasıl farklılıklar gösterdiği açıklanmış ve tartışılmıştır. Düz yüzeyli ve konik şekilli kesici kafalar, karışık zemin koşullarında dinamik ve kinematik açıdan karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar sunulmuş ve tartışılarak değerlendirilmiştir.

TBM MESİCİ KAFA TASARIMINDA GÖZETİLEN PARAMATERLER

Disk Seçimi ve Yükleme Olukları ile İlgili Faktörler

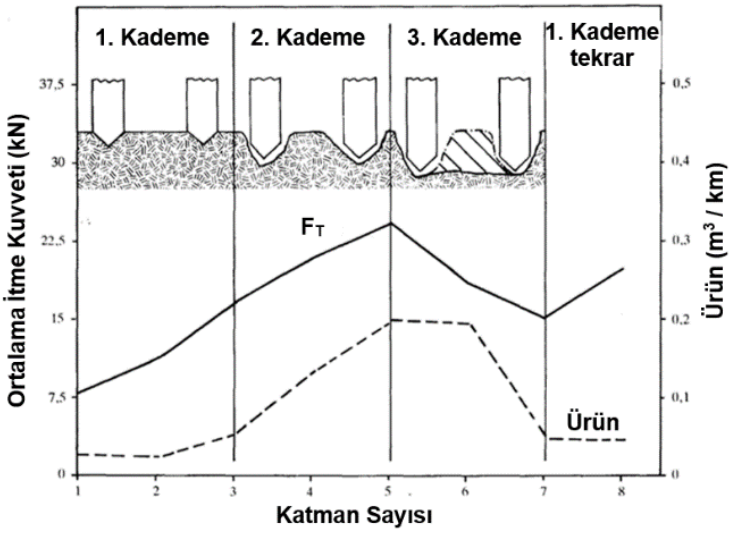
Günümüzde sabit kesit alanlı diskler kullanılmakta ve bunların çapları kesilen formasyonun sertliği ve aşındırıcılığına bağlı olarak makinenin çapı arttıkça artış göstermektedir. Fazla sert ve aşındırıcı olmayan

formasyonlarda kullanılan küçük çaplı makineler için 30 mm çaplı diskler kullanılabilmektedir. Çapı 10 m ve bunun üzerinde olan makinelerde normal koşullarda 432 mm (17 inç) çaplı diskler kullanılırken, çok sert ve aşındırıcı koşullar için 483 mm (19 inç) çaplı diskler tercih edilmektedir. Sert ve aşındırıcı koşullar için disk seçiminde diskin yük taşıma kapasitesi ve diskin kesme hızı sınırı (m/dakika) gözetilir. Yük taşıma kapasitesi uygulamada 432 mm çaplı diskler için 250 kN, 483 mm diskler için ise 310 kN oldukları görülmektedir. Diskin kesme hız sınırı diskin yatağındaki rulmanların en yüksek dönüş hızına göre belirlenir. Uygulamada bu hız değerlerinin 432 mm çaplı diskler için 165 m/d, 483 mm diskler için ise 200 m/d civarında oldukları görülür. Bunun yanı sıra disk eni de önemli bir faktördür. Uygulamada disk eni 12,5 mm ile 25 mm arasında değişir. Çok sert ve aşındırıcı kesme koşulları için gerekli olan kesme kuvvetlerini oluşturmak için yüksek enli diskler kullanılır (Rostami ve Chang, 2017).

Yükleme olukları kesme sırasında oluşan kırık malzemelerin tünel aynasından yüklenerek alınmasını sağlar. Kazılan malzeme yeterli oranda boşaltılamadığı durumda kesici kafa yüzeyi ile tünel aynası arasında sıkışarak makinenin ilerleme hızını düşürür ve kesici kafa yüzeyinin aşınmasına neden olur. Özellikle tünel tabanına düşen malzemeler köşe kesici (gauge cutter) disklerinin daha fazla aşınmasına neden olur. Yükleme oluklarının boyutları ve sayıları kesme sırasında oluşan malzemenin boyut ve miktarına göre belirlenir. Boyutlar 10 mm x 15 mm iriliğindeki parçalar göz önüne alınarak yapılır. Kazılan malzemeler genel olarak tünel tabanına döküldüğünden yükleme olukları her ne kadar kesici kafanın ön yüzeyinde de yer alsalar da daha çok kesici kafanın en dış çapının olduğu yere konumlandırılırlar. Oluk sayısı küçük makineler için 4, orta ölçekli makineler için 6-8 ve 9 m'den büyük çaplı makineler için ise 12 civarında oldukları görülür.

Diskler Arasındaki Uzaklık, Kesme Derinliği ve Diğer İlişkili Parametreler

Laboratuvar deneylerinde diskler arasındaki uzaklık (s) ve diskin kesme derinliği (p) şekil 1 de görüldüğü gibi birbirlerine paralel oluşturulan kesme olukları ile tanımlanır. Kesme sonucu açılan bu olukların tümü kesme derinliğinin (p) sabit olduğu aynı yatay çizgi üzerinde yer alır. Özgül enerji (SE) başlangıçta küçük s/p değerlerinde hızlı bir düşüş gösterir ve genel olarak (kayaç ve disk koşullarına bağlı olarak) s/p oranı 7 civarında en düşük değerini alır ve bundan sonra hemen tekrar yükselerek sabit değere ulaşır. Ancak aynı kesme olukları ardışıklı olarak 'oluk derinleştirme' (groove deepening)' yöntemiyle aynı derinlikteki alt katmanlarda tekrar edildiklerinde SE'nin bu düşük değerini sürdürdüğü ve bu düşük değerin genel olarak 10 ile 20 arasında yer aldığı görülür. Eğer bu oluk derinleştirme işlemi yüksek s/p değerlerinde ardışıklı olarak sürdürülürse oluklar arasındaki etkileşimin yani kırılmanın 'düzgün derinleştirme' değil de Şekil 3'de görüldüğü gibi düzgün olmayan 'çevrimsel derinleştirme' şeklinde olduğu görülür.

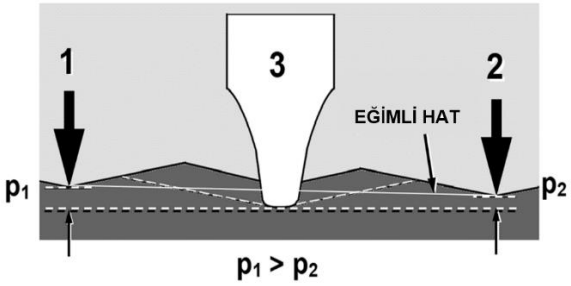


Şekil 3. Ardışıklı katmanlarda komşu diskler arasında çevrimsel derinleştirme oluşumu

Bu kesme şeklinde başlangıçta olukların arasında kırılamayan çıkıntılar daha sonraki geçişlerde kırılmakta ve bu durumun sonraki katmanlarda tekrarlandığı belirtilmiştir (Howard ve Roxborough, 1982). Benzer laboratuvar deneyleri kayatuzu örnekleri üzerinde 400 ve 600 lik açılı disklerle yapıldığında ise bu 'çevrimsel derinleştirme' deki kırılma kademesinin disk açısı ile değiştiği belirlenmiştir (Hekimoglu, 1984). Kırılma işlemi, 60^0 açılı disklerde 2 kademede olurken, 40^0 açılı diskte ise 3 kademede oluştuğu belirtilmiştir. Bu tür kademeli kırılmada diskin yanal kenarının kayaç ile temas alanı artar ve buda disklerin aşınmasına neden olur. Uygulamada s/p oranının 10 ile 20 arasında alındığı ve kademeli kırılmanın da bu değerler arasında oluştuğu gerçeği göz önüne alınırsa yüksek s/p değerlerinin sakıncalı olabileceği öne sürülebilir.

Kesici kafa tasarımında spiral düzenden dolayı etkin derinlik tanımı, laboratuvardaki gibi olmayıp kesicilerin dizilim şekline bağlı olarak karmaşıklık gösterir. Etkin derinlik tanımı kazı mekaniğinde kesici kafadaki ardışıklı spiral sayısının kafanın bir dönü sırasındaki ilerlemesine olan oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu ilke disk gibi yuvarlanma hareketi yapan keskilerin yanı sıra kama ve konik uçlu tüm mekanik kesiciler için de aynıdır. Şekil 2'de gösterildiği gibi, günümüzdeki TBM kesici kafalarında, komşu diskler birbirlerini dengelemek için aynı çap üzerinde karşılıklı olarak konumlandırılırlar. Günümüzdeki TBM kesici kafalarında yaygın olan bu tasarımda genel olarak 2 adet spiral düzeni ortaya çıkmaktadır. Yine uygulamada diskler arası 's' uzunluğu genel olarak 90 mm olarak alınmaktadır. Sert kayaçların kesiminde kesici kafanın bir devri sırasındaki ilerleme miktarı normal koşullarda en fazla 9 mm ve 10 mm civarında olduğu bu konuda yapılan gözlemlerden anlaşılmaktadır. Bu durumda etkin p derinlik değeri 9/2 = 4,5 mm olur. 's/p' değerinin 10 olarak alındığı bir tasarımda etkin s/p değeri (s= 90 mm ve p= 4,5 mm olduğundan) 90/4,5= 20 olarak ortaya çıkar. Yani günümüzdeki TBM'lerin etkin s/p değeri yukarıda belirtilen laboratuvar sonuçlarına dayalı olan nominal tasarım değerlerinin çok üstünde olmaktadır. Bu durum özellikle sert ve aşındırıcı formasyonlarda potansiyel bir 'çevrimsel derinleştirme' riskinin var olduğunu ve bununda uygulamadaki keski aşınma nedenlerinden biri olduğu öne sürülebilir.

Mekanik kazıcılarda, ardışıklı kesme yapmak için kesiciler birbirlerini izleyen spiraller halinde kesici kafa üzerinde yer alırlar. Böyle bir durumda Şekil 2'de görüldüğü gibi keskiler arasındaki açısal uzaklık (Θ) parametresinin etkisi öne çıkmaktadır. Bu açı nedeniyle komşu keskilerin birbirlerine göre bağıl kesme konumları Şekil 1'de verilen laboratuvardaki kesme konumlarından farklı olmaktadır. Günümüzdeki TBM kesici kafalarında komşu keskilerin birbirlerine göre gerçek bağıl kesme konumları tipik olarak Şekil 4 de verilmiştir.



Şekil 4. Gerçek kesme koşullarında asimetrik kesme konumunun oluşumu

Görüldüğü gibi 3 no'lu disk, kendisinden önce gelen 1 ve 2 no'lu komşu disklerin arasındaki uzaklığın orta kısmını kesmektedir. Ancak 1 no'lu diskin komşu disklere göre olan bağıl derinliği (p_1 ve p_2) birbirinden farklı olarak ortaya çıkmakta ve bu nedenle komşu diskler birbirlerine göre eğimli bir doğru boyunca kesme yapmakta ve bu da asimetrik kesmeye neden olmaktadır. Yani uygulamadaki disklerin kesme konumları, laboratuvardaki gibi simetrik olmaktan çok aksine asimetrik şeklinde ortaya çıkmaktadır. Buradaki eğimin değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\beta = \tan^{-1} [APR (\Theta_{n+1} - \Theta_n) / 360\ S] \quad (1)$$

Burada;
β = Eğim açısı (derece),
Θ_n = Bir spiraldeki n diski ile ait olduğu spiralin başlangıç diski arasındaki açısal uzaklık (derece),
Θ_{n+1} = n diskine komşu disk ile ait olduğu spiralin başlangıç diski arasındaki açısal uzaklık (derece)
S = Aynı spiraldeki komşu diskler arasındaki uzaklık (mm).

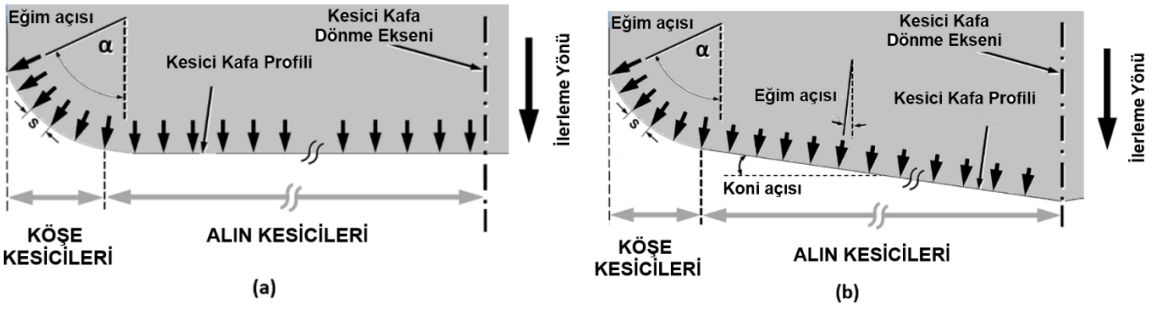
Asimetrik kesme sonucunda diske etkiyen yanal kuvvetin önemli ölçüde arttığı geçmişte yapılan laboratuvar çalışmaları ile ortaya konulmuştur (Ozdemir, 1977; Fauvel, 1981). Yüksek yanal kuvvetler kesme sırasında makinenin tünel ekseninden sapmasına neden olur. Dolayısı ile günümüzdeki TBM'ler bu tür yanal kuvvetlerin olumsuz etkileriyle karşı karşıya bulunmaktadır. Bu tür yanal kuvvetlerin oluşumu hassas şekilde tasarlanmış yıldız tipli kesici kafalar ile bir yere kadar en aza indirilebilir. Ama bu da her zaman olası değildir. Çözüm olarak disklerin birbirlerine göre simetrik kesme yapmasını yani şekil 4 de görülen '$p_1 \neq p_1$' asimetrik konumun '$p_1 = p_1$' simetrik konumuna getirilmesidir. Bu simetrik konumu elde etmek için disklerin birbirlerine göre olan profil yüksekliklerinin değiştirilmesi önerilebilir. Bunun için bir çözüm olarak disk yataklarının altına mm ölçekli kalınlıkta çelik plakalar (şim) konularak elde edilebilir. Verilen bir TBM kesici kafası için bu plaka kalınlığı (k) aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$k = PR [1 - (\Theta / 360)] \quad (2)$$

Burada;
PR= Kesici kafanın bir devri sırasında makinenin ilerleme miktarı (mm/devir),
Θ = Verilen bir disk ile ait olduğu spiralin başlangıç diski arasındaki açısal uzaklık (derece).

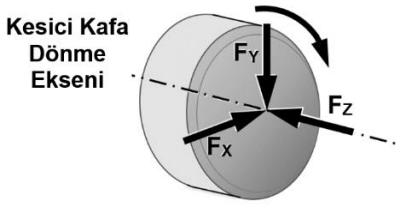
Kesici Kafa Geometrilerinin Karşılaştırılması

TBM kesici kafaları başlangıçta kubbeli, ya da konik şekilde tasarlanmaktaydı. Daha sonra bu geometriler terkedilerek günümüzde bunların yerine düz yüzeyli kesici kafalar almıştır. Şekil 5'de görüldüğü gibi düz yüzeyli geometrilerde alın disklerinin ekseni tünel eksenine paralel olurken yalnızca köşe kesici diskler tünel eksenine göre belli eğim açılarına sahiptir. Konik ya da kubbe şekilli kesici kafalarda ise tüm keskilerin ekseni tünel ekseni ile daima belli eğim açıları (α) yapacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 5. (a) Düz yüzeyli kesici kafalar ve (b) konik şekilli kesici kafalar

Bir TBM kesici kafasına etkiyen tepkime kuvvetleri kesici kafanın dönme eksenine ya da tünel eksenine göre Şekil 6'da verilmiştir. Diske etkiyen kuvvetin bileşenleri göz önüne alındığında bir TBM kesici kafasına etkiyen kuvvetlerin büyüklüğü genel anlamda aşağıdaki gibi verilir:



Şekil 6. TBM kesici kafasına kesici kafanın dönme eksenine göre etkiyen tepkime kuvvetleri

$$F_X = \Sigma [F_T \cos \Theta \sin \alpha - F_R \sin \Theta \pm F_S \cos \Theta \cos \alpha] \quad (3)$$

$$F_Y = \Sigma [F_T \sin \Theta \sin \alpha + F_R \cos \Theta \pm F_S \sin \Theta \cos \alpha] \quad (4)$$

$$F_Z = \Sigma [F_T \cos \alpha + F_S \sin \alpha] \quad (5)$$

Burada;

F_X = Yatay tepkime kuvveti (N),

F_V = Düşey tepkime kuvveti (N),

F_Z = Eksenel tepkime kuvveti (N),

Θ = Kesici kafanın dönüşü sırasında diskin açısal konumu (derece),

α = Diskin tünel eksenine göre eğim açısı (derece).

Yatay Kuvvet'in (F_S) etkisi bazı durumlarda pozitif yada negatif yönde olmaktadır. Daha önceki laboratuvar deneylerinde F_S'nin etki yönü, optimum s/p değerinin altında negatif, bunun üstünde ise pozitif olma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir (Fauvel, 1981). TBM'lerde s/p oranı genelde optimum s/p değerinin üzerinde olduğundan F_S'nin etki yönü (+) olarak alınmıştır. Diske etkiyen en büyük kuvvet bileşeni İtme Kuvveti (F_T) olup normalde bunun değeri Yuvarlanma Kuvvetinin (F_R) on katı kadardır. Ayrıca asimetrik kesme koşullarında F_S'nin değeri F_R'nin iki yada üç katından fazla olmaktadır. Yukarıdaki 3, 4 ve 5 No'lu bağıntılarda F_T ve F_S bileşenlerinin, eğim açısı sıfır olan disklerde sıfır değerde olduğu görülmektedir. Düz yüzeyli TBM kesici kafalarında köşe kesiciler dışında kalan tüm disklerin eğim açısı sıfırdır. Köşe kesicilerin sayısı da normal koşullarda alın disklerin sayısından ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Ayrıca laboratuvar deneylerinde köşe kesicilere etkiyen kuvvetlerin alın kesicilere oranla daha düşük olduğu ve eğim açıları büyüdükçe kuvvet değerlerinde de azalma eğilimi gösterdikleri belirtilmiştir (Fauvel, 1981). Bu nedenle analizlerde kolaylık olması açısından düz yüzeyli TBM kesici kafalarında köşe kesicilerin etkisi, alın disklerine oranla ihmal edilebilir. Bu durumda yukarıdaki 3, 4 ve 5 No'lu bağıntılar düz yüzeyli kesici kafalar için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F_X = \Sigma [F_R \sin \Theta \pm F_S \cos \Theta\} \quad (6)$$

$$F_Y = \Sigma [F_R \cos \Theta \pm F_S \sin \Theta\} \quad (7)$$

$$F_Z = \Sigma [F_T] \quad (8)$$

Yukarıdaki bağıntılardan görülebileceği gibi düz yüzeyli kesici kafalarda en yüksek değere sahip olan İtme Kuvveti'nin (F_T) etkin olmayışı nedeniyle makineye yatay (X) ve düşey (Y) yönlerinde etkiyen tepkime kuvvetleri kubbeli yada konik şekilli kesici kafalara göre daha azdır. Bunu daha belirgin olarak görmek için düz yüzeyli kesici kafalar ile konik şekilli kesici kafaların dinamik ve kinematik temelde bir karşılaştırılması yapılabilir. Bu amaçla uygulamada kullanılan disk düzenine sahip 2 m çaplı bir kesici kafa referans olarak alınmıştır. Kesici kafanın, aralarındaki uzaklık (s) 80 mm olan ve her biri eşit açısal uzaklık düzeninde dizilmiş toplam 24 adet alın diski ile donatıldığı var sayılmıştır. Aralarındaki tek fark birinin düz yüzeyli, diğerinin ise tünel eksenine 8^0 eğimli konik yüzeye sahip 'konik geometrili' olmasıdır. Geriye kalan bütün tasarım ve işletim

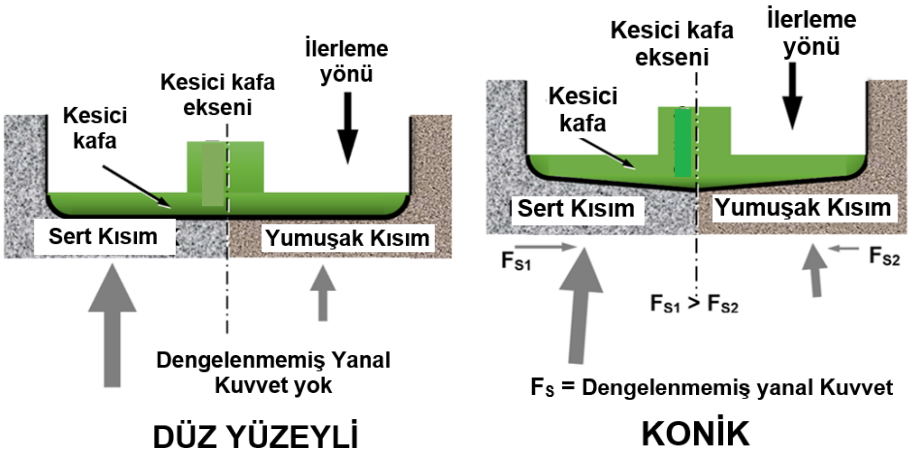
parametrelerin aynı olduğu kabul edilmiştir. Yine uygulamadaki gibi, diskler kesici kafa üzerinde birbirlerini karşılıklı olarak dengeleyecek şekilde dizilmişlerdir. Bu nedenle eğer, kesilen formasyon homojen ve izotropik ise normal koşullarda bu iki kafanın performansları arasında önemli bir fark olmaz. Ancak etkin bir karşılaştırma için tünel aynasının homojen olmadığı yani yarısının sert, diğer yarısının ise yumuşak olduğu varsayılmıştır. Daha önceki laboratuvar deneyleri göz önüne alınarak bir diske etkiyen İtme Kuvveti (F_T) değeri sert kısım için 40 kN, yumuşak kısım için 5 kN, Yuvarlanma Kuvveti (F_R) ise sert kısım için 5 kN, yumuşak kısım için 1 kN olarak varsayılmıştır (Fauvel 1981, Bilgin 1977). Hesaplamayı basitleştirmek için Yanal Kuvvet burada dikkate alınmamıştır.

Bu koşullar altında her iki kesici kafaya bir dönme hareketi için etki eden Yatay Tepkime (F_X) Kuvvetindeki değişimler ve ait olan değerleri Şekil 7 de verilmiştir. Düşey Tepkime Kuvveti de aynı davranışı gösterdiğinden burada ayrıca verilmemiştir. Görüldüğü gibi eşit kesme koşullarında düz yüzeyli kesici kafaya etkiyen tepkime kuvveti konik geometrili kesici kafalara göre daha düşüktür.



Şekil 7. Düz yüzeyli ve konik şekilli kesici kafalara etkiyen yatay tepkime kuvvet değerinin, kesici kafanın bir dönme hareketi sırasındaki açısal konuma göre değişimi ve büyüklüğü

Her iki kesici kafaların yüzeyine dik olarak etkiyen dengelenmemiş tepkime kuvvetleri de Şekil 8 de sunulmuştur. Burada da görüldüğü gibi konik geometrili kesici kafaya dengelenmemiş Yanal Tepkime Kuvveti (FS) etki ederken, düz yüzeyli kesici kafa için böyle bir durum bulunmamaktadır. Bu analiz, konik geometrili kesici kafaların homojen olmayan kesme koşullarında tünel ekseninden sapmaya daha eğilimli olduklarını göstermektedir.



Şekil 8. Düz yüzeyli ve konik şekilli kesici kafalara homojen olmayan zeminde etkiyen dengelenmemiş tepkime kuvvetleri

SONUÇLAR

Günümüzde tünel açmada yaygın olarak kullanılan tam cephe kazı makinelerinin kesici kafa tasarımlarının bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Daha önce yapılan laboratuvar çalışmaları ve uygulamada kullanılan makinelerin gerçek tasarımları ve bunlardan edinilen performans verileri temelinde aşağıdaki sonuçlar vurgulanabilir:

(1) Laboratuvarda yapılan kesme deneylerinde komşu disklerin birbirlerine göre simetrik konumda kesme yaptıkları varsayılmaktadır. Ancak uygulamada disklerin kesici kafa üzerinde ardışıklı dizilimleri nedeniyle kesme hareketinin genelde asimetrik olduğu ve bu durumun kesme derinliği kavramında karmaşıklık oluşturduğu görülmektedir. Günümüz tünel açma makinelerinin tasarımları dikkate alındığında diskler arası uzaklığın kesme derinliğine olan oranının (s/p) nominal tasarım değerlerinin çok üstünde oluştuğu görülmektedir. Bu tür yüksek s/p oranlarında oluşabilen 'çevrimsel derinleştirme' kesme işlemi nedeniyle disklerin aşınarak zarar görmesi söz konusu olabilir.

(2) Asimetrik kesme konumunda disklere etkiyen yanal kuvvet bileşeninin kayda değer ölçüde arttığı ve bunun makinenin tünel ekseninden sapmasına neden olan faktörlerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısı ile günümüzdeki TBM'ler bu tür yanal kuvvetlerin olumsuz etkileriyle karşı karşıya bulunmaktadır. Bu olumsuz etkiyi en aza indirmek için simetrik kesme hareketinin sağlanması gerekir. Simetrik hareket için ise disklerin birbirlerine göre olan profil yüksekliklerinin düzenlenmesi ile elde edilebilir. Bunun için her bir disk yatağının altına kalınlıkları bu çalışmada verilen formüle göre hesaplanabilen ince plakalar yerleştirilerek profil yükseklikleri bir ölçüde değiştirilebilir.

(3) Düz yüzeyli geometriye sahip kesici kafaların daha az tepkime kuvvetlerine ve dengelenmemiş yanal kuvvetlere maruz kalması nedeniyle konik şekilli kesici kafalara göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Bilgin, N. (1977). Investigations into the mechanical cutting characteristics of some medium and high strength rocks, Ph.D. Thesis, Univ. of Newcastle upon Tyne, June, 1977.

Fauvel, O.R. (1981). Implications of laboratory rock cutting for the design of a tunnel boring machine cutter head, Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne. July.

Hekimoglu, O.Z. (2014). Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural stones, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, December, 230-241.

Howarth, D.F. and Roxborough, F.F. (1982). Some fundamental aspects of the use of disc cutters in hard-rock excavation. *Journal of South African Inst of Mining & Metallurgy*.

Lislerud, A. (1997). Principles of mechanical excavation, Tamrock Corp, POSIVA 97-12.

Ozdemir, L. (1977). Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability. Ph.D Thesis, Colorado School of Mines.

Rostami, J, Chang, S.E. (2017). A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring Machines, Engineering. Volume 3, Issue 6, December 2017. Pages 892-904.

Roxborough, F.F., Rispin, A. (1975). Mechanical cutting characteristics of the lower chalk, Report to the Transport and Road Research Laboratory of the Department of the Environment, University of Newcastle Upon Tyne (UK).

Roxborough, F.F., Phillips, H.R. (1975). Rock excavation by disc cutter. *Int. J. Rock Mech & Min. Sci*, 12, 36-36.

POLYAK EYNEZ'DE TAM MEKANİZE UZUNAYAK MADENCİLİĞİNDE KONVEYÖR MOTORLARINDA SÜRÜCÜ KULLANIMININ AVANTAJLARININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE ADVANTAGES OF USING DRIVES IN CONVEYOR MOTORS IN FULLY MECHANIZED LONGWALL MINING IN POLYAK EYNEZ

E. Kahraman*, E. Elban, E. Çelik

Polyak Eynez Enerji Üretim Madencilik San. ve Tic. A.Ş.
*(*Sorumlu yazar: erginkahraman@yahoo.com)*

ÖZET

Tam mekanize yeraltı kömür madenciliğinde bant konveyör, zincirli konveyör, vb. birçok sistem ve ekipman kullanılmaktadır. Konveyörlerin çalıştırılmasında/opera edilmesinde klasik yol verme sistemleri ve gelişmiş yol verme sistemleri (sürücülü sistem) kullanılmaktadır. Sürücülü yol verme sistemi kullanımının verimlilik, güvenlik ve maliyet açısından ciddi avantajları bulunmaktadır. Özellikle ayak üretim bölgelerinde sürücülü yol verme sistemlerinin kullanımı ciddi avantajlar sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında, Polyak Linyit Yeraltı Linyit İşletmesi' nde mekanize üretim bölgelerinde konveyör sistemlerinde kullanılan sürücülü yol vericilerin sağladığı avantajlar, vb. hususlar tanımlanmış, uygulamaya yönelik bilgiler/bulgular paylaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Mekanize uzun ayak, sürücülü motor, verimlilik

ABSTRACT

In fully mechanized underground coal mining, many systems and equipment such as belt conveyors, chain conveyors, etc. are used. Conventional starting systems and advanced starting systems (driven systems) are used to operate conveyors. The use of a driven starting system has significant advantages in terms of efficiency, safety and cost. Especially in the foot production areas, the use of drive starting systems provides serious advantages.

Within the scope of the study, the advantages, etc., of the drive starters used in conveyor systems in mechanized production zones in Polyak Lignite Underground Lignite Operation were defined and information/findings regarding the application were shared.

Keywords: Coal mining, driven motor, efficiency

GİRİŞ

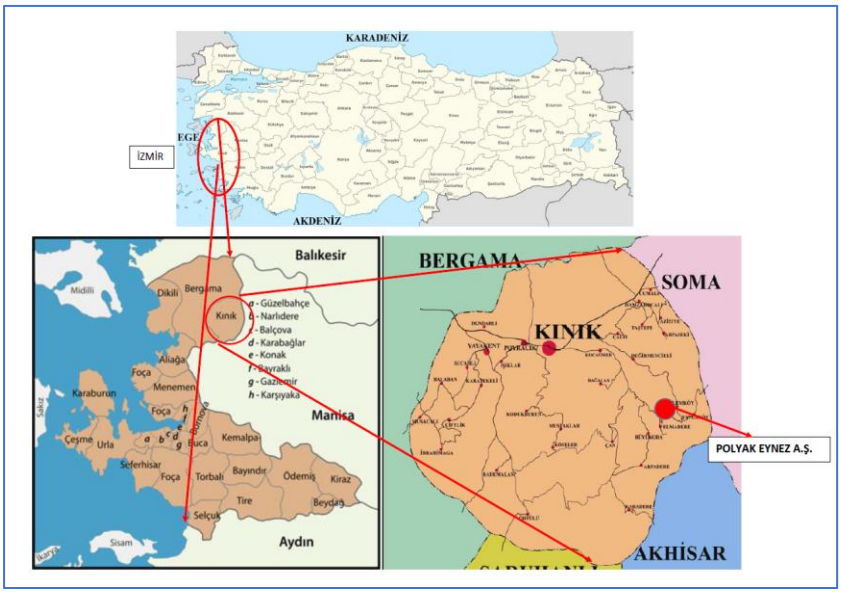
Yeraltı kömür madenciliğinde mekanize kazı tekniklerinin kullanımı ile üretimde randıman artışı ve daha az personel ile çalışılmasına olanak sağlamıştır. Bu nedenle daha güvenli çalışmalar yapılması mümkün olmuştur. Mekanize uzun ayaklarda, ayaktan kömürün kesilmesinde kullanılan kesici-yükleyici makine, ayak tahkimatında kullanılan yürüyen tahkimat üniteleri ve kazılan/kesilen kömürün nakledilmesine yarayan birçok zincirli konveyör (ayak içi konveyörü, arka konveyör, aktarma konveyörü, vb.) ekipmanı kullanılmaktadır. Yeraltında mekanik ekipmanların kullanımının getirdiği avantajların yanında bu ekipmanların kullanımında elektrik, pnömatik ve hidrolik gibi konularda ciddi bir bilgi birikimi gerekliliği bulunmaktadır. Makine-

ekipmanlarda kullanılan motorların kontrol edilmesi operasyonel olarak en önemli işlemlerden biridir. Ekipmanların motorları sürücülü yolverici kullanımı ve direkt kontaktörlü yol verme şeklinde olmak üzere iki şekilde kontrol edilebilmektedir.

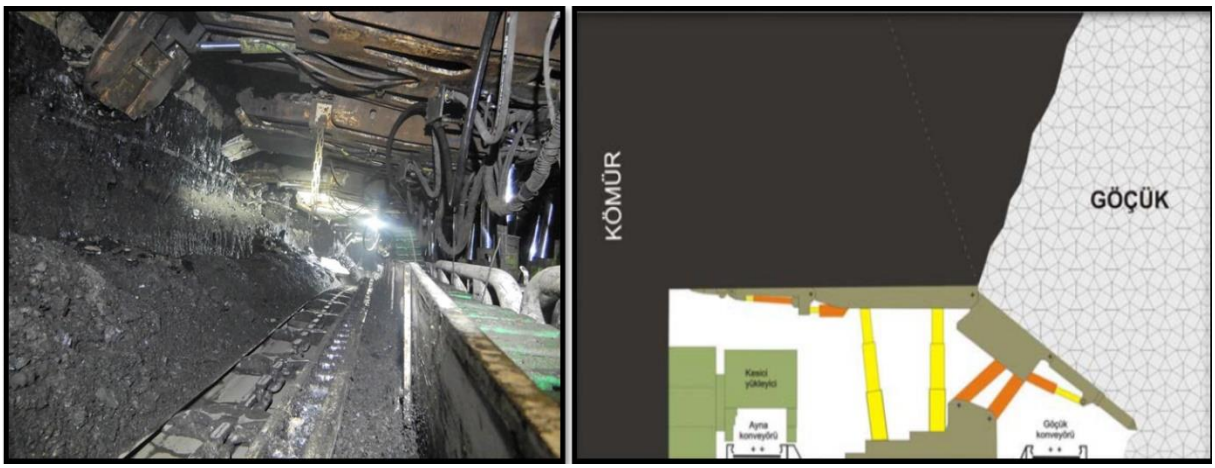
Mekanize ayaklarda çalışmalar sırasında birçok nedenden dolayı ayaklar çok sık durdurulup, çalıştırılabilmektedir. Geçilen formasyonların özelliklerine bağlı olarak, yürüyen tahkimat ünitelerinin (şilt) hareket ettirilmesi sırasında tavandan veya arından akmalar olabilmekte, bu malzeme akmalarına bağlı olarak, ayaktan geçen hava miktarı değişmekte, dolayısı ile güvenlikle ilgili sorunlar yaşanabilmektedir. Bunlar dışında, temizlik ve bakım süreçlerinde de konveyörün hızlarının düşürülmesi gereken durumlar, vb. benzer süreçler yaşanabilmektedir. Bu süreçlerin güvenli bir şekilde yönetimi için ayak ekipmanlarının torklarının, hızlarının, vb. parametrelerinin izlenmesi ve gerektiğinde hızlı bir şekilde değiştirilmesi uygulamada avantajlar sağlamaktadır. Sürücülü yol verme sistemi ile çalıştırılan ekipmanlar/motorlar bu bahsedilen esnekliklere sahiptirler. Çalışma kapsamında, sürücülü yol verme sistemi ile çalıştırılan motorlar ve direkt kontaktörlü yol verme sistemi ile çalıştırılan motorların genel çalışma prensipleri, besleme gerilimleri, hız kontrolü, frekans değiştirme, devir sayısı ve ölçümü, tork ölçümü, çalışma ömrü, enerji tüketimi, vb. başlıklar altında incelenmiştir. Polyak Eynez Kınık Linyit İşletmesi' nde mekanize üretim bölgelerinde kullanılan bazı ekipmanların (konveyörler, kırıcılar, vb.) yol verme sistemleri incelenmiştir. Çalışmalar sırasında, ekipmanların akım, devir, tork grafikleri ve enerji tüketimleri gibi parametreleri incelenmiş, sürücülü yol verici ile çalışan motorlar ile direkt yol verme şeklinde çalışan motorların karşılaştırmaları yapılmış, vb. incelemelerle elde edilen sonuçlar, uygulamaya yönelik bilgiler/bulgular paylaşılmıştır.

İŞLETME HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Polyak Eynez A.Ş. Kınık Linyit İşletmesi, İzmir İli Kınık İlçe sınırları içerisinde Elmadere Mahallesi civarında bulunan ülkemizin en derin linyit madenidir (Şekil 1). Proje sahasında kazı çalışmalarına 2014 yılında başlanmış olup, ilk üretim çalışmaları 2020 yılında başlamıştır. Mevcut durumda, yeraltından yüksek kaliteli linyit kömürü mekanize kazı ekipmanları ile LTCC (arkadan göçertmeli geri dönümlü tam mekanize uzun ayak) yöntemi (Şekil 2) ile üretilerek, yerüstünde kurulu bulunan Lavvar tesisinde işlenerek, piyasanın ihtiyacı olan kömür ürünü elde edilmektedir. İşletmenin yeraltına 850 metre derinliğinde 50 m^2 kesitte servis kuyusu ve ortalama 14 derece eğimde 3600 metre uzunluğunda 23,4 m^2 kesitte ana desandre olmak üzere 2 erişim ve temiz hava yolu bulunmaktadır. Ocakta kirlenen hava 850 metre uzunluğundaki 50 m^2 kesitte havalandırma kuyusunun yerüstü bölgesine monte edilmiş 1100 kW gücünde, 300 m^3/sn hava debisi emişi yapabilen emici fanla ocak dışına atılmaktadır. İşletmede yeraltında metan drenaj sistemi bulunmaktadır. Kendiliğinden yanma yönetimi kapsamında bütün teknolojik alt yapı (azot tesisi, gaz kromatografisi, kül tesisi, vb.) mevcuttur. Yeraltına personel naklinde 120 kişi kapasiteli kuyu nakliyatı kullanılmaktadır. Su drenajı için yeraltında uygun ve yeterli şekilde havuz ve pompa alt yapısı teşkil edilmiş olup, güvenli bir şekilde işletilmektedir. İşletmede uygun PLC (Programmable Logic Controller) altyapısına sahip, yerüstü kontrol/izleme merkezi bulunmaktadır.



Şekil 1. Yer bulduru haritası

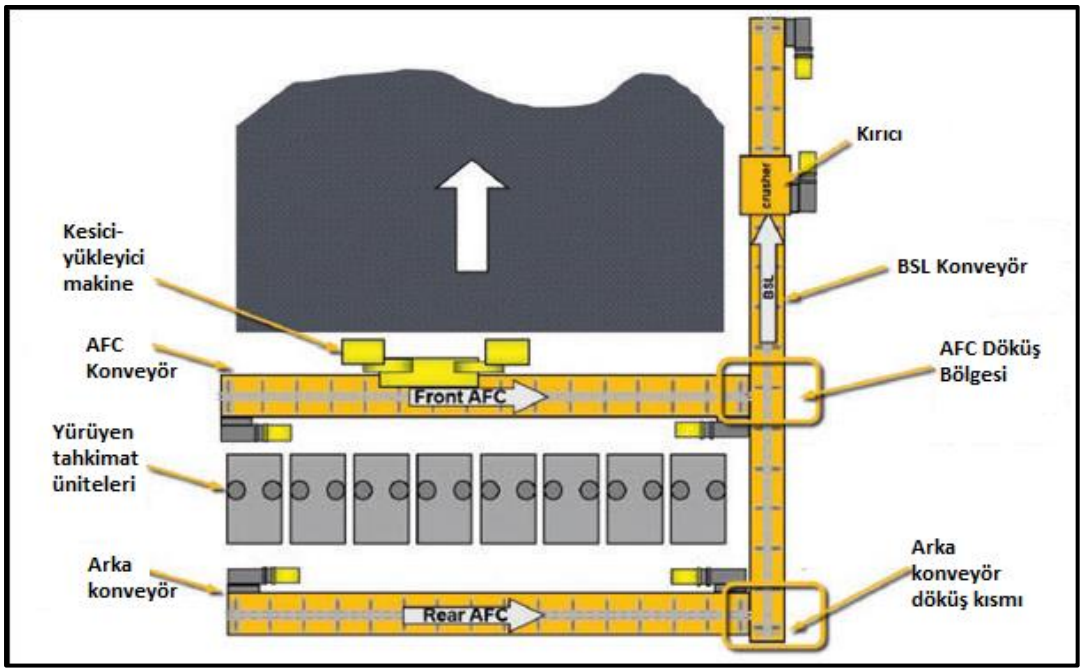


Şekil 2. İşletmede tam mekanize uzun ayakta kömür üretim yöntemi

KONVEYÖRLERDE SÜRÜCÜLÜ MOTOR KULLANIMININ AVANTAJLARI

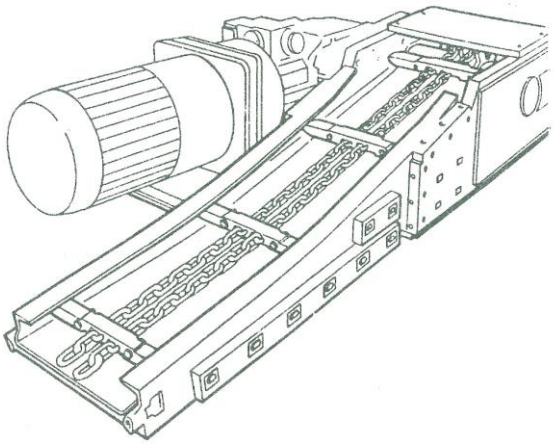
Tam Mekanize Uzun Ayaklarda Kullanılan Ekipmanlar

Tam mekanize uzun ayaklarda kömür üretimi, boyut küçültülmesi ve kazılan malzemenin nakliyatı sürecinde kesici-yükleyici makine, zincirli konveyörler (ayak içi konveyör, arka konveyör ve aktarma konveyör), kırıcı, vb. ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar elektrik enerjisi ile çalışan ekipmanlardır (Şekil 3).



Şekil 3. LTCC yöntemi ile çalışan tam mekanize uzun ayakta kullanılan ekipmanlar (Mundry ve Sandgathe, 2018)

Mekanize uzun ayaklarda farklı şekillerde imal edilmiş, farklı amaçlara hizmet eden (ayak içi konveyörü-AFC, aktarma konveyörü-BSL, arka konveyör-RC, vb.) zincirli konveyörler temel olarak elektrik motoru ile birleştirilmiş oluklar üzerinde zincirin hareket ettirilmesi ve buna dayalı olarak, zincir hareketi ile malzemenin yer değiştirilmesi prensibine göre çalışmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Örnek bir zincirli konveyör ünitesinin bir kısmının görünüşü

Mekanize Uzun Ayak Ekipmanlarında Motor Kontrol Sistemleri

Elektrik motorlarının kontrol sistemleri sürücülü yol verme ve direkt kontaktörlü yol verme şeklinde olmak üzere temel olarak 2 çeşittir.

Direkt kontaktörlü yol verme sistemi, motorlara standart kontaktör bağlantısı ile yapılan yol verme ve kontrol sistemidir. Bu tür sistemlerde konveyör ile motor arasında kaplin adı verilen ekipmanlar kullanılmaktadır.

Sürücülü (VFD-Variable Frequency Drive) motorlar, sürücü girişlerine uygulanan 3 faz AC (alternatif akım) gerilimi doğrultucu devre (rectifier devresi) ile DC (doğru akım) voltaja çevirip, elde edilen DC (doğru akım) voltaj, örneklenerek istenilen frekansta tekrar AC (alternatif akım) voltaja çevirip, elektrik motorları üzerinde hız, yön, tork ve akım kontrolüne olanak sağlamaktadır. Sürücü motorlar içlerinde gömülü yazılımlar barındırdığından, çeşitli verileri ve komutları alabilme ve gönderebilme yeteneklerine sahiplerdir. Bu sayede PLC (Programmable Logic Controller)'ler tarafından kontrol edilir, verileri merkezi kontrolde görüntülenmektedir (Al-Ali, vd., 2000).

Sürücülü yolverici ile çalışan ve direkt kontaktörlü yol verici ile çalışan motorların belli parametrelerde karşılaştırılması Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Sürücülü yolverici motorlar ve direkt konktaktörlü motorların karşılaştırılması

Parametre	Sürücülü yol vericili motor	Direkt kontaktörlü yol verilen motor
Besleme	1000 Volt	220-380 Volt (yerüstü) 1000 Volt (yeraltı)
Hız kontrolü	Var	Yok
Frekans değiştirme	Var	Yok
Devir sayısı ölçümü	Var	Yok
Tork ölçümü	Var	Yok
Çalışma ömrü	Uzun ömürlü	Kısa ömürlü
Enerji tüketimi	Düşük	Yüksek
Sabit hızda çalışma	Yok	Var
Kontrol ve haberleşme	Var	Yok

Sürücülü yol verici ile çalışan motorlar; emniyet, verimlilik ve tasarruf ana başlıklarında sürücüsüz (direkt kontaktörle yol verilen) motorlara göre temel farklılıkları bulunmaktadır. Farklılığa dayalı avantajlar aşağıdaki gibi maddeler halinde listelenmiştir:

- Emniyet: Çalışan güvenliği ve işletme güvenliği için oluşturulan çalışma modları ve çalışma prensipleri, güvenlik ve donanımsal kontrol avantajları bulunmaktadır.
- Verimlilik: Motorların çektiği akım, kullanılan gerilim, çalışma ömürleri, genel toplamda verimlilikleri, yıllık bazda kayıp çeşitleri ve miktarları bulunmaktadır.
- Tasarruf: Motorların bir vardiya ve dolaylı yıllık bazda çekilen peak akımlarının işletmedeki gider tablosuna yansıması mevcuttur.

İşletmede Sürücülü Yolverici ve Direkt Yolverme ile Çalışan Motorların Kullanımı

İşletmede mevcut durumda aktif çalışmakta olan 2 üretim panosunda (CK-01 ve CK-02) ayak bölgesinde bulunan ayak ekipmanlarında (zincirli konveyörler, kırıcı, vb.) kullanılan sürücülü yol verme ve direkt kontaktörlü yol verme sistemiyle kontrol edilen motorlara ilişkin bazı temel bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir. Kullanılan 400 kW ve 500 kW'lık Breuer marka motorların çalışma grafikleri Şekil 5'de verilmiştir.

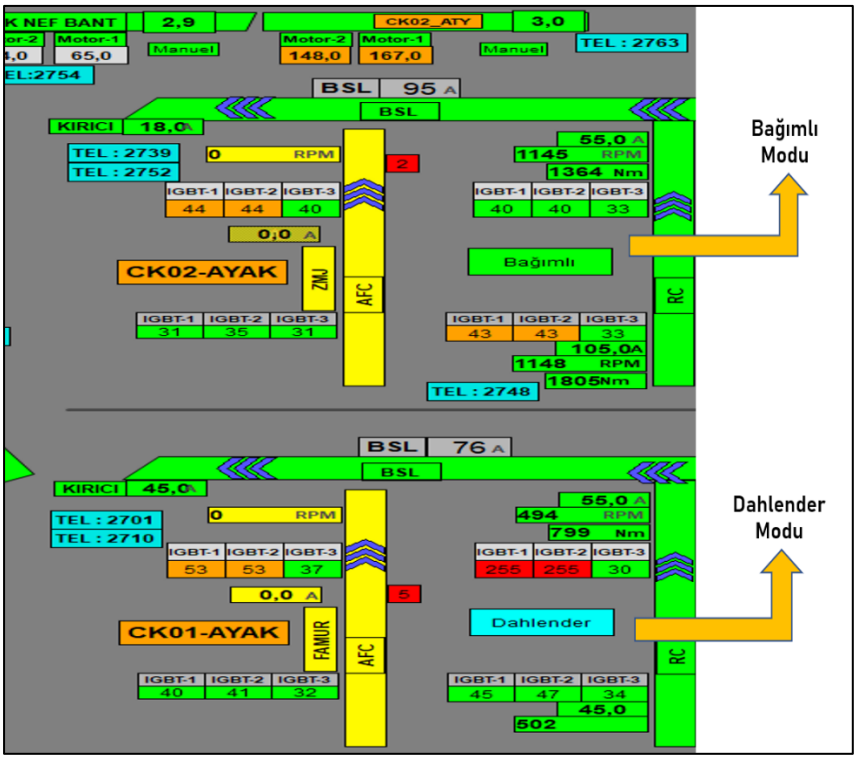
Çizelge 2. İşletmede kullanılan zincirli konveyör sürücülü ve sürücüsüz motorları

Ekipman	CK-01 Panosu	CK-02 Panosu
AFC (ayak içi konveyörü)	Motor-1 Sürücülü Motor-400 kW Motor-2 Sürücülü Motor-400 kW	Motor-1 Sürücülü Motor-400 kW Motor-2 Sürücülü Motor-400 kW
RC (ayak arkası konveyörü)	Motor-1 Sürücülü Motor-400 kW Motor-2 Sürücülü Motor-500 kW	Motor-1 Sürücülü Motor-400 kW Motor-2 Sürücülü Motor-400 kW
BSL (aktarma konveyörü)	Motor 1 Hava Soğutmalı, Sürücüsüz Motor-315 kW	Motor 1 Hava Soğutmalı, Sürücüsüz Motor-315 kW
Kırıcı	Motor 1 Hava Soğutmalı, Sürücüsüz Motor-160 kW	Motor 1 Hava Soğutmalı, Sürücüsüz Motor-132 kW

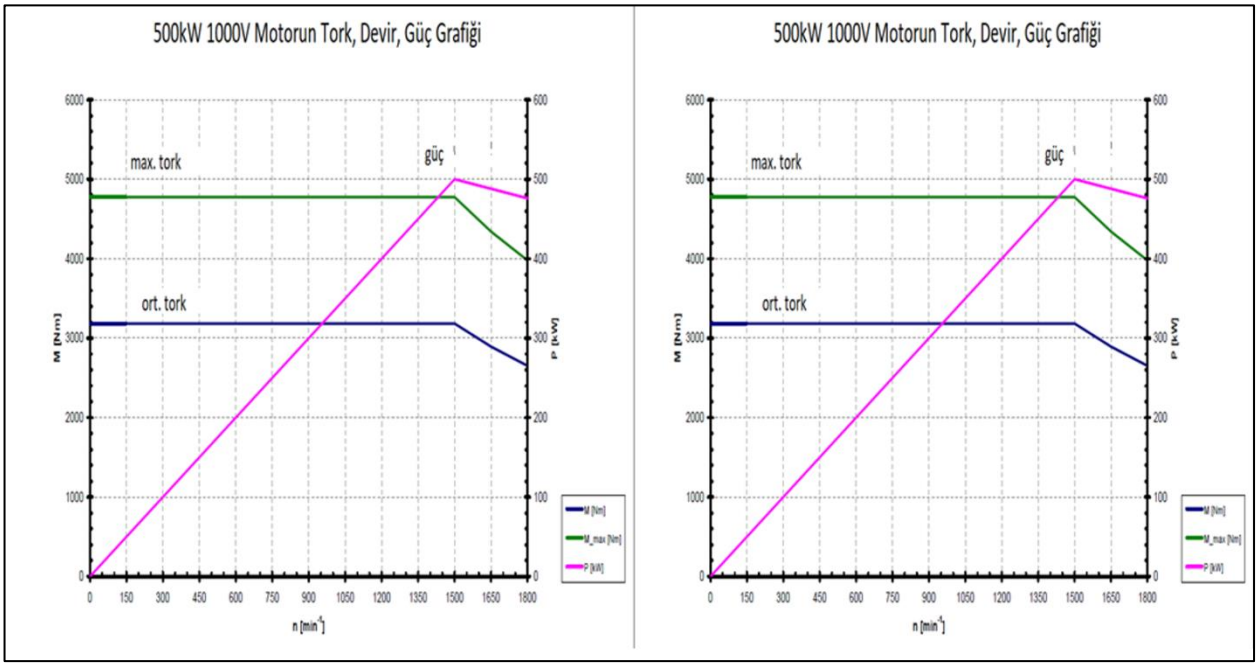
Çizelge 3. Çalıştırma modları ve genel özellikleri

Çalıştırma Modu	Modun Özellikleri
Temizlik Modu	Bu modda önce kırıcı çalışmakta, sonra aktarma konveyörü (BSL) çalışmaktadır. Önce çalışan motor bakım modunda (yavaş), diğeri ise normal çalışmaktadır. Ayak içi konveyörü (AFC) ve arka konveyör (RC) bakım hızında (yavaş) çalışmaktadır. Bu çalışmada amaç, başlangıçta bir motoru diğerine göre yavaş çalıştırmaktır. Çalışma şartlarına göre hız ayarlanabilmektedir.
Manuel Mod (Bağımlı Modu)	Bu modda önce kırıcı çalışmakta, sonra aktarma konveyörü (BSL) çalışmaktadır. Mekanize ayağın durumuna göre AFC veya RC motorlarından hangisi seçildi ise, onun çalışmasına olanak tanımaktadır.
Manuel Mod (Bağımsız)	Bağımsız modda hangi motorun çalışması isteniliyorsa, o motor çalıştırılabilmektedir.
Bakım Modu	İstenilen motor/motorlar bakım modunda çalıştırılabilir. Sistemde kontrol ünitesi üzerinde tanımlanan tuşlar basılı tutularak, istenilen devirde emniyetli bir şekilde çalıştırılabilmektedir.
Dahlender Test Modu	Bu modda motorlar sıralı çalışmaktadır. Önce kırıcı, sonra BSL konveyör çalışmaktadır. AFC ve RC konveyör motorları yavaş (bakım) hızındadır.
Ters Yön Modu	Bakım modunun çalışma prensibi ile aynıdır. Motorun/konveyörün yönünü değiştirerek, diğer yönde çalışmasına olanak sağlamaktadır.
Sıkışık Mod	Kırıcı ve BSL sıralı olarak çalışmaktadır. AFC veya RC motorundan hangisine ilk basılırsa normal, diğeri bakım modu gibi çalışmaktadır.

İşletmede sürücülü yolverici ile çalıştırılan motorlarda; temizlik modu, manuel mod (bağımlı), manuel mod (bağımsız), bakım modu, Dahlender Test Modu, Ters Yön Modu ve Sıkışık Mod gibi çalışma modları bulunmaktadır. Modların genel çalışma prensipleri Çizelge 3'de verilmiştir. Bağımlı mod ve Dahlender Modu kullanılması durumunda skada ekran görüntüsü Şekil 5'de bulunmaktadır. 400 ve 500 kW güçlerdeki motorlara ilişkin tork, akım ve devir grafikleri Şekil 6' da verilmiştir.



Şekil 5. Sürücülü motor kullanımı modlarını gösterir Polyak Eynez Kontrol Merkezi scada görüntüsü

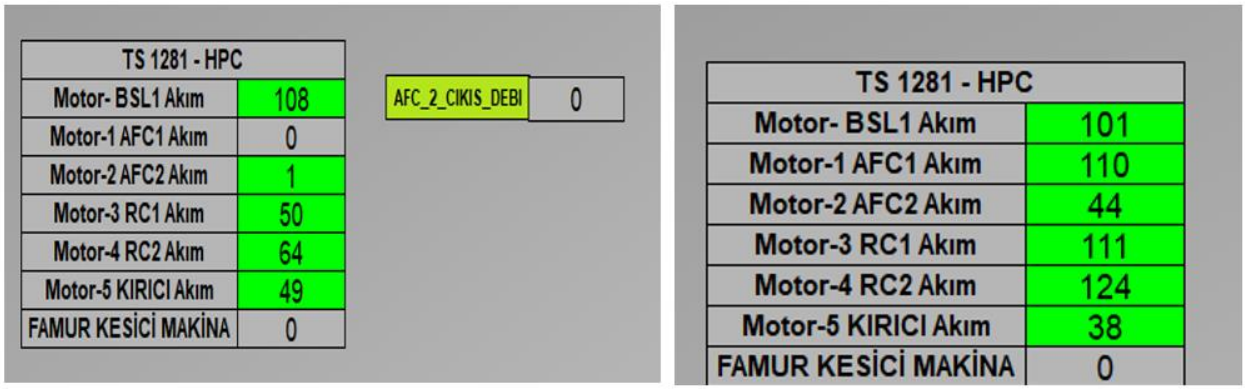


Şekil 6. 400kW ve 500kW güçteki Breuer marka motorların akım-devir grafiği (Bruer, 2023)

Motorların ayaklardaki çalışma verimlilikleri değişken özelliktedir. Çizelge 4'de bu veriler yer almaktadır. Motorların ayaklardan çektikleri akımlara ilişkin grafikler Şekil 7'de verilmiştir.

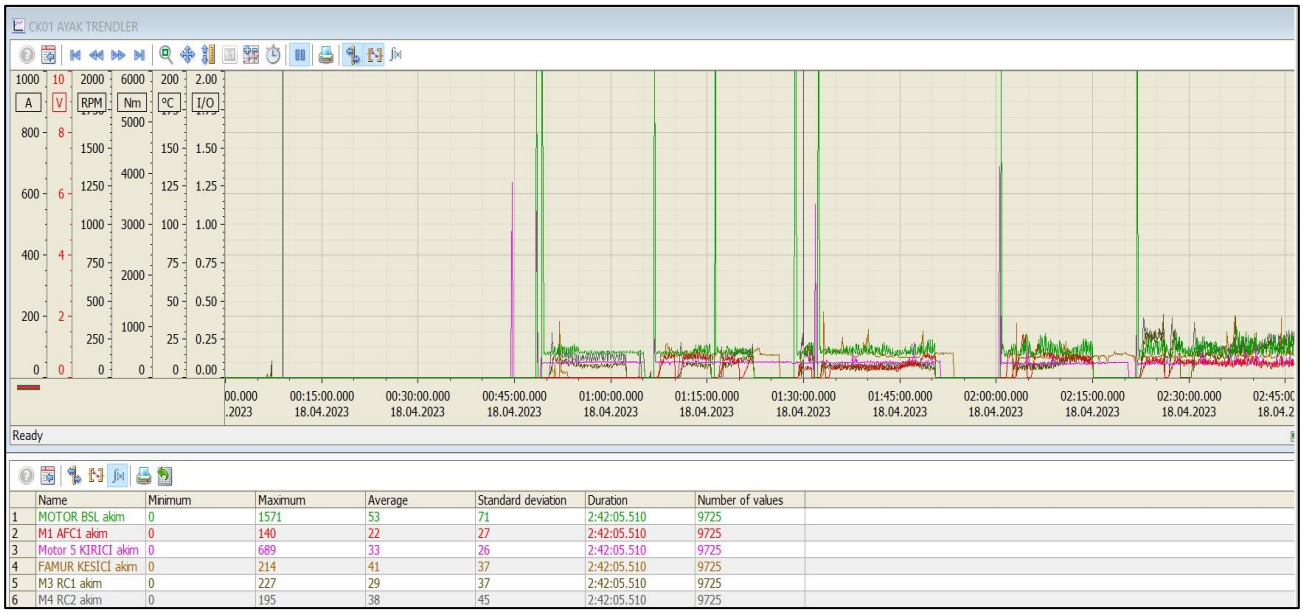
Çizelge 4. Motorların ayaklardaki çalışma verimlilikleri

Ekipman	Sürücülü Yolvericili Motor Verimlilik (%)	Direkt Kantaktörle Yol Verilen Motor Verimlilik (%)
400 kW motor	92,5	
500 kW motor	92	
315 kW motor		87
160 kW motor		85



Şekil 7. Motorların ortalama anlık akım değerleri (Scadadan çekilen veri)

Şekil 8'de örnek olarak CK-01 ayakta 18.04.2023 tarihinde saat 00.00 ile 03.00 saatleri arasında ayak ekipmanlarının akımlarına ilişkin skada verisi sunulmuştur. Grafikten de görüleceği gibi, direkt yol verme ile çalışan kırıcının pik akım değeri 689 Amper ve BSL ekipmanın 1571 Amper iken sürücülü yol verme ile çalışan AFC' nin pik akım değeri 140 Amper ve sürücülü yol verme ile çalışan RC ekipmanlarının pik akım değeri 227 Amperdir. Buradan da anlaşılacağı gibi direkt yol verme durumunda pik akımları, sürücülü yol verme yöntemine göre çok daha fazladır.



Şekil 8. CK-01 ayak ekipmanlarının akım grafiklerine ilişkin örnek (18.04.2023)

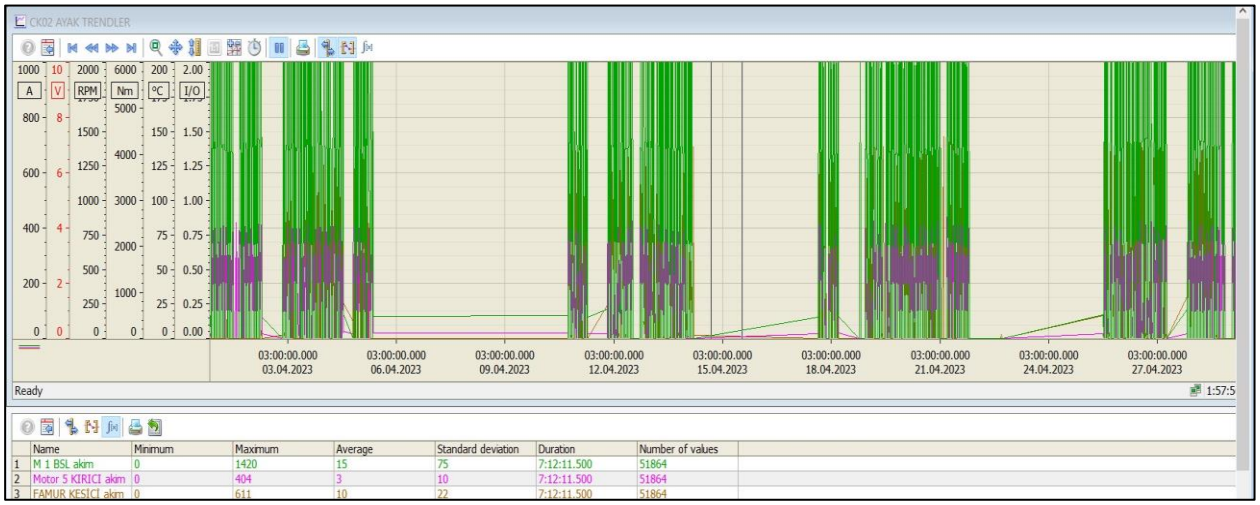
Şekil 9'da örnek olarak CK-02 ayakta 18.04.2023 tarihinde saat 06.00 ile 09.00 saatleri arasında ayak ekipmanlarının çektikleri torklara ilişkin skada verisi sunulmuştur. Grafikten de görüldüğü gibi, yük durumunun farklı olduğu kalkış durumlarında maksimum 4038 Nm tork çekilmiştir. Bu durum RC motorların, AFC motorlarından daha fazla tork çektiğini göstermektedir.



	Name	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	Duration	Number of values
1	M3 AFC TORK	0	2590	254	496	2:42:04.000	19449
2	M4 AFC2 TORK	0	2561	264	511	2:42:04.000	19449
3	RC1_TORK	0	4038	731	1152	2:42:04.000	19449
4	RC2_TORK	0	4014	752	1171	2:42:04.000	19449

Şekil 9. CK-02 ayak ekipmanlarının tork verilerine ilişkin örnek (18.04.2023-CK02)

İşletmede üretim faaliyetleri sırasında birçok nedenden dolayı (tahkimat, vb.) ayaklarda duruşlar olmaktadır. Sistemin durma kalkma sayılarına ilişkin sıklığı gösterir verilere örnek Şekil 10'da mevcutİşletmede üç vardiya çalışmanın olduğu referans bir günde iki ayakta gerçekleştirilen süreçlere bağlı olarak sistemlerin ortalama dur-kalk sayısı 25 olarak belirlenmiştir. Ulaştıkları ortalama tepe (peak) akım süresi 4 saniye kabul edilerek, bazı hesaplamalar yapılmıştır (Çizelge 5).



	Name	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	Duration	Number of values
1	M 1 BSL akım	0	1420	15	75	7:12:11.500	51864
2	Motor 5 KIRICI akım	0	404	3	10	7:12:11.500	51864
3	FAMUR KEŞİCİ akım	0	611	10	22	7:12:11.500	51864

Şekil 10. CK-02 ayak ekipmanlarının durma-kalkma sayılarını gösterir örnek scada verisi

Çizelge 5. Motorlardan kalkışlarda çekilen akımların vardiya bazlı sonuçları

Ekipman	Dur-Kalk (ortalama) sayısı-adet	Peak akım (A) (ortalama)	1 vardiyada çekilen toplam akım (kA)
BSL	25	1500	37,5
Kırıcı	25	550	13,75
Sürücüsüz motor 1 vardiya toplam çekilen akım			51 kA
AFC	25	100	2,5
RC	25	125	3,125
Sürücülü motor 1 vardiya kalkışlarda toplam çekilen akım			5,625 kA

Bir vardiya olarak çekilen akım miktarı verisinden yola çıkılarak, motorların çalışma gerilimleri referans alındığında toplam güç ve maliyet hesabı Çizelge 6' da verilmiştir. Motorların etiket bilgileri dikkate alınarak $\cos(\varphi)$ değerleri; 400kW ve 500kW motorların sırasıyla 0,9 ve 0,92'dir (Breuer, 2023).

Çizelge 6. Yıllık bazlı güç hesabı

Ekipman	Starttaki maksimum güç (kW)	1 vardiyadaki güç (kW)	3 vardiyadaki güç (kW)	Yıllık bazlı güç (MW)
BSL	2390	59.750	180.000	64.536
Kırıcı	876	21.910	65.731	23.663
AFC	159	3.980	11.950	4.302
RC	199	3,69	14.938	5.378

Şebekeden çekilen güçler dikkate alındığında yıllık yaklaşık 80MW güç farkı olduğu görülmüştür. Enerji tüketim bedeli 0,11 $/kWh olarak referans alındığında, sürücülü motor kullanımında; motor ilk kalkış sırasında kullanılan sistemden kaynaklı 80.000kW/yıl x 0,11 $/kWh = 9.000 $/yıl ortalama tasarruf sağlanmaktadır.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışma kapsamında yapılan incelemelerde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Güvenlik yönünden: Ayak içi akmalarda ekipmanların tork, vb. paramatreli sürücülü yolverici ile çalışan motorlarda hızlı bir şekilde değiştirilerek, sistem çalıştırılabildiğinden kesit daralması, vb. nedenlerle oluşacak havalandırma problemleri engellenerek, güvenli çalışmaya katkı sağlanabilmektedir. Ayak içinde dar kesitlerde çalışmalarda sıkışma, vb. kaynaklı kazaların engellenebilmesi için konveyör hızlarının değiştirilebilmesi önemlidir. Sürücülü yolverici ile çalışan ekipmanlarda farklı çalışma modları olduğundan bu durum mümkün olabilmektedir.
- Ekipmanların ömrü açısından: Sürücülü yol verme ile çalışan motorlarda kalkış süreleri ayarlanabildiğinden motorlar daha az darbeye maruz kalmakta, konveyör kalkış sürelerinden az etkilenmektedir. Bu sayede, hareketli ekipmanların (konveyör, vb.) mekanik aksamlarının ömrü uzamaktadır.
- Mekanik arızalar açısından: Sürücülü yol verici ile çalışan motorlarda/ekipmanlarda tork, hız, vb. parametreler yazılımdaki uygun modların kullanımı ile ayarlanabildiğinden zincir kopmaları, vb. mekanik arızaların engellendiği, tespit edilmiştir.

- Enerji tüketimi yönünden: Sürücülü yol verme ile çalışan motorlar start akım değerleri düşük olduğundan, direkt kontaktörlü yol verme ile çalışan motorlara göre daha az enerji tükettiği tespit edilmiştir.
- İlkyatırım maliyeti yönünden: Sürücülü yol verme ile çalışan motorlar, diğer motorlara göre yaklaşık 2,5 kat daha pahalıdır.
- İşletme maliyeti yönünden: Sürücülü yol verme ile çalışan motorlar direkt kontaktörlü yol verme ile çalışan motorlara göre daha az enerji tükettiği ve daha az enerji maliyeti ile çalıştığı belirlenmiştir. Mekanik arızalar, duruşlar, vb. nedenli sorular sürücülü yolvericili motorların sahip olduğu farklı modlar sayesinde engellendiğinden, işletme maliyetleri yönünden ciddi avantajlar belirlenmiştir.
- Sürücülü yol verici ile çalışan motorlar, direkt kontaktörlü sistemle yol verilen motorlara göre ilkyatırım maliyeti yönünden dezavantajlı olmasına rağmen, sahip olduğu diğer avantajlar göz önünde bulundurulduğunda, sürücülü yol verici ile çalışan motorların çok daha az maliyetli olduğu değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

Al-Ali, A. R., Negm, M. M., Kassas, M. (2000). A PLC based power factor controller for a 3-phase induction motor", Proc. Conf. Rec. IEEE Industry Applications, vol. 2, pp. 1065-1072.

Bruer Motor Kataloğu (2023)
https://www.breuer-motoren.de/fileadmin/downloads/breuer_company_brochure_en.pdf

Mundry, S. ve Sandgathe, C. (2018). Efficient mining of high seams with automated LTCC operations, Caterpillar Inc., cat.com/mining

OPTIMIZATION OF PRODUCTION DOZING IN OPEN CUT MINES

AÇIK OCAK KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE DOZERLE YIĞIN ÖTELEME OPTİMİZASYONU

M. Doktan [1, *], Y.S. İnci [2]

[1] *Emekli Maden Muhendisi*
[2] *TÜPRAG Efemçukuru Alt*
*(*Sorumlu yazar: m.doktan@gmail.com)*

ABSTRACT

This paper summarizes the most recent developments in bulk production dozing applications in relation to pit design, planning, operational practices. Fully automated and semi-automated dozers are rapidly replacing manned dozers creating more efficient, lower cost and safer overburden removal opportunities which are, in most cases, comparable to those of dragline or low-cost-end truck and shovel operations. Advances in design and planning of such operations in complex mining geometries are challenging the dozer engineers to review and upgrade their traditional design and planning practices, to come up with innovative ideas and deployment strategies to match with these developments.

Keywords: Dozer, cast blasting, bulk production dozing, pit design, planning, fully automated and semi-automated dozers, tip head, back stack, carbon emission

ÖZET

Bu makale, ocak tasarımı, planlama ve operasyonel uygulamalarla ilgili olarak yığın üretim dozerleme uygulamalarındaki en son gelişmeleri özetlemektedir. Tam otomatik ve yarı otomatik dozerler hızla insanlı dozerlerin yerini almakta ve çoğu durumda dragline veya düşük maliyetli kamyon ve kepçe operasyonlarıyla karşılaştırılabilecek daha verimli, daha düşük maliyetli ve daha güvenli aşırı yük kaldırma fırsatları yaratmaktadır. Karmaşık madencilik geometrilerinde bu tür operasyonların tasarım ve planlamasındaki ilerlemeler, dozer mühendislerini geleneksel tasarım ve planlama uygulamalarını gözden geçirmeye ve geliştirmeye, bu gelişmelere uygun yenilikçi fikirler ve dağıtım stratejileri bulmaya zorlamaktadır.

Anahtar Sözcükler: Dozer, otelem atilimi, yığın üretim dozerlemesi, ocak tasarımı, planlama, tam otomatik ve yarı otomatik dozerler, sev basi, geriye yigma,karbon emisyonu

INTRODUCTION

In Australian open cut coal mines, the waste removal accounts for a significant proportion of the mining cost. To minimize the cost, cast blasting and dozing are widely used to move bigger portion of the overburden to its final place while keeping the risks of potential damage to coal minimal. The method is better known as "Cast-Prestrip-Doze-Postrip" and well suited to large scale strip mines (Figure 1). Dozers can move, not only big part of the digger fleet waste but also some of the dragline waste speeding up dragline's coal recovery.

The proportion of waste allocated to dozers can be as high as 30-40% of the total waste volume in a typical application. Usually, bulk production dozing is the second lowest cost mining method after the direct cast.

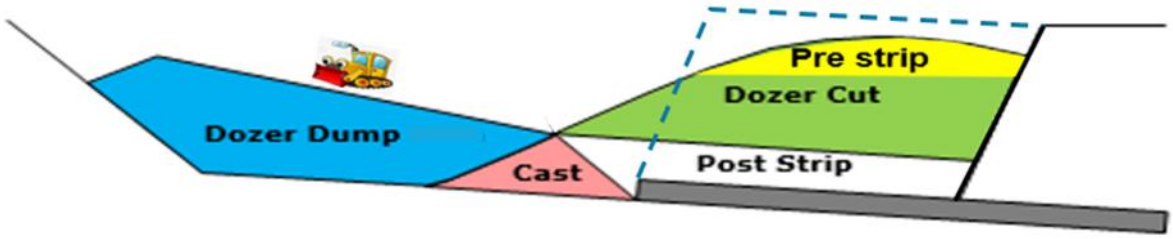


Figure 1. A typical cast-prestrip-doze-postrip operation

As per other waste removal methods, the unit cost of dozing is dependent on ownership cost, hourly operating cost (fuel, operator, ground engaging tool and maintenance), utilization and productivity of the dozer. The introduction of Autonomous, Semi-Autonomous Dozing Systems provides a means for reducing operating costs by reducing operator numbers, increasing utilization and improving productivity. In a typical Autonomous/Semi-Autonomous Dozer System, a single operator can control multiple machines from a control station far away from the operation (i.e., 000's kms away). The dozers can autonomously fell the digging conditions, dig, push, dump the blade load and then reverse back, position itself for the next load in their respective slots (Figure 2). A dedicated operator can still be responsible for the slot selection of the dozers and the positioning of the dozer in the slot and take control if any other unusual condition is encountered. However, currently these systems are not able to generate an optimal dozing plan for a given cast profile and for the required final design. This still needs to be generated by the dozer push design engineers and be provided to the system.



Figure 2. Production dozing in slots

OPTIMIZATION OF PRODUCTION DOZING

Under normal circumstances, the goal in production dozing is to keep the unit cost of the last dozer cut equal or less than the unit cost of the digger fleet (dragline or truck-excavator) for that parcel of waste. Although in some other cases, the cost may not be the primary objective especially where coal exposure rate is of greater importance hence the objective becomes "To maximize dozer push volumes to reduce postrip waste volume

increasing the coal exposure rate". Even if so, it is critical that the all the variables in bulk dozing are well understood, and push plans developed with this objective in mind during the design& planning. The equivalent digger fleet unit cost is derived or interpolated from the "Rise and Run Matrix" rates by defining or digitizing haulage from the dig point to the planned dump location. This defines an upper limit for dozers to achieve. The dozer unit cost is a function of a number of variables such as cast blast outcomes, dozer size and type, planning and operational factors. The details of these are shown below (Figure 3).

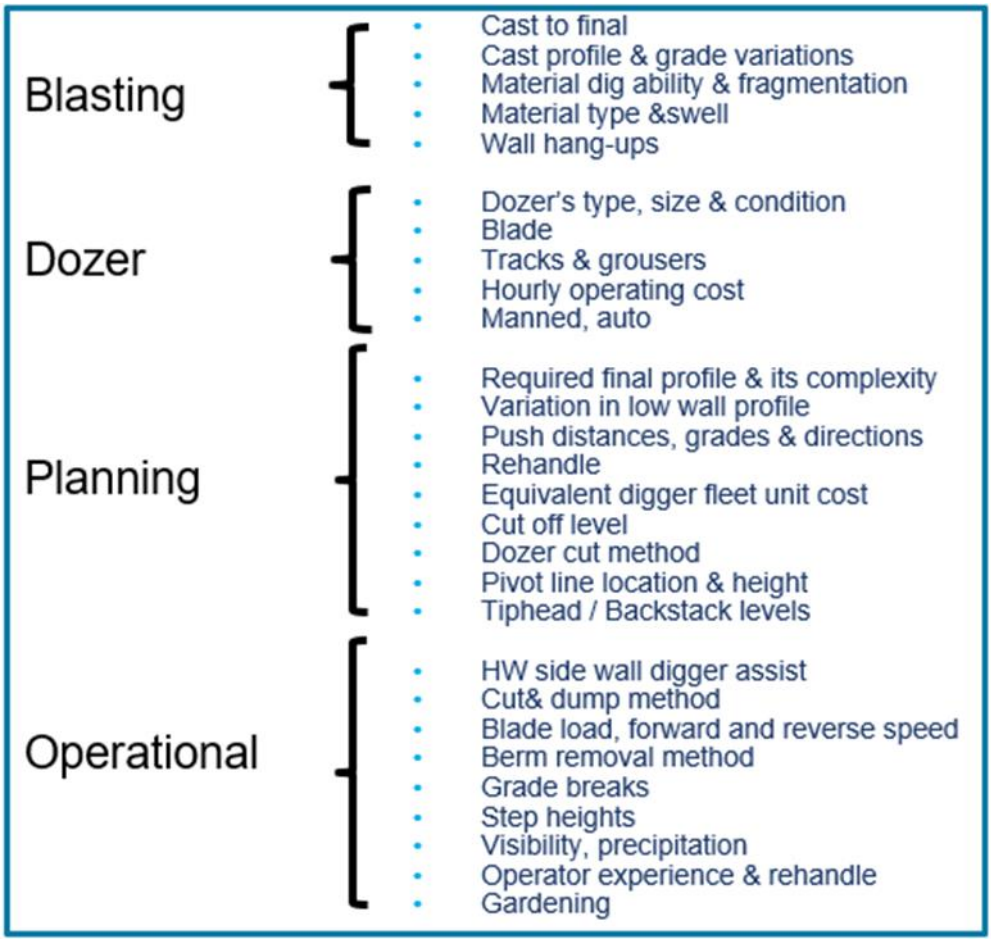


Figure 3. Variables in bulk production dozing

Fragmentation and digability, just like in the digger-truck or dragline cases is of paramount importance and has big impact in dozer productivity. Once the cast blast is safely accomplished and muck pile is ready for bulk dozing, the only other opportunity available to the dozer engineer is the optimization of the push as this paper sets out to describe. The push design has the biggest impact on productivity and resulting costs, and in most cases, the dozer engineer is left with a very limited time to optimize his or her work for a successful implementation.

CAST BLAST

The cheapest way of moving waste into its final place is to cast to final and hence the aim is always cast as much material into the low all void as possible without damaging the coal. With the advances in drill & blast practices, it is now possible to cast up to 40% of prime waste into the final and create a suitable profile for dozers to operate on. A high-level study conducted looking at various cast profiles (High, medium, and

low-Figure 4), clearly indicate higher the cast, lower the overall total unit cost of waste removal becomes even though dozer prime productivities decrease due to lesser "Tiphead" opportunity. The difference in total unit cost (Cast, Doze and Excavate) can be as much as 10% in favour of the high cast option (Doktan, 2023).

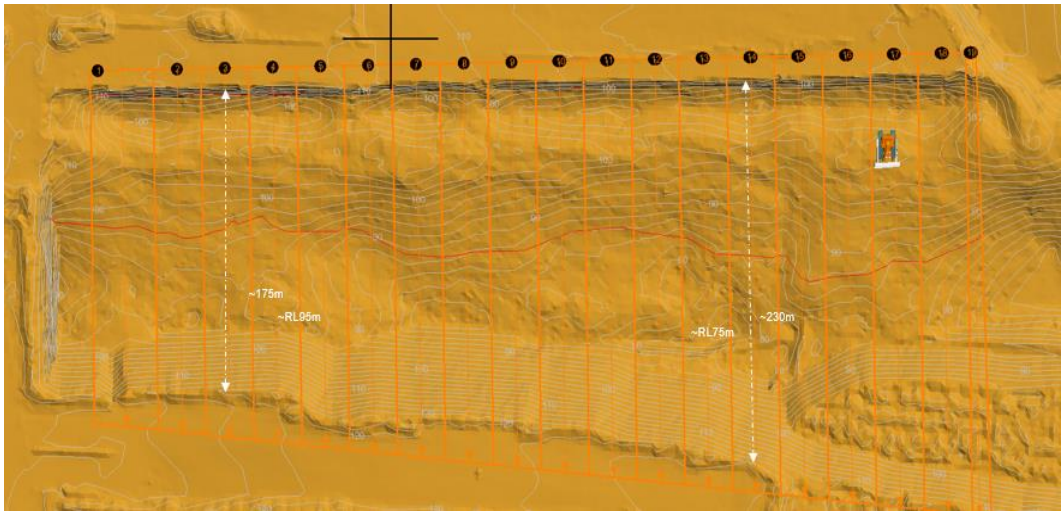


Figure 4. Typical cast and variability of cast along the cast profile

In addition to the unit cost benefit, the coal exposure rates also increase in favour of "High Case" and may be a deciding factor when there is a high demand for the product coal in the markets. One another important outcome to consider is that the resulting muck pile would invariably have variable swell and fluff within the muck pile. Areas such as top of the cast and cast-to-final volume in the low wall will have higher swell and bigger fluff compared to areas close to the highwall above the coal seam where in general low swell and tight conditions are encountered. Dozer engineers need to take this into account when estimating prime volumes cast into final or dozed. Sharp grade variations along the cast profile also have an impact of dozer's prime productivity due to compounded rehandle. If the profile has sharp drop (>25%), the dozers first need to bring it to a workable grade (25%-26%) and hence incurring rehandle in successive cuts. This can be as much as 30% in some areas. There are also other sources of rehandle which can be unavoidable like when bridging to the pivot point (Figure 5).

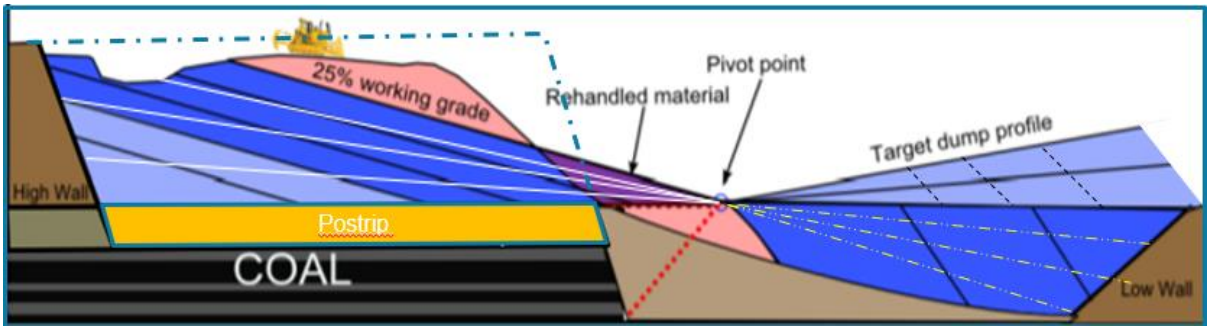


Figure 5. Example of wedge rehandle

The muck pile profile that has more of favourable slope (25-26%) in general and smoother curvature creates less rehandle and hence higher prime productivity. The cast profile needs to be carefully optimized for existing geometrical constraints prevailing in the pit and the final pit design required which invariably will include a low wall or high wall ramp design. Hence this optimization work is collectively called "Cast to Design" and needs to be a cooperative effort between the blast engineer and the dozer engineer.

DIGABILITY & FRAGMENTATION

For a given dozer fleet, muck pile dig ability is directly related to blast design, its implementation, insitu rock mass characteristics, resulting size distribution and the swell/ fluff generated along the profile. It is established that dozer productivity increases with a decreasing rate to a level from which the benefit of increased powder factor diminishes. Doktan et.al, (1998) recognizing the issue, have developed a material condition index for post blast dozing performance. The index is calculated using sub-empirical Indexes such as Friction, Arch, Shearing off, shape and blade. The Index is then used in dozer productivity estimate from the first principals. Additionally in a typical operation, misfires or inadequately loosened sections within muck pile create hard digging conditions and dozers may need to rip to load such segments of ground and do a second or third pass. If these segments are deep in the muck pile, they can create grade breaks effecting dozer's performance in a negative way.

SIDE CUTTING

The cast blast typically creates a large power through along the highwall where most of the material is displaced off the highwall. While this may seem to be beneficial for dozers, if the wall created is not close to the designed wall or there are numerous hang ups on the wall then, the power through needs to be back filled to create an access for a small digger to scale the wall back, negating the benefit of high cast o some extent. In addition, the dozers try to side cut the wall losing time unnecessarily.

Side cutting the HW with dozers has been proven to be very unproductive. Hence most operations now use a small excavator (Figure 6) for side cutting the high wall (Sinclair, 2016). This saves dozers wasting their time along the highwall trying to dig wall side as well as scaling the wall creating a safe wall.



Figure 6. A small digger side cutting highwall

PLANNING & DOZER PIT DESIGN

Most of the factors briefly mentioned above would not change much after the cast. However, the dozer pit design can be developed to match the prevailing muck pile and other existing mining conditions.

The planning and design process is a dynamic process, and several iterations need to be run using appropriate simulation software such as 3DDig until the results converge to a stable solution.

It must be remembered however there is usually very little time to develop and optimize the design as dozers may be ready to move in to start dozing a soon as the cast is surveyed, and cast profile produced. Hence the first challenge for the dozer engineer is to define and generate an optimized "Tip Head" level for the push. This is simply a volume balance exercise across the pit in narrow regions. Once this is done, the dozer engineers work on defining the "Cut off" level and other push KPI's such as maximum push distance, directions and grades as well as required final design of the pit.

TIP HEAD LEVEL

Defining the tip head level is an important process in the dozer pit design work and its criticality is under appreciated at times. In a typical dozing "Tip head" level is the horizontal flat surface defined at each region along the dozer pit, where the waste volume in the highwall side is balanced with the waste volume in the lowwall side. Material above the Tip head level is dozed downhill in short distances and consequently it is the most productive component of the push. Hence the dozer engineer needs to make sure that the tip head volume is maximized. However, the mission is not as easy as it sounds because of the variations in existing mining geometry such as variations in cast profile, high wall and low wall profiles, floor undulations, required ramps and accesses to name a few (Figure 7-8).

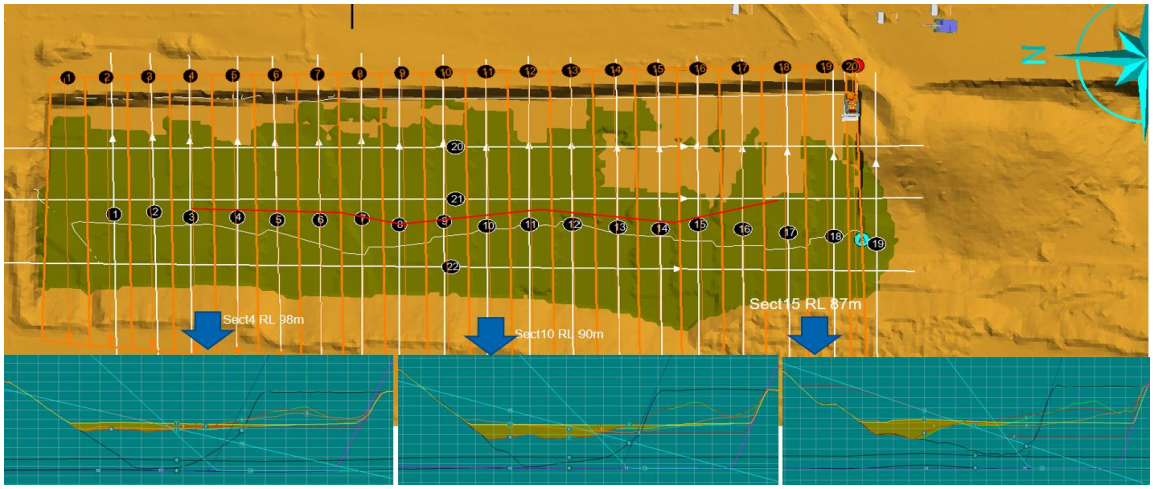


Figure 7. Designing the tip head level

Flat tip head level plan is provided to dozers, so the cut and dump sequence follows the plans (Front to Back) progressively to the lowwall (Figure 8). Safe flat tip heading methods always include having an appropriate windrow at tip head edge.

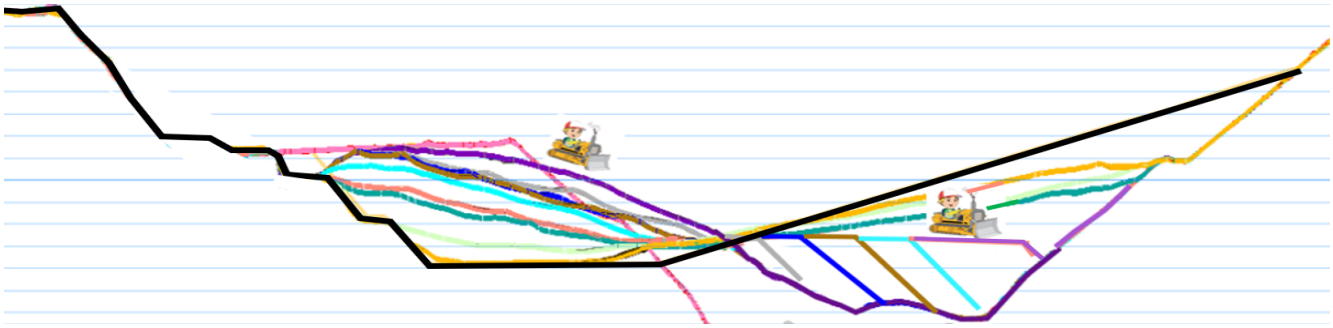


Figure 8. Progressive tip heading

BACK STACKING

The back stacking is the next stage after the tip heading is completed. The back stacking starts from the "Pivot line" and usually it is an uphill dumping in increasing gradients. The Pivot line is defined as an imaginary line on the cast profile, defined by the points where the cast profile intersected by a line usually drawn from the coal toe at a 45°. The slope of this toe line may change up to 85° if a high pivot point is required at times when more room in the low wall side is needed. Economical push distance is a function of push grade and target cost. The back stacking is usually carried out in steps incrementally at higher grades starting from flat to the design grade (usually 25-26%). The maximum push distance become shorter with increasing uphill grade (Figure 9).

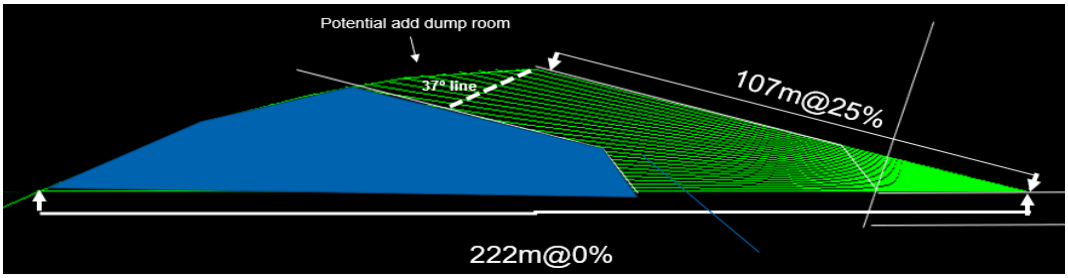


Figure 9. Back stacking

Although push directions square to the strip lines are the best for productivity, they are sometimes optimized and at an angle depending on the room available on lowwall side or on the fill requirements for a ramp. Back stacking usually involves uphill and long-distance push segments and hence less productive compared to "Tip heading". The dozer engineer makes sure that the distance of the last push cycle at the required uphill slope does not exceed the maximum push distance defined by the optimization study for the push. Figure 10 below shows the completion of Back Stacking and a lowwall ramp by dozers.

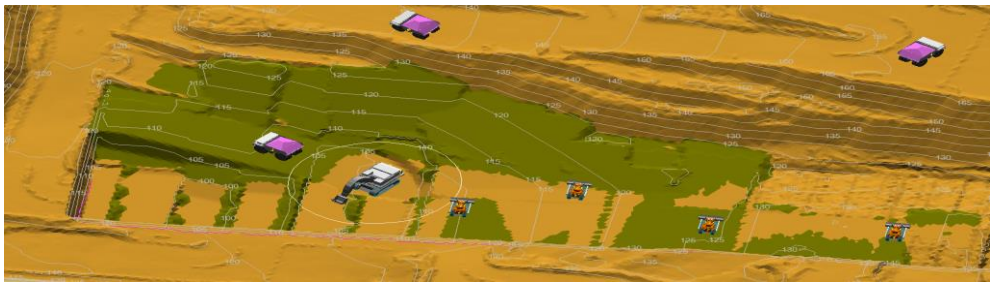


Figure 10. Back stacking and design low wall ramp

CUT OFF LEVEL

The cut off level defines the lower most final limits of dozing envelop in the campaign. It is the last layer of dozing in the blasted waste where the cost of dozing becomes equal to the cost of postrip unit cost. The postrip can be done by a dragline or digger fleet. The cut off level is a function of various parameters but the most important one being the equivalent digger fleet unit cost for the same parcel of waste. If the equivalent digger fleet unit cost is high (i.e., long and high haulage), deeper the cut off level becomes. The objective is to equalize the unit dozer cost to the equivalent digger fleet cost. For that, an estimate of the rise and run (either from the schedule or simply by digitizing the haulage on the existing and modelled surfaces) is done. Then using these numbers and the rise & run rate matrix belonging to the digger fleet in question a rate is determined for the digger fleet. Some interpolations may be required to refine the rates to 0.5m thick or less dozer slices. Once the rate is estimated then the problem reduces to finding the push distance and grade for the dozer fleet of which the cost will be equal to the equivalent digger fleet cost for the last dozer cut. The maximum push distance is estimated from the Pivot point. And then the cut-off point is simply calculated by balancing volumes in either side of the pivot line. It is usually rounded off to the nearest double bench or single bench height. Due to complexity of the process, Doktan (2023), proposed and developed an algorithm that works with various Excel look up tables to help estimate the cut off level swiftly for a given case (Figure 11).

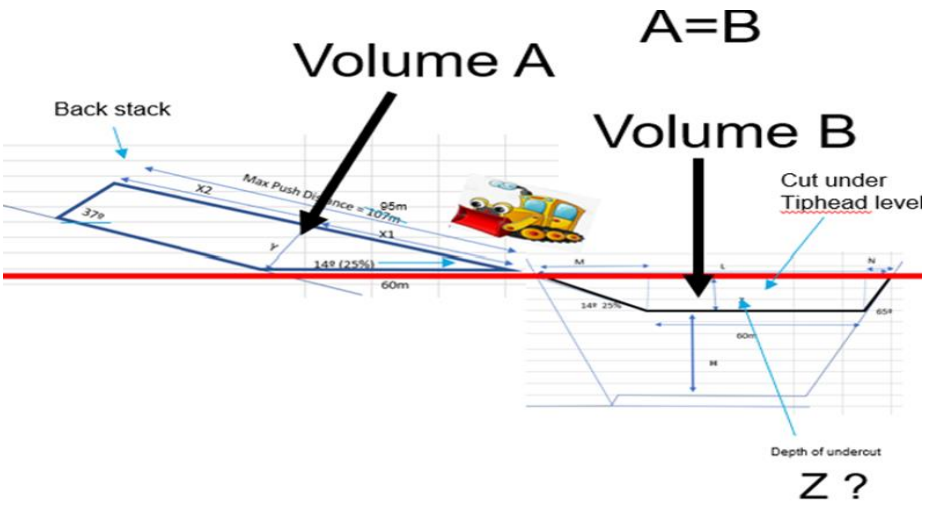


Figure 11. Estimating cut off level

The figure below (Figure 12) shows an estimated economic cut off level and maximum push distance as described above. The dozer engineer then furthers his or her designs by splitting the cut & fill sections into several thin slices and estimates rehandle, productivity and prime unit cost of dozer push for each slice. This provides the detail breakdown of the prime & total unit costs of the push.

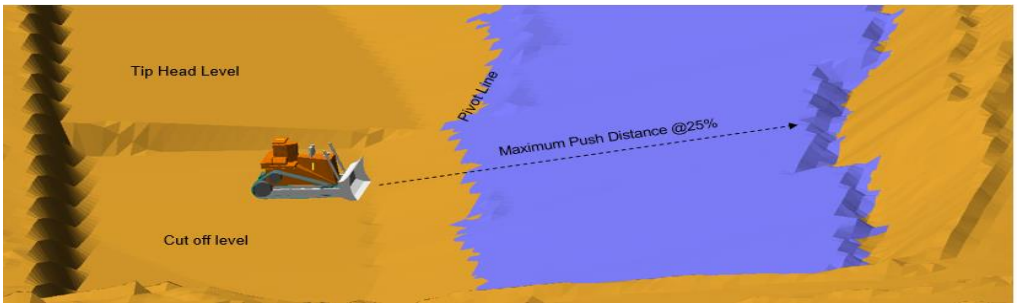


Figure 12. Cut off level & maximum push distance

The 3D plans & sections based on the optimized push envelop are then provided to dozers in dxf format for implementation in the field (Figure 13).

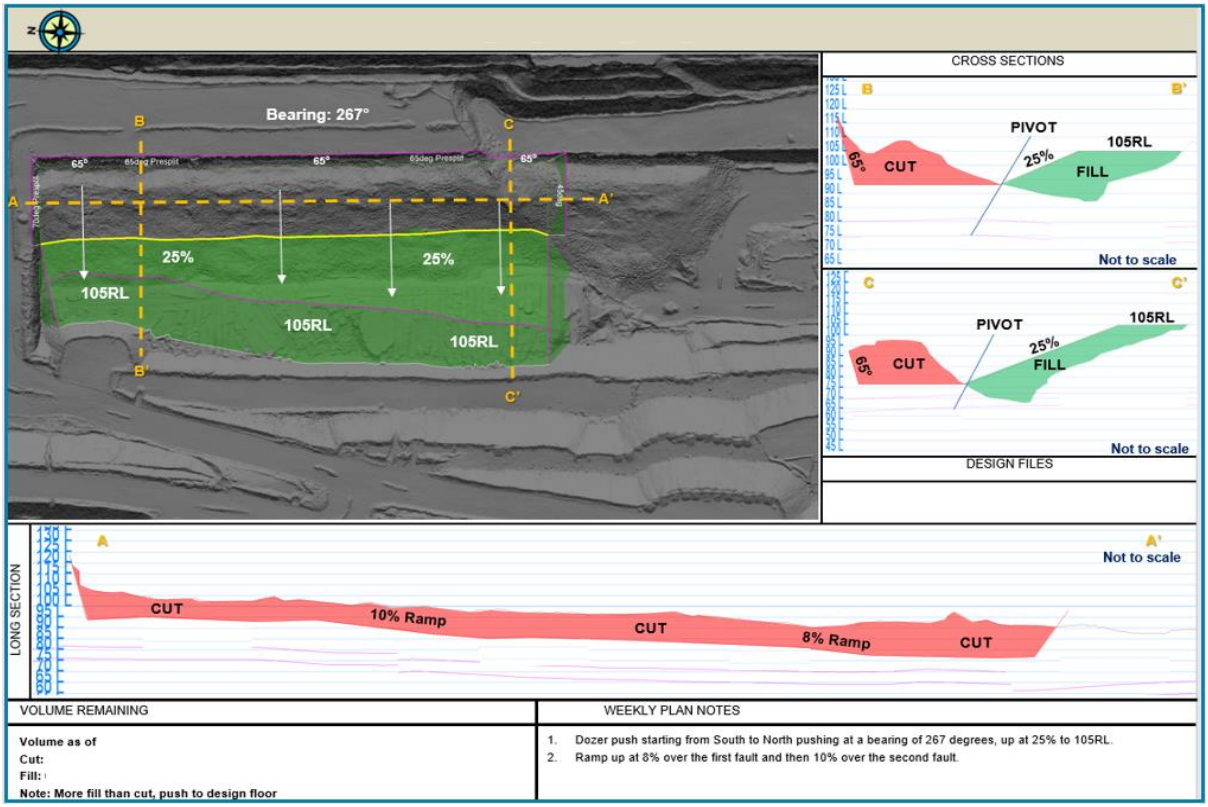


Figure 13. A typical dozer push plan

AUTONOMOUS / SEMI-AUTONOMOUS DOZERS

The current trend within the mining industry to integrate automation technology with existing mining processes to improve safety, consistency, productivity and manage operator shortage. Driverless haul trucks, automated blast-hole drill and autonomous bulldozers are examples of success stories. The perceived benefits of dozer automation include:

1) Increased efficiency
2) Reduced costs
3) Enhanced safety
4) Increased precision
5) Improved data collection
6) Reduced Carbon emission

Early studies in autonomous dozers have focussed on horizon and blade control gradually moving towards full automation. The basic cycle of operation for a fully autonomous dozer includes:

- Sense,
- Plan,
- Review and,
- Execute.

Firstly, an automated dozer must sense its own state and the world around it. Next, it must use this information along with a description of a goal to be achieved to plan the next action to be taken. In some cases, the mapping from sensing to action is direct, and can take the form of a pre-determined control law. In other cases, deliberation, or the use of models (sensors, mechanisms, and actions) is necessary. Finally, the action must be executed via the mechanism (Bulgakov et al., 2020).

Semi-Autonomous Dozing system allow operators to control multiple dozers simultaneously through a wireless network remotely where cameras and other navigational systems are installed on dozers can be viewed inside an operator station (Figure 14).

A slot for each dozer is selected by the operator to work in and the system then autonomously implements the required manoeuvres to complete the task. This is called “Mission Planning”. The operator supervises the dozers and work, interferes as necessary overriding auto mode and when changing the slots. Automated slot change and fully autonomous dozing are currently in the development and/or testing stage.



Figure 14. Dozer operator station

Fully automated mission planning requires real time terrain mapping allowing the system to recognize the blade load and terrain it is traveling on. Sensors (LIDAR- Laser, photogrammetry, GPS, cameras and others) mounted on dozer produce data in obstacle identification and classification teaching the dozer to learn from objects and its environment for improved dozer behaviour. A fleet of dozers can learn from each other for auto tuning and better react to changing ground conditions while dozing.

Kulkaev, P 2021, in his thesis validates the idea that a mathematical framework containing heuristics and a mathematical program can be used to solve for bulldozer mission plans. It is hoped that this will promote the use of AI and other technologies in the mining space and further improve the productivity of the mining industry.

A comparison with manual operation is presented to demonstrate that the developed autonomous path planning methodology performs equally to experienced manual operation in simple terrain and outperform in complex terrain. An analysis regarding the operation time comparison between autonomous and manual operation is also presented (Hirayama et al., 2019).

There are off the shelf systems (retrofits) and AI powered software available to help convert existing manned machines to fully auto or remote-control systems. These systems also capture and monitor real-time dozer health indicators.

A fully automated dozer developed by the University of Huazhong Science and Technology (HUST) and manufacturer Shantui Construction Machinery (Ref 1) remains to be tested in the field.

REAL TIME MONITORING OF PRODUCTION DOZING

Dozer engineers and supervisors have several monitoring and supervision tools in their disposal to aid them to implement the plans precisely. These include blade full indicator, speed and fuel consumption rates, track slippage and various other diagnostic indicators as well as a set of cameras to see the progress of the pit in real time (Mc Aree 2019).

Outside the operator control station, other tools and apps such as IControl, XProtect, Blueview and various inhouse near real time monitoring tools are available to monitor dozers and conduct reconciliation to see how precisely the plans are implemented. Also, engineers conduct regular reconciliations with regular scheduled drone flights and survey pickups.

CONCLUSIONS

Full or semi automation in dozing is revolutionizing the mining industry with increased utilization, safety, reduced cost, and reduced Carbon Emissions. Fully automated and electric dozers will be soon available for bulk scale mining. While these dozers geared with suitable AI systems will optimize their in-slot dig, carry, dump and reverse efficiency and hence achieving high productivity in their missions, they won't replace the well-engineered dozer pit design and dozer engineering smarts.

This paper presents some examples of the state-of-the-art developments in dozer engineering and tools in the development stage to further enhance the bulk dozing efficiency reducing unit cost and carbon emissions while improving safety in open cut coal mining applications.

REFERENCES

Bulgakov, A., Bock, T., Tokmakova, G. (2020). Mechatronic Control System for Leveling of Bulldozer Blade 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020).

Doktan, M., Scott, A., and Cocker, A. (1998). Optimization of dozer operations in open cut coal mines, ACARP Project Report. Brisbane.

Doktan, M. (2020-23). Various Dozer Projects Unpublished. Brisbane.

Hirayama M, Guivant J, Katupitiya J, Whitty M. (2019). Artificial Intelligence in Path Planning for Autonomous Bulldozers comparison with Manual Dozers, *Int Journal of Innovative Computing*, Information and Control, 15, 3.

Kulkaew, P. (2021). Optimisation of bulldozer earthmoving plans. PhD Thesis, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland.

McAree, R. (2019). Personal Correspondence, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland.

Sinclair, N. (2016). A cost benefit analysis of comparing dozer side cutting and excavator side casting techniques on the highwall in a dozer bulk push operation, The UQ Honours Thesis. Brisbane.

INVESTIGATION THE EFFECT OF PERMEABILITY AND FRACTURING PARAMETERS ON CO_2 CAPTURE IN AQUIFER RESERVOIRS

P. Zafari [1], E. Moosavi [2, 3 *]

[1] *Sahand University of Technology, Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering Department*
[2] *Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[3] *Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*
*(*Corresponding Author: Se.Moosavi@yahoo.com)*

ABSTRACT

The production and emission of greenhouse gases like CO_2 through the atmosphere are the main causes of increasing the temperature of global warming. CO_2 storage in underground environments such as aquifer reservoirs is one of the solutions to deal with environmental pollution. Convergence mixing subjects enhance the potential of the aquifer reservoir for CO_2 storage during the mechanism of dissolution. The presence of fractures in the reservoir causes fingeres congestion to grow the path of permeability and increases dissolution in line with CO_2 storage. In the development of this model, Darcy's law coupled with the transport equation is used, which is a function of dissolved CO_2 concentration. The simulation time is chosen equal to 50 years and the concentration profile was collected at different time intervals. The results obtained indicate that by reducing the permeability from 100 mD to 1 mD, the amount of Rayleigh number is lower than the critical value, indicating the dominant molecular penetration force and the non-occurrence of the convection phenomenon. At the end of the convection process, ultimate molecular penetration dominates the system, and CO_2 is permanently trapped in the aquifer reservoir.

Keywords: Environmental management, CO_2 storage, fracture aquifer reservoir, permeability

INTRODUCTION

The production and emission of greenhouse gases like CO_2 through the atmosphere are the main causes of increasing temperature of the global warming. The phenomenon of instability and density difference was first presented by Bénard (1900). This phenomenon has been scrutinized for the sake of temperature changes by placing water between two parallel sheets that are near to one another. He increased the temperature of the lower sheet and found out that the thermal energy transited to the fluid through the thermal sheet conduction leads to fluid motion (Zhang, 2011). Inding and Blunt (2011) examined CO_2 trapping as a result of dissolution in fissured aquifers by analytical solutions in porous media. Existence of a fracture in the aquifer model will increase the dissolution of CO_2 from 16.9% to 21.6%. Rezk and Foroozesh (2019) studied the effect of density, orientation, permeability and surface roughness on dissolution CO_2 and finger diffusion. The results indicated that the presence of a fracture causes the fingers to compress to grow the permeability path. Besides, the aperture orientation increases the dissolution in the CO_2 storage direction. Similarly, matrix permeability has a dominant and positive effect on CO_2 storage in multiple fracture systems. Shchipanov et al. (2022) focused on the features of pervading periodically CO_2 into saline discharge using a mechanical reservoir model, including pressure management and storage capacity. CO_2 Under the influence of well position in geological structure.

In this article, the phenomenon of diffusion and checking concentration of CO_2 in a homogeneous reservoirs based on aperture rate and permeability rate have been measured according to the simulation. The results show how flow due to fractures is attributed to the downward movement of a heavier layer as a result of high density.

NUMERICAL SIMULATION

In order to simulate, the model has been considered while CO_2 is being dissolved in the aquifer according to the two dimensional space of the rectangular shape. Figure 1 shows a view of the presented model. This aquifer reservoir with two apertures is placed in the depth of 1 km).

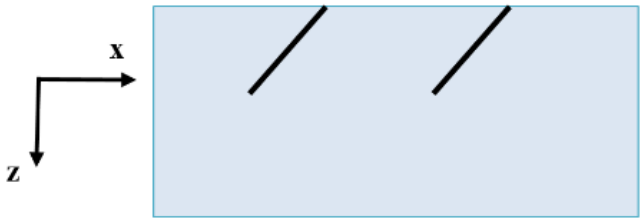


Figure 1. A view of the target model

RESULTS

Sensitivity Based on Fracture Aperture

According to the input parameter in Table 1, CO_2 has been injected into the aquifer and the simulation duration has been estimated to be 50 years. Further, the concentration profile has been collected in different time intervals.

Table 1. Input parameters

Initial Density $\frac{kg}{m^3}$	Viscosity (cp)	Diffusion Coefficient $\frac{m^2}{s}$	Porosity (%)	Permeability (mD)	Injection Pressure (Pa)
1000	0.5	5×10^{-9}	0.15	100	10×10^{6}

Figure 2 shows the profile of CO_2 concentration with increasing aperture to 1 cm. as shown in Figure 2-d, at a 1 cm opening, the fingerings become larger after 5 years; Though, CO_2 has not yet been fully dispersed and the convection phenomenon has not occurred. After 10 years, the convective flow begins as shown in Figure 2-e, and these fingerings have a high concentration of CO_2 and due to their higher density than water without saturation CO_2, they move downwards because of the force of gravity. Water with a lower density goes up. After 30 years, the resultant fingerings form the joining points as displayed in Figure 2-g, the conversion is made. Figure 2-i diffusion the saturated system of CO_2 after 50 years and it is trapped in the aquifer reservoir for storing.

Sensitivity Based on Permeability

According to Figure 3, when the permeability is 1 mD, the penetration phenomenon dominates the entire environment and there is no effect of fingerings and hydrodynamic instability in the system and

convection phenomenon has not occurred. As a result, the dissolution of CO_2 is very slow and this issue will reduce the security of CO_2 storage.

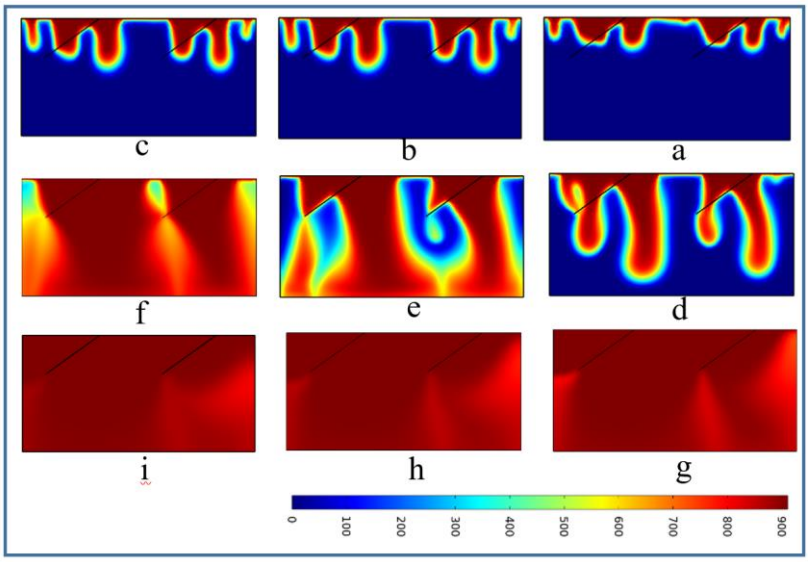


Figure 2. Profile of CO_2 Concentration in the period of a) 1 Year, b) 2 Years, c) 3 Years, d) 5 Years, e) 10 Years, f) 15 Years, g) 20 Years, h) 40 Years and i) 50 Years with 1 cm aperture

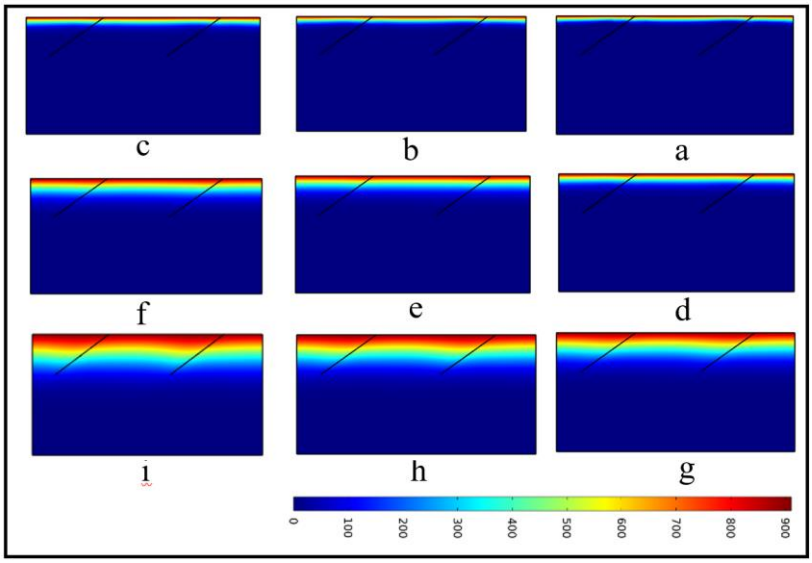


Figure 3. Profile of CO_2 Concentration in the period of a) 1 Year, b) 2 Years, c) 3 Years, d) 5 Years, e) 10 Years, f) 15 Years, g) 20 years, h) 40 Years and i) 50 Years with 1 mD permeability

CONCLUSIONS

The results are summarized as below:

- As the aperture of the aquifer is widened, it reaches the equilibrium concentration in a shorter time interval and faster. After 50 years, it has reached the saturated condition.
- By reducing the permeability to 1 millidarcy, the Rayleigh number is less than the critical level, in this case the molecular penetration dominates the system and after 50 years, only a small part above the aquifer causes dissolution.

REFERENCES

Bénard, H. (1900). Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. evue Générale des Sciences Pures et Appliquées (pp. 1261-1271).

Iding, M., Blunt, M. J. (2011). Enhanced solubility trapping of CO_2 in fractured reservoirs. Energy procedia. *Journal of Fluid Science and Technology*, 4, 4961–4968.

Rezk, M. G., Foroozesh, J. (2019). Study of convective-diffusive flow during CO_2 sequestration in fractured heterogeneous saline aquifers. *Journal of natural gas science and Engineering*, 69, 1875-5100.

Shchipanov, A., Kollbotn, L., and Encinas, M., Fjelde, I., Berenblyum, R. (2022). Periodic CO_2 Injection for Improved Storage Capacity and Pressure Management under Intermittent CO_2 Supply. Energies (pp. 566).

Zhang, M., Bachu, S. (2011). Review of integrity of existing wells in relation to CO_2 geological storage: what do we know? *Journal of Greenhouse Gas*, 5, 826–840.

DÖNER KEPÇE EKSKAVATÖR KAZI SİSTEMİ İYİLEŞTİRMELERİNİN ÜRETİM KAPASİTESİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT ON BUCKET WHEEL EXCAVATOR IMPROVEMENTS ON PRODUCTION CAPACITY

T. Mallı

Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
(tahir.malli@deu.edu.tr)

ÖZ

Türkiye elektrik üretiminin yaklaşık %14'ü linyit kömüründen gerçekleştirilirken linyit kömür üretimin yaklaşık dörtte biri Afşin-Elbistan Linyit İşletmesi'nden sağlanmaktadır. İşletmede yüksek kapasitede dekapaj ve kömür kazı operasyonlarında döner kepçeli ekskavatörler kullanılmaktadır. Döner kepçeli ekskavatörlerde (DKE), aktif çalışma süresinin yükseltilmesi beraberinde kazı sürelerini artırmakta ve kazı miktarlarının da yükselmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle, sistemde yapılacak iyileştirmelerle birlikte verimlilik ve kazı kapasitesinin arttırılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar ile DKE aktif çalışma sürelerinde %21 artış; DKE kullanım oranlarında ortalama olarak %2,03 artışı getirirken ayakta kalma oranlarında ise ortalama %14,43 iyileştirme sağlanmıştır. Bu iyileştirmeler sonucunda işletme kazı miktarlarında %22,5 oranında artış sağlandığı görülmektedir.

Bu çalışmada, işletmede kazı sisteminde gerçekleştirilecek iyileştirmelerle teknik açıdan verimliğin yükselmesi sağlanırken ekonomik kazının gerçekleştirilmesi de sağlanmaktadır. Böylelikle işletmelerde sürdürülebilir efektif maliyetli üretimlerin gerçekleştirilmesi ile rezervlerin rasyo-ekonomik ve etkin değerlendirilmesi olası görünmektedir.

Anahtar Sözcükler: Döner kepçeli ekskavatör, sürekli sistem, kazı operasyonu, çalışma süresi, iyileştirme, verimlilik.

ABSTRACT

Turkey electricity generation is realized from lignite coal aproxiamately 14% and one fourth of lignite coal production is realized by Afşin-Elbistan Lignite Enterprise. In mining operations, bucket wheel excavators (BWE) are used high-capacity stripping and coal excavation. In operations, increasing the active working time of BWE increases the digging times and amounts of excavation. For this reason, it is aimed to increase the efficiency and excavation capacity with the improvements to be made in the system. With the studies carried out, 21% increase in the active working times of BWE; while it brought an average increase of 2,03% in the utilization ratio and an average improvement of 14,43% was achieved in availability rates. As a result of improvements, it is seen that an increase of 22,5% was achieved in yearly excavation capacity.

In this study, the system improvements and the increase in efficiency are ensured, while the realization of economic excavation is ensured. Thus, it seems possible to realize the sustainable cost-effective productions and to evaluated the reserves rationally and effectively.

Keywords: Bucket wheel excavator, continuous system, digging operation, working time, improvement, efficiency.

GİRİŞ

Türkiye'de 2022 yılında elektrik üretiminin yaklaşık %14'ü linyit kömüründen sağlanmıştır. Bu nedenle, ülkemiz enerji kaynaklarının özellikle linyit kömürlerinin değerlendirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Afşin Elbistan Linyit (AEL) kömür işletmesi, linyit rezervlerinde en büyük linyit havzası konumundadır. (MTA, 2023). İşletmede yüksek kapasitede dekapaj ve kömür kazı operasyonlarında döner kepçeli ekskavatörler kullanılmaktadır. Kazı sisteminde yapılacak iyileştirmelerle birlikte işletme verimlilik ve kazı kapasitesinin arttırılması hedeflenmektedir. Döner kepçeli ekskavatörlerde (DKE), aktif çalışma süresinin yükseltilmesi beraberinde kazı sürelerini artırırken yıllık bazda kazı miktarlarının da yükselmesini sağlamaktadır. Arttırılan DKE kullanımı, işletme verimliliğini artırırken kömür üretim kapasitesinde önemli artışlar sağlamaktadır.

Açık işletme madenciliğinde özellikle kazı ve nakliye sisteminde yapılacak iyileştirme süreçleri, maliyetlerin düşürülmesiyle işletmelere önemli kazanımlar sağlanacaktır. Bu yönüyle, sürekli sistem döner kepçe ekskavatör bantlı könveyör yöntemi, yüksek kapasiteleri ile avantajlı ekonomik çözümler sağlayabilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretimine yönelik tasarlanan işletmelerde sürdürülebilir, verimli ve efektif maliyetlerle üretimlerin gerçekleştirilmesi rekabetçi ekonomik kömür üretimlerini gerektirmektedir. Ülkemiz 19,32 milyar ton linyit rezervi ile Dünya kömür rezervinin %2,1'ini sahip bulunmaktadır. Linyit rezervleri ortalama 2500 kcal/kg altında kalori değerinde olduğundan üretimin %85'i termik santrallere yöneliktir. Rezervleri belirlenmiş santral kurulabilecek linyit sahalarının devreye alınması, mevcut santral kapasitelerinin geliştirilmesi mümkün görülmektedir (MTA, 2023).

Açık maden işletmelerinde verimlilik ve karlılık değerleri; kazıcıların kapasite, kullanım oranları, ayakta kalma oranlarına, yıllık çalışma süreleri, ekonomik ömürleri gibi parametrelere bağlıdır. Özellikle kazı ve nakliye sistemlerinde gerçekleştirilecek iyileştirme ve verimlilik artışları, işletme kazı miktarlarında artışları dolayısıyla ekonomik kazanımlarla birlikte önemli avantajlar sağlayacaktır. Bu çalışmada, işletmede sürekli sistemin iyileştirilmesi durumunda; teknik açıdan verimliğin yükselmesi ile birlikte ekonomik kazının gerçekleşmesi olasılığı mümkün görünmektedir. Böylelikle, işletmelerde sürdürülebilir efektif maliyetli üretimlerin gerçekleştirilmesi ile ülke rezervlerinin rasyo-ekonomik ve etkin değerlendirilmesi sağlanabilecektir.

Sürekli madencilik sistemleri, Almanya açık işletmelerinden sonra Polonya, Romanya, Yunanistan ve Çek Cumhuriyeti gibi bazı Avrupa ülkelerinde adapte olarak uygulanmaktadır (Kavouridis, 2008; Huss, 2014). Sürekli sistemlerin avantajı; düşük operasyonel giderler, yüksek sistem uyumluluğu, düşük emisyon ve CO2 ayak izi, yüksek kapasitelerde (240,000 m^3/gün) kazı performansı sağlamasıdır (Thyssenkrupp, 2020). Ancak nispeten daha yüksek yatırımlara karşılayacak düzeyde rezervlerin bulunması, geniş alanda yataklanma gerekmektedir (Atkinson, 1971). Kazılabilirlik ve makine performanslarını kesin olarak belirleyen örtü tabakası malzemesinin geometrik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin döner kepçeli ekskavatörlerin verimliliği üzerindeki etkisinin tahmini, uzun vadeli maden planlama ve tasarım fazları için çok önemlidir (Galetakis, 2014). Marn ve kil olmak üzere birbirini izleyen örtü tabaksı katmanları, değişen kalınlık ve kohezyona sahiptir ve ayrıca ondülasyonlu dalgalanmalar sergileyebilir. Ayrıca, örtü tabakasında çoğunlukla çakıltaşları ve sert kumtaşlarından oluşan sert jeolojik oluşumlar, bağımsız olarak veya mevcut sürekli maden ekipmanı ile kombinasyon halinde kesikli işletme yöntemlerinin (ekskavatör-kamyon ve/veya patlatma) kullanılmasını zorunlu kılmaktadır (Galetakis, 2016). DKE, gevşek ve konsolide olmayan formasyonlarda büyük kapasiteli üretimler için en etkin makinadır. DKE sürekli kazıcı sistemler büyük yatırımlar gerektirdiğinden max sürede yüksek verimlilikle çalışması gerekir. Almanya' da ortalama günlük çalışma süresi 3 vardiya devamlı olarak iyi şekilde adapte olmuş makine için 19,2 saat olduğu yılda 5000 saat aktif çalışma (genel bakımdan sonra net olarak) planlanabilmektedir. BWE, gevşek ve konsolide olmayan formasyonlarda büyük kapasiteli üretimler için en etkin makinalardır (Atkinson, 1971).

Geleneksel ekskavatör-kamyon sistemi yerine, düşük enerji tüketimi sağlayan, sera gazı ve CO_2 emisyonları düşük, yüksek kapasiteli döner kepçeli ekskavatör-bant konveyör sürekli sistemleri ekonomik çözüm sağlayabilmektedir. Ekonomik, teknolojik ve çevresel açıdan sistemin işletmelere büyük avantalar sağlaması olasıdır. Açık kömür işletmelerde DKE + bant sistemi, yüksek ilkyatırımlar gerektirmesine rağmen oldukça düşük amortisman şarjları sağlamaktadır. Kömür işletmelerinde sürekli sistemler konvansiyonel ekskavatör-kamyon sistemlerine göre ekonomik ve teknik açıdan da oldukça avantajlar sağladığı görülmektedir. DKE + bant konveyör sisteminin konvansiyonel ekskavatör-kamyon sistemine göre farklı kapasiteli üretim planlamalarında yaklaşık %28-45 oranında amortismanları düşürdüğü görülmektedir. İşletmelerde makinaların ekonomik çalışma süreleri ve kapasite gibi değişkenlerin yıllık amortisman ve birim ton üretim değerlerine etkisi oldukça fazladır (Mallı, 2021).

Bu çalışmada, işletmede çalışan DKE kazı sisteminden olabildiğince yararlanılarak kazı kapasitesi, verimlilik ve üretkenlik artışlarına yönelik iyileştirme opsiyonlarına odaklanılmaktadır.

İŞLETMEDE DKE SÜREKLİ SİSTEM ve VERİMLİLİK ÖLÇÜTLERİ

Açık maden işletmelerinde, yüksek ilk yatırım gerektiren elektrikli sürekli kazıcı sistemlerinde planlı ve plansız duruşlar makinaların çalışma başarım parametrelerini etkilemektedir. Özellikle planlı duruşlar, bakım-onarım sürelerinden kaynaklanırken plansız duruşlar ise arıza ve beklenmeyen sürelerden kaynaklanmaktadır. Planlanmış duraksamalar; döngüsel bakım-onarım süreleri, molaları, vardiya değişimi ve hazırlık süreleri gibi önceden öngörülmüş planlanmış boşta beklemeleri kapsar. Planlanmayan duraksamalar ise genellikle arızaları, bozukluk ve planlanmamış boşta beklemeleri kapsar (Özdoğan ve Taksuk, 2011) Bakım türleri, düzenli ve düzensiz bakımdan oluşur. Düzensiz bakım, kazı aracı bozuldukça yapılan onarım-bakımdır. Bu tür bakımda, hiç belirti vermeden birdenbire ortaya çıkabilecek giderilmesi uzun süre alabilen büyük ve pahalı arızalara hazır olmak lazımdır (Barkhuizen ve Pretorius, 2008). Koruyucu-önleyici bakım çalışma saatine bağlı olarak düzenli aralıkla yapılır. Koruyucu-önleyici bakım yapılmasıyla üretim yapan makinaların duraksamaları en aza indirilip üretim miktarı arttırılır, üretim programları gerçekleştirilir, makine ömrü uzatılır, arızalar zamanında ve önceden saptanarak maliyeti daha yüksek arızalara yol açması önlenir, toplam bakım-onarım giderleri azaltılır (Erçelebi ve Ergin, 1997).

Açık maden işletmelerinde verimlilik ile kazançlılıkları kazıcıların kullanım ve ayakta kalma oranlarına, yıllık çalışma sürelerinin, ekonomik ömürlüklerinin uzunluklarına bağlıdır (Cebesoy, 1998). Ayakta kalma oranı, bakım-onarım yönetimi için kullanılan ana başarım göstergelerinden olup yerkazarın bozuk olmadığı, hizmete hazır bulunduğu süreyi gösterir. A (Availability) olarak tanımlanır (Dhillon, 2008). Programlanan çalışma süresinden plansız duruşlardan arındırılması ile elde edilen çalışma süresinin programlanan çalışma süresine oranıdır. Kullanım oranının (U) ayakta kalma oranından farkı, bu göstergenin hem planlanmış hem de planlanmamış duruşları kapsamasıdır. Plansız duruşlar arıza, bozukluk ve boşta beklemeleri içerir. (Dhillon, 2008). Programlanan çalışma süresinden planlı ve plansız tüm duruşlardan arındırılması ile elde edilen net çalışma süresinin, planlanmayan çalışma süresinden arındırılmış programlanan çalışma süresine oranıdır.

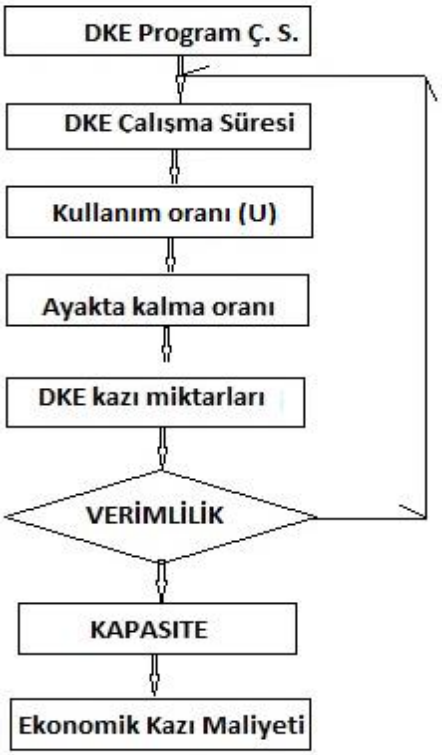
Dünya'da birçok açık kömür işletmesinde olduğu gibi AEL İşletmesi'nde döner kepçeli ekskavatör bant konveyör örtü-kazı sistemine dayalı yüksek kapasitede kömür üretilmekte ve termik santrale beslenmektedir. Ülkemiz linyite dayalı termik santral toplam kurulu gücün %23,6 oluşturan ve linyit sahaları içinde en büyük potansiyele sahip Afşin-Elbistan linyit kömür havzası genelinde yapılan arama ve etüdler sonucu; 4,3 milyar ton görünür ve 3,4 milyar ton işletilebilir rezerv tespit edilmiştir. Kışlaköy açık işletmesinin yaklaşık 582 milyon ton rezervi olduğu belirlenmiştir. 2022 yılı kömür üretim kapasitesi 20 milyon tonu aşan Kışlaköy açık işletmesinde kömür üretim hedefi, yıllık bazda 27 milyon ton düzeyine ulaşılması planlanmaktadır (Çelikler, 2023). İşletmede çalışan 6 adet 2300 m^3/h döner kepçeli ekskavatör bulunmaktadır (Şekil 1).

İşletmede hedef olarak konvansiyonel ekskavatör-kamyon yöntemine göre ekonomik avantajlar sağlaması nedeniyle DKE makinalardan daha yüksek oranda yararlanılması hedeflenmektedir. Makinaların aktif çalışma süresinin ve kazı süresinde artışların sağlanması ve dolayısıyla kazı miktarlarının arttırılması planlanmaktadır. Böylelikle artan DKE kullanım oranı, işletme verimliliğini yükseltirken ve kömür üretim kapasitesinde önemli artışlar sağlaması beklenmektedir.



Şekil 1. İşletmede çalışan DKE sürekli sistemlerden görünüm

İşletmede kazı kapasitesindeki gerçekleştirilecek artışlar, kazı maliyetlerinin düşmesine neden olmaktadır. Bu çevrimsel etkileşim Şekil 2'de verilmektedir. DKE kazıcı makinalarda verimlilik; programlanan çalışma süresi, aktif çalışma süresi, planlı ve plansız duruşların azaltılması yükselen kullanımı oranı ve ayakta kalma oranları kazı miktarları ile üretkenlikleri dolayısıyla ekonomik kazı performanslarını etkilemektedir. Bu nedenle, işletmede çalışan DKE kazı sisteminden olabildiğince yararlanılarak verimliliğin arttırılmasına yönelik olarak detaylı tasarım ve çalışmalara odaklanılmalıdır.



Şekil 2. DKE iyileştirme süreçleri

İşletmede DKE aktif çalışma saatleri geçen iki yıllık süreçte yükselmekte olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen DKE toplam çalışma süresi; 2021 yılında 21248 saat düzeyinden 25815 saat düzeyine yükselmiştir. DKE ortalama çalışma süresi; 2021 yılında 3541 saat düzeyinden 4302 saat düzeyine yükselmiştir. İşletmede DKE aktif çalışma saatleri geçen iki yıl için Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. İşletmede DKE aktif çalışma saatleri (Çelikler, 2023)

DKE	Program çalışma süreleri (saat/yıl)		Aktif çalışma süreleri (saat/yıl)	
	2021	2022	2021	2022
BG-1	4422	4245	3086	3564
BG-2	4422	4245	3616	3833
BG-3	1773	3715	2509	3714
BG-4	6021	5307	4737	5950
BG-5	5162	4781	4606	5271
BG-6	4422	4245	2694	3483
Toplam	26222	26538	21248	25815
Ortalama	4370	4423	3541,33	4302,50

İşletmede gerçekleştirilen iyileştirmeler sayesinde verimlilik ölçütlerinde belirgin düzeyde yükselişler görünmektedir. DKE çalışma sürelerinde gözlenen iyileşmeler, kullanım oran ve ayakta kalma oranlarını da etkilemektedir.

YÖNTEM: KULLANIM VE AYAKTA KALMA ORANLARI

Açık maden işletmelerinde kazıcıların kapasite ve verimlilikleri, yıllık çalışma sürelerinin, planlı ve plansız duruşlarından arındırılması ile programlanan çalışma süresi içindeki kullanım ve ayakta kalma oranlarına bağlı olmaktadır. Ayakta kalma oranı, bakım-onarım yönetimi için kullanılan ana başarım göstergelerindendir. A (Availability) olarak tanımlanır ve programlanan çalışma süresinden plansız duruşlardan arındırılması ile elde edilen çalışma süresinin programlanan çalışma süresine oranıdır. Kullanım oranının (U) ise hem planlanmış hem de planlanmamış duruşların arındırılması ile elde edilen çalışma süresinin programlanan çalışma süresine oranıdır.

Tüm bunlar dikkate alınarak, AEL Kışlaköy İşletmesi'nde DKE kazıcılarda üretkenlik ve verimlilik iyileştirmelerinde genel olarak;

- Arıza önleyici bakımların arttırılması ve periyodik bakımların arttırılması,
- Kazı planlamasında bant hattı ile kazıcı arasındaki mesafenin genişletilip ideale yaklaştırılması,
- Dekapaj ve kömür basamak kazılarının uyumlu ilerlemesi, bir üst basamakta çalışan makine ile senkronizasyon ve uyumun sağlanması,
- Operatör verimlerinin yükseltilmesi ile DKE kazıcı makinalarda aktif kazı sürelerinde belirgin artışlar sağlanarak üretkenlik ve verimlilik artışları sağlanması çalışmalarına odaklanılmaktadır.

DKE makinalarda gerçekleştirilen aktif çalışma süreleri, bir önceki yıla göre %21,49 oranında artış sağlanmıştır. DKE ortalama çalışma süresi; 2021 yılında 3541 saat düzeyinden 4302 saat düzeyine yükselmiştir. İşletmede DKE aktif çalışma saatleri geçen iki yıl için Çizelge 2'de verilmektedir. DKE' ler içinde en yüksek iyileşme oranı BG-3, en düşük iyileşme oranı ise BG-2'de gerçekleşmiştir. (Çelikler, 2023)

İşletmede hedeflenen DKE ortalama çalışma süresinin; 5200 saat düzeyine yükseltilmesi öngörülürken toplam çalışma saatinin 31250 saat düzeyine ulaştırılması hedeflenmektedir. Genel olarak DKE lerde aktif çalışma sürelerinde gerçekleştirilecek ortalama %21 oranında artışlar sağlanması halinde önümüzdeki süreçte;

BG-1: 4300 h, BG-2: 4650 h, BG-3: 4500 h, BG-4: 7200 h, BG-5: 6400 h, BG-6: 4200 h aktif çalışma sürelerine ulaşabilecekleri öngörülmektedir.

İşletmede DKE kullanım oranlarında ortalama olarak %2,03 artış sağlanmıştır (Çizelge 3). DKE' ler içinde kullanım oranına göre en yüksek iyileşme oranı BG-4'te %2,37 ile sağlanırken en düşük iyileşme oranı ise BG-2'de % -0,20 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 2. İşletmede DKE'lerin aktif çalışma saatlerindeki iyileşme yüzdeleri

DKE	Gerçekleşen aktif çalışma süreleri ve öngörülen projeksiyon (saat/yıl)			
	2021	2022	İyileşme (%)	Projeksiyon Hedefi
BG-1	3086	3564	+ 15,49	4300
BG-2	3616	3833	+ 6,00	4650
BG-3	2509	3714	+ 48,03	4500
BG-4	4737	5950	+ 25,61	7200
BG-5	4606	5271	+ 14,44	6400
BG-6	2694	3483	+ 29,29	4200
Toplam	21248	25815	+ 21,49	31250
Ortalama	3541,33	4302,50	+ 21,49	5200

Çizelge 3. DKE gerçekleşen kullanım oranları

	Kullanım oranları (%)		
DKE	2021 (U_1)	2022 (U_2)	İyileştirme ((U_2/U_1)-1) x100
BG-1	87,47	88,08	+0,60
BG-2	89,11	88,91	-0,20
BG-3	85,02	89,98	+ 1,17
BG-4	88,72	91,09	+ 2,37
BG-5	89,93	90,93	+ 1,01
BG-6	85,91	87,80	+ 1,89
Ortalama	87,69	89,72	+ 2,03

DKE kazıcı makinalarda aktif kazı sürelerinde gerçekleşen iyileştirme süreçlerinin; DKE kullanım oranlarındaki artışlar baz alındığında üretkenlik ve verimlilik artışlarına yansıdığı görülmektedir.

DKE ayakta kalma oranlarında ortalama olarak %14,43 artış sağlanmıştır (Çizelge 4). DKE' ler içinde ayakta kalma oranı baz alındığında en yüksek iyileşme oranı BG-3'te %33,24 ile sağlanırken en düşük iyileşme oranı ise BG-2'de % -1,47 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 4. DKE gerçekleşen ayakta kalma oranları

	Ayakta kalma oranları (%)		
DKE	2021 (A_1)	2022 (A_2)	İyileştirme ((A_2/A_1)-1) x100
BG-1	79,78	83,96	+4,17
BG-2	91,77	90,29	-1,47
BG-3	66,73	99,97	+ 33,24
BG-4	88,67	112,12	+ 23,44
BG-5	99,23	110,25	+ 11,02
BG-6	70,92	82,05	+ 11,13
Ortalama	82,85	97,28	+ 14,43

DKE kazıcı makinalarda aktif kazı sürelerinde gerçekleşen iyileştirme süreçlerinin; DKE ayakta kalma oranlarındaki artışlar baz alındığında üretkenlik ve verimlilik artışlarına yansımakta olduğu görülmektedir.

İYİLEŞTİRME SÜREÇLERİ ve DEĞERLENDİRMELER

Açık maden işletmelerinde kazıcıların kapasite ve verimliliklerin iyileştirilmesinde, yıllık çalışma sürelerinin, planlı ve plansız duruşlarından olabildiğince arındırılması ile aktif çalışma sürelerinin olabildiğince artırılması ile kullanım oranı ve ayakta kalma oranlarının yükseltilmesi oldukça önemlidir.
Bu nedenle, AEL Kışlaköy İşletmesi ve DKE kazıcı makinalarda gerçekleştirilen iyileştirme süreçleri genel olarak;

- Arıza önleyici bakımların arttırılması ve periyodik bakımların arttırılması,
- Kazı planlamasında bant hattı ile kazıcı arasındaki mesafenin genişletilip ideale yaklaştırılması,
- Dekapaj ve kömür basamak kazılarının uyumlu ilerlemesi, bir üst basamakta çalışan makine ile senkronizasyon ve uyumun sağlanması,
- Operatör verimlerinin yükseltilmesine temeline yönelik olarak DKE kazıcı makinalarda aktif kazı sürelerinde belirgin artışlar sağlanarak üretkenlik ve verimlilik artışları sağlanmasına odaklanılmaktadır.

DKE kazıcılarda sağlanan bu iyileştirme çalışmaları sonuç olarak, DKE verimliliklerinde artışların gerçekleşmesiyle birlikte kazı miktarlarının da genelde %22,25 oranında artmasını sağlamaktadır. İşletme verimini yükselmesi ile kömür üretim kapasitesinde %27,10 oranında artışlar sağlanmaktadır. İşletmede DKE ’ler için gerçekleşen kazı miktarları ve değişimleri Çizelge 5’de verilmektedir.

Çizelge 5. İşletmede gerçekleşen DKE kazı miktarları gelişimi

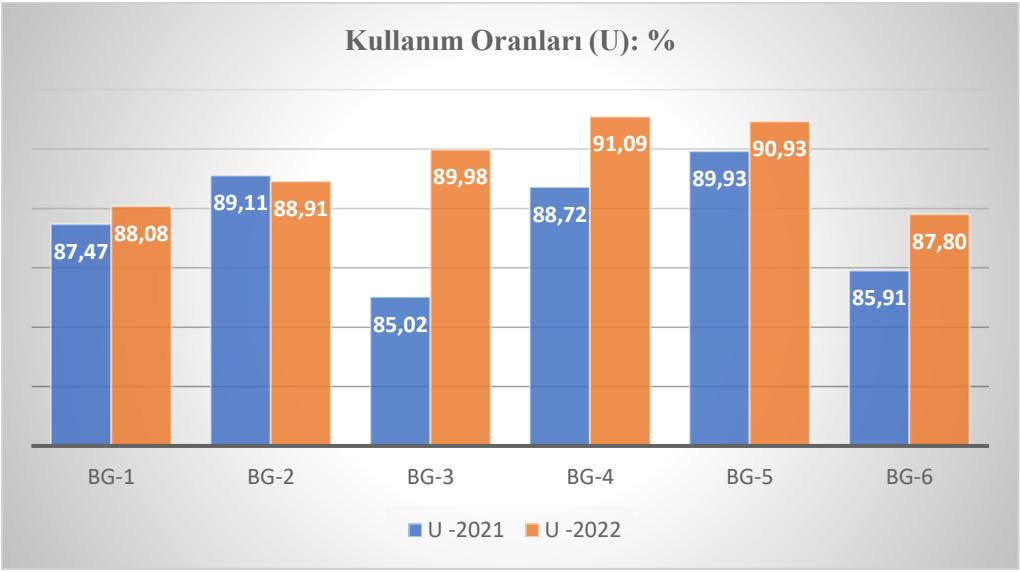
DKE	Kazı miktarları (m^3/yıl)		
	2021	2022	İyileştirme %
BG-1	4,782,265	5,469,242	+ 14.37
BG-2	5,624,933	5,580,008	- 0.80
BG-3	1,955,016	3,129,628	+ 60.08
BG-4	8,325,742	11,453,599	+ 37.57
BG-5	6,457,774	7,359,357	+ 13.96
BG-6	3,914,331	4,980,325	+ 27.23
Toplam	31,060,062	37,972,159	+ 22.25

İşletmede DKE kazı miktarları, 2021 yılında 31,060,062 m^3 düzeyinde iken 2022 yılında %22,25 artış göstererek 37,972,159 m^3 kazı düzeyine çıkmıştır. Dekapaj kazı miktarlarında ve toplam kazıda belirgin düzeyde artışlar gerçekleşmiştir. DKE kazıcı makinalarda aktif çalışma süresinin %21,50 oranında yükseltilmesi sayesinde; DKE kullanım oranlarında ortalama %2,03 düzeyinde artış sağlanmıştır (Şekil 3).

İşletmede DKE makinaların aktif çalışma sürelerinde gerçekleştirilen iyileştirmeler sonunda, DKE + bant konveyör sürekli sisteminin toplam kazı içindeki payı, %47,63 oranından %53,54 seviyesine çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte ekskavatör-kamyon örtü-kazı ve nakliye sistemine dayalı gerçekleştirilen kazı miktarı da gerilemiştir. Bu aynı zamanda daha pahalı bir kazı-nakliye sisteminin yerine elektriğe dayalı bir sistemle daha yüksek oranda çalışılması anlamına geldiği için daha ekonomik kömür üretiminin gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır.

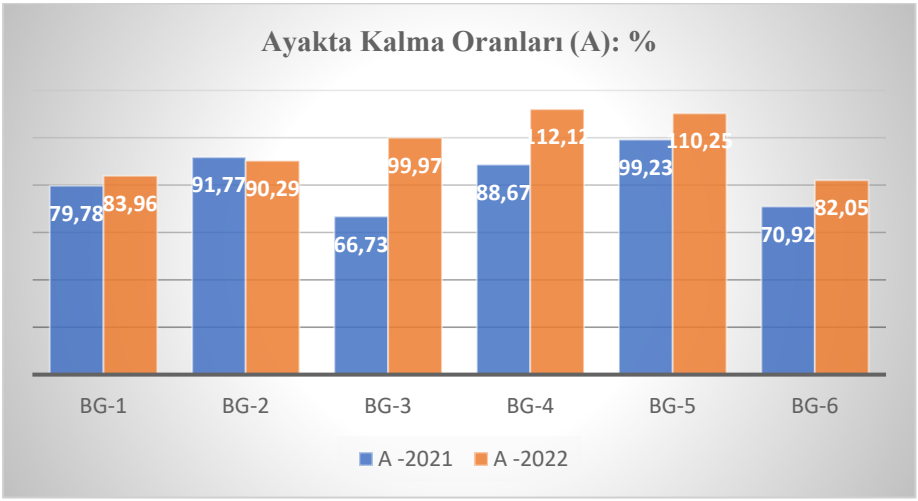
AEL Kışlaköy İşletmesi’nde çalışan DKE’lerin aktif çalışma sürelerinde gerçekleştirilen artışlar sayesinde, kazı miktarında artışların gerçekleşmesini sağlarken, toplam kazı hacmin yaklaşık %40’ını oluşturan kömür kazısının artmasını da sağlamaktadır. Böylelikle yıllık kömür üretim kapasitesine de pozitif yansımakta

ve işletme ekonomisi açısından daha düşük maliyetli üretim olanağı sağlanmaktadır. DKE kazıcılarda gerçekleştirilen bu iyileştirme çalışmaları ile yükseltilen DKE kullanım ve ayakta kalma verimlilikleri, işletme kazı miktarların da genel olarak %22,25 oranında artış sağlarken kömür üretim kapasitesinde %27,10 oranında artışlara olanak sağlamaktadır.



Şekil 3. DKE kullanım oranları

İşletmede çalışan DKE kazıcı makinalarda aktif çalışma süresinin %21,50 oranında yükseltilmesi sayesinde; DKE ayakta kalma oranlarında ortalama olarak %14,43 artış sağlanmıştır. (Şekil 4).



Şekil 4. DKE ayakta kalma oranları

SONUÇ ve ÖNERİLER

DKE makinalarda planlı ve plansız duruşların azaltılması, aktif çalışma sürelerinin yükseltilmesi ve diğer süreçlerdeki iyileştirmeler sonucunda; makina kullanım ve ayakta kalma oranlarında artışlar sağlanmış olup kazı miktarlarında önemli oranda artışlar sağlanmıştır. DKE kazıcı makinalarda duruşların azaltılıp

çalışma sürelerinin iyileştirilmesi ile DKE aktif çalışma süresinin ortalama %21,50 oranında yükseltilmesi, DKE kullanım oranları ve ayakta kalma oranları ile verimlilik artışları yaratarak işletme kazı miktarlarında %22,25 oranıyla birlikte kömür üretim kapasitesinde %27,10 oranında artış sağlamaktadır. DKE + bant konveyör sürekli sistemi ile arttırılan kazı miktarları sayesinde daha pahalı bir yöntem olan konvansiyonel ekskavatör-kamyon kazı-nakliye sistemi yerine elektriğe dayalı bir sistemden yüksek oranda yararlanılması anlamına geldiği için daha ekonomik bir kömür üretiminin gerçekleşmesi sağlanacaktır.

Açık işletmelerde kazı kapasitelerinin arttırılması ve daha ekonomik üretimlerin gerçekleştirilmesine yönelik kazıcı makinalarda aktif kazı sürelerinde iyileştirmeleri gerekli kılmaktadır. İyileştirmelerin sağlanması, kazıcı makinalarda üretkenlik ve verimlilik artışlarına yansımaktadır. İşletmelerde genel olarak; arıza önleyici bakımların ve periyodik bakımların arttırılması, kazıcıların çalıştığı basamakların uyumlu ilerlemesi, bir üst basamakta çalışan makine ile senkronizasyonun sağlanması, operatör verimlerinin sağlanması gibi temel iyileştirmeler sonunda, işletmelerde teknik ve ekonomik ideal çözümler ile sürdürülebilir efektif maliyetli üretimlerin gerçekleştirilmesi sağlanırken ülke rezervlerinin rasyo-ekonomik ve etkin değerlendirilmesi de olası görünmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalar sırasında EÜAŞ ve Çelikler Holding yetkili ve mühendislerine yapmış oldukları değerli katkı ve öneriler için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Atkinson, T. (1971). Institution of Mining and Metallurgy, Transaction, July 1971. Açık işletmelerde kazı ve yükleme teçhizatının seçimi, (Çeviri) Ömer Ünver, Madencilik, Cilt 11, Sayı:5,36-72.

Barkhuizen, W.F., Pretorius, L. (2008). Life cycle management for mining machinery, M.Ing., University of Johannesburg, South Africa, https://ujcontent.uj.ac.za/esploro/fulltext/graduate/Life-cycle management-for-miningmachinery/9911616407691?repId=124808990007691&mId= 136036390007691&institution=27UOJ_INST

Cebesoy, T. (1998). Maden ekipmanları için bir rasyonel bakım planlaması modeli: Önleyici bakım. Türkiye 11. Kömür Kongresi bildiriler kitabı, Zonguldak, Türkiye.

Çelikler (2023). Afşin-Elbistan Elektrik Üretim ve Tic. A.Ş. Aylık Faaliyet Raporu, Ocak 2023.

Dhillon, B.S. (2008). Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety, 1st edition (book), Chapter 4. Springer,2008, New York, USA, pp.57-70

Erçelebi, S.G, Ergin, H. (1997). Maden makinalarında koruyucu bakım onarım planlaması. Türkiye 15. Maden Kongresi, Ankara, pp.31-36.

Galetakis M., Papadopoulos S., Vasiliou A., Roumpos C., M. Theodoros, (2014). Development of an Expert System for the Prediction of the Performance of Bucket-Wheel Excavators Used for the Selective Mining of Multiple-layered Lignite Deposits. C. Niemann-Delius. (ed.), Proc. of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining, Aachen 2014, 47-58.

Galetakis M., Michalakopoulos T., Bajcar A., Roumpos C., Lazar M., Svoboda P., (2016). Project Bewexmin: Bucket Wheel Excavators Operating Under Difficult Mining Conditions Including Unmineable Inclusions and Geological Structures with Excessive Mining Resistance. 13th ISCSM 2016 Belgrade, 11-14 September.

Kavouridis K., Roumpos C., Galetakis M., Pavloudakis F., (2008). Methods and technological Improvements for the efficient removal of the overburden hard rock formations at South Field Lignite Mine, Ptolemais, Greece. Proceed of 9th International Symposium 'Continuous Surface Mining', 8-11 October 2008, Petrosani-Romania, 91-100.

Mallı, (2021). Açık Kömür İşletmeleri Makina Planlamasında Örtü-kazı Sistemlerinin Yatırım Analizi. 8. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi, 8. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojileri Kongresi Bildirileri Kitabı, 13-15 Ekim, 2021, İzmir, pp.96-105.

M.T.A., (2023). MTA Kömür Arama Araştırmaları, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara. https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari.

Özdoğan, M., Taksuk, M., (2011). GLİ Tunçbilek Maden işletmesi F/C panosunda çalışan elektrikli yerkazarların bakım-onarım ve üretkenlik göstergeleri, 3. Maden Makinaları Sempozyumu, 05-06 Mayıs, 2011, İzmir, pp.11-22.

Thyssenkrupp, (2021). Industrial Solutions, Continuous Mining Systems. www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/products-and-services/mining-systems/bucket-wheel-excavators.

YERLİ BİR İNKLİNOMETRE CİHAZININ TASARIMI VE ÜRETİMİ

DESIGN AND PRODUCTION OF A DOMESTIC INCLINOMETER DEVICE

Ö. Öztürk [1], V. Özacar [2, *], T. Özacar Öztürk [1], S. Eren Özacar [3]

[1] Celal Bayar Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
[2] Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu
[3] Octahedron İnovasyon Bilişim Elektronik ve Madencilik Hiz. Malz. San. Tic. A.Ş.
*(*Sorumlu yazar: vehbi.ozacar@deu.edu.tr)*

ÖZ

1980'lerle birlikte yükselişe geçen küreselleşme dalgası, pandemi ve küresel ekonomik kriz ile birlikte günümüzde yerini daha korumacı bir üretim politikasına bırakmaya başlamıştır. Bu ve buna benzer gelişmeler sonucunda yabancı menşeili ölçüm cihazlarının yerine yerli rakipleri yaygınlaşmaktadır. Sektörden gelen taleplerin sonucunda yerli bir taşınabilir eğim ölçer sisteminin (inklinometre) ihtiyacı anlaşılmış ve bu doğrultuda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada yerli inklinometre cihazının geliştirme ve üretim aşamaları, yabancı muadilleri ve tekrarlayan ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması anlatılmıştır.

Anahtar Sözcükler: İnklinometre, yerli üretim inklinometre, ölçüm doğruluğu, eğim ölçer

ABSTRACT

The globalization trend, which started to rise with the 1980s, has replaced a more protective production policy in today, together with the pandemic and the global economic crisis. Because of these kind of developments, domestic competitors are becoming widespread instead of foreign origin measuring devices. As a result of the demands from the sector, the need for a domestic portable inclinometer system was seen and studies were carried out in this direction. In this study, the development and production stages of the domestic inclinometer device, foreign equivalents and comparison of repetitive measurement results are explained.

Keywords: Inclinometer, domestic production inclinometer, measurement accuracy

GİRİŞ

Geçmişte yükselişe geçen küreselleşme dalgası, pandemi, küresel ekonomik kriz gibi gelişmelerin sonucunda ülkelerin daha korumacı bir üretim politikasına yönelmesiyle birlikte yabancı menşeli ölçüm cihazlarının yerine yerli rakiplerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur.

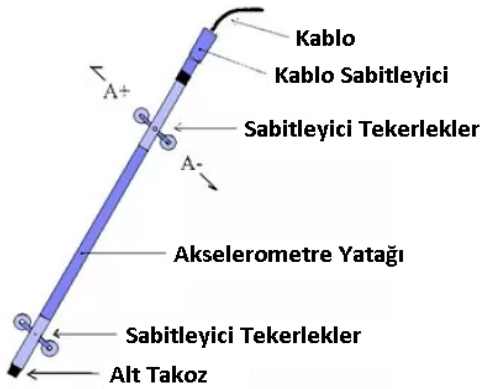
Madencilik sektöründe bu gibi ihtiyaçlara yönelik çözümler geliştirmek üzere birden fazla yerli üretim girişimiyle geliştirme sürecine devam etmektedir. Sektörden gelen taleplerin sonucunda yerli bir taşınabilir eğim ölçer sisteminin (inklinometre) ihtiyacı anlaşılmış ve bu doğrultuda çalışmalar yapılmıştır. Şev eğim ölçerler, inşaat sırasında en önemli jeoteknik veri kaynaklarından biridir (Erikson et. al., 1992). Bu çalışmada, ortaya çıkan yerli inklinometrenin geliştirme ve üretim aşamaları, yabancı muadilleri ve tekrarlayan ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması anlatılmıştır.

YÖNTEM

Şev ve şevler gibi duraylılığından şüphe duyulan veya gözlemlenen bölgelerdeki yer hareketlerinin, gözlenmesi ve tespiti amacıyla inklinometre ölçümleri diğer yöntemlerin yanı sıra yoğun olarak kullanılmaktadır. İnklinometre ölçümleri sonucunda zeminde yatayda olan tüm hareketler tespit edilebilmektedir. İnklinometre cihazı şev hareketleriyle birlikte, baraj gövdelerindeki kazıklı temel sistemlerinde imalat esnasında inklinometre boruları yerleştirilerek gövdede ve kazıklı temellerde olan hareketler ölçülebilmektedir. Ayrıca yerleşim yerleri yakınlarındaki şev kaymaları da çevre sakinleri açısından önemlidir. Deformasyon verileri, mülklerine gelebilecek potansiyel zarardan endişe duyan çevre sakinlerini yatıştırmak için gereklidir (Laplante, 1998).

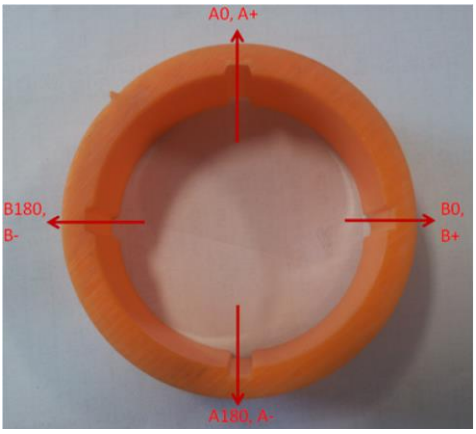
İnklinometre cihazları, yerleştirildikleri sondaj deliğinin eksenine dik yönde oluşan hareketlerin ölçülmesinde kullanılmaktadırlar. Cihaz yardımıyla düşey doğrultudaki deliğin iki tarafında. 10 - 20°lik sapmalar ölçülebilmekte ayrıca hareketin yeri, büyüklüğü ve yönü saptanabilmektedir. Uygulama yöntemi ile hareketlerin üçüncü boyutta da izlenmesi mümkündür. Bir tek inklinometre cihazı kullanılarak çok sayıda sondaj deliğinden ölçüm alınabilmesinin yanında, ölçüm hassasiyetinin diğer yöntemlerden çok daha yüksek olması sebebiyle zeminde gelişebilecek çok yavaş hareketler bile kaydedilebilmektedir. Ölçüm esnasında oluşabilecek önemli bir yer hareketi sonucu aletin kuyu içinde kalabilme riski, inklinometre cihazı ile ölçüm yönteminin önemli dezavantajlarından sayılabilir. Bu yüzden yurtdışından ithal edilen inklinometre cihazlarının ölçüm sırasında kuyu içinde kaybedilmesi hem ölçüm yapan firma için hem de ülke ekonomisi açısından büyük kayıplar oluşturmaktadır. Ayrıca yeni bir inklinometre cihazının tedariği üretici firma stoğunun azlığı ve gümrük işlemleri yüzünden uzun süreler alabilmektedir. İnklinometre ile ölçüm yönteminin diğer bir dezavantajı ise inklinometre borularının iç yüzeylerinde bulunan olukların pürüzlü olmasına ve montajına bağlı olarak hatalı sonuçların ortaya çıkabilmesidir. Tasarımını ve üretimini gerçekleştirdiğimiz inklinometrenin, firmalara sağlayacağı en büyük avantajlar arasında ekonomik maliyeti, hızlı tedarik ve hızlı teknik destek sürecidir.

İnklinometre aleti, prob, kayıt yapan cihazın içinde bulunduğu ve kablonun sarıldığı tambur ve bunlar arasındaki bağlantıyı sağlayan kablodan oluşur. Gövdesi paslanmaz malzemeden yapılmış boru şeklindeki probun alt ve üst tarafında sabitleyici tekerler bulunmaktadır. Bu tekerleri gerdiren yaylı makara düzeneklerinin arasındaki mesafe 50 cm.'dir. Böylece cihaz 50 cm. ve katlarında ölçüm yaparken tekerler inklinometre borusunun hep aynı noktalarına basmış olur. İnklinometre sisteminde, algılayıcı ile kayıt cihazı birbirlerine, çelik bir kılıf ile çevrilmiş, esnek ve suya karşı oldukça dayanıklı, genelde 50 cm. aralıklara göre bölümlenmiş kablo ile bağlanmaktadır (Şekil 1).

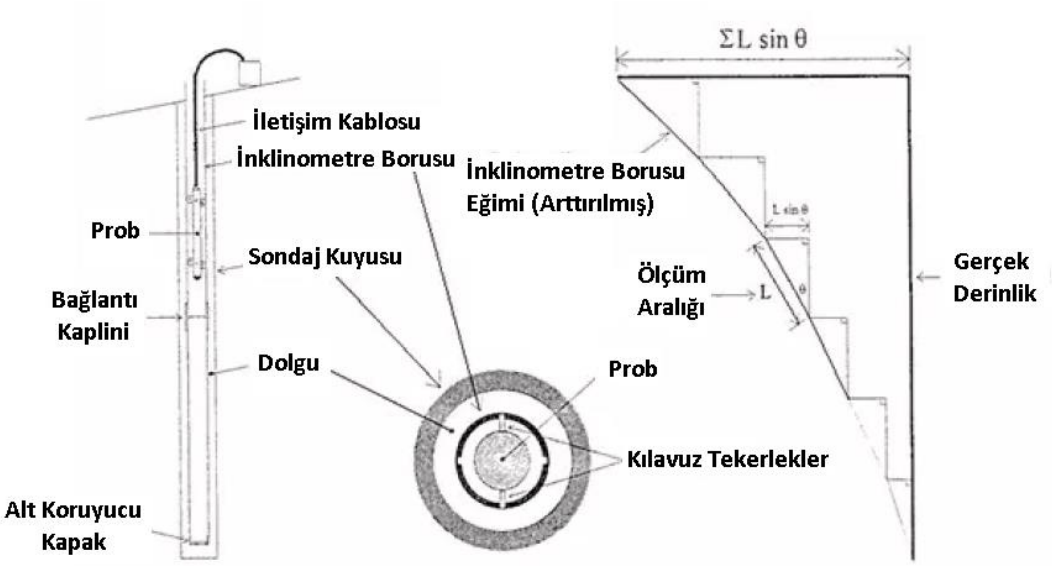


Şekil 1. İnklinometre probunun parçaları (Deep Excavation 2023)

İnklinometre borularının, açılmış sondaj kuyularına yerleştirilmesi sırasında boruların iç cidarlarında bulunan ve 90° açı yapan kanal çiftlerinden birisi A+, A- diğeri ise B+, B- kanal çifti olarak kabul edilir (Şekil 2). Probun yanal veya düşey yöndeki deformasyonların daha yüksek bir hassasiyet ve doğrulukta ölçmesini sağlayan oluklardan A+, A oluk çifti, A+ oluğu muhtemel hareketin referans yönü olacak şekilde, beklenilen hareket yönü ile aynı doğrultuya getirilir. Bu kurala uygun olarak yerleştirilen 3 metre boyundaki, inklinometre boruları birbirlerine özel bağlantılarla eklenerek, kuyu içine kuyunun derinliği kadar boru indirilir. Probun tekerleklerinin üst kısımda kalan tarafı A+ kanalına oturacak şekilde, prob kuyuya indirilir. Kuyudan genelde 50 cm. aralıklarla ölçüm alınır. Prob A+ kanalındayken iki kez ölçüm alınır. Bu ölçümlerde tek fark probun A+ tarafına basan tekerleri ikinci sefer de A- tarafına basması gerekir. Bu şekilde probun imalatından gelen sapma varsa bu hata payı ölçüm sonucundan uzaklaştırılmış olur. Ölçüm yöntemi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 2. İnklinometre ölçüm borusunda yer alan kanallar (Soil Instruments, 2015)

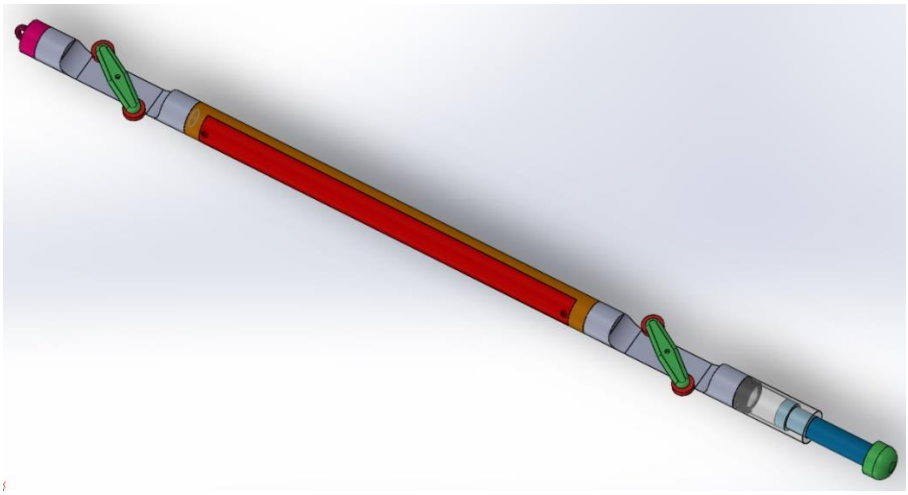


Şekil 3. İnklinometre ölçüm yöntemi (Deep Excavation 2023, türkçeleştirilmiştir)

ÜRÜN GELİŞTİRME VE SAHA ÇALIŞMALARI

İnklinometre cihazının geliştirilmesine, cihazın prototipinin 3 boyutlu modelleme programları ile modellenmesiyle başlanmıştır. Bu model ilk aşamada modüler şekilde tasarlanarak, geliştirme aşamasındaki değişikliklerde prototipin sadece ilgili kısmının güncellenmesi amaçlanmıştır (Şekil 4). Prototip üretim aşamasında artan üretim ve malzeme maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, prototip üretiminde hataya yer olmadığı görülmüştür. Hatalı bir prototip üretiminin sonucunda ikinci bir üretimin ya da değişkliğin proje bütçesini tehlikeye sokacağı malumdur.

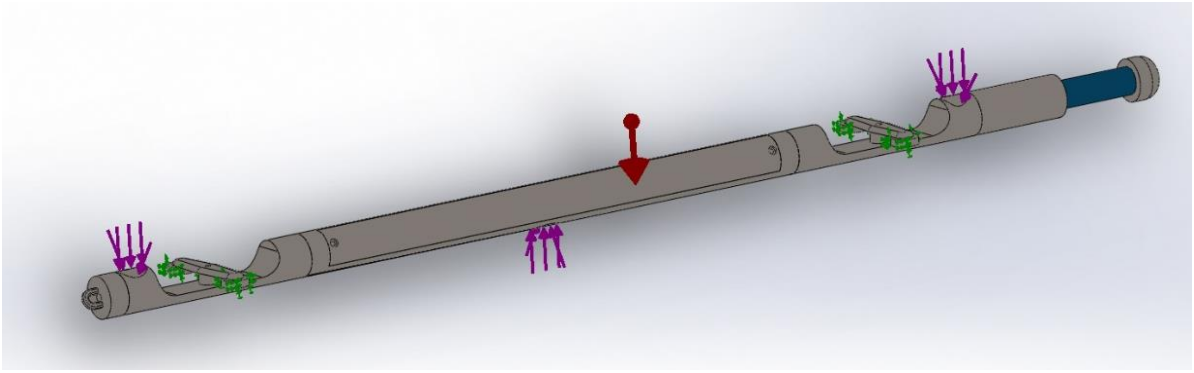
Bu yüzden ilk prototipin gerek üretim esnekliğinden, gerekse maliyetinin düşüklüğünden dolayı 3 boyutlu yazıcıda üretilmesi kararlaştırılmıştır. 3 boyutlu yazıcıdan alınan ürün mukavemetinin çelikle karşılaştırıldığında düşük olması aşikardır. Fakat tehlikesiz ve susuz kuyularda elektronik bileşenlerin denenmesinde ve prototip tasarımın geometrik olarak doğrulanmasında çok fayda sağlamakta ve gerekli asgari mukavemet ihtiyacını karşılamaktadır. Tasarım aşamasında karar verilen modüler yapının faydası üretim aşamasında görülmüştür. Üretici ve sektörden son kullanıcılarla görüş alışverişinde bulunulduğunda, ilk tasarlanan makara sisteminin yapısı çok karmaşık görülmüş ve diğer yabancı üreticilere benzer bir makara sistemine geçilmesi görüşü hakim olmuştur. Söz konusu makara sistemi tasarıma adapte edilerek değişikliğe gidilmesi modüler yapı sonucunda basitçe gerçekleşmiştir.



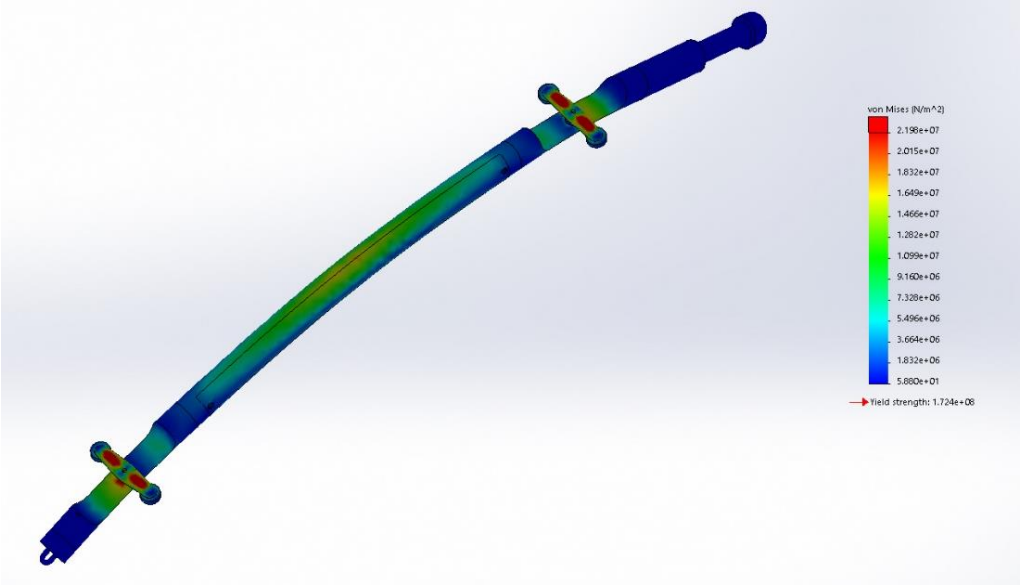
Şekil 4. 3 boyutlu modelleme programında yapılan modüler tasarım

Üretime yönelik tasarımı gerçekleştirilen probun üzerine gelen yüklere karşı mukavemeti, üretim aşamasından önce bilgisayar ortamında uygulanan testlerle incelenmiştir. Parça yeşil okların bulunduğu 4 rulmandan sabitlenmiştir. Orta kısımda gösterilen kırmızı ok ise 9.8 m/s^2 olarak uygulanan yerçekiminin yönünü belirtmektedir (Şekil 5). Mor okların bulunduğu alanlarda toplam 3 kuvvet parçaya uygulanmaktadır. Uç kısımlardaki kuvvetler yerçekimi yönünde 100 N, orta kısımdaki kuvvet ise yerçekiminin tersi yönde 200 N'dur. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanması sonucu Şekil 6'da verilmektedir. Oluşturulan tasarım eğilmeye karşı mukaveti, bilgisayar ortamındaki testlerden başarı ile geçmiştir.

Üretim aşamasına geçildiğinde, 3 boyutlu yazıcıda probun üretimi gerçekleştirilerek bilgisayar ortamında yapılan tasarımın boyutları fiziksel olarak hayata geçirilmiştir. Elektronik ve bu gibi diğer bileşenlerle probun uyumu gözlemlenerek, elektronik bileşenlerin uyumu ve çalışması test edildikten sonra çelik malzemeden prop üretimine geçilmiştir. Bu üretim aşamalarının testi için, üretim atölyesine yakın bir bölgede bu projenin çıktılarının kullanımına yönelik 15 metre derinliğinde bir sondaj kuyusu açılmış ve bu kuyuya inklinometre boruları indirilerek sabitlenmiştir. Şekil 7'de plastik malzemeden model ve ön üretim prototip proplar görülmektedir.



Şekil 5. Uygulanan yüklerin gösterimi



Şekil 6. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanması sonucu oluşan gerilme ısı haritası



Şekil 7. Plastik ve çelik malzemeden üretimi gerçekleştirilen prototip proplar

Çelik malzemeden üretilen probun üzerinde tüm saha testleri gerçekleştirilmiş ve elektronik bileşenlerin kusursuz şekilde çalıştığı görülmüştür. Alınan ölçümler aynı kuyuda ve aynı zamanda yabancı üretim diğer inklinometrelerin ölçümleri ile karşılaştırılmış ve başarı ölçütleri karşılanmıştır. Daha sonra saha testleri ve kullanıcı geri dönüşleri dikkate alınarak ve üretim aşamasındaki deneyimlerde kullanılarak nihai ürün üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretimi gerçekleştirilen probun sahadaki kullanıcılardan aldığı geri dönüşler gayet başarılı olmuştur. Söz konusu prototipin kullanıcılardan alınan geri dönüşlerinde, bazı noktalarda yabancı muadillerinden bile daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8.Üretimi yapılmış nihai tasarım inklinometre probu

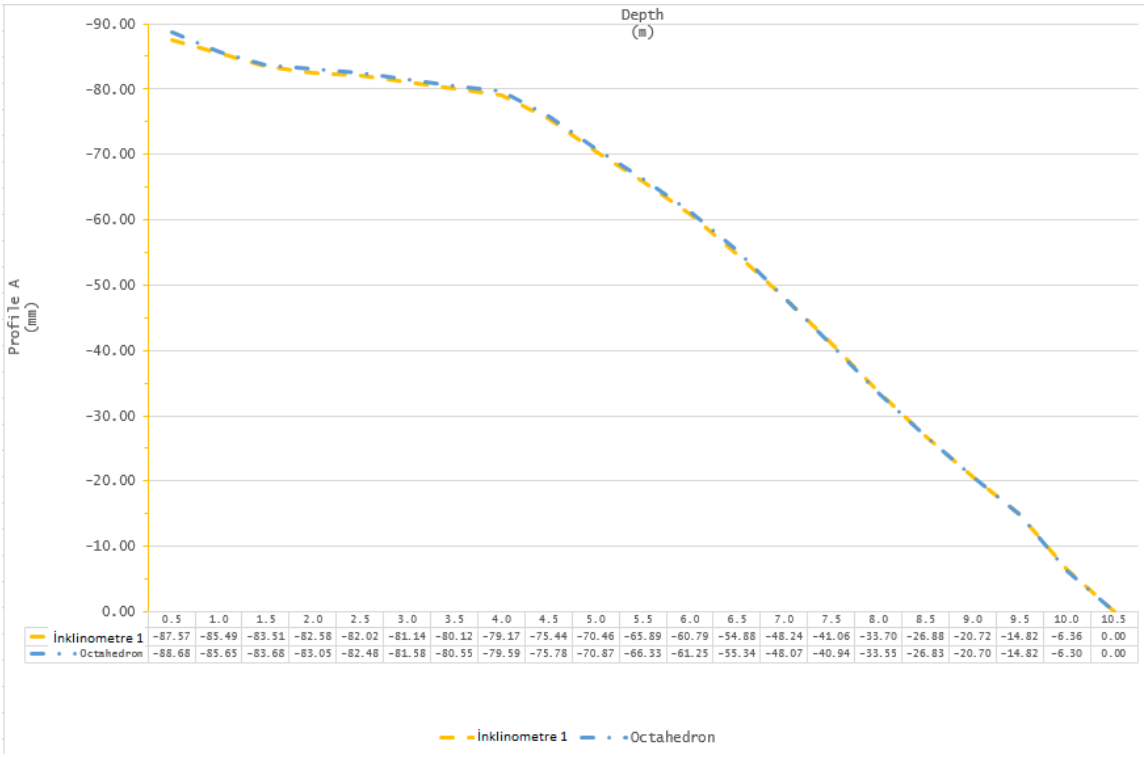
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Önceki kısımda belirtildiği üzere proje bünyesinde açılan sondaj kuyusunda yapılan ölçümler aşağıda görülmektedir (Şekil 9 ve 10). Ölçümler aynı zamanda arka arkaya aynı kuyuda gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde sapma olmaması için, proje bünyesinde açılan kuyu kayma gerçekleşmeyen bir lokasyonda açılmıştır. Böylece deneysel ölçümlerdeki değişkenler mümkün olduğunca azaltılmıştır. Ayrıca bu çalışmanın çıktısı olarak üretilen yerli inklinometre cihazının aynı kuyuda arka arkaya tekrarlanan ölçümlerinde de aynı sonuçlarının alındığı görülmüştür.

Üretimi gerçekleştirilen yerli inklinometrenin kullanımının getireceği avantajları inceleyecek olursak;

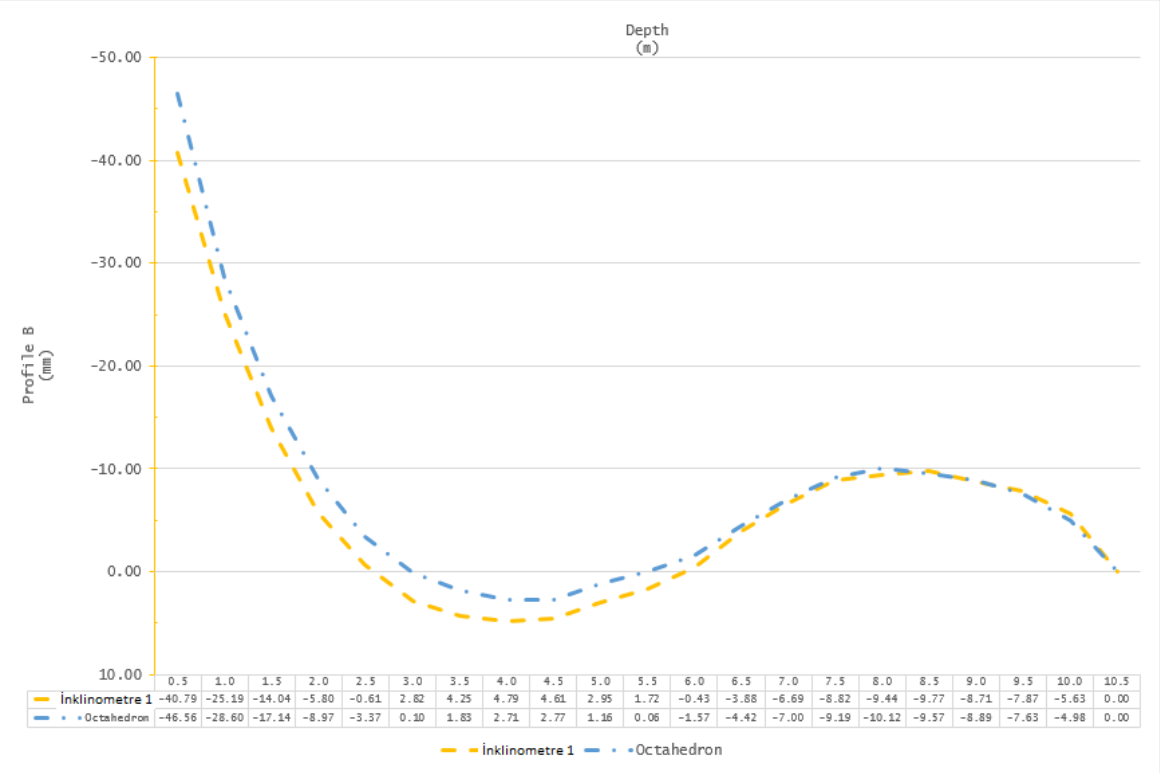
- İlk alım maliyetinin çok daha uygun olması
- İnklinometre cihazının kuyu içinde kalması riskinin sonuçlarının düşük maliyetli olması
- Herhangi bir arıza durumunda gümrük prosedürleri ve maliyetiyle uğraşmamak
- Hızlı tamir ve tedarik zinciri
- Tamir masraflarından dolayı atıl durumdaki inklinometrelerin yerli prob ile daha düşük maliyetle yenilenmesi

Başlıca avantajları olarak sıralanabilir.



	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5
İnklinometre 1	-87.57	-85.49	-83.51	-82.58	-82.02	-81.14	-80.12	-79.17	-75.44	-70.46	-65.89	-60.79	-54.88	-48.24	-41.06	-33.70	-26.88	-20.72	-14.82	-6.36	0.00
Octahedron	-88.68	-85.65	-83.68	-83.05	-82.48	-81.58	-80.55	-79.59	-75.78	-70.87	-66.33	-61.25	-55.34	-48.07	-40.94	-33.55	-26.83	-20.70	-14.82	-6.30	0.00

Şekil 9. A Profilinde yapılan ölçüm sonuçları



	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5
İnklinometre 1	-40.79	-25.19	-14.04	-5.80	-0.61	2.82	4.25	4.79	4.61	2.95	1.72	-0.43	-3.88	-6.69	-8.82	-9.44	-9.77	-8.71	-7.87	-5.63	0.00
Octahedron	-46.56	-28.60	-17.14	-8.97	-3.37	0.10	1.83	2.71	2.77	1.16	0.06	-1.57	-4.42	-7.00	-9.19	-10.12	-9.57	-8.89	-7.63	-4.98	0.00

Şekil 10. B Profilinde yapılan ölçüm sonuçları

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK/TEYDEB tarafından, 7201242 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca projenin saha çalışmalarında vermiş oldukları desteklerden dolayı yazarlar, "Geotechnical Testing Teknik Test Cihazları Müh. Ve San. Tic.", "Gedik Tek İnşaat Lab. Hiz. Müh. Müş. Taah. İç ve Dış Tic.Ltd. Şti." ve "Efol Mühendislik İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti." firmalarına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Deep Excavation, Slope Inclinometers, Borehole Inclinometers, SlopeIndicators, https://www.deepexcavation.com/en/resources/deepex-theory-methods/geotechnical-instrumentation-monitoring-slope-inclinometer, Ağustos 2023.

Erikson, C., Kraemer, S., ve Johnson, E. 1992. Geotechnical İnstrumentation for deep excavations in Boston", *Civil Engineering Practice* , Spring.

Laplante, J. P. 1998. Instrumentation to Monitor Building Damage from Excavation Induced Ground Movement", YL. Tezi, Master of Enginering in Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Soil Instruments, Inclinometer A and B Directions, http://www.itmsoilsupport.com/index.php?/Knowledgebase/Article/View/162/7/inclinometer-a-and-b-directions, Mayıs 2015.

KALİTE KONTROL GRAFİKLERİ VE PARETO ANALİZİNİN HAZIR BETON TESİSİNDE UYGULANMASI

APPLICATION OF QUALITY CONTROL GRAPHS AND PARETO ANALYSIS IN THE READY CONCRETE PLANT

V. Arslan

MTA Genel Müdürlüğü, Orta Anadolu II. Bölge Müdürlüğü, Konya
(volkanarslan76@hotmail.com)

ÖZET

İstatistiksel Proses Kontrol (İPK), üretim faaliyetlerinin önceden belirlenen kalite spesifikasyonlarına uygun şekilde yapılmasını sağlayan ve standart dışı üretimi büyük ölçüde önleyerek kusurlu ürün üretimini minimize etmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu çalışmada, Konya'da faaliyet gösteren bir hazır beton fabrikasından alınan beton basınç dayanım değerlerinin istatistiksel olarak kontrol altında olup olmadığı İPK'nın temel araçlarından birisi olan kontrol grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. Söz konusu kalite kontrol grafiklerinden elde edilen bilgiler ışığında üretim sürecinin daha önceden belirlenen spesifikasyonları karşılama yeteneğini belirlemek üzere proses yeterlilik analizi yapılmıştır. Son olarak, pareto analizi kullanılarak hata dağılımları tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: İstatistiksel kalite kontrol, hazır beton, pareto analizi.

ABSTRACT

Statistical Process Control (SPC) is a method to ensure that production activities are carried out in accordance with pre-determined quality specifications and aims to minimize the production of defective products by preventing non-standard production to a large extent. In this study, whether the concrete compressive strength values obtained from a ready-mixed concrete factory operating in Konya are under statistical control was determined using control charts, which is one of the basic tools of SPC. In the light of the information obtained from the said quality control charts, a process capability analysis was performed to determine the ability of the production process to meet the predetermined specifications. Finally, error distributions were determined using pareto analysis.

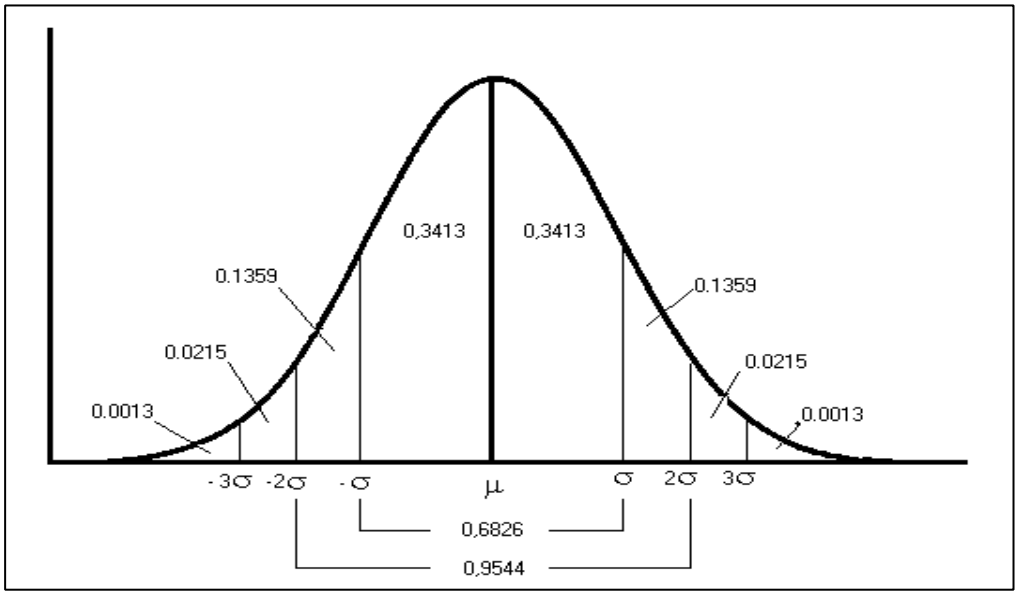
Keywords: Statistical quality control, ready-mixed concrete, pareto analysis.

GİRİŞ

Hazır beton; ince ve iri agrega çimento ile suyun, kimyasal ve mineral katkı maddeleri ilave edilerek veya edilmeden homojen olarak üretim teknolojisine uygun karıştırılmasından oluşan başlangıçta plastik kıvamda olup, şekil verilebilen, zamanla katılaşıp sertleşerek mukavemet kazanan ve tüketiciye "taze beton" olarak teslim edilen önemli bir yapı malzemesidir. Betonun mutlak hacmi %70 oranında agrega (kum, çakıl ve mıcır), %10 oranında çimento ve %20 oranında sudan oluşmaktadır. Gerektiğinde çimento ağırlığının %5'inden fazla olmamak kaydıyla, katkı malzemesi ilave edilmektedir. Hazır betonun kalitesini belirleyen beş temel aşama söz konusudur. Bunlar; tasarım, üretim, taşıma, yerleştirme ve bakımdır. Bunlardan ilk üç aşama hazır beton üreticisi, son iki aşama ise tüketici tarafından yerine getirilmektedir. Hazır betonun yüksek katlı binalardan, barajlara, prefabrikasyondan metro inşaatlarına kadar çok geniş bir kullanım alanı vardır. Hazır

beton konvansiyonel betona göre işçilikten ve zamandan tasarruf sağlayıp çağdaş bir çalışma imkanı sunmaktadır.

Betonunun günümüzde en yaygın taşıyıcı yapı malzemesi olarak kullanılmasında en önemli etkenler ucuz olması, bilgisayar kontrollü santraller, transmikserler ve pompalar ile üretim, taşıma ve yerleştirme aşamalarında büyük gelişmelerin sağlanmış olması, şekil verilebilme kolaylığı, çelik donatı ile betonarme çekme mukavemetinin yetersizliğinin dengelenmesi, yüksek basınç dayanımlarına ulaşılması, fiziksel ve kimyasal dış etkenlere karşı dayanıklılığı (uzun ömür ve bakım kolaylığı gibi), hafif agrega ile hafifletilmesi ve pigmentlerle renklendirilmesidir. Hazır betonda aranan temel özellikler; işlenebilme özelliği, uygun kıvam, taze betonun sıcaklığı, agreganın tane büyüklüğü, homojenlik, kıvam kaybı, hava miktarı, birim ağırlık, basınç dayanımı, dış etkenlere karşı dayanıklılık, donma ve çözülmeye dayanıklılık, hafiflik, ısı ve ses yalıtımı ve ekonomikliktir (Usta, 2005). İstatistiksel Proses Kontrolü (İPK) istatistik tekniklerinin veri toplamak, analiz etmek, yorumlamak ve çözümler getirmek üzere kalite problemlerine uygulanması olarak tanımlanmaktadır. İstatistiksel proses kontrolü üretimin önceden belirlenmiş kalite özelliklerine uygunluğunu ve kusurlu ürün üretiminin en aza indirgenmesini sağlayıcı bir nitelik taşımaktadır. İstatistiksel proses kontrolü uygulamalarında proses sürekli gözlemlenerek problemler tespit edilir, problemin sebepleri belirlenir, çözüm geliştirilir, geliştirilen çözüm uygulanır ve proses tekrar izlenir. Bu döngü sonsuz olup bu sayede prosesin sürekli iyileştirilmesi sağlanır. İstatistiksel proses kontrolü bir kalite muayenesi değildir. Kalite muayenesi ile istatistiksel proses kontrolü arasındaki önemli fark, istatistiksel proses kontrolünün üretim sürecini, kalite muayenesinin ise ürünü kontrol etmesidir (Cook vd., 2006; Devor vd., 1992). İstatistiksel yöntemlerin kalite kontrolde kullanılmasının iki nedeni vardır. İlki; kontrol edilmesi gereken kitle veya yığının tamamına muayene yapmanın genellikle olanaksız ya da ekonomik olmaması, ikincisi ise; üretilen bir ürünün ölçülebilen kalite özelliklerinin sürekli olarak bir değişime uğraması ve bu değişimin, bazı sınırlar arasında kalmak koşuluyla rastgele bir yapı göstermesidir. İPK Yöntemleri içinde en fazla kullanılan ve bilinen araç kontrol grafikleri olup, 1924 yılında Shewhart tarafından üretim prosesindeki değişimleri araştırmak ve anlamakta yardımcı olmak amacıyla hazırlanmıştır. Özellikle imalat sanayinde yoğun bir şekilde kullanılan kontrol grafiklerinden son yıllarda madencilik alanında da faydalanılmaya başlanmıştır (Elevli ve Behdioğlu, 2006). Normal dağılmış bir eğride verilerin %99,73'ü $\mu \pm 3\sigma$, %95,45'i $\mu \pm 2\sigma$ ve %68,26'sı $\mu \pm 1\sigma$ aralığında yer alır. Şekil 1'de normal eğri üzerinde bu ilişki anlatılmaktadır.



Şekil 1. İstatistiksel proses kontrolünde normal dağılım eğrisi

İstatistiksel proses kontrolü çalışmaları altı aşamaya ayrılmaktadır. Bunlar; Prosesin tanımlanması, kontrol edilecek olan karakteristiklerin belirlenmesi, ölçü aletlerinin test edilmesi ve kalibrasyonu, proses yeterlilik analizi, proses performans analizi ve proses kontrol grafikleridir. Bu çalışmada, kalite kontrol grafikleri kullanılarak Konya'daki bir beton firmasına ait hazır betonun ürün kaliteleri incelenmiş, proses yeterlilik analizi yapılmış ve pareto analizinin beton sanayinde nasıl uygulanabileceği araştırılmıştır. Bu kapsamda, fabrikada test edilen dönem boyunca betonun basınç dayanım değerlerinin X-R grafikleri yardımıyla incelenmesi ve ortaya çıkan hataların sebeplerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca proses yeterlilik analiziyle de işletmenin çalışma veriminin yeterli olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Son olarak yapılan pareto analizi yardımıyla da üretimdeki hataların nedenlerinin belirlenmesi ve bu hataların hepsinin ortadan kaldırılması çok mümkün olmadığı için hataların önem sırası belirlenerek hangi hataların öncelikli olarak giderilmesi gerektiğinin tespiti amaçlanmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kalite Kontrol Grafikleri

Kalite kontrolü, bir ürünün tüketicisini tatmin etmesi ve onun beklentilerini en iyi biçimde karşılaması amacıyla üretimin her aşamasında sürdürülen kontrol işlemidir. Kalite kontrol sürecinin temelinde üretimin planlanması aşamasında belirlenen kalite standartlarına üretim işlemleri boyunca, öncesinde ve sonrasında ne ölçüde uyulduğunun incelenmesi ve gözlenmesi yatar şeklinde tanımlamıştır. Ayrıca kalite kontrol, ürün kalitesini yüksek tutmayı amaçlayan bütün ölçme ve kontrol işlerinin, sürekli bir "bilgi alma-değerlendirme-karar verme-müdahale" programına göre, sistemli bir şekilde yürütülmesini sağlayan bir faaliyettir (Ankara vd., 2007; Işığıçok, 2012; Yücel, 2007).

Bir kontrol grafiği esas olarak üç çizgiden oluşur. Bunlar; alt kontrol sınır limiti (AKL), üst kontrol sınır limiti (ÜKL) ve orta değer çizgisidir (OÇ). Alt ve üst kontrol limitleri alt grupların genel ortalamasını gösteren orta çizgiden itibaren ±3a uzaklığı veya standart normal dağılım eğrisinin %99.73'lük alanını ifade eder. Bir kontrol grafiğinde tüm noktaların limitler arasında bulunması her zaman prosesin kontrol altında olduğu her şeyin yolunda gittiği anlamına gelmez. Bunun aksi durumda yani noktaların sık limitler dışına taşması halinde de prosesin kontrol dışında olmadığı her zaman söylenemez. Prosesin karakteristiğinin değişmesini veya yanlış hesaplama ihtimallerini göz önünde bulundurmak gerekir (Akın, 1996; Ankara ve Bilir, 1995; Bayat ve Arslan, 2004; Ridley ve Duke, 2007; Saraç ve Özdemir, 2003; Şahin, 2013).

Değişkenler İçin Kontrol Kartları

Proses çıktısı sayısal bir ifade ile ölçülebiliyorsa değişkenler için kontrol kartlarından söz edilebilir. Değişkenler için hazırlanan kontrol kartlarının içinde en fazla kullanılanı X-R kontrol kartlarıdır. Bu kartlar, proses karakteristikleri sayısal olarak ifade edilebilen değişkenler için kullanılır. Madencilik faaliyetlerinde genellikle kalite verileri ölçülebilir özelliktedir ve bu yüzden X-R kontrol kartlarının kullanımı daha uygundur (Akın, 1996). Kontrol kartları çizilirken verilerin işaretlenmesi rasyonel örneklemeye göre yapılır. Bu örneklemede belirli bir sayısı (m) ve büyüklüğü (n) olan alt gruplar oluşturulur. Alt grup örnekleri prosesten belirli bir zaman dilimi içindeki belirli bir anda veya zaman diliminin farklı anlarında örneklenebilir (Besterfield, 2004).

Bir kontrol grafiğinin oluşturulması için değişkenin cinsi ne olursa olsun, belirlenmesi gereken 3 temel eleman ise orta çizgi (OÇ), alt kontrol limiti (AKL) ve üst kontrol limitidir (ÜKL). Kontrol grafikleri çizilirken her bir alt grubun ortalamasının ($\overline{X}$) ve değişim aralığının (R) bulunmasında Eşitlik 1'deki formüller kullanılır.

$$\overline{X} = \frac{X1 + X2 + X3 + \ldots\ldots + Xn}{n} = \frac{1}{n}\sum X ; \quad R = X_{enbüyük} - X_{enküçük} \tag{1}$$

Alt grup ortalaması ve değişim aralığı belirlendikten sonra, alt grup ortalamalarının genel ortalaması ($\overline{\overline{X}}$) ile alt grup değişim aralıklarının ortalaması Eşitlik 2'de verilen formüllere göre hesaplanır.

$$\overline{\overline{X}} = \frac{\overline{X1} + \overline{X2} + \overline{X3} + ... + \overline{Xm}}{m} \quad ; \qquad \overline{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_m}{m} \tag{2}$$

Formüllerde; m alt grup sayısını, n alt grup büyüklüğünü, X ise her bir örnekleme değerini ifade etmektedir. Eşitlik 1 ve 2'deki formüller yardımıyla $\overline{\overline{X}}$ ve $\overline{R}$ hesaplandıktan sonra X-R kontrol kartlarının çizimi için gerekli olan orta çizgi (OÇ), alt kontrol limiti (AKL) ve üst kontrol limitleri (ÜKL) Eşitlik 3 ve 4'de verilen formüllere göre hesaplanır (Akın, 1996; Ankara ve Bilir, 1995; Arslan ve Bayat, 2012; Burr, 2005; Devor vd., 1992; Grant ve Leavenworth, 1996; Juran ve Gryna, 1993; Mongomery, 2007; Ryan, 2011).

$$\text{ÜKL} = \overline{\overline{X}} + A_2\overline{R}; \qquad \text{OÇ} = \overline{\overline{X}}; \qquad \text{AKL} = \overline{\overline{X}} - A_2\overline{R} \tag{3}$$

$$\text{ÜKL} = D_4\overline{R}; \qquad \text{OÇ} = \overline{R}; \qquad \text{AKL} = D_3\overline{R} \tag{4}$$

Proses Yeterlilik Analizi

İstatistiksel kalite kontrol, ürün çevriminin imalata öncelik veren aktivitelerinin geliştirilmesi, değişkenliğin ölçülmesi, bu değişkenliğin ürün ihtiyaçları veya spesifikasyonlara uygunluğunun analizi de dahil olmak üzere değişkenliğin azaltılmasında önemli rol oynamaktadırlar. Bu aşamada proses yeterlilik analizi, prosese ait ölçülebilir bir kalite karakteristiğinin belirlenen hedef değer, Alt Spesifikasyon Limiti (ASL) ve Üst Spesifikasyon Limiti (ÜSL)'ne göre nasıl bir merkezlenme ve saçılım gösterdiğini inceler. Proses yeterlilik analizinin amacı; proses ortalaması ve standart sapmasını, spesifikasyonlar ile ilişkilendirerek prosesin tüketici isteklerine uygun ürün oluşturma yeteneğini değerlendirmektir. İşletmelerin ulaşmak istediği amaç; proses ortalamasının hedef değer üzerinde ve yayılımın spesifikasyonlar içerisinde, mümkün olan en küçük değerde oluşmasıdır. Bu aşamada dikkate alınan değerler C_p ve C_{pk} indisleridir. C_p indisi, şartname limitleri ile proses kontrol limitleri arasındaki ilişkiyi gösterir. C_{pk} indisi ise, proses ortalamasının hedef değere göre konumunu ve spesifikasyon limitleri arasındaki konumunu göstermektedir ve bu indisler Eşitlik 5'deki gibi hesaplanır. Prosesin standart sapmasının bilinmediği durumlarda standart sapma Eşitlik 6'ya göre hesaplanır.

$$C_p = \frac{\text{ÜSL} - \text{ASL}}{6\sigma} \quad C_{pk} = \min\left(\frac{\text{ÜSL} - \overline{\overline{X}}}{3\sigma}; \frac{\overline{\overline{X}} - \text{ASL}}{3\sigma}\right) \tag{5}$$

$$\sigma = \frac{\overline{R}}{d_2} \qquad \text{veya} \quad \sigma = \frac{\overline{S}}{c_4} \tag{6}$$

Eşitlik 5'de $\overline{\overline{X}}$ bu çalışmada günlük alınan 3 örneğin ortalamalarının ay sonundaki ortalaması olarak ifade edilebilir. Proses yeterlilik analizinde geçerli olan varsayımlardan biri prosesin istatistiksel olarak kontrol altında olmasıdır. Bu aşamada yaygın olarak kontrol grafikleri kullanılmaktadır. Kalite karakteristiğinin ölçülebilir değişken olarak tanımlanabildiği durumlarda bu karakteristiğin ortalaması ve değişkenliği sürekli olarak kontrol edilmelidir (Aydın vd., 2010; Kolarik, 1995; Montgomery, 2007; Vapur vd., 2005; Zeyveli ve Selalmaz, 2008). Yeterlilik indisleri hesaplandıktan sonra yorum yapılmalıdır. C_p ve C_{pk} değerlerine göre sürecin yeterliliği hakkında karar vermede Çizelge 1'de verilen değerler kullanılır (Işığıçok, 2012).

Çizelge 1. C_p ve C_{pk} indisleri karar noktaları

İndisler	Karar noktası
$C_p>1,33$	Proses spesifikasyonu karşılar.
$1<C_p<1,33$	Proses spesifikasyonu karşılamaz. Proses kontrolü sürdürülmelidir.
$C_p<1$	Proses yetersizdir. İyileştirmeler yapılmalıdır.
$C_{pk}>1$	Verilerin tamamı spesifikasyon sınırı içindedir.
$C_{pk}=1$	Verilerin bir kısmı spesifikasyonlara yaklaşır.
$0<C_{pk}<1$	Proses ortalaması spesifikasyon sınırı içindedir.
$C_{pk}=0$	Proses ortalaması spesifikasyon sınırına eşittir.
$C_{pk}<0$	Proses ortalaması spesifikasyon sınırı dışındadır.

Yukarıdaki formüllerde; A_2, D_3, D_4 ve d_2 doğal toleranslar olarak tanımlanan ±3a değerlerinin normal dağılım eğrisi üzerinde ifade edilmesinden elde edilmiş sabitler olup, alt ve üst kontrol limitlerinin ve proses yeterlilik indislerinin hesaplanmasında Çizelge 2'deki sabit değerler kullanılır (Elevli ve Behdioğlu, 2006).

Çizelge 2. X-R kontrol kartları için katsayılar

Alt grup sayısı (n)	A_2	D_3	D_4	d_2
2	1,880	0	3,267	1,128
3	1,023	0	2,574	1,693
4	0,729	0	2,282	2,059
5	0,577	0	2,115	2,326

Pareto Analizi

Pareto analizi maliyet ve hata analizi için kullanılan basit bir yöntemdir. İşletmelerde doğru ve hızlı bir şekilde karar alabilmek genellikle zordur. Pareto analizi verileri tasnif ederek karar alma işini kolaylaştırır. Söz konusu tasnif için pareto grafikleri kullanılır. Bu yöntemle değişik parçalar için üretim hatalarının direk işçilik giderlerinin veya maliyetin yüzde ne kadarını oluşturduğu görülebilmektedir. Pareto analizi İtalyan ekonomist Vilfredo Pareto tarafından 1900'lü yılların başlarında ekonomik olaylar için uygulanmış, daha sonra Dr. Joseph M. Juran tarafından kalite kontrolde de uygulanmıştır. Pareto analizi bir problemi oluşturan nedenleri önem derecesine göre sıralayarak, önemlileri önemsizlerden ayırt etmeye ve dikkatleri önemli nedenler üzerinde toplamaya yarar. En önemli unsurlar, daha az önemli olanlardan ayrılarak, en az çaba ile en büyük iyileştirme elde edilir. Pareto grafiğini çizmek için belirli bir zaman aralığında ve düzenli bir şekilde toplanıp çetele tablosuna işlenen verilerden yararlanılmaktadır. Belirlenen nedenler önem derecelerine göre veya miktarlarına göre sıralanır.

Belirlenen nedenler yatay eksene eşit aralıklarla önem sırasına veya miktara göre yerleştirilir, pareto analizi yapılabilmesi için ürün üzerinde çıkan hataların bir listesi yapılır ve belirli bir alan içerisinde hatalarla ilgili veriler toplanır. Bunların toplam hata yüzdesi hesaplanır. Azalan yüzdelere göre bu hata yüzdeleri sıralanır. Bu yüzde değerleri toplanarak birikimli pareto grafiği çizilir. Pareto grafiklerinin yorumlanmasında ise; pareto grafiği bize dikkat ve çabalarımızı gerçekten önemli problemler üzerine yöneltmemizde yardımcı olur. En uzun sütun üzerinde çalışmakla genelde daha küçük sütun üzerinde çalışmaktan daha fazla kazanç elde ederiz. Fakat her zaman en büyük sütun en büyük maliyeti göstermez. Hata oranı esas alındığında önemsiz görülen bir sorun, grafik "maliyet" faktörüne göre yeniden düzenlendiğinde bir numaralı problem olarak görülebilir. Ayrıca o problemin çözümündeki en büyük hatanın maliyeti en uzun sütundan sonraki sütun olabilir. Pareto grafikleri fabrikada meydana gelen duruşların sebeplerini araştırmada, stok kontrolünde, enerji tasarrufunda, güvenlik, verimlilik, pazarlama, satın alma, dağıtım, satış analizi, atık azaltma, ürün çeşitliliği, malzeme temini ve başarıyı izlemek gibi çok çeşitli alanlarda kullanılarak çok faydalı sonuçlar vermektedir (Kobu, 1987; Devar, 1989; Özcan, 2001; Ulutürk, 1999).

SONUÇLAR

Bu çalışmada Konya'daki bir hazır beton firmasının ürettiği C20 sınıfı hazır betonun 50 günlük basınç dayanım verileri kullanılarak kalite kontrol grafikleri ve proses yeterlilik analizi oluşturulmuş, pareto analizi uygulanarak istatistiksel proses kontrolü yapılmıştır. Bu amaçla tesiste üretilen hazır betondan her biri 25*25*25 cm boyutlarındaki beton küp numuneleri 50 gün boyunca her gün 3'er adet olmak üzere alınmış ve 50 gün süre ile kür işlemine tabi tutulmuştur. Bu süre sonunda beton örnekleri TS3323'e uygun bir şekilde basınç dayanım testleri yapılmıştır. Numunelerin ortalama basınç dayanımları Çizelge 3'de verilmiştir.

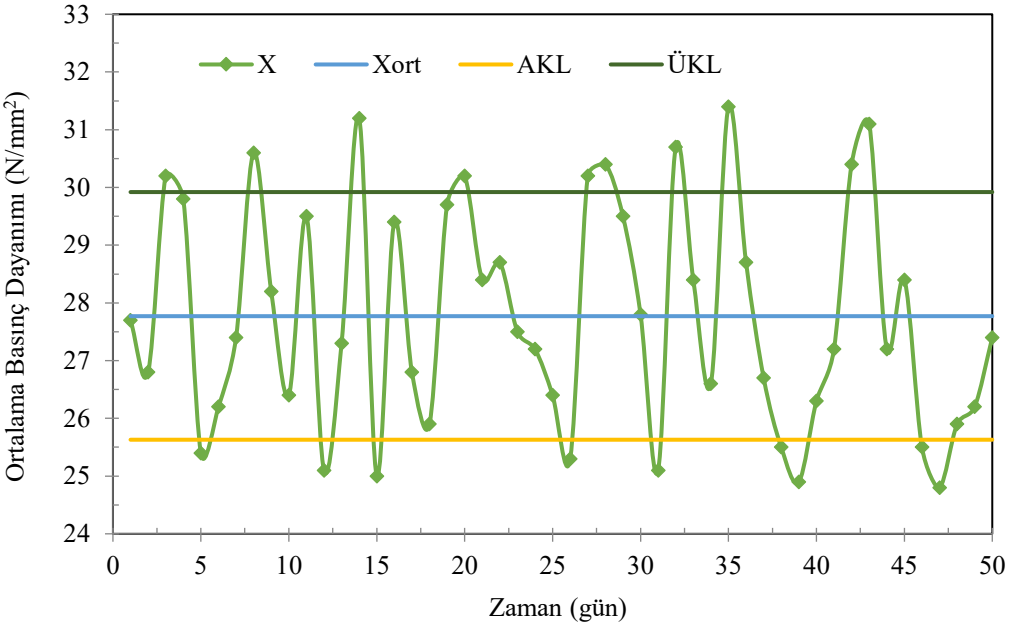
Çizelge 3. Küp beton numunelerinin ortalama basınç dayanımları

Zaman (gün)	Basınç dayanımı (N/mm^2)	R	Zaman (gün)	Basınç dayanımı (N/mm^2)	R
1	27,7	0	26	25,3	1,1
2	26,8	0,9	27	30,2	4,9
3	30,2	3,4	28	30,4	0,2
4	29,8	0,4	29	29,5	0,9
5	25,4	4,4	30	27,8	1,7
6	26,2	0,8	31	25,1	2,7
7	27,4	1,2	32	30,7	5,6
8	30,6	3,2	33	28,4	2,3
9	28,2	2,4	34	26,6	1,8
10	26,4	1,8	35	31,4	4,8
11	29,5	3,1	36	28,7	2,7
12	25,1	4,4	37	26,7	2,0
13	27,3	2,2	38	25,5	1,2
14	31,2	3,9	39	24,9	0,6
15	25,0	6,2	40	26,3	1,4
16	29,4	4,4	41	27,2	0,9
17	26,8	2,6	42	30,4	3,2
18	25,9	0,9	43	31,1	0,7
19	29,7	3,8	44	27,2	3,9
20	30,2	0,5	45	28,4	1,2
21	28,4	1,8	46	25,5	2,9
22	28,7	0,3	47	24,8	0,7
23	27,5	1,2	48	25,9	1,1
24	27,2	0,3	49	26,2	0,3
25	26,4	0,8	50	27,4	1,2

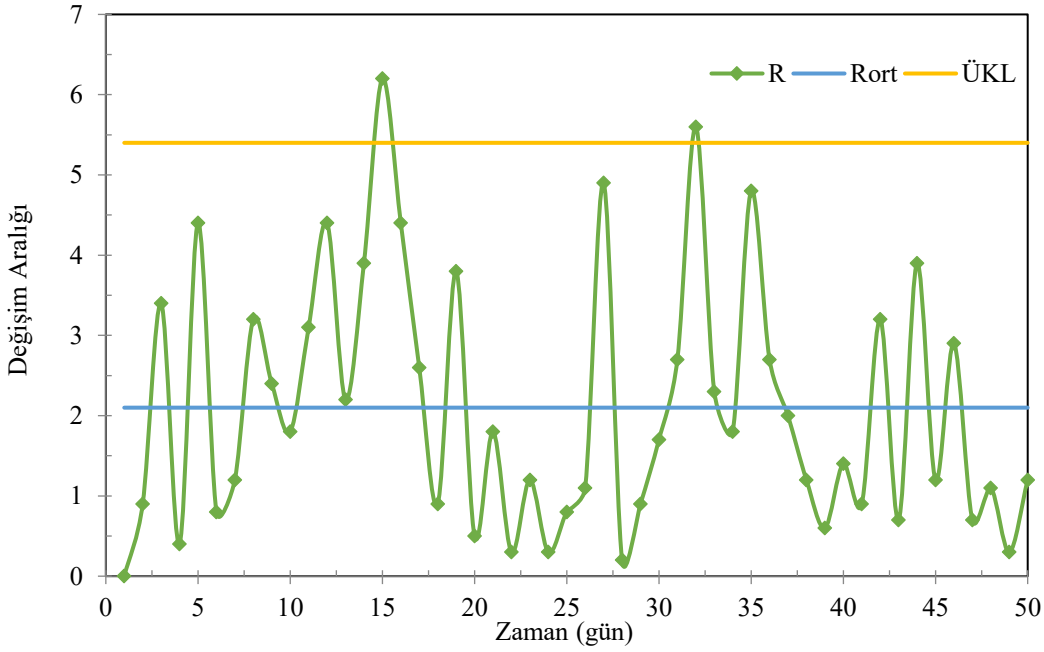
Tesisten alınan veriler ile yapılan proses yeterlilik analizi sonucu $1,33>C_p$, $C_{pk}>1$ olduğundan dolayı proses yeterliliği orta seviyededir ve kabul edilebilir. Ancak bu durum bize tesisin gerekli düzenleme ve iyileştirme çalışmalarına ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Hazır beton fabrikasından alınan basınç dayanım değerleri Çizelge 4'de verilen ve TSE tarafından kabul edilen sınır değerlerin içerisinde kalmaktadır. Hazır beton fabrikasından alınan basınç dayanım değerleri analiz edilerek gerekli hesaplamalar yapılmış ve X-R kontrol kartları çizilmiştir (Şekil 2, 3).

Çizelge 4. Beton sınıfları ve basınç dayanımları

Beton sınıfı	Eşdeğer küp basınç dayanımı (N/mm^2)
C16	20
C18	22
C20	25
C25	30
C30	37
C35	45



Şekil 2. Hazır beton fabrikası basınç dayanımı değerleri için X kontrol kartı



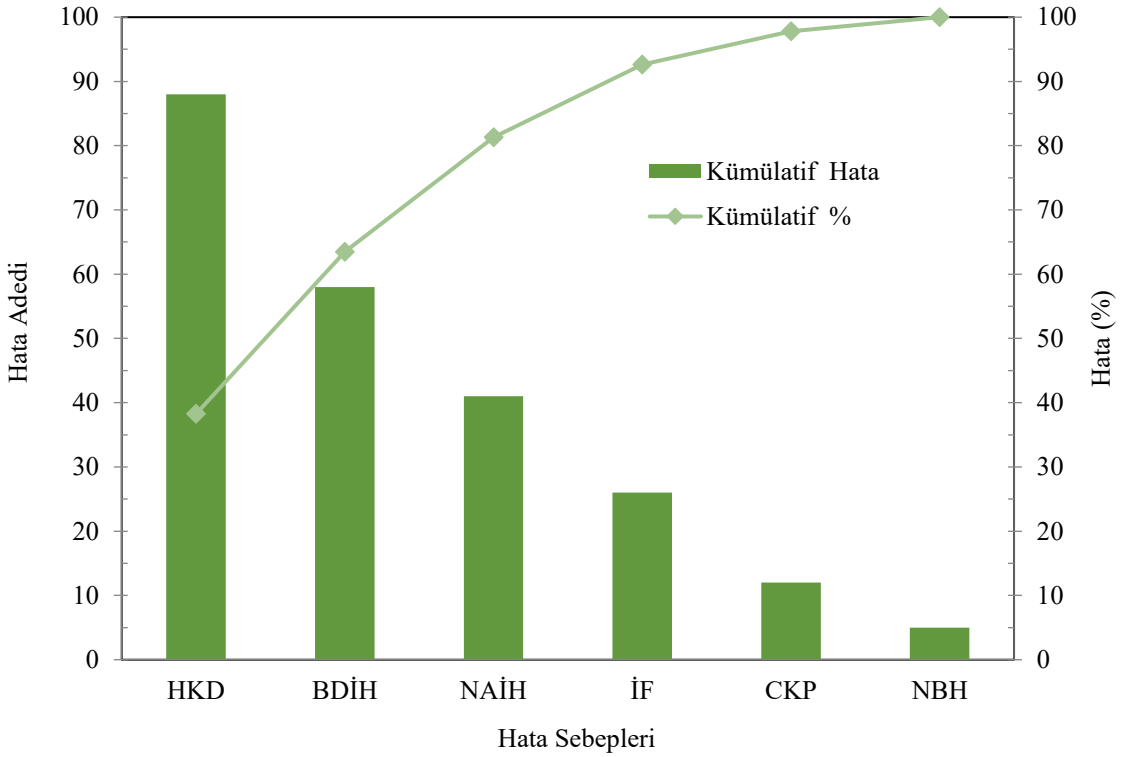
Şekil 3. Hazır beton fabrikası basınç dayanımı değerleri için R kontrol kartı

Şekil 2 ve 3 incelendiğinde basınç dayanım değerleri çok fazla düzensizlik arz etmektedir. Bu durum bize tesiste belirli hataların mevcut olduğunu göstermektedir. Bu hataların hepsi birden ortadan kaldırılamayacağı için daha fazla önem arz eden bazı sebeplere öncelik vermek gerekmektedir. Hangi sebeplere öncelik verilmesi gerektiğini tespit etmek için pareto analizinden faydalanılır. Hazır beton fabrikasından alınan bilgiler doğrultusunda meydana gelen hatalar ve bunların tanımlamaları Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Hazır beton fabrikası kalite hatalarının kontrol tablosu

Hata sebepleri	Hata adedi	%
Hammadde kalitesindeki değişimler	88	38,26
Beton dökümündeki işçilik hataları	58	25,22
Numune alımındaki işçilik hataları	41	17,83
İklimsel faktörler	26	11,30
Cihazın kalibrasyon problemleri	12	5,22
Nedeni belirlenemeyen hatalar	5	2,17
Toplam	230	100

Pareto analizi kullanılarak hazır beton tesisinde beton kalitesini etkileyen hataların sebepleri de istatistiksel olarak incelenmiştir. Oluşturulan pareto grafiği Şekil 4'de verilmiştir. Buradaki amaç beton kalitesine etki eden ve giderilebilmesi en mümkün olan en önemli hataları tespit ederek bu hataların giderilmesini sağlamaktır. Çizelge 5 ve Şekil 4'den de görüldüğü gibi hammadde kalitesindeki değişimlerden kaynaklanan hatalar, beton dökümü sırasındaki işçilik hataları ve numune alımındaki işçilik hataları genel hataların yaklaşık olarak %82'sini oluşturmaktadır. Eğer bu üç hatanın nedenleri iyi analiz edilip minimize edilirse veya tamamen giderilebilirse beton kalitesi artacak ve istenen süreklilik sağlanacaktır.



Şekil 4. Hazır beton fabrikasındaki hataların pareto grafiği (HKD: Hammadde kalitesindeki değişimler, BDİH: Beton dökümündeki işçilik hataları, NAİH: Numune alımındaki işçilik hataları, İF: İklimsel faktörler, CKP: Cihazların kalibrasyon problemleri, NBH: Nedeni belirlenemeyen hatalar.)

ÖNERİLER VE TARTIŞMA

Konya'daki bir hazır beton firmasının ürettiği C20 sınıfı hazır betonun basınç dayanımı değerleri baz alınarak yapılan istatistiksel kalite kontrol çalışması ile çizilen XR kontrol grafikleri sonucunda beton basınç dayanım değerlerinin çok fazla düzensizlik gösterdiği ve alt-üst kontrol limitlerini yer yer aştığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak yapılan proses yeterlilik analizi verilerinin sonuçlarına göre de $1<C_p<1,33$ ve $C_{pk}>1$ olduğundan dolayı tesisin proses yeterliliği orta seviyededir ve kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Bu analiz sonuçları göz önüne alındığında tesiste belirli hataların var olduğu ve bu hataların mümkün olduğunca tespit edilerek hızlı bir şekilde giderilmesi gerektiği görülmektedir. Ancak bu hataların hepsinin birden ortadan kaldırılamayacağı aşikar olduğundan daha önemli görülen sebeplerin tespit edilip giderilmeye çalışılması gerekmektedir. Bu amaçla da pareto analizi yapılmış ve tesisteki hataların yaklaşık olarak %80'inin hammadde kalitesindeki değişimlerden ve genel işçilik hatalarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu nedenle tesise beslenen hammaddenin stabil hale getirilmesi veya hammadde kalitesinin tesise beslenmeden önce gerekli analizleri yapılarak iyileştirilmelidir. Ayrıca işletmede çalışan işçilerin iş kollarına göre işe başlamadan önce ve sonrasında düzenli olarak eğitime tabi tutulmaları sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

Akın, B. (1996). İşletmelerde istatistik proses kontrol, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, Türkiye.

Ankara, H., ve Bilir, K. (1995). Kriblaj tesisinde kalite denetimi. Madencilikte Bilgisayar Uygulamaları Sempozyumu, (syf. 235-240). İzmir, Türkiye.

Ankara H., Yerel S., and Konuk A. (2007). Determination of plate losses and parallelisms with shewhart control charts. The Sri Lanka Geotechnical Society's First International Conference on Soil & Rock Engineering, (pp. 421-430). Colombo, Sri Lanka.

Arslan, V., ve Bayat, O. (2012). Çukurova bölgesindeki kömür briketleme fabrikalarına istatistiksel kalite kontrol uygulaması. Türkiye 18. Kömür Kongresi, (syf. 111-122). Zonguldak, Türkiye.

Aydın, Ö., Pakdil, F., ve Aydın, Ö. (2010). Kömür kalorisi değişkenliğinin azaltılmasında proses yeterlilik analizi. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23, 2, 1-17.

Bayat, O., and Arslan, V. (2004). Statistical analysis in Turkish chromite mining. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 33, 322-327.

Besterfield, D.H. (2004). Quality control. Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.

Burr, J.T. (2005). Elementary statistical quality control (2nd edition). Marcel Dekker Press, New York, USA.

Cook, D.F., Zobel, C.W., and Wolfe, M.L. (2006). Environmental statistical process control using an augmented neural network classification approach. *European Journal of Operational Research*, 174, 3, 1631-1642.

Devar, D.L. (1989). Kalite çemberleri eğitim el kitabı. Şişecam A.Ş. Yayınları, İstanbul, Türkiye.

Devor, R.E., Chang, T., and Sutherland, J.W. (1992). Statistical quality design and control. Macmillan Publishing Company, New York, USA.

Elevli, S., ve Bedhioğlu, S. (2006). İstatistiksel proses kontrolü teknikleri ile kömür kalitesindeki değişkenliğin belirlenmesi. *Madencilik Dergisi*, 45, 3, 19-26.

Grant, E.L., and Leavenworth, R.S. (1996). Statistical quality control. Mcgraw-Hill Company, New York, USA.

Işığıçok, E. (2012). Toplam kalite yönetimine bakış açısıyla istatistiksel kalite kontrol (ikinci baskı), Ezgi Yayınevi, Bursa, Türkiye.

Juran, J.M., and Gryna, F.M. (1993) Quality planning and analysis. Mcgraw-Hill Company, New York, USA.

Kobu, B. (1987). Endüstriyel kalite kontrol (ikinci baskı). İstanbul Üniversitesi Yayınları, No: 3425, İstanbul, Türkiye.

Kolarik, W.J. (1995). Creating quality industrial engineering series. Mcgraw-Hill Company, New York, USA.

Montgomery, D.C. (2007). Introduction to statistical quality control (4th edition). John Wiley and Sons Inc., New Jersey, USA.

Özcan, S. (2001). İstatistiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi ve çimento sanayinde bir uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2, 2, 151-174.

Ridley, D., and Duke, D. (2007). Moving-window spectral model based statistical process control. *International Journal of Production Economics*, 105, 492-509.

Ryan, T.P. (2011). Statistical methods for quality improvement (3rd edition). John Wiley and Sons Inc., New Jersey, USA.

Saraç, S., ve Özdemir, G. (2003). Mermer fayanslarının boyutlandırmasında istatistiksel kalite kontrolü. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, (syf. 15-26). Afyon, Türkiye.

Şahin, O. (2013). İstatiksel proses kontrolünde kontrol grafiklerinin kullanımı ve tekstil sanayinde bir uygulama. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10, 53-75.

Ulutürk, S. (1999). İstatistiksel kalite kontrol teknikleri. Doktora Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Usta, H. (2005). Hazır beton sektör araştırması. İstanbul Ticaret Odası Yayınları, İstanbul, Türkiye.

Vapur, H., Bayat, O., ve Akyol, F. (2005). Eti Gümüş A.Ş. liç prosesinde istatistiksel proses kontrolü uygulaması. 19. Uluslararası Madencilik Kongresi, (syf. 347-356). İzmir, Türkiye.

Yücel, M. (2007). Mükemmelliğe giden yolda altısigma modeli. 8. Türkiye Ekonometri ve İstatistik Kongresi, (syf. 1-15). Malatya, Türkiye.

Zeyveli, M., ve Selalmaz, E. (2008). İstatistiksel proses kontrol tekniklerinin zincir imalatı yapan bir işletmede uygulanması. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Sempozyumu, (syf. 36-45). Elazığ, Türkiye.

TRAKYA BÖLGESİNDE GALERİ HAZIRLIK ÇALIŞMALARININ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF THE GALLERY PREPARATION WORKS IN THE TRAKYA REGION

O. Yazıcı, S. Sarımehmet*, C. Yılmaz, T. Parlak, B. Bozdağ

Kiremitçiler Grup-Özşen Maden İşletmeleri
*((*Sorumlu yazar: sadiksarimehmet@ozsenmadencilik.com.tr)*

ÖZ

Yüksek yatırım gerektiren madencilik sektöründe; verimliliği arttırmak, hazırlık ve işletme maliyetlerini düşürmek için makine ile kazı kaçınılmaz hale gelmiştir **(**Kahraman ve Erarslan,2011). Son yıllarda, özellikle hazırlık çalışmalarında galeri açma makinelerinin kullanımı işletme veriminin artmasında ciddi ölçüde katkı sağlamıştır. Hazırlık çalışmalarında kullanılan kazı ve nakliyat ekipmanları, uygulanan tahkimat sistemi gibi faktörler işlem süresini ve üretimi etkilemektedir. Bu çalışmada, tam mekanize kazı sisteminin kullanıldığı Özşen Maden İşletmeleri kapalı kömür ocağında hazırlık çalışmalarının ilerleme hızları incelenmiştir. Bu verilere göre her yıl genel ilerleme hızı artmıştır. Yıllar içerisinde kazanılan saha tecrübesi ve kalifiye personel sayısının artması en büyük etkendir. Ayrıca tecrübelere göre düzenlenen ekipman seçimleri de etkili olmuştur. Saha da ilerleme kömür içerisinde hızlı iken, yan kayaç (Kiltaşı,kumtaşı, vb.) içerisinde yapılan hazırlık çalışmalarında daha düşüktür. Bu arınlar da ilerleme hızlarının artırılması yöntem değişikliğiyle mümkün olabilir. Yan kayaç içerisinde yapılan hazırlık çalışmalarının performansını artırmak için araştırma ve gözlem yapılmaya devam edilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Galeri açma makinesi, mekanize kazı, verimlilik, kömür

ABSTRACT

In the mining sector, which requires high investment; Excavation with machinery has become inevitable in order to increase productivity and reduce preparation and operating costs. In recent years, the use of gallery opening machines, especially in the preparatory work, has contributed significantly to the increase of operating efficiency. Factors such as the excavation and transportation equipment used in the preparation works, the support system applied affect the processing time and production. In this study, the progress rate of the preparatory works in the closed coal mine of Özşen Maden İşletmeleri, where a fully mechanized excavation system is used, was investigated. According to these data, the overall rate of progress has increased every year. The most important factor is the field experience gained over the years and the increase in the number of qualified personnel. In addition, equipment selections organized according to experience were also effective. While the progress in the field is fast in coal, it is lower in the preparatory work done in the country rock (claystone, sandstone, etc.). Increasing the speed of these bees can be possible with a change in method. Research and observations continue to improve the performance of the preparatory work in the country rock.

Keywords: Roadway cutting machine, mechanized excavation, productivity, coal

GİRİŞ

Ülkemizde yer altı kömür madenciliğinde ilk olarak 1977 yılında denemelerine başlanılan uzun ayak madencilik yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzun ayak kömür madenciliğinde teknolojik gelişmelere bağlı olarak güvenli ve yüksek üretim kapasitelerine sahip olması tam mekanize sistem uygulama yatırımları giderek arttırmıştır. Tam mekanize yöntemde kömür üretimi hızı, hazırlık çalışmalarının ve nakliye ekipmanlarının performansı ile doğrudan ilişkilidir.

Yeraltında hazırlık çalışması, maden cevherini çıkarmak için belirlenen yönteme göre yeraltında ki galerilerin (yolların) açılması işlemlerinin tümünü kapsar. Yer altında yapılan hazırlık işleri, yapılan işin amacına göre ana yollar, taban yolları, tavan yolları ve kılavuzlar gibi farklı birçok adlandırmalar yapılmaktadır.

Tam mekanize sistem ile kömür üretiminin aksamadan devam edebilmesi için hazırlık çalışmalarının ilerleme hızları önem arz etmektedir. İlerleme hızına kazı-nakliyat sisteminde kullanılan ekipmanlar, jeolojik-jeomekanik koşullar, yapısal unsurlar (fay, antiklinal, vb.), hidrojeolojik koşullar ve tahkimat sistemi gibi faktörler etki etmektedir. Yer altı hazırlık çalışmalarında ilerleme hızlarında en büyük etken arında (aynada) kazı ve yükleme işini yapabilen galeri açma makineleridir. Ülkemizde galeri açma makinesi (GAM) ilk olarak 1977 yılında Türkiye Kömür İşletmelerine bağlı olarak OAL işletmesinde kullanılmıştır (Eyyüboğlu ve Bölükbaşı, 2004).

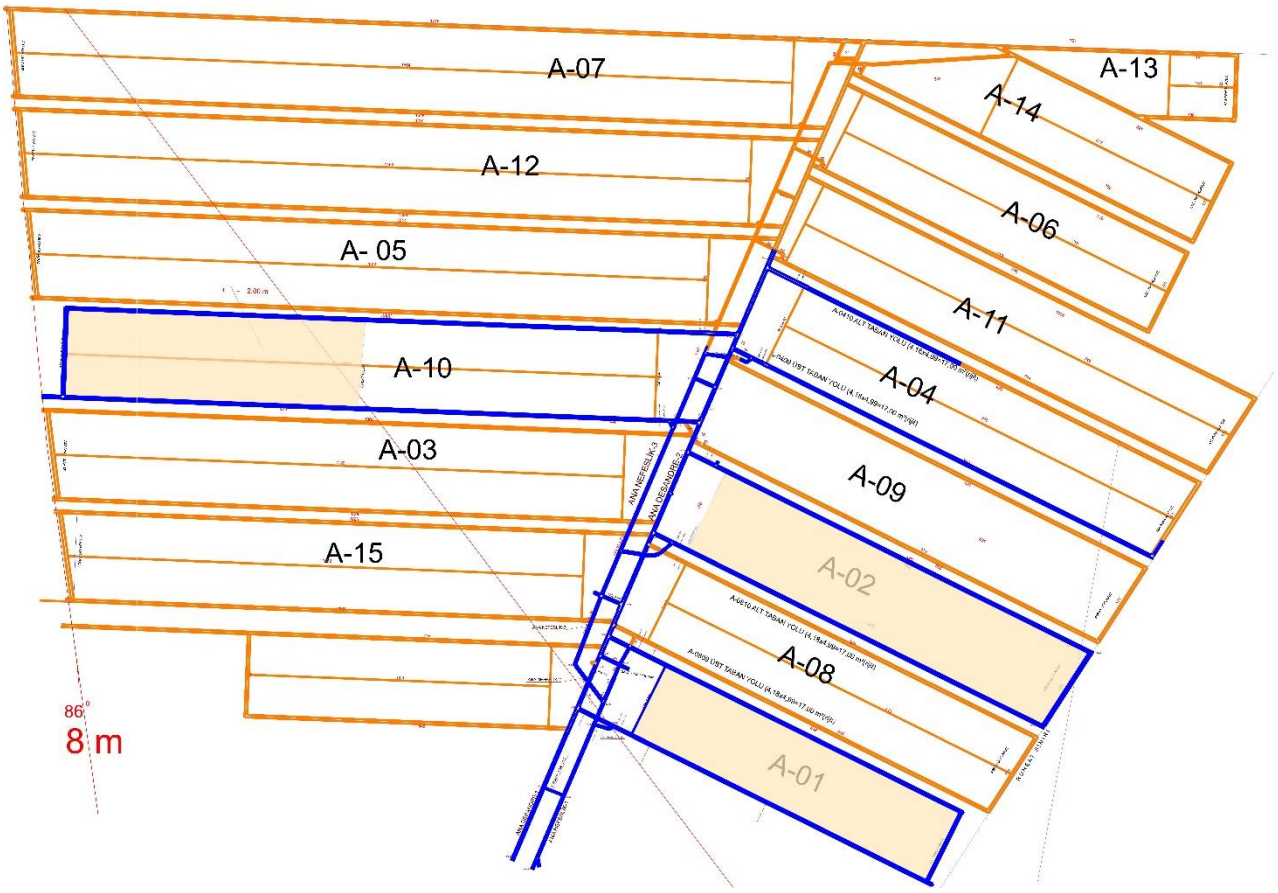
İŞLETME VE BÖLGE BİLGİLERİ

Trakya (Ergene) havzası, Marmara Bölgesi içerisinde yer alan Trakya Alt Bölgesi'nde bulunmaktadır. Bu havzanın kömür ve hidrokarbon potansiyeli nedeniyle, ekonomik yönden ülkemizin önemli enerji havzalarından birisidir. Havzadaki kömür arama çalışmaları, Malkara-Keşan-Uzunköprü bölgesinde potansiyel kömür damarlarını arayan Dr.R.F.Lebküchner tarafından yapılmış olup, rapor ve haritalar MTA arşivlerinde yer almaktadır (Şengüler, 2019). Buna göre bölgedeki kömür oluşumları Oligosen yaşlı sarı, gri yeşil renkli ince-orta-kalın ve belirgin tabakalanmalı kumtaşı, silttaşı, kiltaşı ardalanmasından meydana gelen birim yer yer tüf ara katkılı ve nadiren çakıltaşı mercekli olup zengin kömür yatakları ile tanımlanan Danışmen Formasyonu içerisinde yer almaktadır (Şengüler vd., 2000).

Güney Trakya bölgesinde (Uzunköprü-Keşan-Malkara) birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar neticesinde 11 adet kömür potansiyeline sahip damar tanımlanmıştır. Bölgedeki kömürler, genel olarak limnik ortamda ve ASTM standartlarına göre alt bitümlü kömür olarak sınıflanmaktadır. Lebküchner, Danışmen Formasyonu içerisinde yer alan 11 adet damarı, stratigrafik olarak en altta yer alan kömür için 1 numara, üstüne gelen diğer kömür damarlarına 2, 3,.11 olarak numaralandırma işlemi ile tüm damarları adlandırmıştır. Trakya bölgesinde çok bilinen Harmanlı Damarı olarak nitelendirilen ve 4 numaralı damar olarak adlandırılmış kömür~~ün~~ zenginleştirme işlemi ile ülkenin her yerinde evsel ve endüstriyel tüketimlerde kullanılmaktadır. Çalışılan bölgede; kalınlık, yüksek kalori, düşük kükürt, yanal ve düşey yöndeki devamlılıkları dikkate alındığında birçok damar içerisinden Özşen Maden İşletmeleri tarafından da üretimi yapılan 4 numaralı kömür damarı öne çıkmaktadır. Ruhsat sahasında mevcutta açık işletme ve yeraltı işletmesi 4 numaralı kömür damarında çalışmaktadır.

Çalışılan 4 numaralı kömür damarını, Özşen Maden İşletmeleri olarak kendi içerisinde; Şeritli KM, tavan kiltaşı, KM-2, ara kesme, KM-1 ve taban kiltaşı olarak adlandırılmıştır. Kaynak ve rezerv hesaplamalarında kömür damarı KM-1 tabanı ile KM-2 tavanı arasında değerlendirilmiştir. Ruhsat alanı hedeflenmiş 4 numaralı kömür damarı altında bulunan damarların da doğrultuları ve eğimleri genellikle birbirine paralel olup farklı kalınlıktadırlar.

Sahamız içerisinde 2016-2020 yılları arasında 122 adet toplamda 12,000 m arama sondajı yapmıştır. Çalışılan 4 numaralı damar ve bu damarın altında bulunan 3, 2 ve 1 numaralı damarların tespiti için 2020-2023 yılları arasında 72 adet toplamda 10,000 m arama sondajı yapılmış ve arama sondaj çalışmalarına devam edilmektedir. Yapılan sondaj çalışmaları baz alınarak yapısal unsurlar yönünden farklı doğrultu, eğimli ile ters fay ve/veya normal fayların farklı atım miktarları etkisinde olduğu tespit edilmiş ve tespit edilen fayların oluşumuna göre planlama çalışmalarında kömür bloklara (A, B, C, D ve E) ayrılmıştır (Kiremitçiler, 2023).



Şekil 1. A ve B blokta planlanan pano tasarım planı (Kiremitçiler, 2023)

Üretim Çalışmaları

İşletmemizde üretimi yapılacak olan kömür, bir ara kesmeyle ayrılan ve KM-1 ve KM-2 olarak adlandırılan iki damar halindedir. Ayak içerisinde üretimi yapılacak kömürün stamp yüksekliği ortalama 3,30 m'dir. Ocak içerisindeki bütün panolarda üretim yöntemi geri dönümlü arkadan göçertmeli tam mekanize uzun ayak sistemi olarak uygulanacaktır.

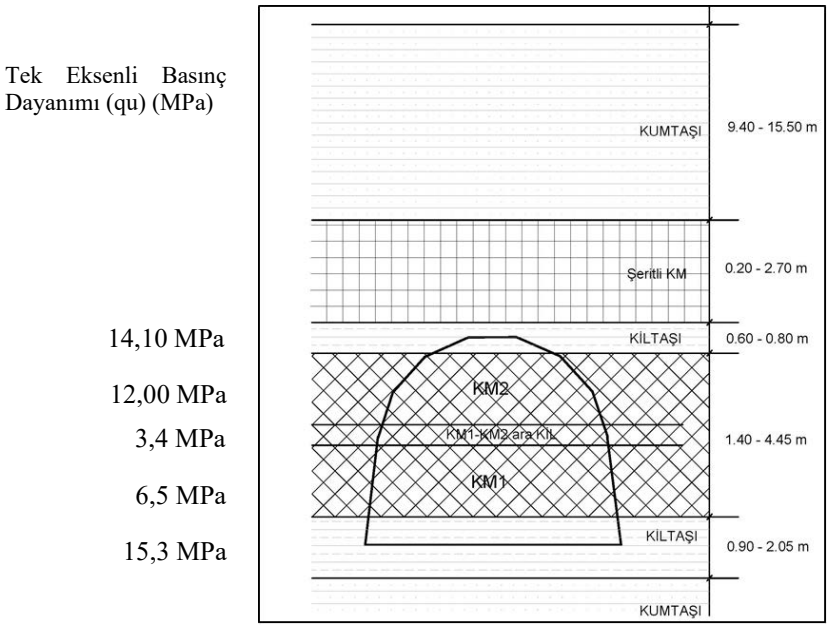
Üretime alınan panolar ile hazırlık aşamasındaki üst taban yolu ve alt taban yolu hazırlık çalışmaları esnasında oluşabilecek baskıları azaltmak amacı ile planda yer alan panoların bir pano bırakılarak atlamalı çalışacak şekilde projelendirilmiştir.

Hazırlık Çalışmaları

Rezerve dönüştürülmüş alan içerisinde oluşturulan termin planına göre hazırlık çalışmalarında galeriler; galeri açma makineleri kullanılarak açılmaktadır. Ana desandre galerisi, ana nefeslik galerisi, kılavuz

galerileri, havalandırma ara bağlantılarının kesitlerine bağlı olarak galeri genişlikleri 3-5 m arasında, galeri yükseklikleri 3-5,5 m arasında B9, B17 ve B22 kesitlerinde çalışmalar yapılmıştır. Galerilerin hazırlanmasında yukarıda yazılı olan kesitlere uygun, yer altı suyu, kazıya maruz kalacak birimlerin tek eksenli basınç dayanımları, kayaçların aşındırma kapasiteleri, çalışma ağırlıklarına bağlı zemine etki ettikleri gerilmeler ile taban taşının taşıma kapasitesine bağlı galeri açma makineleri tercih edilmiştir. Galeri ilerlemelerinde kullanılmak üzere ocağımızda 3 adet EBZ-132 galeri açma makinesi kullanılmaktadır. Galeri açma makinelerinin arkasında monoray hattına bağlı hareketli 30 m köprü bantları yer almaktadır.

Özşen Maden İşletmeleri yeraltı işletme planlaması esnasında jeoteknik sondaj yapılarak uygun seviyelerden karot numunesi alınmış akretide zemin ve kaya laboratuvarında tek eksenli basınç dayanımı deneyi yapılmıştır (Şekil 2) (Kiremitçiler, 2023).



Şekil 2. Jeoteknik sondaja ait jeomekanik değerler ve damar stratigrafik kolonu (Kiremitçiler, 2023)

Açılacak olan galeri kesitleri hazırlık ve üretim dönemlerinde ihtiyaç duyulacak olan makine ekipman boyutuna ve kurulacak nakliye sistemlerine göre değişiklik göstermektedir. Malzeme ve personel nakli hazırlık döneminde tavana asılı raylarda kullanılan dizel monoraylarla yapılmaktadır. Proje dâhilinde Ana Desandre-1 olarak adlandırılan ana nakliye galerisi 22 m² kesitli kavisli bağ kullanılarak ilerlemekte, alt ve üst taban yolları girişleri ve dönüş hatlarında galeri boyunca 22,5 m² ve 27 m² trapez bağlarla galeri genişletmeleri yapılmaktadır. Alt taban yolları ve Üst taban yolları 17 m² ve 22 m² kesit alanlı kavisli bağlar kullanılarak açılmaktadır. Üretim yapılacak kılavuzlar kesit alanı 3x3.8 m^2 trapez olarak açılıp, toplamda 6x3.8 m^2 trapez olacak şekilde genişletmesi yapılmaktadır. Havalandırma bacalarında; ana yollar 12,8 m² kavisli, bağlantı yolları 9 m² trapez bağlar kullanılarak açılmaktadır.

Hazırlık çalışmaları; ilerlemeye bağlı olarak kazı çalışmaları, taban tesviyeleri, tahkimat, tamir-tarama, vantüp bezinin eklenilmesi, malzeme nakliyatı, dizel monorayların ray hattının döşenmesi, bant montajı, boru hatlarının döşenmesi, köprü bantlarının kurulması vb. işlemlerin bütününü kapsar.

Yeraltında, hazırlık ve üretim aşamalarında açılan galerilerin tahkimi ve bu galerilerde deforme olan tahkimatların yenilenmesi için tahkimat çalışması yapılır. Tahkimat sırasında boyunduruk, direk, kelepçe, j kanca, tel örgü, fırça, kama, sıktırma gibi tahkimat elemanları kullanılır.

Kullanılan Ekipmanlar

Galeri Açma Makineleri (G.A.M.)

Hazırlık galeri ilerlemesinde kullanılan, Tablo 1'de teknik özellikleri verilen galeri açma makineleri, paletler üzerine bindirilmiş, kömür ve taş kesebilen, kesici kafalı, yükleme tablası üzerinde dönen pasa toplama kollarına sahip makinelerdir. Kayaç ve kömürü kestikten sonra kırılmış pasayı, yükleme tabla ve kolları ile alarak, gövde içinden geçen zincirli konveyöre, sonra da köprü tipi ve ayrılabilir yükleme konveyörüne (bant konveyöre) yükleyerek hem kazı hem de yükleme işini yapabilirler. Kazı ve yükleme işlemi bitirildikten sonra galeride tahkimat işi yapılırken de yardımcı araç olarak kullanılırlar (Kiremitçiler, 2023).

Tablo 1. Galeri Açma Makinesinin Teknik Özellikleri

MAKİNE ÖZELLİKLERİ	AÇIKLAMA
Toplam Uzunluk	9,18 m
Toplam Genişlik	3 m
Toplam Yükseklik	1,55 m
Kazı Derinliği	131,5 / 290 mm
Max. Kazı Kesiti (Yükseklik / Genişlik) (m)	3,3m-5,0m / 3,3m-4,5m
Kazı Alanı	22,25 m²
Kesici Kafa Hızı	47/23,5 d/d
Makine Toplam Ağırlığı (ton)	46 ton
Kesme Sertliği (Mpa)	50/40 Mpa
Çıkabilecek Max. Eğim (°)	±18 °
Zemin Basıncı (Mpa)	0,13 Mpa
Max. Kesme Derinliği (m)	290 mm
Max. Kazı Kapasitesi (m)	3,2 mm3/ dk
İlerleme Hızı (m/dk)	0-8,5 m/dk
Çalışma Gerilimi (V)	1100 V
Teleskopik Mesafe	500 mm
Motor	132/75 kW-478 ATEX Sertifikalı
Kesici Kafa Motor Gücü (kW)	132 kW
Hidrolik Motor (kW)	75 kW
Toplam Kurulu Güç (kW)	207 kW

Nakliye sistemi

Ocak içerisinde açılan tüm galerilerde malzeme ve personel nakli bağlara asılı olan raylar vasıtası ile kullanılan, Tablo 2 de teknik özellikleri verilen dizel monoray ile yapılmaktadır. Taşınan malzeme ağırlığına göre gerekirse ağır yük krişleri kullanılarak taşınan yük ağırlığı daha geniş alana yayılarak birim alanda asılı olan raylara, zincirlere, keplere daha az yük gelmesi sağlanmaktadır (Kiremitçiler, 2023).

Tablo 2. Dizel monoray teknik özellikleri

MAKİNA ÖZELLİKLERİ	AÇIKLAMA
Max. Güç	81 kW
Yakıt	Dizel
Soğutma	Basınçlı su soğutmalı
Egzost Gazlarındaki Nox Oranı	max. 350 ppm (0,035 %)
Max. Hidrolik Devre Basıncı	32 Mpa
Tahrik Tekeri Çapı	355 mm
Çalışma Sıcaklığı/Nem	0-40° C / 90 %
Max. Çalışma Eğimi	30°
Uzunluğu	8650 mm
Yüksekliği	1425 mm
Genişliği	850 + 40 mm
Ağırlığı	4800 kg
Max. Çekme Kuvveti	80 KN
Max. Hızı	7,2 km/h

Bant Konveyör

Konveyör sistemi, dağıtım ve transferde insan gücünü en aza indiren mekanizmadır. Katı malzemelerin uzun mesafelerde yatay veya eğimli olarak taşınmasında kullanılan en önemli taşıma araçlarıdır. Ocak içerisinde hazırlık amaçlı kullanılan bant konveyörler iki ana gruba ayrılır:

Hazırlık Bant Konveyörleri: Büyük hazırlık ve küçük hazırlık çalışmalarında ilerleme yapılan arından çıkarılan tüvenan cevher ve/veya pasanın ana nakliye bantlarına naklini yapan bant konveyörlerdir.

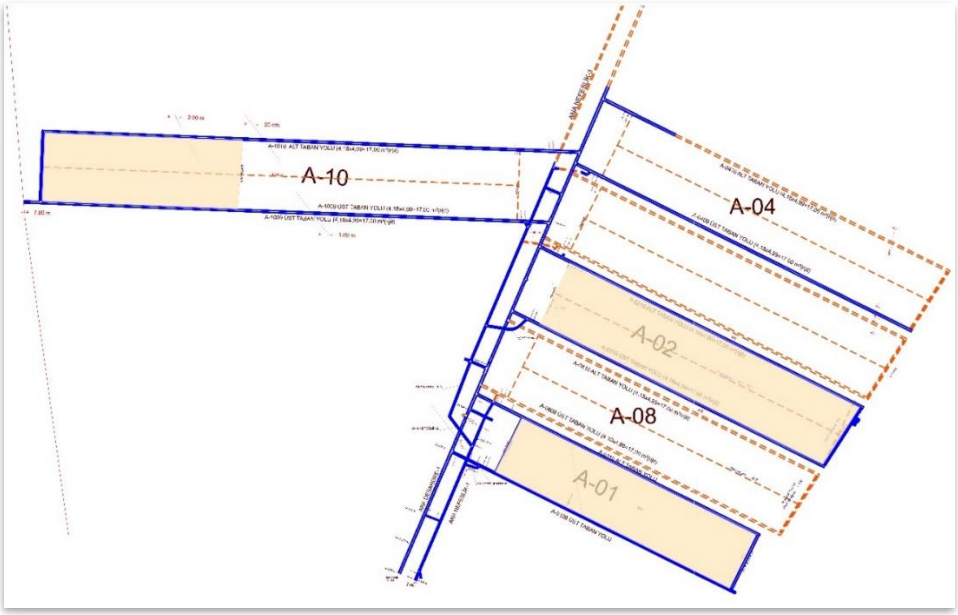
Ana Nakliye Bant Konveyörleri: Ocak içerisinde ve dışında ana nakliye anayollarında kurulan, üretim ve hazırlıktan çıkarılan tüvenan kömürü yerüstüne çıkaracak bant konveyörlerdir.

Zincirli Konveyör

Bant konveyör kurulumu için gerekli mesafenin oluşmadığı durumlarda, bant konveyör kurulumu gerektirmeyen çalışma alanlarında (kılavuz galerisi) ya da bant konveyöre ek yapılmasının erken olduğu zamanlarda pasa ve kömürü banda aktarmak için zincirli konveyörler kullanılmaktadır. Ocak içerisinde kullanılan zincirli konveyörlerin motor gücü 55 kW, redüktör tipi 18*64 dür.

HAZIRLIK ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

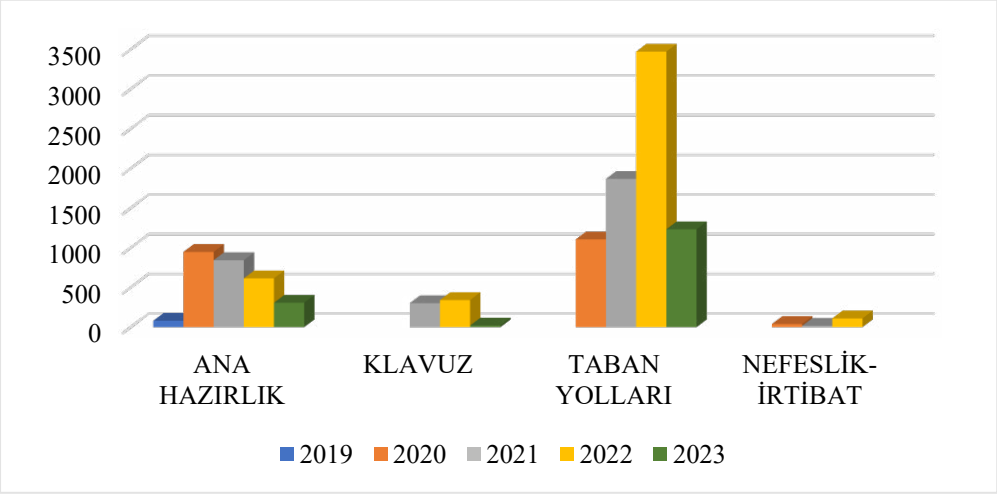
Ruhsat alanı içerisinde yapılan çalışmalara ait plan aşağıda Şekil 3'de sunulmuştur. Ruhsat alanı içerisinde A, B ve C bloklarını kapsayan termin planı hazırlanmıştır. Termin planına göre hazırlık çalışmaları ile toplamda 52 km uzunluğunda, farklı kesitlerde galeri ilerlemesinin yapılması planlanmıştır. Hazırlık çalışmalarında kullanılan tahkimat tipi, tahkimat aralığı ve kullanılan malzeme kalitesi, kaya mekaniği değerlendirme sonuçlarına göre tercih edilmiştir. Elde edilen veriler uygulama ile tecrübe edilerek gerekli düzeltmeler ve karşılaşılan zorluklara göre bölgesel değişiklikler yapılmıştır.



Şekil 3. Ruhsat sahasında üretim yapılan panolar ve hazırlık bacaları (Kiremitçiler, 2023)

Hazırlık Çalışmalarının Yıllara ve Amaçlarına Göre Değerlendirilmesi

Ekim 2019-Temmuz 2023 tarihleri arasında hazırlık çalışmaları kapsamında toplam 11.366 m galeri açılmıştır. Açılan galerilerin yıllara göre ilerleme miktarı Şekil 4'de sunulmuştur (Ana hazırlık, Nefeslik-İrtibat, Taban yolları ve Kılavuz)



Şekil 4. Hazırlık çalışmalarının yıllara göre dağılımı (Kiremitçiler, 2023)

Ana hazırlık olarak desandre ve ana nefeslik çalışmaları, küçük hazırlık olarak taban yolları ve bağlantı yolları yer almaktadır. Ruhsat alanında yapılan hazırlık çalışmaları yıllara göre farklılık göstermiştir. 2020 yılından itibaren hazırlık çalışmalarına ağırlık verilmiş, ana desandre de ilerlemeler ile taban yollarında yapılan çalışmalar eş zamanlı olarak galeri açma makineleri ile yürütülmüştür. Alt ve üst taban yolları tamamlandıktan sonra bu iki galeri bir kılavuz galerisi ile irtibatlandırıp ve pano oluşturulmuştur.

Sahada 2019-2021 yılları arasında büyük hazırlık ve taban yolları açılmış, devamında kılavuz çalışmaları 2021 yılı itibari ile başlamıştır. Ocak ağzının açılmasından sonra ilk panonun hazırlık çalışmalarının tamamlanması ~23 ay sürmüştür.

Panoların alt ve üst taban yolları ana nakliye galerisi olan desandreye bağlıdır. Üretim panosu için hazırlanan taban yolları ve kılavuz galerilerinin açılmasıyla beraber panonun temiz hava akışını sağlamak amacıyla üst taban yolları ile ana nefeslik galerisi arasında irtibat galerileri açılır. Nefeslik irtibat çalışmaları üst taban yolları ile eş zamanlı olarak yürütülmektedir.

Yukarıda ki grafikten anlaşılacağı gibi ana hazırlık çalışmaları gittikçe azalmıştır. Çünkü artık pano alt, üst taban yollarına girebilecek mesafeye kadar yapılmıştır. Fakat taban yolları ilerlemelerine bakıldığında tam tersine çok büyük artışlar olduğu görülmektedir.

Galeri İlerleme Hızlarının Değerlendirilmesi

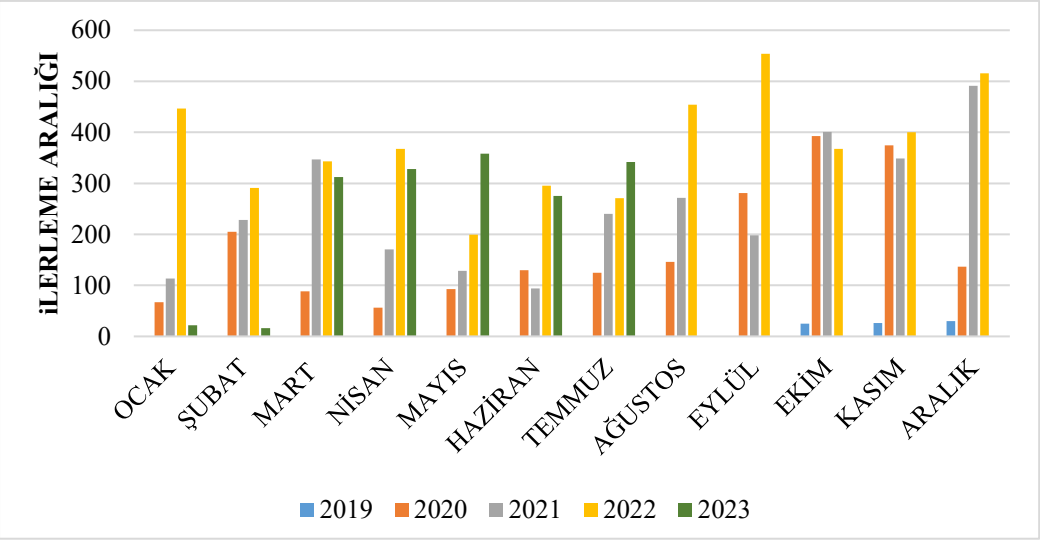
Galeri açma makinelerinin kullanıldığı ana desandre, ana nefeslik ve taban yollarının açılmasında yıllara göre ortalama aylık ilerleme Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Panoların taban yollarına ait hazırlık bilgileri (Kiremitçiler, 2023)

AÇIKLAMA/GALERİ ADI	A-01 PANOSU	A-02 PANOSU	A-10 PANOSU	A-04 PANOSU
TARİH	Temmuz 2020- Aralık 2020	Temmuz 2021- Şubat 2022	Ocak 2022- Ocak 2023	Temmuz 2022- Devam Ediyor
KULLANILAN MAKİNE	EBZ-132	EBZ-132	EBZ-132	EBZ-132
GALERİ UZUNLUĞU (m)	1578	1776	2659	1904
KESİT (m²)	17 m² ve 22 m²	17 m² ve 22 m²	17 m² ve 22 m²	17 m² ve 22 m²
ORTALAMA AYLIK İLERLEME (m)	105	148	156	107
GALERİ EĞİMİ	0.5	0.3	0.5	0.4

Tablo 4. Panoların kılavuz galerilerine ait hazırlık bilgileri (Kiremitçiler, 2023)

AÇIKLAMA/GALERİ ADI	A-01 KLAVUZ	A-02 KLAVUZ	A-10 KLAVUZ	A-04 KLAVUZ
TARİH	Nisan 2021- Ağustos 2021	Ocak 2022- Mart 2022	Ekim 2022- Aralık 2022	Temmuz 2023- Devam Ediyor
KULLANILAN MAKİNE	Elle	Elle	Elle	Elle
GALERİ UZUNLUĞU (m)	151	171	172.8	171
KESİT (m²)	2 m^2	23 m^2	23 m^2	23 m^2
ORTALAMA AYLIK İLERLEME (m)	100	85	69	21
GALERİ EĞİMİ	-4.5	-3.5	-7.5	-3



Şekil 5. Tüm hazırlık çalışmalarının yıllara göre aylık ilerlemeleri (Kiremitçiler, 2023)

GAM ile taban yollarında yapılan kazılar incelendiğinde en iyi aylık ilerleme A-10 panosunda gerçekleşmiştir. 2020 yılında ilk olarak A-01 panosunda çalışma yapılmıştır. A-01 panosunda en iyi ilerleme Eylül ve Kasım ayları arasında olmuştur. A-01 panosu bittikten sonra ana galerilerde ilerlemeler olmuş, bunu taban yolları takip etmiştir. Şekil 5 incelenip, yıllar arasında aylara göre kıyas yapıldığında her yıl ilerleme hızı bir önceki yıl aynı aya göre genel olarak artmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Ruhsat sahasında hazırlık çalışmalarına 2019 yılında ana desandre ve ana nefeslik bacaları ile başlanmış, 2020 yılında ana desandre ilerlemeleri ile birlikte A-01 taban yollarında yapılan çalışmalar eş zamanlı olarak galeri açma makineleri ile yürütülmüştür. A-01 panosu için hazırlanan taban yollarının açılmasıyla beraber 2021 yılında kılavuz galerisi açılmıştır. Bu panoların açılmasıyla temiz hava akışını sağlamak amacıyla A-0109 üst taban yolu ile ana nefeslik galerisi arasında irtibat galerisi açılmıştır.

Hazırlık çalışmaları grafikleri incelendiğinde yıllara bağlı olarak ana hazırlık olarak adlandırılan ana nakliye ve ana nefeslik galerilerinin ilerleme hızları sürekli düşmüştür. Bunun nedeni, ilk panoya ulaşana kadar yan kayaç içerisinde sürülen galerilerin pano taban yollarına ulaşılmasıyla birlikte ilerleme hızlarının düşürülüp taban yolları hazırlık çalışmalarının başlatılmasıdır. Taban yolları ve bağlantı yollarının açılımı ise yıllar geçtikçe artmıştır. Burada ilk neden ilk yıllarda taban yollarının hazırlık çalışmalarına ağırlık verilmesidir. Ama ilerleyen yıllarda özellikle taban yollarında aylık ve yıllık bazda ilerleme hızının artmasının sebebi personel sayısı ve tecrübesindeki artış, edinilen tecrübelere göre ekipman ve malzeme düzenlemeleri, vb etkenlerdir.

Özşen Maden İşletmeleri yeraltı linyit işletmesinde hazırlık çalışması yapılan ve şuan üretim aşamasında olan A-10 panosunda açılan taban yolları Trakya bölgesinde açılan en büyük kesitli ve en uzun galerilerdir. Ruhsat sahamızda yapılan hazırlık çalışmaları Trakya bölgesinde yapılan en derin, en hızlı ve büyük kesitli hazırlık çalışması olması yönüyle bölgede daha sonra yapılacak çalışmalar için büyük bir tecrübedir. Saha içerisinde yapılan hazırlık ve üretim çalışmalarında her geçen gün daha derinde çalışma yapılmakta ve tecrübeler kazanılmaktadır.

Trakya havzası, diğer kömür havzalarına göre havalandırma, gaz içerikleri, kendiliğinden yanma, su geliri, jeolojik arızalar ve buna bağlı deformasyonlar vb. madencilik problemleri açısından daha avantajlı konumdadır. Ancak bu olumlu durumun aksine havza için tam mekanize sistemler yeni olması sebebiyle, diğer

kömür havzaları ile mukayese edildiğinde yetişmiş kalifiye personel sayısı yok denecek kadar azdır. Bu nedenle tüm madencilik aşamalarında mühendisliğin bir aşaması olan eğitim, gözetim, takip ve kontrol büyük önem arz etmektedir.

Tam mekanize sistemini verimli kullanmak ve kalifiyeli personel yetiştirerek performansı artırmaya yönelik çalışmalar yapılmış ve sonuçları yukarıda belirtilen ilerleme hızlarına da yansımıştır. İlerleyen süreçte ocak koşulları (gaz, su, kendiliğinden yanabilirlik, vb), teknolojik imkanların gelişimi ve saha tecrübesinin artmasıyla ocak randımanlarında pozitif değişimler daha fazla olacaktır.

KAYNAKLAR

Eyyüboğlu ve Bölükbaşı, (2004). TKİ-OAL Çayırhan Yeraltı İşletmesinde Hazırlık Çalışmalarının Değerlendirilmesi, Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak

Kahraman, E. ve Erarslan, O. (2011). Çayırhan Yer Altı Linyit İşletmesi G Sahasında Hazırlık Çalışmalarının Değerlendirmesi, 3. Maden Makineleri Sempozyumu, Ankara

Kara, H., Kır N., Öner, A., Şengüler, İ., Toprak, S., Tuncalı E. (2000). Güney Trakya Bölgesindeki Kömürlerin Petrografik İncelemesi ve Ortamsal Yorumu, Türkiye 12. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak

Kiremitçiler Gruo, Özşen Maden İşletmeleri, (2023). Kontrol merkezinden alınan faaliyet raporları, yayımlanmamış, Edirne

Şengüler, İ. (2019). Ergene (Trakya) Havzasının Jeolojisi ve Kömür Potansiyeli, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara

APPLICATION OF DIRECTIONAL DRILLING TECHNOLOGY FOR GAS AND WATER HAZARD CONTROL IN UNDERGROUND COAL MINE

Q. Ji

CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd.
(maioutwo@gmail.com)

ABSTRACT

In order to achieve high gas drainage efficiency in underground coal mine, directional drilling technology is applied to conduct to inseam borehole drilling and roof drilling. A super-long directional borehole with 3353m was accomplished in a demonstration project, whose Average daily gas drainage volume is more than 5000m³. A single borehole with 77 sidetracks was accomplished in a working face and covered the whole areas which reduced gas drainage cost significantly. More than 1.78 million m^3 pure gas were extracted in 11 roof directional boreholes in Qinglong Coal Mine. The results shows that directional drilling has significant advantages including relative accurate borehole trajectory control, increased effective borehole depth and. It has considerable high gas drainage efficiency to ensure mining safety. Directional drilling technology was also used to detect the hidden water-bearing structure in working face. In a coal mine, it helped avoiding potential water inrush accidents by precise drilling into potentially water-rich areas identified by physical detection. A sudden increase in borehole water inrush was encountered during directional drilling process, revealing the presence of a collapsed column connected with the floor aquifer. The research results provide new idea for accurate detection and determination of water hazard hidden dangers in working face.

Keywords: Directional drilling, measuring while drilling, gas drainage, mine water hazard control, mining safety

INTRODUCTION

Coal mine gas disaster is one of the main security threats in the process of mine construction and mine producing. Its destructiveness has brought great loss of life and property. In recent years, gas drainage after borehole drilling has significantly reduced the coal seam gas content (Zhang, 2010). However, with the development of comprehensive mechanized coal mining technology in modern coal mines, preparation of the working face is accelerated, and the gas emission during mining has increased sharply. The sharp increase of gas emission during mining process is restricting the safe and efficient mining of many mines. Thus, highly efficient borehole drilling and gas drainage have become the key factors for safe and efficient mining. In response to the need for gas drainage, a lot of research work has been carried out (Xie and Sun, 2013; Qian and Xu, 1998). Some relatively mature theoretical systems have been formed, such as pressure relief and enhanced gas drainage theory, inert gas replacement drainage theory, and drainage drilling constitutive theory of surrounding gas flow, "0" ring of gas drainage, and theory of ellipsoidal zone, etc.

Water hazards in coal mines is another main safety factor that threaten coal mine production. The causes of underground water hazards in coal mines mainly include broken roofs or cracks connected to the bottom of rivers and lakes or strong aquifers, serious water accumulation in goafs, faults or fault zones. Connected with groundwater, insufficient strength of water-proof coal (rock) columns, etc., coal mine water damage will cause heavy casualties and property losses, and seriously threaten the normal mining safety (Hu and Tian, 2010; Du et al., 2014). The detection and prevention of water hazards before coal mining is very important to ensure the personal safety. For mines with serious threats of water hazards, water prevention and control principles of

"prediction and forecasting, exploration in case of doubt, exploration before excavation, treatment before mining" are highlighted (Wu et al., 2011).

It is of great significance to apply directional drilling technology to the prevention and control of gas and water hazards in coal mine to ensure mining safety.

UNDERGROUND DIRECTIONAL DRILLING TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

Underground directional drilling technology is based on real-time regulation of the dip angle and azimuth to accomplish precise control of borehole trajectory. It can ensure the borehole trajectory effectively extend in the objective layer, and can be carried out many sidetracks construction. The system consists of capable directional drill rig, downhole motor, real-time survey tools (MWD), modular electrical connected cable assembly (MECCA) drill rod and mud pump crawler. The whole set of equipment shows significant advantages including enlarged power, high borehole accident handing capacity and high MWD accuracy. Meanwhile, less drilling cutting, and small borehole curvature are expected to generate by combined (directional associates with rotatory) drilling technique.

Underground directional drilling system has capable for sub-horizontal precise directional drilling operations with borehole depths up to 3000 meters, and has been widely used to drill boreholes in gas drainage, water hazard control, grout injection, exploration of geological structure, detection of seam thickness, water injection, etc.

As a new technology developed in underground coal mine in recent years, the composition of directional drilling system includes MECCA drill pipe, mud pump, drill bit and other equipment (Fig. 1). Though real-time detection of drilling inclination, azimuth and control of drilling trajectory, the drilling trajectory can be accurately extended in the target layer. Therefore, it can realize branch borehole drilling, and satisfy engineering precision drilling construction requirements (Li et al., 2018; Shi and Zhang, 2015). Directional drilling technology has the advantages of precise drilling, high drilling efficiency, less engineering total, and low overall cost, and has been widely used in coal mine gas drainage, geological anomaly detection and other fields (Liu et al., 2019; Zhang, 2015).

Specifically designed to drill ultra-long directional drilling boreholes in explosive underground environments. Typical ZDY12000LD and ZDY6000LD directional drilling rigs are applied during high position directional drilling process. The rigs have relative compact footprint mounted on tracks, and are integrated with certified flameproof electrics and flameproof laptop (Shi et al., 2015).

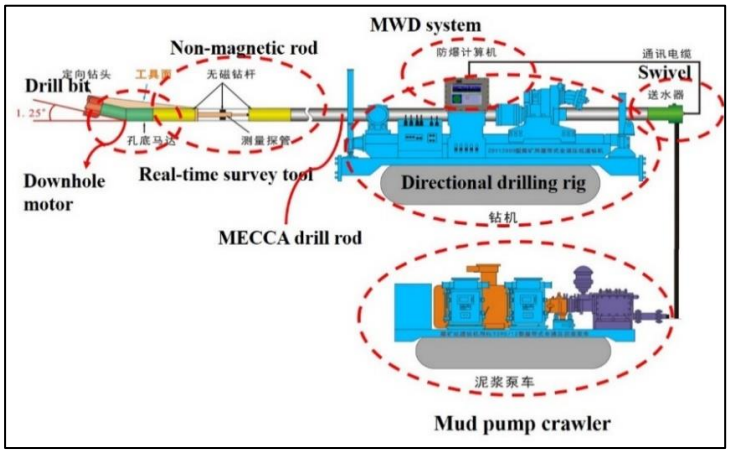


Figure 1. Composition of underground directional drilling system



Figure 2. Directional drilling rig and MWD system

A communication channel (inside cable) is designed in MECCA drill rod, which created a telemetry system for high position directional drilling. It was designed for deep hole wire line applications, with its strong tool joints, high quality friction-welded and special heat-treated steel, the rods are excel in directional drilling applications. Φ73mm and Φ70mm MECCA drill rods have maximum working torque of 6000N•m and have excess to accomplish in-seam directional borehole up to 1000 meters. While Φ89mm rod has a maximum working torque of 15000N•m and are suitable to drill borehole depth up to 2000 meters. The rods allow the driller to receive real time survey data, including directional drilling data and sampling data of drilled formation.

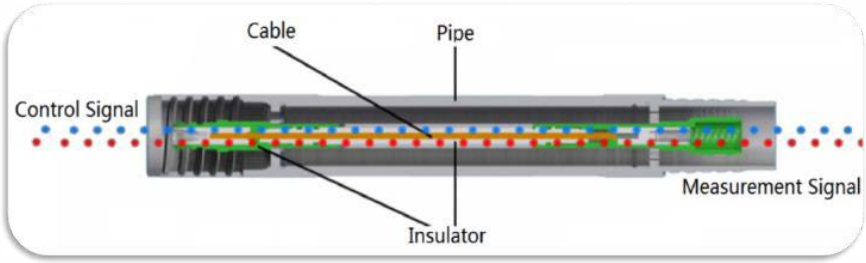


Figure 3. Modular electrically connected cable assembly

Measurement while drilling system (MWD) consists of explosion-proof laptop, real-time survey tool and trajectory control software. Real-time survey data can be recorded, displayed and storage during drilling process. With real-time drilling data, portable data tools, the MWD system boosts operator success and overall efficiency. It allows drillers to drill more footage faster, while ensuring the hole is always on plan. Trajectory control software allows the driller to see exactly where the borehole is compared to the borehole plan, with specified tolerances, allowing for accurate borehole placement. Down-hole real time survey tool is powered by the laptop instead of down-hole battery, which will reduce operation cost and increase its service life (Xu, 2014).

INSEAM DIRECTIONAL BOREHOLE DRILLING FOR HIGH EFFICIENT GAS DRAINAGE

Long-distance directional drilling has become a significant drilling technology to reduce borehole drilling cost. For example, when conducting borehole drilling for gas drainage, underground directional drilling has obvious advantages, including long effective distance, multi sidetracks, high drilling efficiency, long service period, better borehole seal quality. Compare with regular rotary drilling, these characteristics always lead to higher gas drainage efficiency and lower drilling cost. Indeed, there is potential possibility to cancel roadway construction which will lead to tremendous cost reduction.

In a demonstration project in Baode Coal Mine. A super-long directional drilling of the main shaft with a depth of 3353m was accomplished. Borehole was started drilling construction from No.27 roadway of No.1

intake airflow roadway in No.5 panel of Baode coal mine, taking 21 days to drill through the working face of the second panel and successfully connected with the No.2 return air roadway of the third lower panel on the opposite side. The depth of the main hole is 3353m, the total footage is 4428m, the hole diameter is 120mm, the top and bottom branches are explored 13 times, the error of the target coordinate of the drilling through the roadway is less than 0.15%, and the average daily gas drainage volume is more than 5000m³ at present.

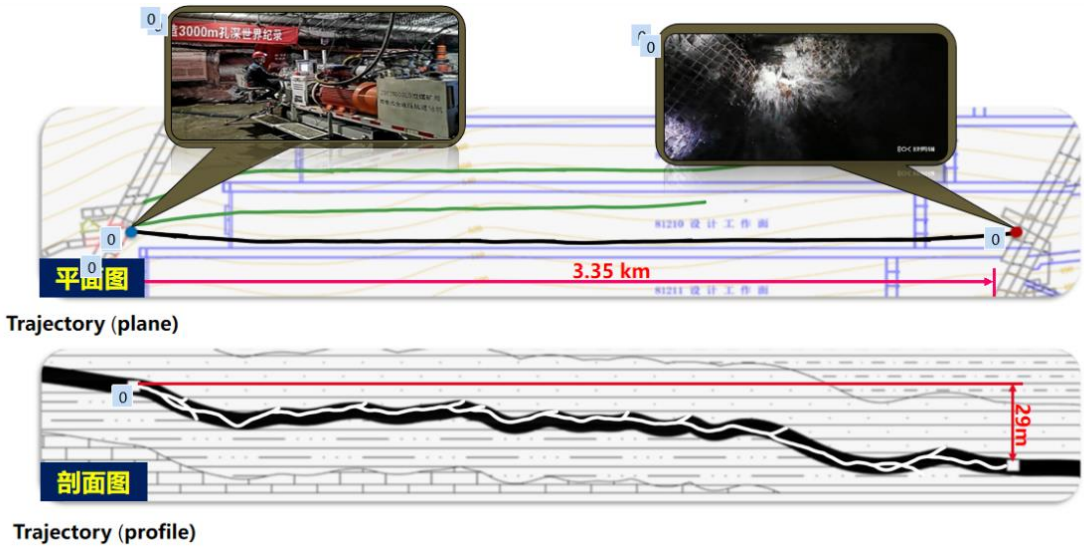
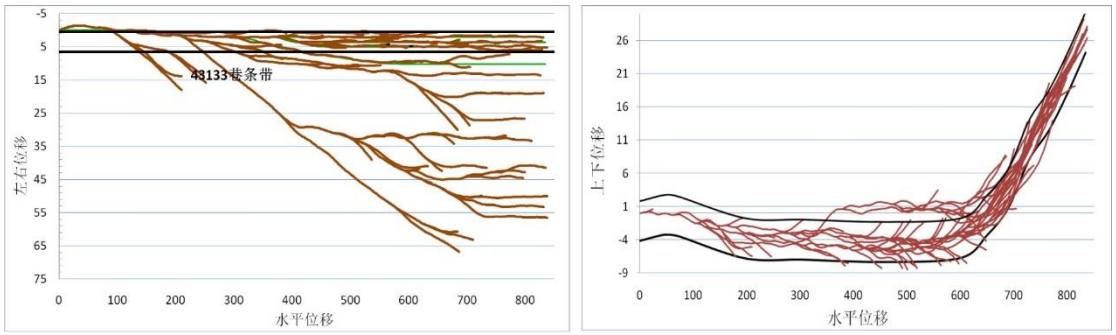


Figure 4. Profile and plane graph of 3353 meter borehole

A single borehole with 77 sidetracks was accomplished in Chengzhuang Coal Mine. The maximum depth of the borehole is 834m. The average drill efficiency reached 247 m/d. One single borehole can cover the whole areas which reduced gas drainage cost significantly.



实钻轨迹平面图 Borehole trajectory (plan)　　实钻轨迹剖面图 Borehole trajectory (profile)

Figure 5. Multi sidetracks directional drilling in Chengzhuang

ROOF DRILLING FOR HIGHLY EFFICIENT GAS DRAINAGE

Gas drainage method that extracting gas from goaf area though specially constructed roadway such as high position roadway and dedicated tail roadway, plays an important role and achieve good result (Liu et al., 2019). However, due to high excavation cost, long construction cycle, and difficult management, application of this technology is limited. Meanwhile, deploying high position roof drilling along the working face and extend to the fracture zone can significantly reduce construction cost and shorten construction time (Fang, 2018).

Roof directional drilling refers to the directional drilling that is arranged in advance on the side of the coal seam roof near the tail gate in accordance with the development law of the mining overburden cracks (Zhang et al., 2014). During the mining of the working face, the directional drilling boreholes are carried out through the mining fractures at the same time. It is used for gas drainage in mining area and goaf area, which can significantly reduce gas concentration in return airway and upper corner. Thus, when coal is mined, safety can be ensured.

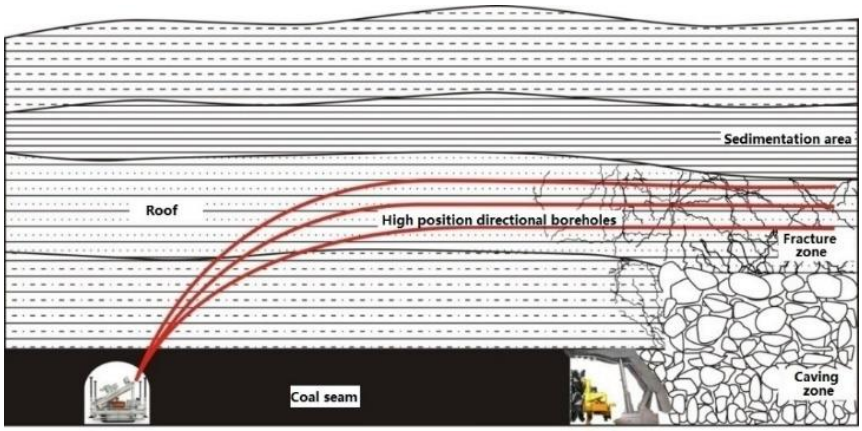


Figure 6. Principle of high position directional drilling for gas drainage

Two months' experiment has been conducted in Qinglong Coal Mine. Accumulated drilling footage is 2230m. Maximum depth reached 601m which established a record of underground high position directional drilling in coal mines in southwestern China where ubiquitous complicated geological conditions are existed. Borehole diameter enlarged to 153mm by reamers leading to increased gas drainage efficiency.

Table 1. Statistics of long-distance directional drilling borehole in 21602-1# drilling site

Borehole No.	Borehole depth (m)	Borehole depth enlarging to 153mm diameter (m)
1-1#	551	551
1-2#	554	554
1-3#	601	300
1-4#	524	524

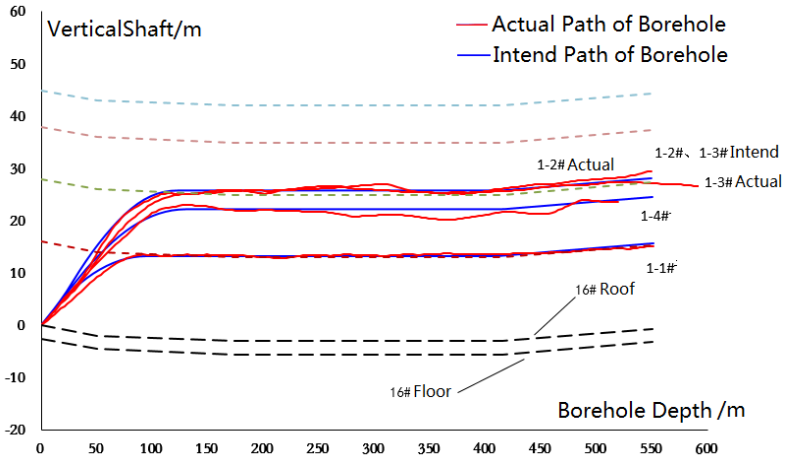


Figure 7. Planar graph of roof drilling boreholes in 21602-1# drilling site

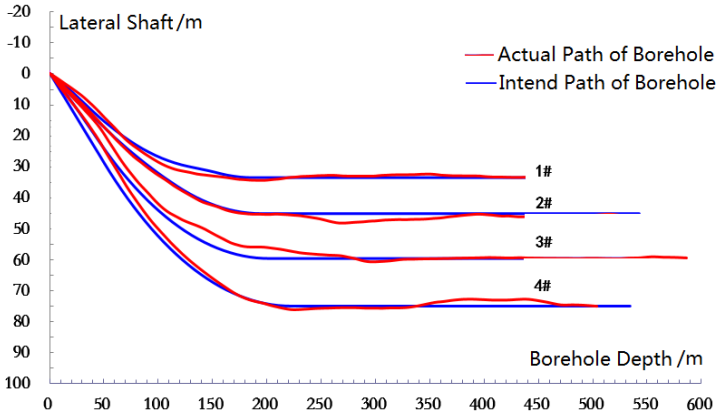


Figure 8. Planar of roof drilling boreholes in 21602-1# drilling site

After experiment, tens of underground high position directional drilling boreholes has been accomplished, some of these boreholes were carefully examined. Accumulated gas drainage quantity of some of the boreholes has been listed in table 2. More than 1.78 million m^3 gas has been extracted in 11 high position directional boreholes.

Table 2. Gas Drainage statistics of directional drilling boreholes in Qinglong Coal Mine

Borehole		Gas Density (%)	Mixed Gas Flow Rate (m^3/min)	Pure Gas Flow Rate (m^3/min)	Gas Drainage Quantity m^3/Day	Accumulated Gas Drainage Quantity(m^3)
+60m Drill Site in 21605 Roadway	1#	8.5	0.78	0.0663	95	23695
	3#	55	1.84	1.012	1457	171010
	4#	56.8	1.28	0.72704	1047	71433
Northern Drill Site in 21606 Roadway	B1#	57.2	1.69	0.96668	1392	256437
	5#	65.5	1.52	0.9956	1434	200592
	6#	45.8	1.2	0.5496	791	204996
3# Roadway, No.2 MA	3#	73.5	2.11	1.55085	2233	41561
Roof Drill Site in 11615 Roadway	1#	0.7	7.2	0.0504	73	71341
	2#	8.5	14.3	1.2155	1750	261040
	3#	13.2	11.2	1.4784	2129	191020
	4#	18.5	9.8	1.813	2611	289327
Total						1782452

DIRECTIONAL DRILLING FOR MINE WATER HAZARD CONTROL

First, use geophysical prospecting technology and equipment to comprehensively explore and evaluate the geological conditions of the coal mining area, fully mechanized mining face and tunneling front, and classify various geological anomalies that affect mining. Comprehensive analysis of detection results and mine hydrogeology, detection of water-rich anomalies or water-conducting faults or structures in the working face, discovery and delineation of doubtful points or hidden dangers of mine water hazards, can provide a reliable

basis for the prevention and control of coal mine water hazards, and play a role in ensuring safe mining of the working face [13]. In the process of conventional drilling in coal mines, the bending deformation of the drill string, the change of the formation in the hole, and the change of the drilling process parameters will cause the drilling to deviate [14]. When the drilling is used for roadway excavation or coal seam mining during construction, large deflection may cause serious decision-making errors, which may bring safety hazards to roadway excavation or coal seam mining.

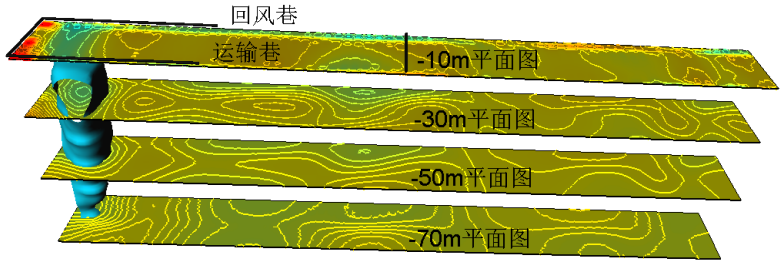


Figure 9. 3D inversion imaging of audio electrical perspective

In a coal mine in north China. Geophysical technology is used to detect the water bearing characteristics of a working face area. The results of audio electric penetration 3D inversion imaging are shown in Figure 9. Analyzing the inversion imaging results, it was found that there is a significant low resistance anomaly area near the designed open-cutting, and this anomaly area is developed within the range of 0-80m below the bottom plate, which is a vertically connected low resistance anomaly body.

In the 9# drill field of tail gate, three directional exploration drilling holes were constructed in the low-resistance abnormal area of the floor for exploration verification (the blue and green lines on the left in Figure 10 are the plane trajectory of the directional holes), and the vertical depth of the horizontal section of the drilling hole is 35m from the 6th coal floor , the horizontal spacing is 40m. During the construction process, the water inflow from the borehole was observed. When the drilling construction did not enter the abnormal range, the water inflow of D1, D1-1 and D2 holes were all less than 10m^3/h. When the drilling entered the abnormal range, the water inflow increased to varying degrees. The water inflow from the final holes reached 60m^3/h, 68m^3/h and 51m^3/h respectively (Figure 10). On-site observations found that when the borehole released more than 1.2 million m^3 of water, no significant attenuation of water inflow was observed, indicating that there is a relatively stable supply source for the inrush water exposed by the borehole. It is judged that there is limestone water supplying this abnormal area.

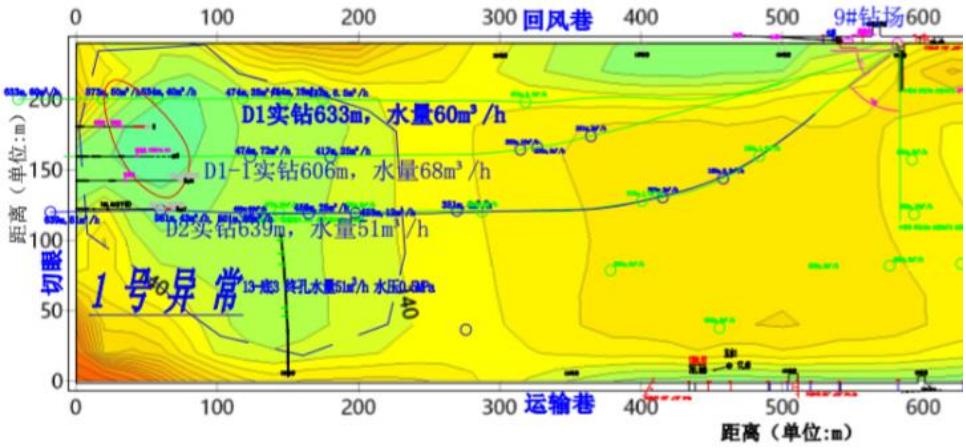


Figure 10. Schematic diagram of directional drilling borehole trajectory

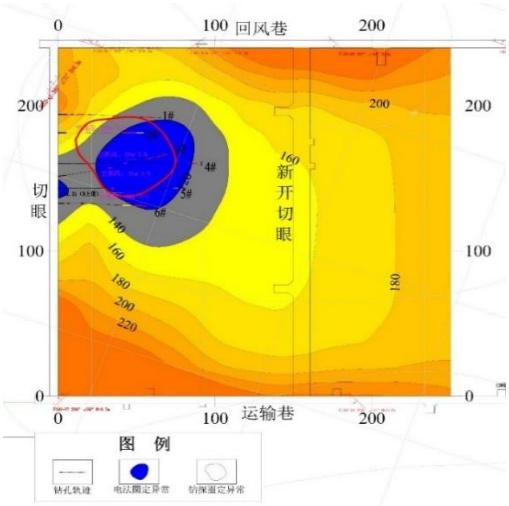


Figure 11. Location of limestone collapse column and redesigned open-cutting

Through the comprehensive analysis of geophysical prospecting and drilling results, it is determined that the anomalous area of low apparent resistivity is the water-conducting Ordovician limestone karst subsidence column, and the development range in the plane is 80m east of the current cut hole and 110m south of the tail gate. In order to ensure the safety of coal mining, after necessary grouting reinforcement measures, the mine side redesigned open-cutting in the area shown in Figure 11, which effectively avoided the possible water inrush accidents.

CONCLUSION

As a new technology, directional drilling technology has achieved excellent application to conducted precise borehole drilling for high efficient gas drainage and mine water hazard control.

(1) Long distance inseam directional drilling boreholes and multi-sidetrack boreholes allow borehole amounts to be reduced which increasing gas extraction efficiency while decreasing the drilling construction cost.

(2) Gas from the coal seam, goaf and upper adjacent layer can all be extracted through roof directional drilling boreholes, which saves considerable mining preparation time.

(3) Comprehensive use of mine geophysical prospecting, directional drilling provides a new idea for the accurate detection and determination of water hazard hidden dangers in the working face.

REFERENCES

Fan, Y. (2018). Study on the technology of keeping straightand preventing deviation in coal mine gas extraction drilling，Jiaozuo：Henan Polytechnic University，2018，9-10.

Du, C., Zhang, X., Li, F. (2014). Application of improved CART algorithm in prediction of water inrush from coal seam floor. Industry and Mine Automation, 40 (12):52-56.

Hu, W., Tian, G. (2010). Mine water disaster type and prevention and control countermeasures in China, *Coal Science and Technology*, 38(1), 92-96.

Li, Q., Fang, J., Chu, Z., et al. (2018). Drilling experiment research on bedding directional drilling of soft-fragmentized coal seam of Qinnglong Coal Mine, Industry and Mine Automation，44(11)：1-6.

Liu, F., Xu, C., Wang, X., et al. (2019). Research of weight on bit transmission law of ultra-long directional borehole along coal seam. *Industry and Mine Automation*, 45(8)：97-100.

Liu, W., Wu, J., Hu, R, et al. (2019). Quantitative evaluation of mine structure complexity and its coupling analysis with water bursting. *Industry and Mine Automation*，45(12)：17-22．

Qian, M. and Xu, J.(1998). Study on the "O-shape" Circle Distribution Characteristics of Mining Induced Fractures in the Overlaying Strata. *Journal of China Coal Society*, (10): 466-469.

Shi, H. and Zhang, J. (2015). Accurate directional water detection and water release technology for underground coal mine．*Safety in Coal Mines*，46(2)：64-67．

Shi, Z., Li, Q. and Yao, K. (2015). Underground Mine 1800 m Horizontal Directional Drilling Technology and Equipment [J]. *Coal Science and Technology*, 43 (2): 109-113.

Wu, Q., Zhao, S., Li, J., et al. (2011). The preparation background and the main points of rule of mine prevention and cure water disaster．*Journal of China Coal Society*，36(1)：71-74．

Xie, J. and Sun, X. (2013). Gas Drainage Technology of Mining Fracture Developed Zone in High Gassy and Thick Seam. *Coal Science and Technology*, 41 (05): 68-71.

Xu, C. (2014) Discussion on Superiority of Compound Directional Drilling Technology in Underground Coal Mine. *Metal Mine.* 49 (2): 112-116

Zhang, H., (2010). Application of Comprehensive Gas Extraction Technology. *Coal Science and Technology*, 38(12):55-57.

Zhang, J. (2015). Trajectory prediction technology of directional drilling in underground coal mine. *Safety in Coal Mines*，46 (10) : 83-86．

Zhang, X., Cheng, Y. and Wang, L. (2014) Optimized Design on High Level Borehole in Roof of Coal Mining Face in Coal and Gas Outburst Mine. *Coal Science and Technology*, 42 (10): 66-70.

YERALTI MADENCİLİĞİNDE GAZ KROMATOGRAFİ KULLANIMI VE ÖNEMİ

APPLICATION AND IMPORTANCE OF GAS CHROMATOGRAPHY IN UNDERGROUND MINING

E. Kahraman *, A. Ramazanirend

Polyak Eynez Enerji Üretim Madencilik San. ve Tic. A.Ş.
*(*Sorumlu yazar: erginkahraman@yahoo.com)*

ÖZ

Yeraltı kömür madenciliğinin en önemli risklerinden bir tanesi de kömürün kendiliğinden yanmasıdır. Kendiliğinden yanmanın en erken evrede tespit edilebilmesi, sürecin güvenli bir şekilde yönetimi için ciddi önem taşımaktadır. Gaz kromatografisi de kendiliğinden yanma sürecinin erken evrede tespit edilmesinde kullanılan önemli bir ekipmandır.

Çalışma kapsamında, Polyak Eynez A.Ş. Kınık Linyit İşletmesi' nde kendiliğinden yanma yönetim sürecinde uygulanan sistem ve ekipmanlar genel olarak tanımlanmış, gaz kromatografi sisteminin genel tanıtımı yapılmış ve sistemin kullanımından elde edilmiş avantajlar paylaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Kömür, gaz kromatografisi, kendiliğinden yanma

ABSTRACT

Coal spontaneous combustion is one the most important risk factors in underground coal mining. To perform a safe and coefficient procedure to prevent coal oxidation, it is vital to identify the it in its primitive stages. Gas chromatography is one of the proficient methods to identify the spontaneous combustion as soon as possible.

The system to prevent and overcome coal spontaneous combustion in Polyak Eynez Underground Lignite Mine and equipment is described in this paper. Additionally, gas chromatography and the results obtained is described.

Keywords: Coal, gas chromatography, spontaneous combustion

GİRİŞ

Yeraltı madencilik faaliyetlerinde ocak havasının gaz içeriği bilinmesi ve yönetilmesi gereken önemli bir hususdur. Yeraltı kömür madenciliğinde ocak havasının gaz içeriği, diğer madencilik yöntemlerine göre farklıdır. Yeraltı kömür madenciliğinin kendine özgü riskleri (kendiliğinden kızışma, metan gazı varlığı, vb.) bulunmaktadır. Bu risklerin bertaraf edilebilmesi için iyi bir havalandırma projesi yapılması, alt yapının kurulması ve sürekli ölçme-izlemenin yapılması önem arz etmektedir.

Yeraltındaki gazların ölçülmesi için sabit ölçüm sistemleri ve sabit olmayan ölçüm sistemleri olmak üzere sistem ve ekipmanlar mevcuttur. Sabit gaz izleme/ölçüm sistemlerinde yeraltında ocak ortamına yerleştirilmiş uç algılayıcılar/sensörler aracılığıyla gazların ölçüldüğü telemetrik sistemler veya yeraltında döşenmiş boru demeti ve tüpler aracılığıyla gazların yerüstüne çıkarılarak, analiz edildiği tube bundle sistemleri kullanılmaktadır. Bunlar dışında portatif gaz ölçüm cihazları ile istenilen bölgede ve istenilen sürede gaz ölçümleri yapılıp, kayıt altına alınabilmektedir. Bütün bunlara ilave olarak numune şeklinde alınan gazların özel kaplarda taşınarak en doğru şekilde analiz edildiği gaz kromatografisi sistemleri kullanılmaktadır.

Gaz kromatografisi alınmış olan gaz numunelerinin analiz edilmesinde kullanılan önemli bir ekipmandır. Özellikle sabit gaz ölçme/izleme sistemleri ile tam olarak ölçülemeyen ve/veya portatif gaz ölçüm cihazları ölçmenin zor olduğu/mümkün olmadığı gazların analizi, gaz geliri olan bölgeden örnek alınması suretiyle gaz kromatografisi ile yapılabilmektedir.

Yeraltı kömür madenciliğinde özellikle kendiliğinden yanma riski, vb. sorunlar bulunduğundan gazların analizi önem arz etmektedir. Özellikle oksidasyonun hızlı ve doğru tespiti için izlenilmesi gereken gazlar (etilen, hidrojen, vb.) bulunmakta olup, bunların bilinmesi önem arz etmektedir.

Çalışma kapsamında, yeraltı kömür madenciliğinde gaz ölçme ve izleme sistemleri tanımlanmış olup, inceleme yapılan Polyak Eynez A.Ş. Kınık Linyit İşletmesi' nde gaz kromatografisi kullanımından elde edilen bilgiler ve tecrübeler paylaşılmış ve kendiliğinden kızışma yönetim sürecinde kromatografi kullanım etkinliği ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

YERALTI KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE OCAK GAZLARI VE GAZ ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Telemetrik Sistemler

Yeraltına monte edilen uç algılayıcılar/sensörler aracılığı ile gazların ölçüldüğü/okunduğu ve ocak ortamına monte edilmiş olan kablolar aracılığı ile yerüstü izleme sistemine gönderildiği ölçüm sistemleridir. Bu sensörler ile yaygın olarak CO (karbonmonoksit), Oksijen (O_2), Karbondioksit (CO_2), Hidrojen sülfür (H_2S), Metan (CH_4) gibi gazların okunması yapılmaktadır. Ülkemizdeki Maden Mevzuatı gereği karbonmonoksit, Oksijen, hidrojen sülfür ve metan gazlarının sürekli izlenmesi zorunludur (Resmi Gazete, 2023).

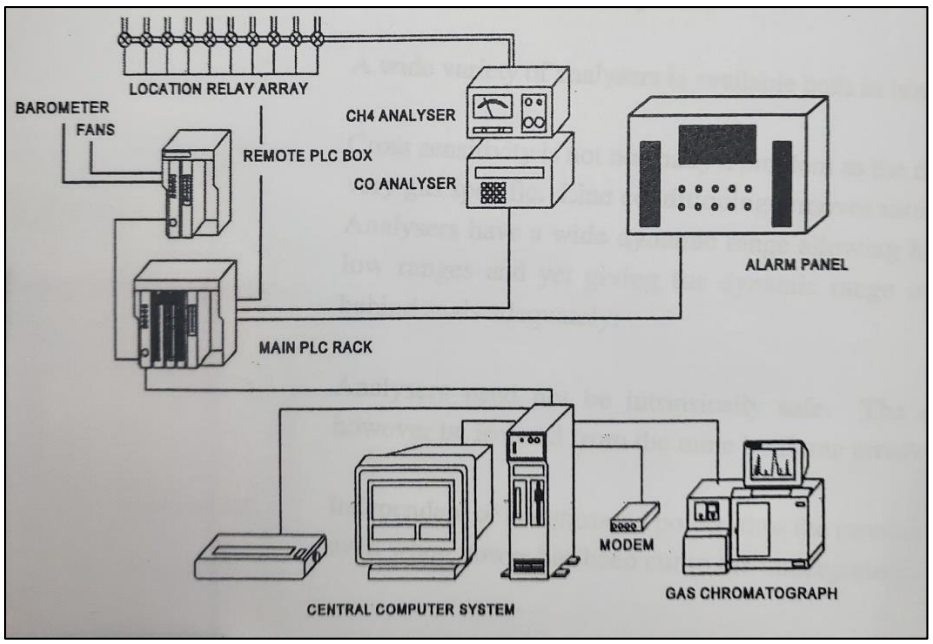
Sabit gaz izleme sensörleri ile genel olarak izlenebilen/ölçülebilen gazlar ve ölçüm teknikleri Çizelge 1' de verilmiştir. Yaygın olarak yasal gereksinimler ülkemizde bu sensörler ile sağlanabilmektedir. Bu tür cihazların en önemli avantajı gerçek zamanlı veri almalarıdır. Veriler kablo ile iletildiğinden bu sistemde yeraltı-yerüstü arası mesafe uzamasının herhangi bir dezavantajı yoktur. Telemetri sisteminde herhangi bir gazı ölçüm için kullanılan sensörler, diğer gazlarla çarpraz-duyarlı olabilirler. Bunun yanında, özellikle sensörlere yakın bölgelerde kimyasal uygulamalar yapılması da sensörlerin kullanımında Bu bazı gazların ölçümünde dezavantajlı durumlar yaratabilir.

Çizelge 1. Sabit gaz izleme sensörleri ile ölçülen gazlar ve ölçüm teknikleri (Aydın, 2017)

Gaz	Tespit Yöntemi
CH_4	Katalitik oksidasyon, ısıl iletkenlik, optik, akustik
O_2	Elektrokimyasal, paramanyetik
CO	Elektrokimyasal, katalitik oksidasyon, yarıiletken, kızılötesi
CO_2	Optik, kızılötesi
SO_2	Elektrokimyasal, kızılötesi
NOx	Elektrokimyasal
H_2S	Elektrokimyasal, yarı iletken
H_2	Katalitik oksidasyon

Tube Bundle (Boru Demeti)

Sistem, oksidasyon ve kendiliğinden yanma olaylarındaki ilerlemeyi tespit etmek ve izlemek amacıyla 1960' larda Almanya' da geliştirilmiştir. Sistemin temel bileşenleri, yüzeyden yeraltında seçilen yerlere uzanmış bir özel plastik boruları kapsamaktadır. Borular, 6 mm' den 20 mm' ye kadar değişken çapta (uzunluğa bağlı olarak) ve uzunluğu birkaç kilometre olan, malzemedir. Yüzeyde yer alan hava numunesi çıkarma pompaları, kurutma, filtrasyon ve alev tutucu sistemler vasıtasıyla her bir borudan aynı anda gaz alınmaktadır. Daha sonra, anali için analizör setine yönlendirilmektedir. Bu tür sistemlerde dağıtıcı olmayan infrared (NDIR) analiz cihazı ve paramanyetik analiz cihazları kullanılır. Buna ilave olarak, bu tür analiz cihazlarında mevcut olan geniş algılama aralığı, yeraltında bariyerli alanlarda bulunan yüksek gaz konsantrasyonlarının ölçümünü kolaylaştırır. Bu tür sistemler telemetri sistemlerine göre daha avantajlı kabul edilirler. Sadece borular içerisinde nem taşınması sorun yaratır. Bu yüzden, ayrıca nem giderici sistem mevcuttur (URL-1, 2023). Tube Bundle (boru demeti) sistemi şematik olarak Şekil 1' de gösterilmiştir. Sistem yaygın olarak Avustralya' da kullanılmaktadır.



Şekil 1. Tube Bundle sistemi (Cliff vd., 2004)

Mevcut durumda Maden İSG Mevzuatımız kapsamında tube bundle (boru demeti) sisteminin ocaklarda kullanımı/kurulumu ile ilgili bir zorunluluk bulunmamaktadır.

Portatif Gaz Ölçüm Cihazları

Portatif gaz ölçüm cihazları ocak ortamında istenilen çalışma noktasında anlık olarak gaz ölçümü yapmaya yarayan ölçüm cihazlarıdır. Aynı anda 4-5 gaz ölçebilen ölçüm cihazı türleri mevcuttur. Ocakta farklı çalışma bölgelerinin portatif gaz ölçüm cihazları ile kontrol edilmesi/uygun kalibreli cihaz bulundurulması Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği gereğince zorunludur. Bu tür cihazlarda kullanılan sensörlerin, diğer gazlarla çarpraz-duyarlı olabilirler. Portatif cihazlar, ocakta yapılmış olan kimyasal uygulamalardan etkilenebilir. Bu bazı gazların ölçümünde dezavantajlı durumlar yaratabilir.

Gaz Kromatografisi

Gaz Kromatografisi; bir balon numune ile çalışma ortamından alınmış olan karışım halinde bulunan gaz numunesindeki gazların birbirinden ayrılması amacıyla kullanılan genel bir kromatografik ölçüm yöntemidir. Bu sistem ile azot, hidrojen, etilen, asetilen gibi gazların doğru bir şekilde ölçülebilmesi diğer sistemlere göre ciddi avantajlar sağlamaktadır.

Mevcut durumda Maden İSG Mevzuatımız kapsamında gaz kromatografi sisteminin ocaklarda kullanımı/kurulumu ile ilgili bir zorunluluk bulunmamaktadır.

GAZ KROMOTOGRAFİ SİSTEM DETAYLARI ve ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

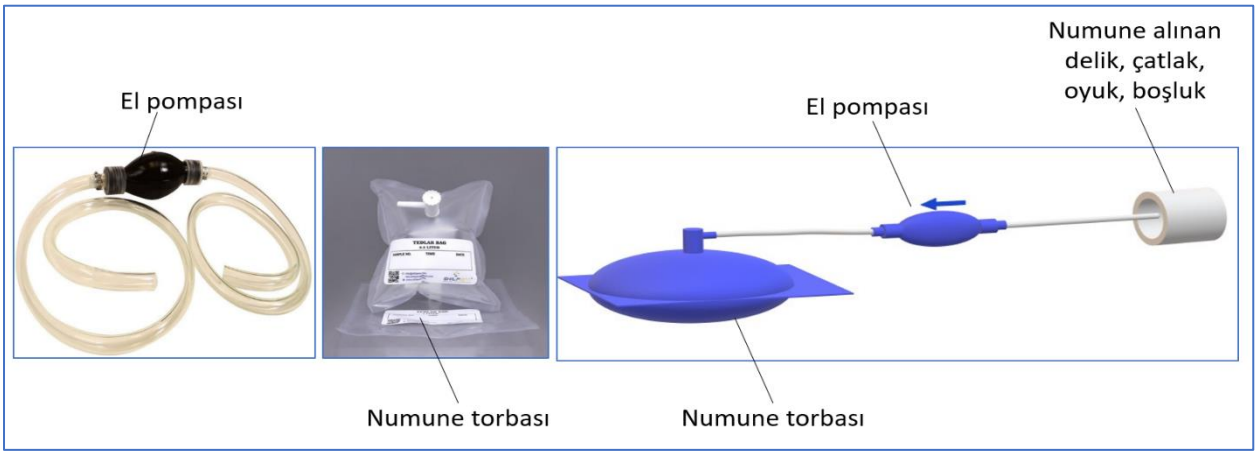
Çalışma Prensibi

Gaz kromatografisi bir ayrım yöntemidir. Sabit bir fazdan mobil faz olarak gaz akımı (He, Azot, vb.) geçirilerek, uçucu bileşiklerin adsorbsiyon ve dağılım farkına göre birbirlerinden ayrılmasını sağlayan yöntemdir. Karışım haldeki bileşenleri ayırmak için kullanılan kimyasal analiz enstrümanıdır.

Yeraltından bir balon numuneye alınmış olan gazların laboratuvar/ofis ortamında cihaz bünyesine verilmesi sağlanarak, numune içerisindeki gazların analiz edilmesi ve çıktı alınması sağlanmaktadır. Cihazın kalibre edilmesinde genellikle Helyum ve Argon gazları kullanılmaktadır. Bu sistem ile 0_2, CO, H_2S, CO_2, CH_4, H_2, Etan, Asetilen ve Etilen gibi gazların analizleri yapılabilmektedir.

Numunenin Temini ve Cihaza Numune Giriş

Gaz numune torbasını doldurmadan önce, öncelikle torbanın içi temizlenir. Bunun için numune alım pompası ile torba içine vakum uygulanarak, torba boşaltılır. Daha saf bir numune elde etmek için, hortumlar ve pompa içindeki havanının boşaltılması ve numune olarak alınacak gaz/gazlar ile doldurulması gerekmektedir. Bu işlem Şekil 2'de gösterildiği gibi, pompayı torbaya bağlamadan önce numune kaynağından gazın emilerek ortama boşaltılması sağlanmalıdır. Daha sonra, balon gaz numune torbasının kapasitesinin % 80' nini gaz ile dolduracak şekilde numune alım işlemi tamamlanır. Numune alım işlemi tamamlandıktan sonra, numune torbasının ağzı kapatılır. Numune alınan kısımdan, portatif gaz ölçüm cihazı ile de ölçüm alınarak, ölçüm torbasının üzerine ölçüm değerleri yazılmalıdır (etiketleme). Daha sonra torba zarar görmeden gaz numunesi kromotografiye ulaştırılmalıdır.

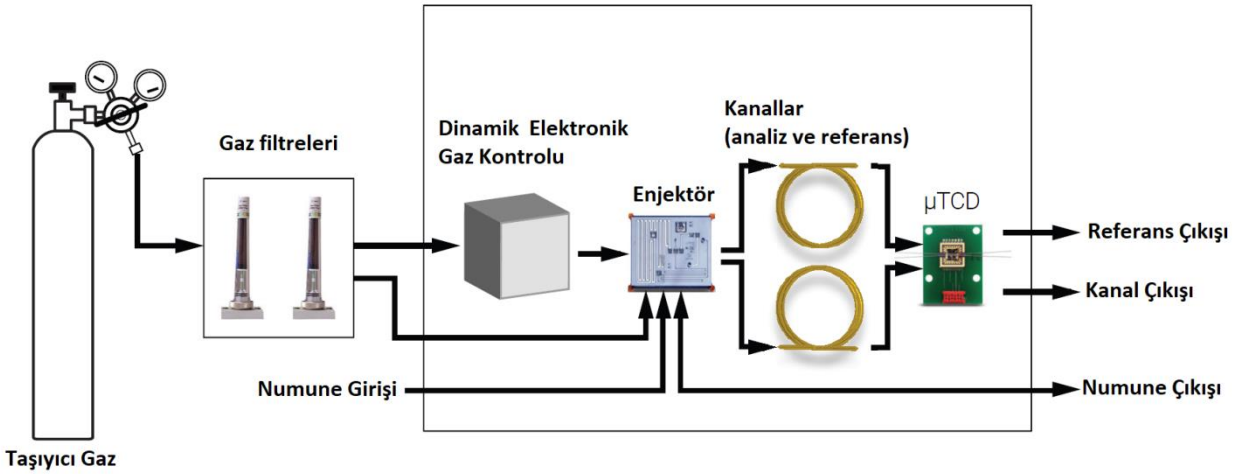


Şekil 2. Balon numune almakta kullanılan ekipmanlar ve numune alımı şematik gösterim

Ekipmanın Önemli Parçaları (Kolon, Dedektör, vb.)

Sistemin genel parçaları Şekil 3'de şematik olarak gösterilmiştir. Kolon; ayırma işleminin gerçekleştiği kısımdır. Kolonlar, paslanmaz çelik, bakır, alüminyum veya camdan yapılmış olabilir. Düz, kıvrılmış veya spiral şeklinde olabilir. Kolonda, sabit faz; polar, orta polar veya nonpolar olabilir. Ayırımı yapılacak bileşiklerin özelliklerine göre sabit faz seçimi yapılır. Kolonda üzerine sabit faz yüklenecek destek maddesi, geniş bir yüzeye sahip olmalı, inert ve dayanıklı olmalıdır. Destek maddesi olarak, diatome toprağı, cam veya organik polimerler kullanılabilir. Numune kolona tatbik edilirken, mümkün olan en küçük hacimde ve en kısa sürede verilmelidir. Gaz numuneler özel enjektörle sisteme verilir. Otomatik enjektörlü cihazlarda split ve splitless enjeksiyon yapmak mümkündür. Splitless; numune seyreltilmeden enjektöre çekilen kısmın tamamı sisteme verilir. Split de ise; numune belli oranda seyreltilip verilir.

Bütün kromatografik ayrılmalar bir karışım numunenin (hareketli faz) sabit fazı teşkil eden bir kolondan geçerek iletilmesi esasına dayanır. Gaz kromatografisinde numunenin uçucu komponentleri inert bir gaz fazı (taşıyıcı gaz) ve sabit bir faz arasında dağılmıştır (Orhun, 1968).

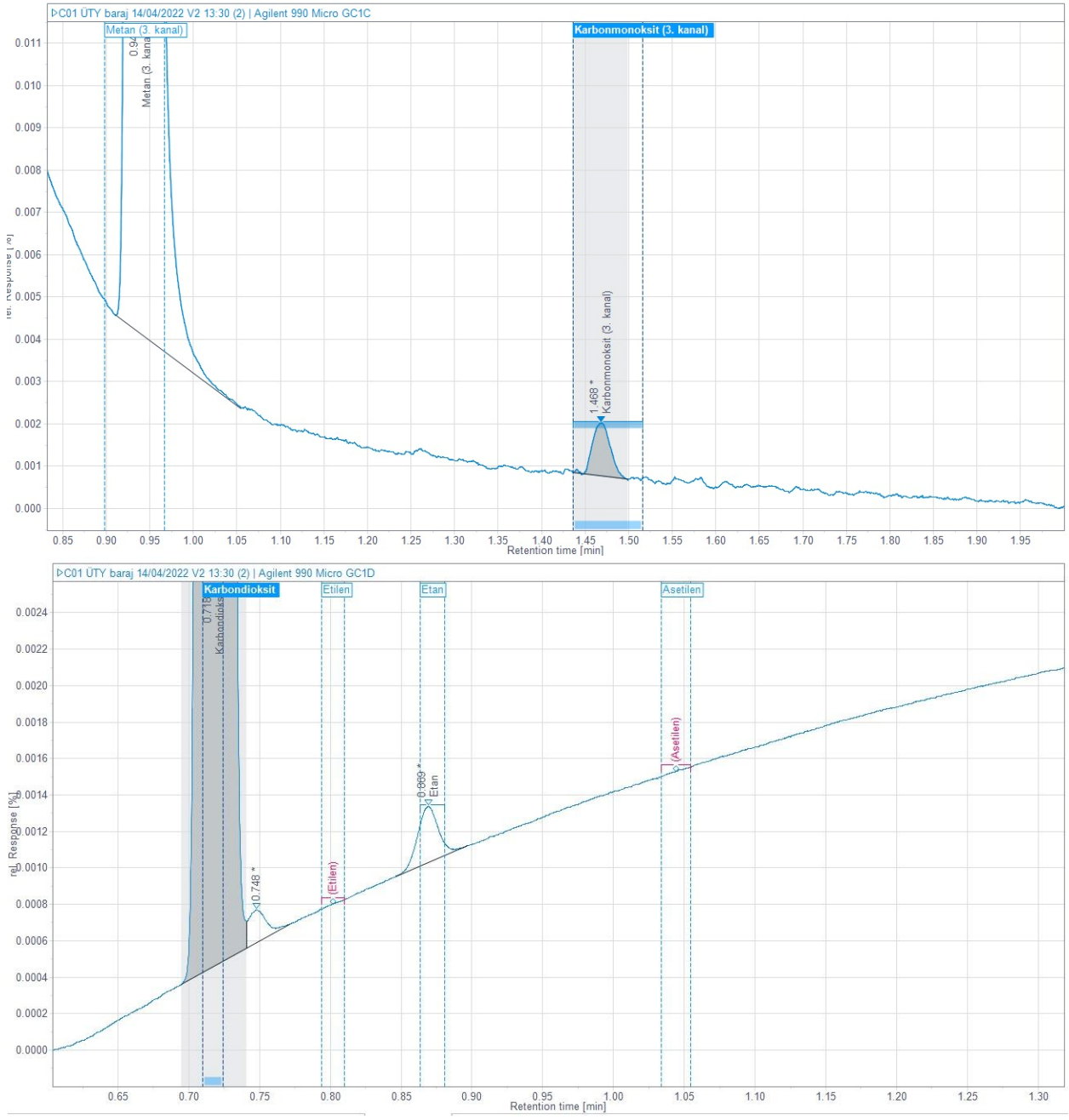


Şekil 3. Gaz kromatografisi genel görünüş (AGİLENT 990 Micro GC kullanım kılavuzu)

Dedektör; kolondan ayrılıp gelen maddeleri algılayıp, zamanın bir fonksiyonu halinde veren cihazlardır. Kolondan gelen maddeleri uygun sinyaller halinde algılarlar ve integratöre gönderirler. Dedektörlerin, duyarlılığı yüksek olmalı, gaz akış hızı değişimlerinden etkilenmemelidirler. Dedektör sıcaklığı kolondan çıkan numunenin yoğunlaşmasına yol açmayacak kadar yüksek olmalıdır. Kromatografilerde Alev İyonizasyon Dedektörü (FID), Kütle Spektrometrik Dedektör (MS), Isı İletkenlik Dedektörü (TCD) ve Azot/Fosfor Dedektörü kullanılmaktadır.

Kaydedici/İntegratör; dedektör sinyallerinin zamana karşı grafiğini pik şeklinde çizer (Şekil 5) ve piklerin altında kalan alanı hesaplar. Kromatografide elde edilen kromatografik pikler retansiyon zamanı ve retansiyon hacmi ile karakterize edilirler. Retasyon zamanı (t_R), maddenin enjekte edildiği an ile maksimum dedektör cevabı alındığı an arasında geçen süredir. Retansiyon hacmi (V_R) ise, retansiyon zamanında kolondan geçen gaz hacmidir.

Şekil 4'den anlaşılacağı gibi pikler daha önce kalibre edilmiş cihaz tarafından hangi gaza ait olduğu tanımlanır. Kalibrasyon metoduna/eğrisine bağlı olarak kesit alanı veya yükseklik parametresi kullanılarak, gazın konsantrasyonu cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanır.



Şekil 4. Bir kromatografiden elde edilmiş grafik (spektrum)

Gaz Kromotografi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Gaz kromatografisinden elde edilen sonuçlar işletmede genel olarak 3 amaca hizmet etmektedir.

- Bunlardan ilki, portatif gaz ölçüm cihazları ile okunamamış olan gazların da bilinmesi ve okunmuş değerlerin daha hassas analizi ile doğruluğunun teyitidir. Örneğin, azot gazı portatif gaz ölçüm cihazları ile ölçülememektedir.
- Metan Drenaj Sistemi Ölçümleri: Metan drenajı yapılan borular içerisinden yüksek konsantrasyonlarda metan gazı, çok düşük konsantrasyonlarda oksijen gazı gelmektedir.

Portatif gaz ölçüm cihazları ile çok hassas ölçümler yapılamadığı durumlarda ya da doğrulama amaçlı kromatografi verileri/analizleri kullanılır.

- Kendiliğinden yanmanın takibi: Kömürün oksidasyon ya da kendiliğinden kızışmasının erken evrede takibi için kromatografi verileri kullanılmaktadır. Özellikle, etilen gazı, asetilen gazı varlığı ve ölçülmüş diğer gazlardan hazırlanan indekslerin değişim eğrileri ile süreç hassas bir şekilde takip edilmektedir.

  Kömürün kendiliğinden kızışma sürecinin tahmininde/tespitinde kullanılmakta olan Graham İndeksi, Young indeksi/modülü, O_2/CO_2 Oranı, Morris Oranı, Jones Trickett Oranı, Litton Oranı, Willet Oranı, H_2/CO Oranı, Etilen gazı tespiti/varlığı, Asetilen varlığı, CO gazı miktarı gibi indeks ve/veya gazlar bulunmaktadır (URL-1, 2023). Çizelge 2' de ölçüm sistemleri ile elde edilen gaz ölçümleri kullanılarak, hesaplanabilen indeksler/parametreler derlenmiştir. Buradan görülebileceği gibi, gaz kromatografisinin gaz ölçüm çeşitlilik oranı daha fazla olduğundan, kendiliğinden kızışma yönetiminde dikkate alınabilecek bütün gazlar hesaplanabilmektedir. Çizelgede asetilen, etilen gibi gazların telemetri sistemiyle (sabit sensörlerle) ölçülmesi mümkün olduğu görülmektedir. Fakat, bu durum uygulamada çok yaygın olarak kullanılan bir durum değildir.

Çizelge 2. Ölçüm sistemleri ile ölçülebilen gazlardan hesaplanabilen kendiliğinden kızışma ile indeksler

Kendiliğinden Kızışma Tespitinde Kullanılan İndeksler	Ölçüm Teknolojisi/Sistemi Elde Edilen Sonuçlara Göre İndekslerin Belirlenebilme Durumu			
	Sabit Sensör (Telemetri Sistemi)	Portatif Gaz Ölçüm Cihazları	Tube Bundle (Boru demeti)	Gaz Kromatografisi
Graham İndeksi	X	X	X	X
Young Modülü	X	X	X	X
O_2/CO_2 Oranı	X	X	X	X
Morris Oranı	--	--	X	X
Jones Tricket Oranı	X	X	X	X
Litton Oranı	X	X	X	X
Willet Oranı	--	--	X	X
H_2/CO Oranı	X	X	X	X
Etilen Miktarı	X	--	X	X
Asetilen Miktarı	X	--	X	X
Karbonmonoksit	X	X	X	X

KINIK LİNYİT İŞLETMESİNDE GAZ KROMATOGRAFİSİ KULLANIMI

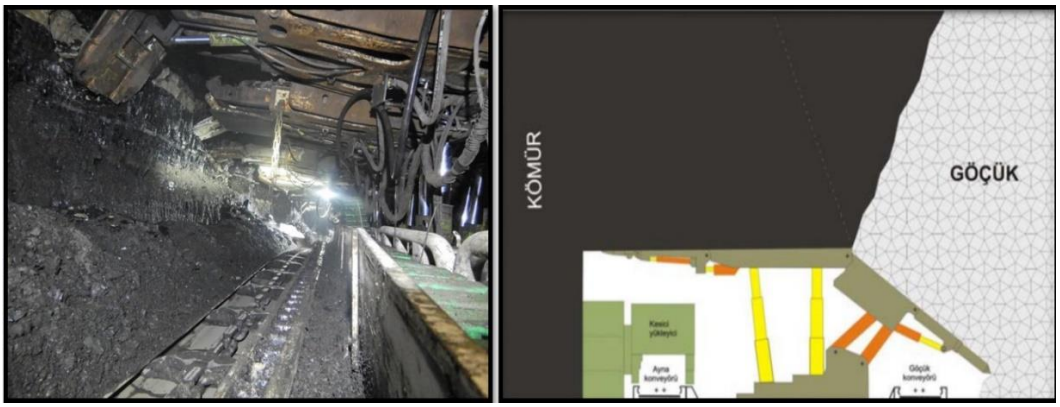
İşletme Hakkında Genel Bilgiler

Polyak Eynez A.Ş. Kınık Linyit İşletmesi, İzmir İli Kınık İlçe sınırları içerisinde Elmadere Mahallesi civarında bulunan ülkemizin en derin linyit madenidir. Proje sahasında kazı çalışmalarına 2014 yılında başlanmış olup, ilk üretim çalışmaları 2020 yılında başlamıştır. Mevcut durumda, yeraltından yüksek kaliteli linyit kömürü mekanize kazı ekipmanları ile LTCC (arkadan göçertmeli geri dönümlü tam mekanize uzun ayak) yöntemi (Şekil 5) ile üretilerek, yerüstünde kurulu bulunan Lavvar tesisinde işlenerek, piyasanın ihtiyacı olan kömür ürünü elde edilmektedir. İşletmenin yeraltına 850 metre derinliğinde 50 m^2 kesitte servis kuyusu ve ortalama 14 derece eğimde 3600 metre uzunluğunda 23,4 m^2 kesitte ana desandre olmak üzere 2 erişim ve temiz hava yolu bulunmaktadır. Ocakta kirlenen hava 850 metre uzunluğundaki 50 m^2 kesitte havalandırma kuyusunun yerüstü bölgesine monte edilmiş 1100 kW gücünde, 300 m^3/sn hava debisi emişi yapabilen emici fanla ocak dışına atılmaktadır. İşletmede yeraltında metan drenaj sistemi bulunmaktadır. Kendiliğinden yanma yönetimi kapsamında bütün teknolojik alt yapı (azot tesisi, gaz kromatografisi, kül tesisi, vb.) mevcuttur.

Yeraltına personel naklinde 120 kişi kapasiteli kuyu nakliyatı kullanılmaktadır. Su drenajı için yeraltında uygun ve yeterli şekilde havuz ve pompa alt yapısı teşkil edilmiş olup, güvenli bir şekilde işletilmektedir. İşletmede uygun PLC altyapısına sahip, yerüstü kontrol/izleme merkezi bulunmaktadır.

İşletmede Gaz Kromatografisi Kullanımı

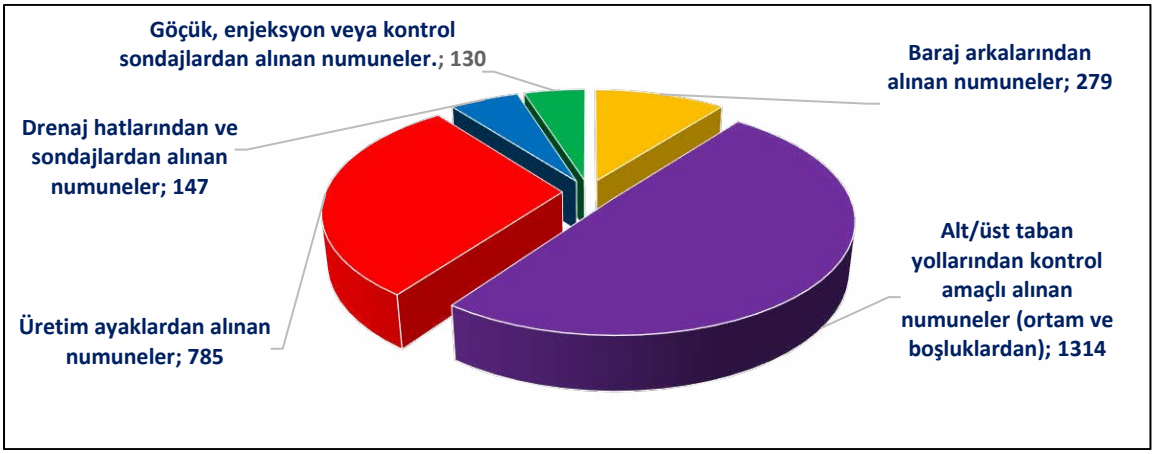
İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden alınan havalandırma danışmanlık hizmeti kapsamında, işletmeye 2021 yılında gaz kromatografisi altyapısı kurulmuş ve ekipmanın kullanımına başlanmıştır (Şekil 6). Eylül-2021 ile Ağustos 2023 tarihleri arasında gaz kromatografisinde 2.729 numune çalışılmıştır. Çalışılan numunelerle ilgili detaylı grafik Şekil 7'de verilmiştir. İşletmede kullanılan Agilent 990 Micro gaz kromatografi sisteminin bazı genel özellikleri aşağıdaki Çizelge 3' de verilmiştir. İşletmede kullanılan gaz kromatografisi ile Oksijen, Metan, Karbonmonoksit, Karbondioksit, Hidrojen, Propan, Helyum, Etilen, Etan, Azot, ve Asetilen gazları ölçülebilmektedir.



Şekil 5. İşletmede tam mekanize uzun ayakta kömür üretim yöntemi



Şekil 6. İşyerinde kullanılan gaz kromatografisi

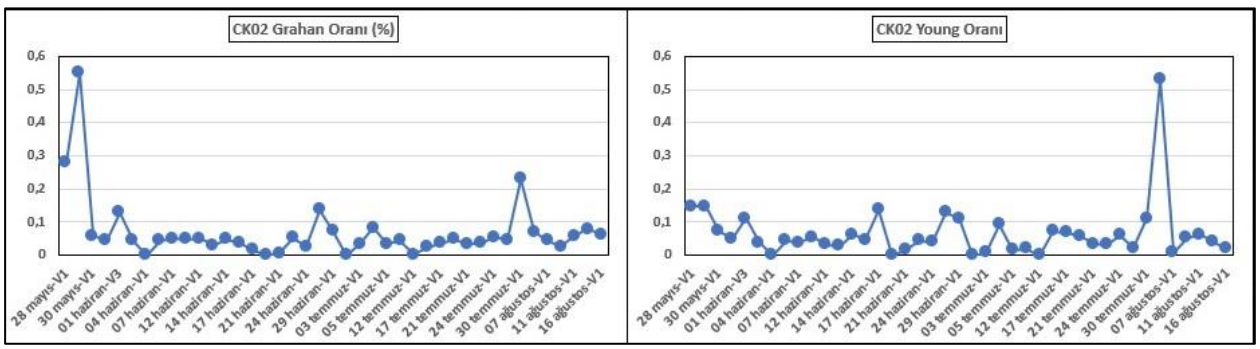


Şekil 7. İşyerinde gaz kromatografisinde çalışılan numunelerin sayısal dağılımına ilişkin bilgiler

İşletmede yeraltında monte edilmiş olan sabit gaz izleme sensörleri ve portatif gaz ölçüm cihazları ile izlenen gazlar, sistematik numuneler alınması suretiyle gaz kromatografisinde analiz edilmekte ve elde edilen veriler üzerinden kendiliğinden kızışma, vb. analizler yapılmaktadır. Gaz kromatografisinde bir üretim ayağının giriş-çıkış değerleri üzerinden yapılan analiz sonucu elde edilen verilerle hazırlanmış örnek grafikler Şekil 8'de sunulmuştur.

Çizelge 3. İşletmede kullanılan mikro gaz kromatografi sistemi ile ilgili bazı teknik veriler (Agilent Kataloğu, 2023)

Teknik Parametre	Kanal 1 CP-Molsieve 5A 10 m	Kanal 2 CP-Molsieve 5A 10 m	Kanal 3 CP-Molsieve 5A 10 m	Kanal 4 PoraPLOT U 10m
Kolon Sıcaklığı (°C)	80	80	80	80
Taşıyıcı gaz	Ar, 120 kPa	He, 150 kPa	He, 150 kPa	He, 100 kPa
Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	50	50	50	50
Enjeksiyon Zamanı (ms)	100	110	110	90
Ters yıkama (temizleme)	Gerekli değil	10	10	Gerekli değil
Dedektör Hassasiyeti	Otomatik	Otomatik	Otomatik	Otomatik
Sinyal düzenleme	mevcut	yoktur	yoktur	yoktur
Numune besleme sıcaklığı (°C)		40		
Numune besleme süresi (s)		70		



Şekil 8. Gaz kromatografisi verileri ile oluşturulmuş örnek gaz indeks verileri

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışma kapsamında yapılan incelemelerde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Gaz kromatografisi kullanımı ile ölçümü telemetrik sistemlerle zor olan ve/veya mümkün olmayan gazların (azot gazı, vb.) ölçümü mümkündür. Bu sayede oksidasyonunun uluslararası belirlenmiş indekslerle takip edilebilmesi mümkün olacaktır.
- Portatif gaz ölçüm cihazları ile ölçümlerde birbirine yakın olan gazlar hatalı ölçüme yol açabilmektedir. Bu tür kuşku duyulan durumlarda gaz kromatografisinin kullanımı kuşkuyu gidermede önemli bir avantaj sağlayacaktır.
- Metan drenaj sistemi uygulanan sistemlerde metan drenaj sondajlarından gelen gazların ölçümlerine ilave olarak belli peryotlarla kromatografi sisteminde de kontrol yapılması güvenliği artırmaktadır.
- Gaz kromatografi sisteminde çapraz hassasiyet, sensör hatası, vb. sorunlar olmadığı için oldukça güvenilir sonuçlara ulaşılabilmektedir.
- Gaz kromatografisi bilgi ve tecrübe gerektirmektedir. Sistemden elde edilen sonuçlarla kendiliğinden kızışma kapsamında literatürdeki bütün indekslerin tespiti mümkün olabilmektedir.
- Kromatografi sistemi, diğer sistemlere ilave olarak kullanılabilecek bir ölçme sistemidir.

KAYNAKLAR

Agilent 990 Micro Gaz Kromatografi Kataloğu (2023).

Aydın, Y. (2017). Yeraltı Kömür Ocakları Merkezi Gaz İzleme Sistemlerinde Kullanılan Sensörlerin Ölçümlerinin ve Konumlarının Optimizasyonu: TTK Kozlu Müessesi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Cliff, D., Rowlands, D. ve Sleeman, J. (2004). Spontaneous Combustion in Australian Underground Coal Mines.

Orhun, F. (1968). Gaz Kromatografisi, Taşıyıcı Akış Hızının Tesirleri Üzerinde Tecrübi Araştırmalar ve Metodun Türkiye' deki Bazı Tabii Gazların Hidrokarbon Analizlerine Etkisi, Maden Teknik ve Arama Dergisi, Cilt:70, Sayı:70, 143-177.

Risk Yönetimi Derneği Soma Çalışma Grubu, https://drive.google.com/drive/folders/1j3L1cUuLgon_yJ0oosxQw4PeTFDXE1hX ((erişim tarihi 01.08.2023)

Resmi Gazete, 2023. Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, Sayı: 29271, Ankara, https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/03/20150310-8.htm (erişim tarihi 18.08.2023)

URL-1 Kömürün Kendiliğinden Yanma Risklerinin Yönetimi İçin Teknik Referans (Çeviri),

YERALTI KÖMÜR MADENLERİNDE PALETLİ YÜKLEYİCİLERİN HAREKET KABİLİYETİNİN TASARIMI

MOBILITY DESIGN OF CRAWLER LOADERS IN UNDERDROUND COAL MINES

G. Bayar [1, *], O. Su [2, 5], A. Özarslan [3, 5], A. Topuz [1, 5], B. Erdoğan [1, 5], U. Sakız [3, 5], H. Kaya [4, 5], M. Kiraz [6], H. Yıldırım [6]

[1] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Makine Mühendisliği Böl., Zonguldak
[2] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, ZMYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Böl., Zonguldak
[3] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Böl., Zonguldak
[4] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Böl., Zonguldak
[5] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Makinaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Zonguldak
[6] Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü, Zonguldak
*(*Sorumlu yazar: bayar@beun.edu.tr)*

ÖZ

Zonguldak Taşkömürü Havzası'ndaki madenlerde kullanılmak üzere paletli bir yükleyici üretilmesi planlanmıştır. Gerek galeri gerekse de desandrelerde farklı zemin koşullarında hareket edecek olan yükleyicinin en iyi makine performansını sağlayabilmek için paletlerin hareket kabiliyetini önceden bilmek çok önemlidir. Çünkü yükleyicilerin yaptığı işin yaklaşık %80'i yürüyüş üniteleri, %20'si de kovanın hareketi ile geçmektedir.

Bu bildiride E-H yükleyici paletlerinin farklı zemin ve eğim koşullarında hareket edebilme kabiliyetini tespit etmek üzere geliştirilmiş olan bir yazılım tanıtılmaktadır. Bu yazılımda, yükleyiciye ait geometrik, mekanik ve ortam koşulları ile ilgili parametreler girildikten sonra, yükleyicinin dönme kapasitesi, çekiş kuvveti, güç, tork, batma derinliği, tanımlanan eğimi tırmanabilme kabiliyeti gibi çıktılar hesaplanmakta ve ortaya çıkan bulgular grafiksel olarak sunulmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Yükleyici, kömür madeni, hareket kabiliyeti, yazılım

ABSTRACT

It has been intended to manufacture a crawler loader which will be used in the coal mines of Zonguldak Hardcoal Basin. It is very important to predict the mobility of the tracks, which will move in different ground conditions in both galleries and inclines, in order to provide the best machine performance because 80% of the work is handled by the walking units and 20% is processed by the movement of the bucket.

In this paper, a software, which was developed to detect the mobility of the E-H loader tracks in different ground and slope conditions, is introduced. In this software, following the input of the parameters related to the geometrical, mechanical and environmental conditions of the loader, outputs such as the loader's rotation ability, tractive force, power, torque, sinking depth, the ability to move upward according to the defined slope can be calculated and the results are graphically presented.

Keywords: Loader, coal mine, mobility, software

GİRİŞ

Yükleyiciler genellikle maden, inşaat, tarım gibi sektörlerde gevşek ya da kazılmış kum, kaya, toprak vb. gibi malzemeyi bir yere yığmak veya yüklemek amacıyla iş makinesi olarak kullanılmaktadır. Yeraltı veya yerüstü fark etmeksizin madenciliğin hemen hemen her kolunda ve tünelcilik sektöründe vazgeçilmez birer araç haline gelmiştir.

Genellikle kova kapasiteleri en önemli husus olmakla birlikte, yeraltı kömür madenciliğinde kullanılan yükleyiciler sahip oldukları güç, enerji ve iş yapabilme kabiliyetleri açısından düşünülerek genellikle çok fonksiyonlu olmaları arzu edilir. Bu bağlamda öncelikli olarak kova olmak üzere, farklı ataşmanlar ile birlikte kullanılarak birden fazla işi yapabilecek kabiliyette tasarlanırlar. Ancak, her madenin kendine özgü farklı bir doğasının olması, ataşman kullanımını, makine hareket kabiliyetini veya iş performansını kısıtlayabilmektedir.

Günümüzde kullanıldıkları yerlere göre birçok yükleyici tipi mevcuttur. Geometrik boyut, güç ve yükleme kapasitesi uygun yükleyici seçimi açısından en önemli belirleyici parametrelerdir. Özdoğan (1983) yükleyicilerin genel olarak tanıtmış ve madencilikteki kullanım alanlarını açıklamıştır.

Yerüstünde kullanılan yükleyiciler sessiz, az yakıt tüketen ve konforlu makineler olabilmektedir. Yer ve alan sınırlaması olmadığı için her türlü kepçe boşaltma düzeneklerine göre uygun bir makine seçimi yapılabilir. Bu noktada açık işletmelerde, tünellerde ve diğer yerüstü madenlerinde en çok kovası öne doğru devrilerek boşaltma yapan lastik tekerlekli yükleyiciler tercih edilmektedir. Ancak, yeraltı madenlerinde durum biraz daha farklıdır. Özellikle kömürde kullanılan yükleyicilerin kısıtlı bir kapalı hacim içerisinde manevra yapabilmesi, yüksek eğimlerde çalışabilmesi ve ağır zemin koşullarında hareket edebilmesi önemli bir ihtiyaçtır. Bu koşullar yükleyicinin paletli olmasını zorunlu kılmaktadır (Şekil 1). Paletli yükleyicilerde daha çok kova yana devrilerek boşaltma yapılır ve lastik tekerleklilere göre daha zorlu jeolojik koşullarda çalıştıkları için hareketlilikleri ve manevra kabiliyetleri biraz daha düşüktür. Bu nedenle işlevlerini yerine getirmesi zaman zaman güçleşmektedir. Makinenin zarar görmeden, sağa-sola çarpmadan manevra yapabilmesi, yüksek eğimlere tırmanabilmesi üretim verimliliği açısından önemlidir. Galeri içerisinde taban kazısı yapılacağı durumda, önden boşaltmalı kovalar da kullanılmaktadır.



a. Sandvik LS600 b. Famur EZ 1200

Şekil 1. Kömür madenlerinde kullanılan paletli yer altı yükleyicileri

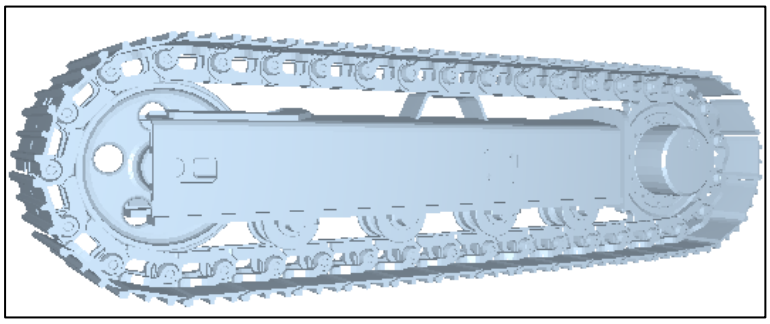
Yükleyiciler ve üzerine takılan ataşmanlarla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ur Rehman ve Awuah-Offei (2020) lastik tekerlekli yükleyicilerin hız, sürüş eforu, kazı yüksekliği, hücum açısı gibi parametrelerin kova batma ve koparma kuvveti üzerindeki etkisini incelemiştir. Coetzee ve Els (2009) yükleyici kovasının doldurulması sırasında yerdeğiştirme ve koparma kuvvetlerini, koparma enerjisini modellemişlerdir. Değirmencioğlu vd. (2021) kovası üzerindeki toplam basınç ve sıkıştırma kuvvetlerini ayrık elemanlar yöntemi ile analiz etmişler, kova üzerine etkiyen gerilme ve deformasyonların kovaya zarar vermediğini belirlemişlerdir. Çolpan (2007) lastik tekerlekli yükleyicilerin bom tasarımının iyileştirilmesini araştırmıştır.

Bu bildiride TTK Maden Makinaları Fabrikasında prototip imalatı yapılması planlanan elektro-hidrolik tahrikli bir paletli yükleyicinin hareket kabiliyetinin tasarım mekaniği ve bu amaçla geliştirilen bir yazılım tanıtılmaktadır. Buna göre paletli yükleyicilerin eğimli yol performansı, kritik eğim açısı, farklı yeraltı galeri kesitlerinde palet-zemin etkileşimine göre araç manevra kabiliyeti ve aracın dönebilme yeteneği yazılımla incelenmekte ve ortaya çıkan bulgular grafiksel olarak sunulmaktadır.

PALETLERİN HAREKET KABİLİYETİ

Doğası gereği yeraltı kömür madenlerindeki faaliyetler zor ve karmaşık jeolojik şartlarda yürütüldüğü için kullanılacak olan herhangi bir kazıcı veya yükleyici makinenin "paletli" tasarlanması zorunlu bir tercih sebebi olmaktadır. Paletler, kazı çalışmalarında ihtiyaç duyulan yüksek itme kuvvetlerini oluşturarak malzemenin kaldırılmasını, sökülmesini ve zor yeraltı koşullarında yürümesini sağlar.

Paletler bir yükleyicide en fazla güç çeken kısımdır (Şekil 2). Bu nedenle bir makine üzerinde kullanılacak paletlerin tasarımı ve hareket kabiliyetinin irdelenmesi imalat öncesi çok önemlidir. Her madenin kendine has bir çalışma ortamı ve üretim yöntemi vardır. Bu nedenle koşullara uygun bir yükleyici makine üretilebilmesi için paletleriyle ilgili bazı tasarım parametrelerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekir. Bu noktada yükleyicinin teknik özelliklerine göre desandrelerde (yer altı iniş ve çıkışlarda) tırmanabileceği eğimler, farklı zemin koşullarında hareket edebilme yeteneği, devrilme açısı, batma derinliği gibi hususlarının önceden bilinmesi gereklidir.



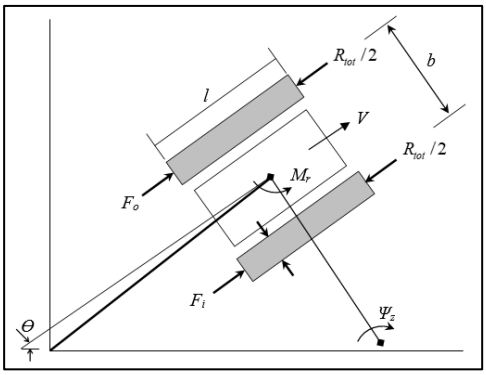
Şekil 2. Yükleyici paleti katı modeli

Dönme Kabiliyeti

Paletlerin hareket yeteneğini belirleyen ana unsur aracın dönme kabiliyetidir. Dönme işlemini gerçekleştirmek için diferansiyel sürüş sistemi kullanan bir yükleyici makinanın sürüş sisteminin, paletlerin zemin üzerinde kaymasından kaynaklanan dönme (hareket) direnci momentini yenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım Şekil 3'te gösterildiği gibi kurgulanabilir.

Hareket direnci matematiksel modeli Bekker (1969) tarafından geliştirilmiştir. Bu model aynı zamanda hazırlanan programın da teorisini oluşturmaktadır. Buna göre yükleyici hareket direnci Eşitlik 1 ve paletin batma ilişkisi Eşitlik 2'ye göre kurgulamış ve paletli aracın hareket kabiliyetini bu modeller üzerine geliştirmiştir.

$$R_{tot} = Wf_r = \left[\frac{1}{(n+1)b^{1/n}\left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right)^{1/n}} \right] \left[\frac{W}{l} \right]^{\frac{n+1}{n}} \tag{1}$$



Şekil 3. Paletli aracın kendi ekseni etrafında dönmesi (Bekker, 1956; Nuthall, 1964).

Palet ile zemin arasındaki temas alanının düzgün yayılı bir basınca sahip olduğu varsayıldığında yumuşak zeminlerde batma derinliği "z_o" Eşitlik 2'den hesaplanabilir.

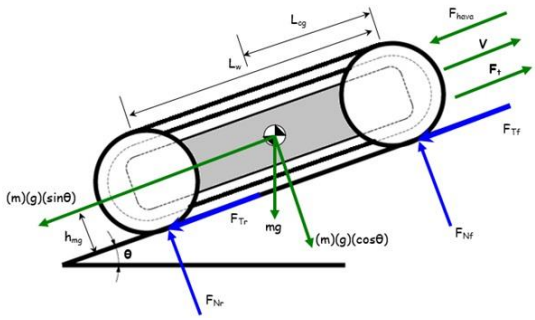
$$z_o = \left(\frac{W/bl}{k_c/b + k_\phi} \right)^{1/n} \tag{2}$$

Burada : Z_0 yükleyicinin batma derinliği, W arazi üzerindeki taşıtın zemine uyguladığı normal yük toplamıdır. b ve l ise sırasıyla palet-arazi temas alanının genişliği ve uzunluğudur. Programda palet/zemin ara yüzünde oluşan normal basınçta (p) hesaplanabilmektedir.

Yükleyicinin Desandre Performansı ve Tırmanabileceği Kritik Eğim Açısı

Yeraltı kömür madenlerinde sürülen desandreler konveyör bantlarının çalışma eğimlerine bağlı olarak en fazla 22-24°'lere kadar sürülebilmektedir. Bu nedenle imalatı yapılacak yükleyicilerin de çalışabilecekleri kritik eğim açılarının belirlenmesi ve performanslarının değerlendirilmesi gerekir.

Paletli yükleyicinin eğimli desandrede yukarı hareketi sırasında paletin istikamet makarası doğrultusunda (palet ön tarafı) zemin normal tepki kuvveti düşmekte, rim dişlisi tarafında ise yükselmektedir. Kritik bir tırmanma açısına ulaşıldığında ise palet ön tarafında oluşan normal tepki kuvveti azalmaktadır. Yükleyicinin ağırlık merkezine göre moment dengesi kritik bir eşiği aştığında ise aracın devrilmesi söz konusu olmaktadır. Bu nedenle meyil yukarı hareket eden taşıtın serbest cisim diyagramı çizilerek kuvvet denge eşitlikleri oluşturulur (Şekil 4). Kritik eğim açısının bulunabilmesi için bu eşitlilikler program içerisinde tanımlanmıştır.

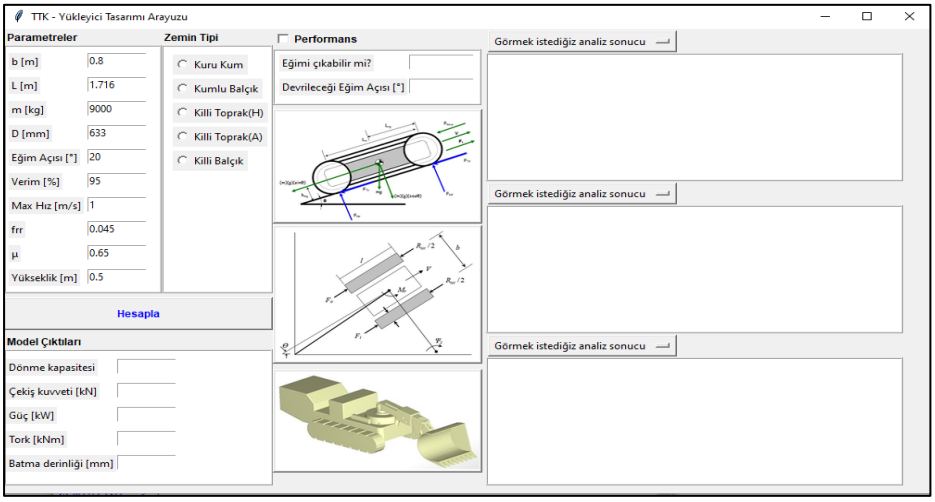


Şekil 4. Paletli aracın eğimli yüzey kinematik modeli

PALET HAREKETİNİ TASARIM YAZILIMI

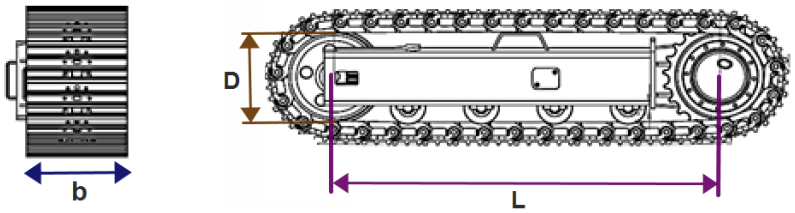
Paletler makinenin zeminle temas halinde olan ve tüm makinanın yükünü taşıyan en temel elemanlar olmakla birlikte, sürüş ve manevra kabiliyetini belirleyen bir rol üstlenmektedir. Her madenin kendine has bir çalışma ortamı ve üretim yöntemi vardır. Bu nedenle koşullara uygun bir yükleyici makine üretilebilmesi için paletleriyle ilgili bazı tasarım parametrelerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekir. Bu kapsamda paletlerin zeminle etkileşimi ile ilgili her türlü kabiliyeti hakkında bilgi vermesi amaçlanana bir yazılım geliştirilmiştir. Açık kaynak kod stratejisine olanak sağlaması açısından Phyton programlama dili kullanılarak oluşturulan yazılım, Microsoft ve Linux tabanlı işletim sistemlerinde bilgisayara kurularak yüklenebilmektedir. Üzerinde yapılabilecek geliştirmelere ve iyileştirmelere de imkan sağlamaktadır.

Yazılımın genel görüntüsü Şekil 5'te gösterilmiştir. Burada öncelikle tasarlanacak yükleyici ile ilgili geometrik parametreler ve tasarıma bağlı parametreler sol taraftaki pencere içerisinde kullanıcı tarafından girilmektedir. Ayrıca, yükleyicinin çalışacağı zemin koşullarının belirlenmesi, yani çalışma şartlarının kullanıcı tarafından ortaya konması önem arz etmektedir. Buna göre zemin tipi seçimi yapılmaktadır.



Şekil 5. Yazılım arayüzünün genel görüntüsü

Geometrik parametrelerden ilki yükleyicinin palet merkezleri arasındaki mesafedir (b). Diğerleri palet dönme merkezleri arasındaki uzaklık (L) ve tasarlanacak olan yükleyici toplam kütlesi (m) dir. Ayrıca palet dişlisi çapının (D) da belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Paletle ilgili girilen geometrik parametreler

Bunların yanı sıra programda sabit olarak tanımlanmış bazı katsayılar da bulunmaktadır. Bunlar yükleyici ağırlık merkezi ile zemin arasındaki yükseklik, hareket zemini yüzey eğimi (°), aracın maksimum hızı (m/s), elektro-mekanik hareket gurubunun çalışma verimi, yüzey sürtünme değeri ve dönme direnci katsayısıdır. Bu çerçevede kömür madeni koşullarına uygun olarak tüm veriler tanımlanmıştır.

Zemin Tipinin Seçimi

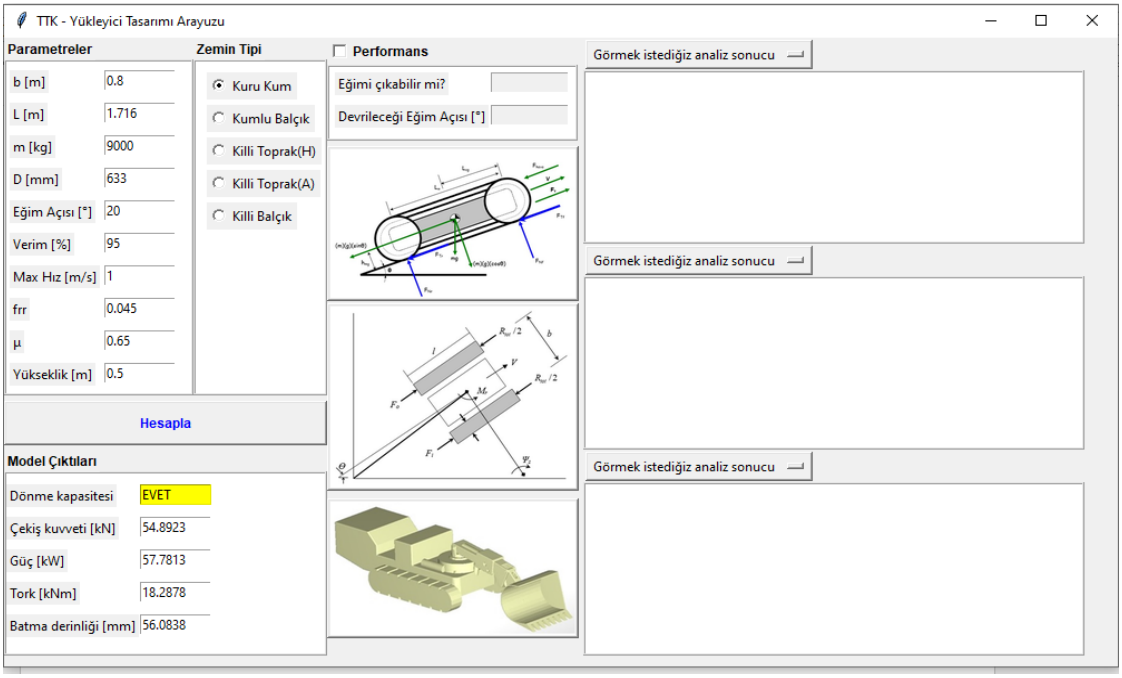
Paletli yükleyici ile arazi arasında etkileşimin tanımlanabilmesi için zeminin fiziko-mekanik özellikleri ve araç yüküne karşı tepkisi hakkında temel bilgiye sahip olunması gerekmektedir. Kömür madenlerindeki galeri ve rekup lağımlarının sürülmesinde en çok karşılaşılan kaya birimleri ince taneli kumtaşı, silttaşı, konglomera ve kiltaşı sayılabilir. Bununla birlikte hem mevsimsel koşullara bağlı olarak ortaya çıkan, hem de kazı ve delme işlerinde kullanılan su etkisiyle killi ortamlarda balçık zeminler de oluşabilmektedir. Balçık zeminlerde sürülen taban yollarında makinanın tabana batma sorunu da meydana gelebilmektedir.

Bunun yanı sıra kömür madenlerinde sürülen galerilerde patlatma sonrası tabanda yığın oluşturan dayanımı nispeten yüksek kumtaşı ve konglomera kaya parçaları bünyesindeki kuvars içeriği ve köşeli yapıları nedeniyle, E-H yükleyicilerin paletlerinde daha hızlı aşınmalara neden olabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı yükleyici palet tasarımı ve seçiminde zemin tipinin doğru belirlenmesi çok önemli olmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen programın da en önemli girdi parametresi olduğu söylenebilir. Çünkü yapılan tüm hesaplamalar bu zemin tipine göre işlenmektedir.

Programda kömür madenlerinde karşılaşılabilecek olan zemin tipleri olarak “kuru kum”, “kumlu balçık”, “killi toprak” ve “killi balçık” olarak tanımlanmıştır. Palet ile zemin arasındaki etkileşimde kohezyon, içsel sürtünme açısı ve diğer temel arazi zemin parametreleri bu girdilere göre işlenmektedir.

Model Çıktıları

Örnek bir zemin tipi seçimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Zemin tipi “Kuru kum” olarak seçilmiş ve “Hesapla” butonu ile model çıktıları elde edilmiştir. Model çıktısı olarak; gerekli toplam çekiş kuvveti (kN), toplam güç (kW), toplam tork (kNm) ve paletli aracın batma derinliği (mm) hesaplanmaktadır. Bu veriler, aracın dönebilme kapasitesini ortaya koymaktadır. Model çıktısı olumlu ise “Dönme kapasitesi” “Evet”, olumsuz ise “Hayır” olarak kullanıcıyı yönlendirmektedir.

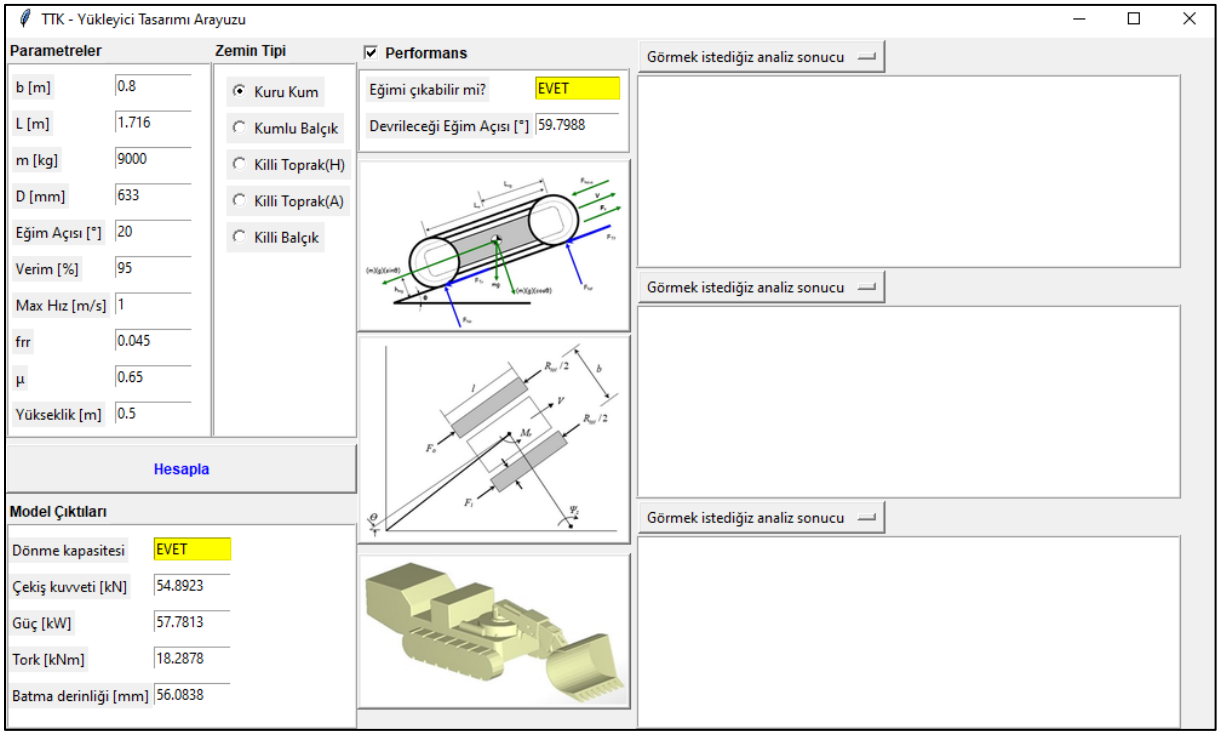


Şekil 7. Örnek bir çözümleme

Burada b = 0,8 m, l = 1,716 m, yükleyicinin ağırlığı (m) = 9000 kg, D = 633 mm, tırmanacağı desandrenin eğim açısı = 20°, yükseklik = 0,5 m, yükleyici maksimum hızı = 1 m/s, verim = %95 ve sürtünme değerleri 0,045 ve 0,65 olarak girilmiştir. Buna göre çekiş kuvveti = 54,89 kN, gerekli güç = 57,78 kW, gerekli tork = 18,28 kNm ve batma derinliği = 56,08 mm olarak model çıktıları içerisinde hesaplanmıştır. Ayrıca, bu koşullar altında yükleyicinin dönme kapasitesinin olumlu olduğu model çıktısında "Evet" olarak belirtilmiş ve bu durum "sarı renk" ile de vurgulanmıştır.

Ayrıca, hazırlanan program, tasarım parametreleri girilen yükleyicinin zemin tipine bağlı olarak belirlenen eğimi çıkıp çıkamayacağına cevap vermektedir. Şekil 8'de gösterildiği gibi, "Kuru kum" zemini üzerinde araç 20° 'lik bir eğimi tırmanabilmesinin olumlu olduğu "Evet" olarak belirlenmiş ve performans penceresinde de sarı renkte vurgulanmıştır.

Yine bu pencere içerisinde yapılan bir diğer performans değerlendirmesinde ise, aracın belirlenen zemin şartlarında devrileceği (tip over) yüzey eğim açısı da hesaplanmaktadır. Buna göre yükleyicinin "Kuru kum" zemini üzerinde 59,79° 'ye kadar devrilmeden hareket edebileceği belirlenmiştir.



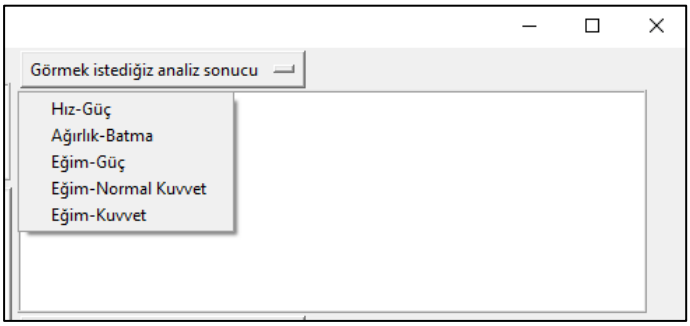
Şekil 8. Zemin tipinin ve performans değerlendirmesi

Grafiksel Çıktılar

Program üzerinde yapılan performans değerlendirmelerinin sonuçları grafiksel olarak da görülebilmektedir. Şekil 9'da gösterildiği gibi "Hız-Güç", "Ağırlık-Batma", "Eğim-Güç", "Eğim-Normal Kuvvet" ve "Eğim-Kuvvet" ilişkilerinden üç tanesi programın sağ tarafındaki pencerelerde grafiksel olarak gösterilebilmektedir. Bu çerçevede,

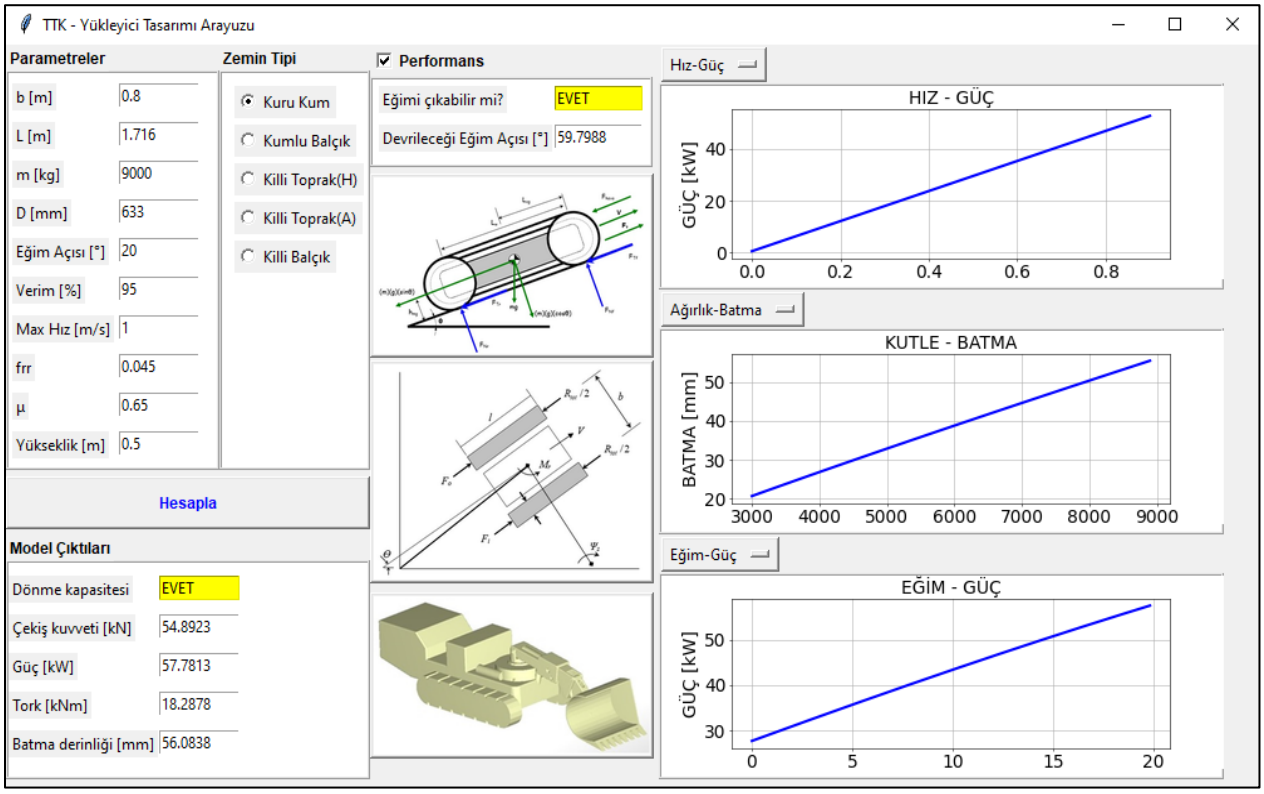
- tasarımı yapılan yükleyiciye bağlı geometrik boyutlar ve fiziksel özellikler ile zemin tipine göre yükleyici elektrik motoru gücü ile yükleyici hızı arasındaki ilişki,
- yükleyicinin tanımlanan ağırlığına bağlı paletlerin zemine uyguladığı basınçtan yükleyicinin batma mesafesi ilişkisi,

- çalıştığı ortamdaki desandre eğim açısına bağlı harcayacağı güç miktarı ilişkisi,
- çalıştığı ortamdaki desandre eğim açısına bağlı arka ve ön taraftaki normal kuvvet ilişkisi,
- yerçekimi etkisi ile paletlerde rol oynayan traktive eforun eğim açısına göre değişimi ilişkisi ortaya çıkarılmaktadır. "Eğim-Kuvvet" ilişkisi aynı zamanda aracın çıkabileceği maksimum eğim açısını da vermektedir.

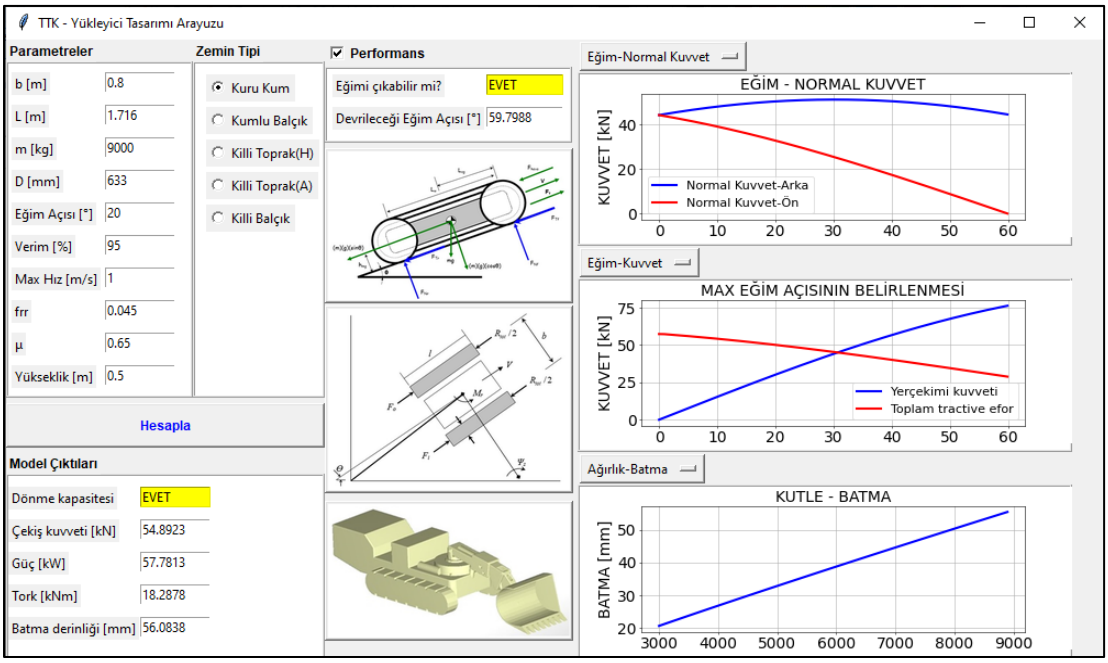


Şekil 9. Program tarafından verilen grafiksel çıktı parametreleri

Şekil 10 ve Şekil 11'de yükleyicinin "Kuru kum" zeminindeki hareket performansına bağlı oluşturulan grafikler verilmiştir.



Şekil 10. "Hız-Güç", "Kütle-Batma" ve "Eğim-Güç" ilişkilerinin grafiksel olarak gösterimi



Şekil 11. “Eğim-Normal Kuvvet” ve “Eğim-Kuvvet” ilişkilerinin grafiksel olarak gösterimi

SONUÇLAR

Türkiye Taşkömürü Kurumu’nun kullanmakta olduğu tüm yükleyici makinaların artık ekonomik ömürlerini tamamlaması, sık sık arıza yapması ve yurt dışı makine maliyetlerinin de çok yüksek olması nedeniyle kurum kendi yükleyici makinesini üretme yoluna gitmeyi tercih etmiştir. Bu çerçevede kömür madenlerinde çalışabilecek yerli ve milli bir paletli yükleyicinin öncelikle bir prorotip imalatının TTK Maden Makinaları Fabrikası’nda üretimi ve sertifikasyon işleri yapıldıktan sonra seri üretime geçilerek tüm müesseselerde devreye alınması hedeflenmektedir.

Bu amaçla tasarlanmakta olan yükleyici üzerinde seçilecek paletlerin hareket kabiliyetini tasarlayan bir yazılımla yükleyicinin dönme kapasitesi, çekiş kuvveti, elektrik gücü, tork ve batma derinliği gibi parametreler hesaplanmaktadır.

Ayrıca, elde edilen model çıktılarından tanımlanan desandre eğimini çıkabilme yeteneği ve yükleyicinin kritik devrilme açısı da bulunmaktadır. “Hız-Güç”, “Kütle-Batma”, “Eğim-Güç”, “Eğim-Normal Kuvvet” ve “Eğim-Kuvvet” gibi ilişkiler de grafiksel olarak sunulmaktadır. Aynı zamanda yükleyicinin çıkabileceği maksimum eğim açısı da belirlenebilmektedir.

Sonuç olarak yeraltı şartlarında çalışacak paletli bir maden makinesinin hareket kabiliyeti ve fonksiyonları çok farklı açıdan değerlendirebilmekte ve makine performansı hakkında önemli bilgileri ortaya çıkarabilmektedir. Bu bağlamda hareket sistemi palet olan her türlü kazıcı veya delici makinelere göre de yazılım geliştirilebilir niteliktedir.

TEŞEKKÜR

Bu bildirinin hazırlanmasına destek veren TTK Genel Müdürlüğüne ve TTK Maden Makinaları Fabrikası İşletme Müdürlüğüne en içten teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Bekker, M.G. (1956). Theory of land locomotion, Ann. Arbor, MI: University of Michigan Press.

Bekker, M.G. (1969). Introduction to terrain-vehicle systems, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

Coetzee, C.J. and Els, D.N.J. (2009) The numerical modelling of excavator bucket filling using DEM, *Journal of Terramechanics,* 46 (5), 217-227.

Çolpan, A.C. (2007) Lastik tekerlekli yükleyicilerin taşıyıcı kol tasarımının iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 83 s.

Değirmencioğlu P., Böğrekci, İ., Hamisu S. (2021) Analysis of interactive effects of bulk material on excavator bucket, *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi,* 4(1), 1-12.

Nuthall, C. J. (1964). Some notes on the steering of tracked vehicles, Journal of Terramechanics, Vol.1, No.1.

Özdoğan, M. (1983). Yükleyiciler ve madencilikteki kullanımları, Madencilik, Cilt:22, Sayı 1.

Ur Rehman, A. and Awuah-Offei, K. (2020). Understanding how speed, tractive effort, digging height, and rake angle affect bucket penetration and resistive forces for rubber tire loaders. Mining, Metallurgy & Exploration, 37, 1423–1435.

EVA ESASLI SU YALITIM MEMBRANLARININ NEM TRANSFERİ VE TÜNEL YAPI PERFORMANSINA ETKİLERİ

THE EFFECTS OF EVA BASED WATERPROOFING MEMBRANES ON MOISTURE TRANSFER AND TUNNEL CONSTRUCTION PERFORMANCE

C.M. Cısdık [1, *], S.N. Bıçakçı [2], H.K. Akkoyun [3], U.A. Doğan [4]

[1] *Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları*
[2] *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*
[3] *Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları*
[4] *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*
*(*Sorumlu yazar: mert.cisdik@mbcc-group.com)*

ÖZ

Günümüzde, yeni Avusturya tünel açma metodu (NATM) uygulamalarında, kalıcı kaplamanın izolasyonunun sağlanması amacıyla, geçici tahkimat ile kalıcı kaplama arasındaki su yalıtımı için membran uygulamaları yapılmaktadır ve uygulamalarda, genellikle projenin gerektirdiği koşullara göre farklı kalınlıklarda ve katmanlarda poly vinil klorür (PVC) esaslı yalıtım membranları kullanılmaktadır. PVC esaslı yalıtım membanlarının birçok avantajı olmasına rağmen, uygulamanın zor olması, memranın delinmesi, uygulama sonrasında ortaya çıkan su sızıntılarının kaynağının belirlenememesi gibi birçok dezevantajı bulunmaktadır. Bu dezavantajların önüne geçmek için yapılan araştırmalarda alternatif yöntemler geliştirilmektedir. Bu yöntemler arasında Etilen Vinil Asetat (EVA) esaslı püskürtme yalıtım membranı dikkat çekmektedir. EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranları, PVC esaslı yalıtım membranlarından farklı olarak, hem geçici tahkimat amaçlı püskürtme betona, hem de kalıcı kaplama betonuna yapışma özelliklerine sahiptir. Bu özelliği sayesinde su girişlerini engellemekle birlikte kompozit kabuk yapısı oluşturarak geçici ve kalıcı tahkimatların birlikte çalışmasına olanak sağlar. Literaturde EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranları ile ilgili çalışmalarda kompozit özelliği sayesinde beton kalınlıklarının azaltılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, yer altı suyunun ilerleyişini engellediği ve nem transferini sınırlandığı belirtilmiştir. Bu bilgiler ışığında, yapılan çalışmada, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranlarının nem transferi ve yapının performansına etkileri ile ilgili literatür araştırması yapılmış ve sonuçlar ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: EVA bazlı membran, püskürtme su yalıtım membranı, su yalıtımı, tünel yalıtımı

ABSTRACT

Currently, in the New Austrian Tunneling Method (NATM) applications, membrane applications are used for waterproofing between temporary and permanent concrete linings to ensure insulation of permanent sealing. Generally, polyvinyl chloride (PVC) based waterproofing membranes of different thicknesses and layers are used based on the project requirements. Despite the many advantages of PVC-based waterproofing membranes, there are several disadvantages such as the difficulty of application, membrane punctures, and difficulties in identifying the source of water leakage after application. Researchers have conducted various studies and attempted to develop alternative methods to overcome these disadvantages. Among these methods, Ethylene Vinyl Acetate (EVA) based spray-applied waterproofing membrane stands out. EVA-based spray-applied waterproofing membranes, unlike PVC-based membranes, have double-sided adhesion properties to both sprayed concrete linings used as temporary and permanent lining concrete. This property not only prevents water ingress but also allows the temporary and permanent linings to work together by creating a composite shell structure. Studies on EVA-based spray-applied waterproofing membranes have been conducted in the

literature, indicating that the composite feature allows for a reduction in concrete thickness. Additionally, it has been noted that it hinders the progression of groundwater and limits moisture transfer. In light of this information, the study conducted a literature review on the effects of EVA-based spray-applied waterproofing membranes on moisture transfer and the performance of the structure, and the results were evaluated in detail.

Keywords: EVA based membrane, sprayed waterproof membrane, waterproofing, tunnel isolation

GİRİŞ

Dağlık coğrafyaya sahip ülkelerde, yol ve demiryolu ulaşımının kesintisiz sağlanması ve büyük şehirlerde arazi işgali sorununun üstesinden gelmek amacıyla yapılan tünel inşaatları büyük bir önem taşımaktadır. Türkiye'de 2020 ile 2030 yılları arasında, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün envanterine (KGM, 2021) göre 240 km uzunluğunda karayolu tüneli yapımı hedeflenirken, Devlet Demiryolları'nın 2018 yılı raporuna göre (TCDD, 2022) 375 km demiryolu tüneli inşa edilmesi planlanmakta ve büyük şehir belediyelerinin bildirimlerine göre (İstanbul B.B., 2019; Mersin B.B., 2022; Metro İzmir, 2020) 826 km metro tüneli yapımı gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Yapılan veya yapılması planlanan bu inşaatlarda en çok kullanılan yöntem, tünel endüstrisinde Del-Patlat olarak da bilinen Yeni Avusturya Tünel Açma (NATM-New Austrian Tunneling Method) Metodudur. NATM yönteminin çalışma prensibi, Rabcewicz tarafından (Rebcewicz, 1964) şu şekilde ifade edilir: "Kaya basıncını azaltmak ve bu basıncı çevreleyen kaya tabakasına dağıtmak amacıyla geçici bir destekleme oluşturulması ve deformasyonlara izin verilmesi esasına dayanır. Böylelikle sonraki destekleme işlemi daha az yüke maruz kalır ve daha sonra daha ince bir yapıda destekleme sağlanabilir." Diğer bir deyişle, deformasyonların karşılanması amacıyla geçici tahkimat olarak kullanılan püskürtme beton uygulaması ile yüklerin dengelemesi ve tekrar kayaya iletilmesi hedeflenir. NATM uygulamalarında, geçici tahkimat ile kalıcı kaplama arasında kalıcı kaplamanın su yalıtımını sağlamak amacıyla su yalıtım membranı uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, genellikle poly vinil klorür (PVC) esaslı yalıtım membranları tercih edilmektedir. Farklı projelerin ihtiyaçlarına bağlı olarak, farklı kalınlık ve katman seçeneklerinde (kompartıman vb.) PVC uygulamalarına sıkça rastlanmaktadır. Ancak PVC yalıtım membranlarının uygulanmasındaki zorluklar, kalıcı kaplama betonunun hazırlık aşamasında yerleştirilen donatının membranı delmesi, uygulama sonrası su sızıntılarının kaynağının tespit edilememesi ve sorunun çözümünün zorlu ve maliyetli olması gibi sebepler alternatif ürün arayışlarını hızlandırmıştır. Bu arayışlar sonucunda geliştirilen alternatiflerden biri de EVA (Etilen Vinil Asetat) esaslı püskürtme su yalıtım membranlarıdır. EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranları, hem geçici tahkimat olarak kullanılan püskürtme betona hem de kalıcı kaplama betonuna çift taraflı yapışma özelliği sunmaktadır. Bu çift taraflı yapışma özelliği, suyun girişini engellemenin yanı sıra geçici ve kalıcı tahkimatın etkili bir şekilde bir arada çalışmasını sağlayarak kompozit bir kabuk yapısı oluşturur (Şekil 1).



Şekil 1. Püskürtme membran tipik yerleşimi **(**ITAtech, 2013**)**

Püskürtme su yalıtım membranlarının tercih edilmesinde hızlı ve kolay uygulanması da önemli bir etken olmaktadır. Ayrıca püskürtme su yalıtım membranlarının çift taraflı yapışma özelliği sayesinde betonarme katmanları birbirine bağlaması, kalıcı kaplamanın yerine, uygulama açısından daha kolay olan püskürtme beton kullanımını mümkün hale getirmesi de zaman verimliliğinin dışında kalıp maliyetinden de tasarruf edilmesini sağlamaktadır (Pelz, 2022).

PÜSKÜRTME SU YALITIM MEMBRANLARININ DAYANIKLILIK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

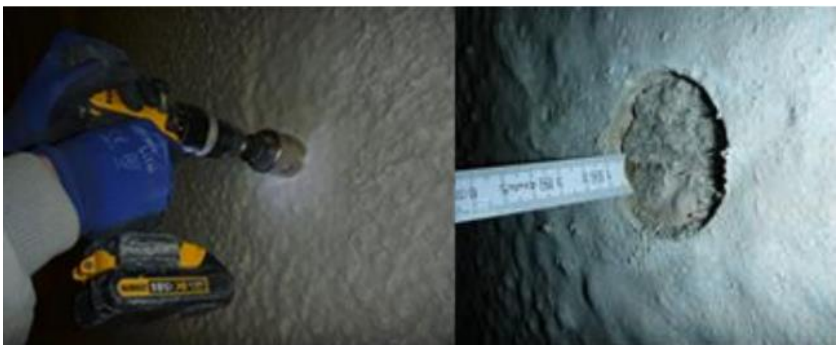
Su Geçirimsizlik Özellikleri

Membran uygulamalarının yapılmasındaki en temel amaç su yalıtımının sağlanmasıdır. Polimer malzemelerden oluşan membranlarda çevre koşulları (suya uzun süreli maruz kalma, sıcaklık, nem durumu vs.) membranın dayanıklılık ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Püskürtme su yalıtım membranlarının su geçirimsizlik özellikleri ile ilgili bugüne kadar birkaç çalışma yapılmış ve farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, Pisova ve Hilar (2017) tarafından yapılan çalışmada, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranın yapısını oluşturan ve birçok uzun polimer zincirinden oluşan polimer kolloidinin fiziksel özelliklerinin nem durumuna göre değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Çalışmaya göre, nemin düşük olduğu durumlarda malzeme film halinde büzülür, büzülen bu membran, artan nem ile beraber tekrar su emer ve bu su emilimi ile beraber malzemenin fiziksel özellikleri, bağ yapısı ve esneklik gibi özelliklerinde değişim meydana gelir. Genel olarak, su emilimi arttıkça, membranın çekme dayanımı azalırken, kopma uzaması artar.

Verani ve Aldrian (2010) tarafından yapılan çalışmada ise, inceledikleri EVA esaslı püskürtme su yalıtım membran ürününün, su damlalarından 20.000 kat daha küçük, su moleküllerinden ise 700 kat daha büyük olan gözenekler geliştirdiğini ve bu durumun membran tarafından emilen suyun buhar olarak salınmasına izin verdiğini belirtilmiştir. Yapılan çalışmada, su sızdırmazlık testleri yapılmış ve sonuç olarak sıvı veya buharın membranın belirli bir derecesine kadar nüfuz edebileceği, ancak bu etkinin membran uygulamasından sonraki ilk yıllarda, yüzeyde rutubet veya su damlalarına neden olacak kadar önemli olmadığı, ayrıca membran ürününün, yüzeyinde oluşan basıncı belirli bir ölçüde engellediği sonucuna varılmıştır.

Yapışma Mukavemeti

Daha önce de bahsedildiği gibi, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranları, hem geçici tahkimat olarak kullanılan püskürtme betona hem de kalıcı kaplama betonuna çift taraflı yapışma özelliği sunar ve bu yapışma özelliğinin belirli bir seviyede olması beklenir. Membran ürününün yapışma mukavemetini belirlemek amacıyla genellikle çekip koparma (pull off) metodu kullanılır (Şekil 2). Örneğin, ITAtech (2013), membran için minimum gereken çekme bağ dayanımını 0.5 MPa olarak önermektedir.



Şekil 2. Püskürtme membran yapışma dayanımının belirlenmesi (Holter, 2015)

Holter K. G. (2015) tarafından yapılan çalışmada membran ürünü en düşük -3 °C'de kalacak şekilde 35 donma çözünme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Sonrasında test yapılarak yapışma mukavemeti ölçülmüş ve 1,1-1,5 MPa arasında değerler elde edilmiştir. Bu da ürünün yapışma mukavemetinin olumsuz çevre koşullarına rağmen istenilen şartları sağladığını göstermektedir.

Çatlak Köprüleme Etkisi

EVA esaslı membranların ana işlevi, çevresinde bulunan betonda oluşan çatlaklar yoluyla ilerleyen suyun akışını engellemektir. Ancak bu özelliğinin yanısıra, betonda oluşan bu çatlakları köprüleme özelliğine de sahiptir. Membran ürünün iki tarafında bulunan beton farklı mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olabilir. Bu farklardan kaynaklı olarak betonlar farklı oranlarda büzülüp membranın her iki tarafında farklı çekme gerilmeleri meydana getirebilir. Bu durumda betonlarda çatlaklar oluşur ve Şekil 3'te de görüldüğü gibi bu çatlaklar 1 mm'ye kadar çıkabilir.



Şekil 3. Püskürtme beton tünel kaplamasından alınmış karot numunesi; ikincil kaplamada 0.8-1.0 mm genişliğinde kalıcı çatlak (Holter, 2015)

Betonda oluşan çekme gerilmeleri membran üzerinde de çekme gerilmeleri meydana getirir ve aynı zamanda çatlaklardan sızan su membran ürünün yüksek oranda suya maruz kalmasına, dolayısıyla, deformasyonlara neden olabilir. Bu etkiler altında, ürünün mekanik ve dayanıklılık özellikleri önemli rol oynar. Düşük yapışma mukavemetine sahip membran ürünleri, çekme gerilmeleri altında beton ile aderansını kaybedebilir ve yapıda süreksizlik meydana getirebilir. Diğer bir önemli nokta ise membran ürünün şekil değiştirme kapasitesidir. Oluşan yükler altında, yeterli şekil değiştirme kapasitesine sahip olmayan membran ürünlerinde çatlama ve yırtılmalar meydana gelebilir (Lemke ve Moran, 2015). Yeterli mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip membran ürünleri ise, mevcut olumsuz koşullardan etkilenmemekle beraber, çatlağın önünde bariyer oluşturarak köprüleme etkisine neden olabilir.

Holter (2016) tarafından yapılan çalışmada, farklı sıcaklıklarda, elastik davranışındaki değişimini belirlemek için iki tür EVA membranı incelenmiştir. Ayrıca, membran ürünleri üzerinde, farklı sıcaklıklarda çatlak köprüleme kapasitesi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, membran ürünlerinin çatlak köprüleme etkisinin, elastik davranışındaki değişimden daha anlamlı olduğu öne sürülmüştür. Ayrıca yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, membranın nem içeriği, ortamın nem ve sıcaklık değişimlerinin önemli rol oynadığı ve dikkate alınması gerektiğini belirtilmiştir.

EVA ESASLI PÜSKÜRTME SU YALITIM MEMBRANLARININ UYGULANMASI

Uluslararası Tünelcilik ve Yeraltı Alanları Birliği ITAtech (2013), püskürtme uygulamalı membranlar için "Püskürtme Uygulamalı Su Yalıtım Membranları Tasarım Rehberi" başlıklı bir kılavuz yayınlamıştır. Belge, mevcut durumun bir genel bakışını, uygulama örneklerini ve genel önerileri içermektedir. Ancak, püskürtme uygulamalı membran ürünlerinin kullanımıyla ilgili rehberlik sağlama konusunda iyi bir temel

oluştururken, bu tür membranların tasarım ve uygulama alanlarının tüm yönleriyle ilgili ayrıntılı bilgi sunmamaktadır (Su ve Bloodworth, 2019).

Rehber, püskürtme membranların kullanımı için en uygun su giriş koşullarını ve bu koşullara bağlı olarak, gereken potansiyel önlemleri gösteren bir akış şeması içermektedir. Ayrıca bu önlemlerin nasıl uygulanması gerektiği konusunda bazı yorumlar da bulunmaktadır. Bu şemadan elde edilen temel sonuç, püskürtme uygulamalı membranların çok ıslak alanlara veya aktif su girişi olan bölgelerin üzerine uygulanamayacağıdır. Bu bulgu birçok araştırmacı tarafından da desteklenmiştir (Naylor vd., 2011). EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranlarının şu ana kadar aktif su girişine maruz kalan yüksek geçirgenliğe sahip zeminlere "başarılı bir şekilde uygulanamadığı" görülmüştür (Marcher vd., 2011).

Yüzey Hazırlığı

Püskürtme uygulamalı membranlar genellikle birincil ve nihai püskürtme beton kaplamalarının arasına yerleştirilir. Sistemin bütünlüğünün sağlanması için membranın kaplama yüzeylerine kalıcı olarak bağlanması gerekir. Bağlama etkisini ve buna bağlı olarakta su yalıtım performansını etkileyen birkaç önemli faktör vardır. Bunlardan biri de alt tabakanın hazırlanmasıdır. Alt tabaka hazırlanırken ilk aşamada, püskürtme betonun üzerine, yüzeyi düzeltmek amacıyla kaplama yapılır (Leong vd., 2019; Naylor vd., 2011). Genellikle, düzeltme amacıyla düşük agrega boyutuna sahip harç numunesi veya püskürtme beton kullanılır. Alt tabakanın düzgün yüzeye sahip olması, membran ürününün daha tutarlı bir şekilde uygulanmasını sağlar. Bu da, daha iyi kalite ve daha düşük miktarda malzeme tüketimi anlamına gelir. ITA Kılavuzu (ITAtech, 2013), alt tabaka için maksimum 4 mm agrega boyutlu bir düzeltme tabakası önermektedir. Ayrıca, kılavuz**,** özellikle püskürtme betonun çelik makro fiber içermesi durumunda, düzeltme tabakasıyla püskürtme betonun iyi bir şekilde kaplanmasının esas olduğunu belirtir.

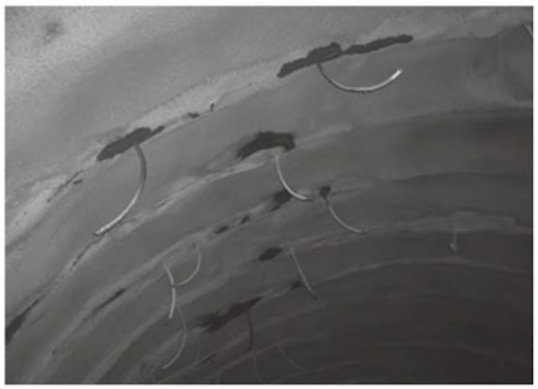
Bazı püskürtme membran ürünleri, gerekli yüzey işlemi parçası olarak alt tabakaya astar veya sızdırmazlık maddelerinin uygulanmasını gerektirir. Bu astarlar, membranın yeterli seviyede yapışmasını sağlar (Lemke ve Moran, 2015). Ayrıca, astar uygulaması, kaya tabakalarından sızan nemin önlenmesine yardımcı olabilir (Ballantyne, 2016; Quellet vd., 2013), böylece membran için ideal bir uygulama yüzeyi sağlar.

Su Girişlerinin Önlenmesi

Püskürtme membran teknolojisinin mevcut durumu göz önüne alındığında, kompozit sistemin inşasını kolaylaştırmak için ele alınması gereken birkaç uygulama sorunu bulunmaktadır. Bu sorunların birçoğu, tünelin kazılmış yüzeyinin koşulları, su girişi ve püskürtme beton birincil kaplamayla ilgilidir.

Püskürtme membran ürünleri, toz ya da sıvı halde tedarik edilmektedir. Her iki yöntemde de, püskürtme membrana, uygulama sırasında püskürtme ekipmanının nozul kısmında su eklenir. Bu durum, nihai membran kaplamasının bir bileşeninin su olması anlamına gelir. Nihai membran oluşumunda, ürünlerin bünyesindeki fazla suyu terlemeyle uzaklaştırdığı bilinmektedir. (Holter, 2015). Uygulama yüzeylerindeki aktif su girişi ve sızıntılar, membranın nihai halinin oluşumunu geciktirmeye veya membranın tamamen suyla yıkanması ve yüzeye tutunamamasına sebep olmaktadır. Bu olumsuzlukların önüne geçilmesi için, uygulama yüzeylerinin kuru olması gerekmektedir. Uygulama yüzeylerinin membran uygulamasından önce ve membranın kür süresi boyunca kuru kalmasını sağlamak için alınabilecek önlemler şu şekilde belirtilmiştir (Verani ve Aldrian, 2010);

- Şerit drenler (Şekil 4)
- Suyu yönlendirmek için kullanılan drenaj levhaları (Şekil 5)
- Lokal sızıntıları engelleyecek çimento enjeksiyonları veya çimento yamaları
- Akışkan, geçirimsiz kimyasal enjeksiyon uygulamaları



Şekil 4. Püskütme mebran uygulaması öncesi su sızıntılarının geçici drenajı, Viret Tüneli (Verani ve Aldrean, 2010)



Şekil 5. Püskütme mebran uygulaması öncesi aktif su girişlerinin yönetimi, Hirtenberger Mühimmat Deposu (Verani ve Aldrean, 2010)

Son Kaplamanın Uygulanması

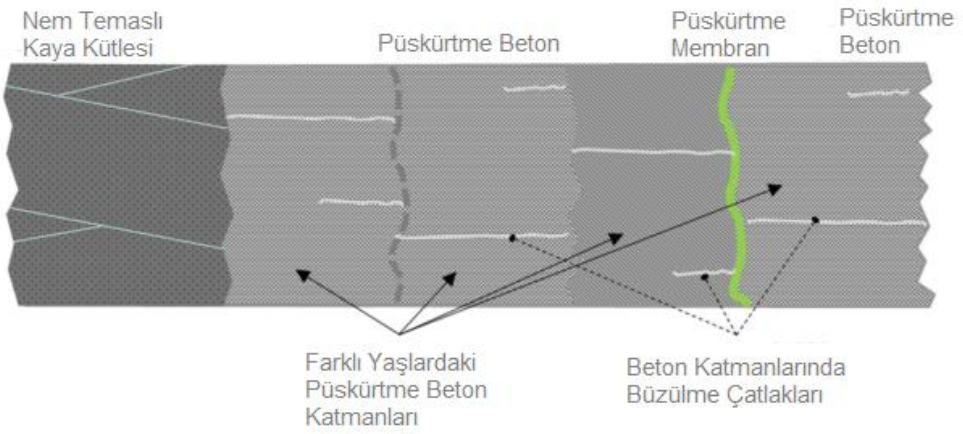
Kalıcı betonarme kaplamanın uygulanması için, membranın gerekli yüzey sertliğine ulaşması beklenir (Macdonald, 2009). Yüzey sertliği, A Tipi Durometre (Shoremetre) kullanılarak ölçülür (Şekil 6). Genellikle kaplama uygulaması için referans alınan değer, A Tipi Shore Sertliği ölçeğinde yaklaşık 30 ila 50 arasındadır. Ancak, membranın ek katmanlarının uygulanması veya membran onarımları için gereken sertlik faktörü daha düşüktür. Yüzey sertliği, farklı ürünler için farklılık gösterebilir**.** Wu vd. (2017), belirli bir malzeme için 20-25 Shore 'A' sertliğine ulaşmanın yaklaşık 7 gün sürdüğünü belirtirken Verani ve Aldrean (2010), başka bir malzeme için 50 Shore A sertliğine ulaşmanın, ortam koşullarına bağlı olarak 24-48 saat arasında sürdüğünü belirtmiştir.



Şekil 6. Püskütme mebran uygulaması sonrası yüzey sertliğinin kontrolü

PÜSKÜRTME SU YALITIM MEMBRANLARININ NEM TRANSFERİNE ETKİLERİ

Püskürtme su yalıtım membranlarıyla yapılan tünel kaplama uygulamaları ilk olarak 2000'li yıllarda denemeye başlanmıştır. Günümüzde ise kullanım oranı her geçen gün artmaktadır. Su yalıtımı açısından püskürtme membranın ana işlevi, çatlak köprülemek ve dolayısıyla suyun tünele, beton malzemesindeki çatlaklar ve kusurlar aracılığıyla girişini engellemektir (Şekil 7). Ancak nem, kapiler etkiler ve buhar difüzyonu mekanizmalarıyla beton ve EVA tabanlı membran malzemeleri arasından geçebilir. Bu nem taşıma mekanizmaları, betonun içindeki boşluklara nüfuz ederek, donma-çözünme hasarı riskini arttırabilir. Bazı çalışmalarda, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranlarının, sıvı su akışına karşı geçirmez olmalarına rağmen, suyu buhar yoluyla emebildikleri ve su buharını geçirebildikleri görülmektedir (Holter, 2016).

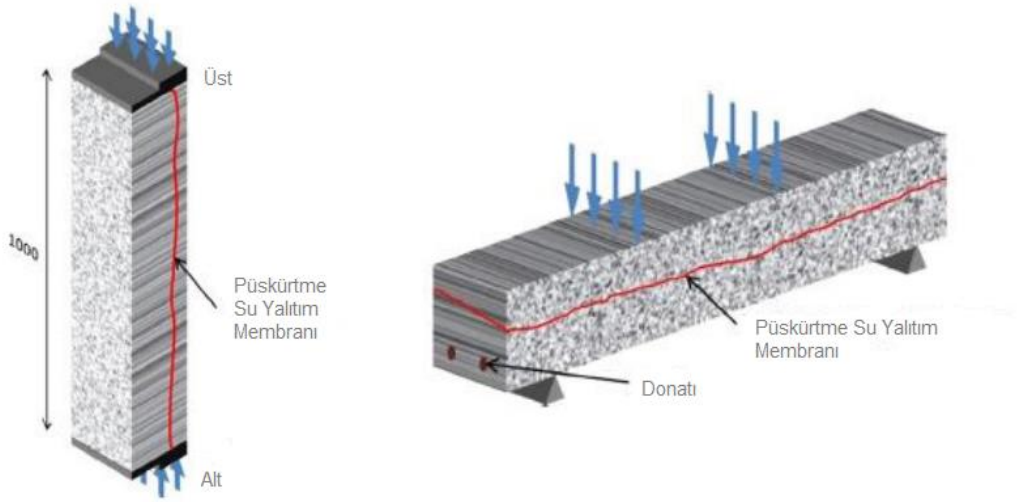


Şekil 7. Kompozit tünel kaplamasının kavramsal kesiti (Holter, 2015)

Holter ve Geiving (2016), yaptıkları çalışmada tünel kaplaması içerisinde bulunan EVA esaslı su yalıtım membranlarının sürekli olarak %12-17 aralığında nem içerdiklerini, membranın etrafını saran beton yüzeylerin nem içeriklerinin ise çok daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Bu farkın en temel açıklamasının, beton ve membran ara yüzeyindeki kusurlardan kaynaklanan serbest suyun, membran yüzeyinde kalmak yerine betona nüfuz etme eğilimi göstermesinden kaynaklı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmada, uygulama alanında yapışma mukavemetleri ölçülmüştür ve yapılan ölçümlerde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, membran malzemesindeki düşük nem içeriğinden kaynaklanmaktadır.

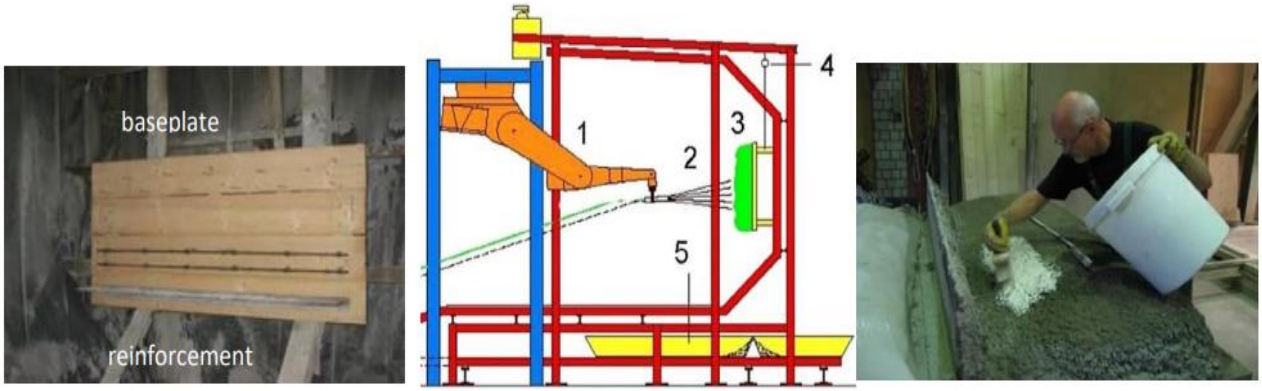
PÜSKÜRTME SU YALITIM MEMBRANLARININ YAPI PERFORMANSINA ETKİLERİ

Literatür araştırması yapıldığında, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membran uygulamalarının, kullanıldığı yapının performansında, herhangi bir olumsuz etkiye yol açmadığı söylenebilir. Örneğin, Nakashima ve diğerleri (2015) tarafından yapılan çalışmada, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranları ile oluşturulan kaplama yönteminin performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranları ile oluşturulan kaplama yönteminin test edilmesi için, saha uygulamalarına en uygun şekilde sırasıyla "püskürtme beton – EVA membran – püskürtme beton" şeklinde yerleştirilen 200 x 200 x 1000 mm ölçülerinde, donatı içeren ve içermeyen 2 farklı numune hazırlanmıştır. Bu numunelere ek olarak, referans amacıyla sadece püskürtme betondan oluşan, aynı boyutlarda 2 adet numune daha üretilmiştir. Numuneler, performanslarının belirlenmesi amacıyla "eksantrik sıkıştırma" ve "4 noktalı eğilme" testlerine tabi tutulmuştur. Numunelerin görüntüsü ve ilgili deneylerin uygulama teorisi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Eksantrik Sıkıştırma (sol resim) ve 4 Noktalı Eğilme Testleri (sağ resim) (Nakashima ve diğerleri, 2015)

Deneyler için, bir duvara sabitlenmiş, donatılı ve donatısız şekilde yerleştirilen kalıpların üzerine birinci kat püskürtme beton uygulanmış, üzerine EVA esaslı su yalıtım membranı sürülerek (3 mm kalınlıkta) uygulanmış ve ikinci kat beton püskürtülerek hazırlık tamamlanmıştır. Numunelerin hazırlanması süreci Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Deney numunelerinin hazırlanması

Numunelerden; 4 noktalı eğilme testine tabi tutulan membran içeren numune 1A, membran içermeyen numune 1B; eksantirik sıkıştırma testine tabi tutulan membran içeren numune 2A, membran içermeyen numune 2B olarak kodlanmıştır. 4 noktalı eğilme testine tabi tutulan numunelerde beton içinde donatı kullanılırken, eksantirik sıkıştırma testine tabi tutulan numunelerde donatı kullanılmamıştır (Nakashima vd, 2015).

Yapılan deneylerle beton katmanlarının arasında membranın bulunması durumunun (kaplama optimizasyonu) membransız numuneye göre performansı ne kadar etkilediği incelenmiştir. Çalışmada, 4 noktalı eğilme testinde su yalıtım membranlı numunenin, birleşik kiriş şeklinde davrandığı belirtilmiştir. Eksantrik yükleme testinde ölçülen eksantirklik, su yalıtım membranlı numune ile su yalıtım membransız numunede benzerlik göstermiştir.

SONUÇLAR

Çalışmada, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranları ile ilgili literatür araştırması yapılmış, su yalıtımı, buhar transferi ve yapı performansına etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, mebranın su buharını geçirse de su akışını engellediği, çatlak köprüleme özelliği sayesinde yalıtım performansının üst düzeyde olduğu, çift taraflı yapışma özelliğinden dolayı püskürtme beton ile kalıcı kaplamanın beraber çalışmasına katkıda bulunduğu görülmüş ve tünel yalıtımlarında önemli bir alternatif olabileceği düşünülmüştür. Çalışmalardan elde edilen bir diğer konu ise, EVA esaslı püskürtme su yalıtım membranı uygulanan tünellerin performansında, membranın malzeme özellikleriyle birlikte, beton kalitesi ve ortam koşullarının etkisi de son derece önemli olduğudur. Ancak bu malzemenin uzun süre içerisindeki performansı yeterli düzeyde bilinmemektedir. Yapı performansının sürekliliği, uzun dönemli araştırmalarla incelenmeli, laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar uygulama alınındaki sonuçlarla da desteklenmelidir. Performansı etkileyen faktörlerin çeşitliliği göz önüne alındığında, saha çalışmaları sonuçları önemli derecede faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

ABB (2022), Başkent Bülteni, Haziran 2022, Yıl 2, Sayı 20.

Ballantyne, B., (2016). Impervious Infrastructure. Tunnels Tunnell Int.

BASF, M.B.S., (2017). MasterSeal 345 Technical Datasheet, MasterSeal-345-ANZ-V9-0417 ed.

Holter, K. G., Buvik, H., Nermoen, B., Nilsen, B. (2013). Future trends for tunnel lining design for modern rail and road tunnels in hard rock and cold climate. In Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, Geneva, 2013.

Holter, K. G. (2014). Loads on sprayed waterproof tunnel linings in jointed hard rock—a study based on Norwegian cases, *Rock Mech Rock Eng,* 47, 1003-1020.

Holter, K. G. (2015). Properties of waterproof sprayed concrete tunnel linings: A study of EVA-based sprayed membranes for waterproofing of rail and road tunnels in hard rock and cold climate. NTNU.

Holter, K. G., (2016). Performance of EVA-Based Membranes for SCL in Hard Rock. Rock Mech., *Rock Eng.,* 49 (4), 1329–1358.

Holter, K. G., Geving, S. (2016). Moisture Transport Through Sprayed Concrete Tunnel Linings. *Rock Mech. Rock Eng,* 49 (1), 243-272.

ITAtech Activity Group, T.M., Tim Babendererde, Klaus Bonin, Ross Dimmock, Simon Greensted, Frank Gregory, Bethan Haig, Thomas Kothe, Kiril Maslev, Matthias Reinhold, Ernando Saraiva, Giorgio Tansini, Volker Wetzig, (2013). ITAtach Design Guidance for Spray Applied Waterproofing Membranes, p. 64.

İBB (2019). Raylı Sistem Projeleri Planlama ve Tasarım Teknolojileri, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Raylı Sistem Daire Başkanlığı, Raylı Sistem Projeler Müdürlüğü.

KGM (2021). Karayolları Genel Müdürlüğü 2021 Faaliyet Raporu.

Lemke, S., Moran, P.S. (2015). Proceedings- Rapid Excavation and Tunneling Conference, A controversial discussion regarding the use of spray applied waterproofing for tunnel applications. *Society for Mining, Metall. Explorat*., 890-900.

Leong, M.W.D., Ted; Taylor, Jacob. (2019). Use of spray applied waterproofing on the downtown bellevue tunnel. Soc. Mining, Metall., Exploration (SME).

MacDonald, M. (2009). Product Evaluation of MASTERSEAL 345, Assessment, Application and Specification.

MAPEI (2013). Mapelastic TU System Technical Data Sheet, 2262-10-2013 ed.

Marcher, T.J., John, M., Ristic, M. (2011). Determination of load-sharing effects in sprayed concrete tunnel linings, 8.

MC-Bauchemie (2018). MC- Montan Shot Seal Technical Data Sheet, 06/18 ed.

Mersin B.B. (2022). Mersin Büyükşehir Belediyesi Strateji 2020-2024 Stratejik Planı.

Metro İzmir (2020). İzmir Metro A.Ş. Stratejik Planı 2020-2024.

Nakashima, M., Hammer, A., Thewes, M., Elshafie, M., Soga, K. (2015). Mechanical behaviour of a sprayed concrete lining ısolated by a sprayed waterproofing membrane, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 47, 143-152.

Naylor, D., Salak, P., Stephenson, S. (2011). Experiences with sprayed waterproofing, *Tunnels & Tunnelling International,* GlobalData plc, London, 45-48.

Normet (2020). TamSeal 800 Technical Data Sheet Global, V1WW20 – 2020.6.24 ed.

Pelz U. (2022). Spray-applied waterproofing membranes in tunnelling: Application and research directions in Australia.

Pisova, B., Hilar, M. (2017). Spray-applied waterproofing membranes: Effective solution for safe and durable tunnel linings? Institute of Physics Publishing.

Su, J., Bloodworth, A. (2016). Interface parameters of composite sprayed concrete linings in soft ground with spray-applied waterproofing. Tunnell. Underground Space Technol. Incorporat. Trenchless Technol. Res. 59, 170–182.

Rabcewicz, L.V. (1964). New Austrian Tunelling Method (NATM). Water Power.

Quellet, J., Hatley, J., Geensted, S., Harper, M. (2013). Sprayed on waterproofing in frozen ground conditions: a shaft liner application case, World Tunnel Congress 2013 Geneva Underground – the way to the future!, Geneva, 8.

TCDD (2022). T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü Demiryolu Sektör Raporu.

T.C. Mevlana Kalkınma Ajansı Destek Programı (2021). Konya Sanayi Odası Konya İli Raylı Sistemler Yatırım Ortamının Araştırılması.

Verani, C. A., Aldrian, W. (2010). Composite linings: Ground support and waterproofing through the use of a fully bonded membrane. In: Shotcrete: Elements of a System- Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, 269-281.

Wu, A., P. C., Davies, A. G., Traldi, D. (2017). Sprayed waterproofing membranes on recent SCL tunnelling projects in London, 10.

METAL SUPPORTED RUBBER COATING (MSRC) METHOD IN FLOTATION CELLS

FLOTASYON HÜCRELERİNDE METAL DESTİKLİ KAUÇUK KAPLAMA (MDKK) YÖNTEMİ

B. Tüfekçioğlu [1], Ö.Y. Gülsoy [2, *]

[1] Tüfekçioğlu Kauçuk San. Tic. A.Ş.
[2] Hacettepe Üniversity, Hacettepe Üniversity, Department of Mining Eng.
*(*Corresponding Author: ogulsoy@hacettepe.edu.tr)*

ABSTRACT

Flotation machines, also called flotation cells, are used in the enrichment method, which is widely used in order to separate the valuable minerals from the tailings and from each other. As with many industrial machines, flotation cells are generally made of steel. A steel-bodied tank, which consists of square, rectangular, cylindrical or different gemometric shapes depending on the manufacturer, in which the material is processed, the stator and rotor that provide the mixing and dispersion process constitute the main components.

The pulp, which consists of a mixture of finely ground ore particles with water, is subjected to severe mixing inside the flotation cells. This intense mixing and chemicals added to the palpation cause severe physical and chemical corrosion of the inner parts of the flotation cells. As the pulp, which consists of finely ground solid particles, is constantly in motion, the solid particles rub and abrade the inner surface of the tank. However, due to the chemicals used in flotation, the pulp pH value in the tank can vary from very low pH (acidic like 1-2pH) to very high pH (basic like 10-12 pH) levels. This wide range of pH values and other chemicals used can cause chemical wear (corrosion) as well as physical wear on the inner wall of the tank they come into contact with. In order to protect the flotation cells from these abrasive effects, it is necessary to use a coating layer that is resistant to physical wear and corrosion on the inner wall of the equipment. In this way, the tank is protected against both physical and chemical corrosion. The most important coating material preferred for this purpose is rubber of a certain thickness. Different methods are used when applying rubber coating. Two methods are mostly preferred in the application of rubber. The common method is the cold bonding method. In this method, rubber sheets of certain thickness (usually 3-6 mm thick) are cut into appropriate shapes and adhered to the inner wall of the equipment with special adhesives. This method, called cold bonding, is simple, but due to errors in the application of adhesives, the rubber lining peels off from where it is adhered and leaves in large sheets. Large falling pieces of coating sway uncontrollably inside the tanks and impair separation performance. Sometimes even weather conditions can cause bumps in the bonded rubber. The shearing, gas trapping and peel off coating causes the steel structure forming the cell to be exposed to wear and corrosion and irreversible damages may occur. Due to the heavy mixing in the tank, it is not possible to prevent pell off when delamination occurs at one point. The pulp, which starts to fill between the rubber and the tank surface through a small opening, gradually enlarges the space it enters with the effect of pressure inside the tank. Chemicals penetrating between the rubber and metal through the opening cause the adhesive to loosen its properties and cause the delaminationto grow even more. In the tanks where there is heavy mixing, the mistakes made during the bonding of the rubber sheets, the problems in the joints, the damage to the coating during the assembly, the problems caused by the adhesive used, and the errors caused by the rubber itself cause the pulp to fill between the rubber and the tank wall. Such defects can cause the entire coating to peel off over time due to constant and compelling pressure. The other method is based on the vulcanization of rubber on the surface. Although this method is more durable, its application is extremely laborious and sometimes impossible depending on the interior details of the tank. In practice, technical personnel prefer the inner parts of the flotation cells to be completely covered with rubber. In order to meet this demand, manufacturers usually cover the inside of the flotation cells with rubber in the form of cold bonding and deliver them to the user. In such

coating applications, the coating should be done by paying attention to the rules and standards that must be strictly followed. Otherwise, it is inevitable that delaminationproblems will occur due to irregular workmanship, use of poor quality or unsuitable materials and the nature of the cold bonding method applied. This emerges as an important problem that the operation teams responsible for production have to overcome, and as a result, even if the machines used are under warranty, it causes a significant loss of production. It has developed the Metal Supported Rubber Coating (MSRC©) method in order to minimize the operational problems in rubber coating applications against wear and corrosion in the flotation cells. In this way, the coating problems in the cells are reduced to a point where it is almost non-existent. In this paper, the details of the method (MSRC©) are discussed.

INTRODUCTION

As in many mixing tanks, tank type flotation cells are cylindrical in shape and made of steel. Steel is a unique building material for the manufacture of such equipment to ensure resistance to extreme operating conditions. However, the resistance of steel against wear and corrosion caused by friction is extremely low. For this reason, the inner parts of the tanks should be covered with materials resistant to abrasion. The flotation cell consists of a tank and a rotor / stator that provides mixing of the pulp in this tank. The rotor and stator, developed as a result of detailed scientific research by many manufacturers, are designed to mix the pulp in the cell bottom agressively and to create a quiscent zone in the upper parts so that the froth layer is not disturbed. This feature is one of the most important design features of flotation cells. In fact, this design criterion should be considered as the main basis of the rubber coating of the cells. Due to the severe mixing at the bottom, the bottom of the flotation cell and the side walls of the lower part, which constitutes about 1/3 of its total height, is exposed to abrasion that may occur as a result of friction. Abrasion due to heavy mixing occurs relatively less in the upper parts of the cell.

It is important that the protection against wear in the inner parts of the flotation cells is more effective, especially at the bottom and the lower parts of the cell inner wall. On the upper part, it will be sufficient to use a coating that will provide resistance against chemical corrosion. On the other hand, it is necessary to use protective coating materials for the rotor and stator, which are exposed to severe mixing. Pourable coating (polyurethane, etc.) can be preferred instead of bonding rubber on metal for rotor and stator which are the other important parts of cells. Abrasion is extremely low in sections such as froth collection launder and flow holes where high-speed flows do not occur. However, since there are many corners, edges and joints in these areas, rubber coatings are more likely to cause problems such as gas trapping, peel off, delamination and thus clogging. In these regions, it is of great importance to offer alternative solutions instead of using thick rubber coatings. Thus, delamination, peel off and rupture of rubbers coated with cold bonding are prevented. Clogging caused by rubber ruptures is reduced. In this way, frequent stoppages, disruptions and efficiency losses are prevented during production.

Rubber coating that is more resistant to peel off and delaminationon the bottom of the cells and the lower parts of the inner walls, protective agents with high chemical resistance such as zinc-based epoxy coating that do not cause problems such as peel off, spalling, gas trapping should be used in the launders including many sharp corners and edges, and in the flow holes and connection pipes. Considering these features of flotation cells, Tüfekçioğlu Kauçuk developed its own special coating system and put it into practice in its own production tanks. Thanks to this method, in which reinforcement with vulcanization is also applied, the problems such as gas trapping and lifting of the rubber coating inside the tanks have almost completely disappeared. The application of rubber coatings used to protect flotation tanks against physical wear and corrosion and solutions against the problems that arise in the use of rubber liners provide great industrial advantages. In this article, the developed method for rubber coating of tank type flotation machines and the advantages of this method are explained. Today, tank-type flotation cells have been widely used in high-capacity plants that process low-grade ore. The demand for high volume unit flotation cells such as 50, 100, 200, 300 and even 600 m3 has increased in order to process high capacities. It is compalsory for protectection

of also these cells by a suitable coating against wear and corrosion. Due to large volume and challenging mixing conditions, the strength of intracellular coatings is extremely important. Unfortunately, problems such as removal of the rubber coating, peeling off, and tearing cause great difficulties for the operation team and can cause efficiency losses in production. Naturally, especially during the design and installation stages, completely rubber-coated flotation tanks are preferred by engineers and technical personnel, in order to protect the inner parts of the flotation cells against wear. In order to meet this demand, manufacturers usually cover the inside of the flotation cells with rubber by cold bonding. In this method, the coating should be done by attention to the rules and standards that must be strictly followed. Otherwise, it is inevitable that delaminationproblems will occur due to irregular workmanship, use of poor quality or unsuitable materials and the nature of the cold bonding method applied. This emerges as an important problem for the operation teams responsible for production. As a result, the machines used cause a significant loss of production, even under warranty. Tüfekçioğlu Kaucuk developed and put into practice the reinforced plate coating method for this problem in the tank type flotation cells that it produces with its own patent.

Rubber Lining

In the literature; Industrial rubber coating is defined as the process of applying protective rubber layers against abrassion and corrosion to the outer and/or inner surface of tanks and pipes. Different types of rubber materials are used in many different applications. The rubber sheets are applied on to the adhesive coated, half dried surface. This is done using slight pressure of hand or a metallic roll. Sometimes various lining tools are also used, since there is no standard application surface where it will be applied. As it can be applied to many different surfaces, it is mostly preferred to protect different metal surfaces such as mild steel, stainless steel, cast iron and aluminum. The thickness of the rubber liner can vary from 2 mm to 50 mm depending on the application, excluding mill liners. Water and wastewater treatment tanks, pipes and fittings, treatment vessels, smoke channels, storage tanks, dosage tanks, clarifier and concentrator tanks and pump components, internal parts of hydrocyclones are the main areas where rubber linings are applied. Due to its resistance to abrasion caused by fine particles and different chemicals, rubber is inevitably used in the interior of flotation cells today. Depending on the application, rubbers with different properties such as natural flexible rubber, butyl, nitrile, ebonite and neoprene can also be preferred as coating material. Flexible natural rubber that is resistant to abrasion and many inorganic chemicals is preferred in mining applications. Depending on the rubber lining application, molded parts according to the shape of the surfaceor rubber sheets in the form of rolls are used. For example, while the inner lining of a centrifugal pump is prepared as pressed rubber in accordance with the structure, the inner part of a mixing tank is lined by cold bonding of rubber sheet to the metal surface. Rubber plugs and silicone-based filling materials are used in the joints and connection holes of the rubber plates. Silicon provides leak proofing. In some applications, rubber in the form of mortar instead of silicon, which is sufficiently sticky, can be applied by hand. Examples of rubber sheet rollers used in coatings in flotation cells are given in Figure 1. The rolls can be of different thicknesses and sizes. Some of them can also be produced as self-adhesive on one side.



Figure 1. Rubber rolls used in coating. (a) EPDM, (b) Meopren, (c) Butyl, (d) Neoprene

The stages of coating process called cold coating or cold bonding are:

The first stage: A certain roughness is given to the metal surfaces by a method called sandblasting.

Second stage: The blasted surfaces are cleaned with extreme care. The absence of deep scratches and crevices on the metal surface is important in order to prevent delaminationand peeling off problems that may occur later.

Third stage: A precoat or primer can be applied to the surfaces to be cold bonded. If sandblasting and cleaning are not at the desired standards, it may cause serious problems in the application after bonding. During application, the surface temperature should be below 15°. The surfaces to be bonded should be heated if possible.

In order to adhere the rubber sheet of certain thickness to the tank surface, a first layer of adhesive and then an intermediate layer of adhesive must be applied on it. Although these adhesive layers may vary depending on the manufacturer, they are generally preferred bonding layers in practice. Before the final bonding, the applied layers must be free of volatile contents. At this stage, care should be taken not to deteriorate the adhesive property of the adhesive. This is a feature that can only be determined by experts. For this reason, such coatings must be done by experienced people.

If the bonding is not completed within the same day after the intermediate adhesive stages, intermediate applications should be repeated.

Forth stage: After the adhesive applications are completed and the required adhesive consistency is reached, the rubber sheet roll should be opened and cut in a neat and clean place according to the application. Then, the cut pieces are carefully adhered to the surface. In this application, care should be taken not to leave any air gaps by passing over the parts adhered to the surface with rollers. In particular, printing rollers that are thin enough to reach narrow places such as edges and corners should be used.

Although different alternatives are used at the connection points, care should be taken to ensure that the connection edges are cut at an angle of 45° in bonding processes that will ensure continuity without any bulges. If possible, before sticking to the surface, a peelable plastic should be placed between the metal and the rubber, and the rubber coating should be adhered to the surface partly, and care should be taken to avoid air bubbles. Silicone or rubber filler is applied to the connection points. Sealing is also ensured by overlapping the joints or by sticking a sealing strip on the joints. Sealing of joints must be done carefully and in accordance with standards. Some joint application examples are given in Figure 2 (Blair Rubber Company).

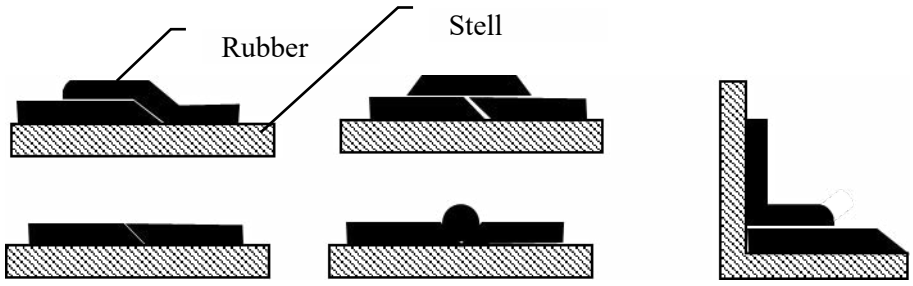


Figure 2. Rubber coating proper connections

Two applications as examples of misbonding of edges are given in Figure 3. Attention should be paid to corners and overlapping points in order to avoid problems later. The free end of the rubber should adhere fully to the surface, no raised or curved end should be left. Raised ends should be filled with filling material and firmly adhered to the surface as seen in the figure.

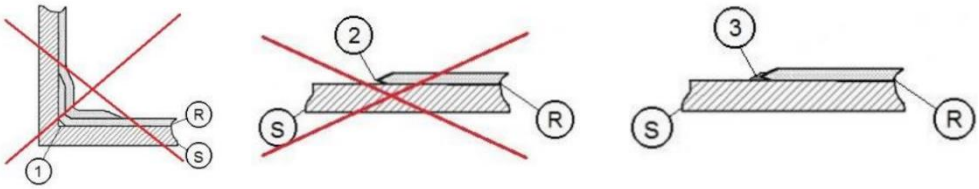


Figure 3. Some example of misconnections

Adhesion to edges, corners and turning points must follow a certain sequence. In Figure 4, the route to be followed during cold bonding to a curved surface is given schematically. Curves and edges are the areas where cold coating and rubber applications are the most difficult and problems are observed.

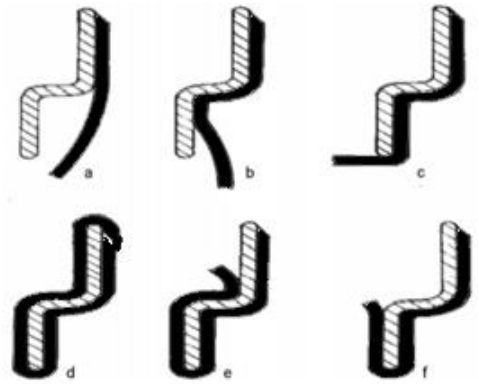


Figure 4. Application Diagram of Cold Bonding to Metal Surface (Chandrasekaran, 2009)

The rubber application to the corners in some parts of flotation cells such as froth launders, connection holes, dart valve passages must be done very carefully and the preliminary preparations of these corners must be perfect. Irregularities, hard bends and corners at the weld joints can cause problems in the proper adhesion of especially thick rubber sheet to the surface. Although it is believed to be subject to aggressive mixing only in the tank, insufficient and problematical adhesion can cause gas trapping and delamination of the rubber lining sheet, even in troughs with calmer flows.

The Problems Occurring in Rubber Coating

Turbulence occurs in the tanks with very vigorous mixing, which causes friction. A complex and irregular effect due to the vigorous mixing of the pulp containing solid particles and the size of the moving mass forces the surfaces. In this way, the rubber sheets that are attached to the surface with only one adhesive (binder) exposed to extreme stresses have a very high tendency to detachment even in the smallest problem.

The main reason for the problems such as spalling, gas trapping and lifting in rubber coating applications is the use of coating method that does not comply with the standards. Material problems, human mistakes, very steep edges, corners, etc., are other causes of spalling. Although less, manufacturing errors due to the material used can also cause problems. Incorrect, insufficient or excessive use of the adhesive (binder) may also cause delamination and peel off problems.

One of the common problems observed with rubber coatings is the sharp and steep edges in the applied areas. In general, there are sharp and irregular joints at the welding points. It is very difficult for the hard and thick rubber sheet to adhere to such sharp surfaces. In such connection and sharp corners, the rubber may pull itself out of the corner. This problem can result in a potential air pocket that is susceptible to wear or edge

splitting. This creates serious operational problems later on during implementation. Photo .1 is given as a striking example of this misapplication.



Photo 1. An example of peel off caused by sand and pressure (Dan Chamberland, 2014)

Rubber sheet manufacturers recommend the use of pasty, bonding rubber to ensure adhesion. Depending on the application, filler, which is a pure natural rubber, may not be resistant to high temperatures or butyls. Delamination may occur at the joints due to high temperatures or chemicals. Misapplications, especially at the end points, cause delamination to start from these points (Photo 2).



Photo 2. Delamination at the edges (Dan Chamberland, 2014)

Sandblasting of steel surfaces and providing a rough surface structure to increase adhesion are important in applications. However, insufficient blasting and dirty surfaces can cause the plates to fall or spall with little effect. Before the bonding process, the surfaces must be perfectly cleaned with applications such as dry, compressed air, vacuum cleaner, degreasing chemicals. As can be seen in many coating standards, care should be taken to ensure surface roughness in the range of 45-75 microns in sandblasting. In fact, the adhesives used for bonding rubber linings are extremely strong materials. For this reason, sandblasting made in different standards can sometimes be used. However, if the appropriate sand thickness (grid) is not used, it is inevitable to experience problems in the bonding process.

The preparation stage of the adhesive before the application is also extremely important. If the adhesive is not mixed correctly and adequately, it may cause excessive use of adhesive and insufficient adhesion. On the other hand, working in dusty environments is one of the important factors that reduce the effect of the adhesive.

Extreme care must be taken to protect the adhesion surfaces from dust. Precautions should be taken to avoid dusting when the adhesive is applied, as well as cleaning the surfaces before bonding. The choice of adhesive suitable for the surface and material is also among the most important factors affecting adhesion (Photo 3).



Photo 3. Example of unsuitable adhesive cause of delamination (Dan Chamberland, 2014)

UV and Ozone can cause mushrooming or degradation at exposed edges. UV and Ozone are very harmful to rubber. Rubber coatings exposed to the sun for a period of time are prone to deterioration. Most rubbers lose their elasticity and ability to fight erosion and corrosion. Rubber that is left in the sun decomposes and can cause delamination problems later on (Photo 4).



Photo 4. UV-exposed rubber (Dan Chamberland, 2014)

There may be air bubbles between the metal surface and the rubber during bonding. Bubbles may also occur during the curing process. Before use, the coated surfaces should be checked very carefully, and if there are any bubble occurrence, they should be removed. Connection points, corners and edges should definitely be

adhered by roller. Otherwise, bubble occurrence is inevitable. Such bubbles can cause ruptures due to excessive turbulence and friction effects and significant defects occur (Photo 5).



Photo 5. Bubbling due to misapplication (Dan Chamberland, 2014)

Peel off problem is solved by puncturing the bubbles and re-gluing the swollen part to the surface. It may not provide durable and long-term solutions. In industrial applications, it is extremely important to develop solutions against such rubber coating problems.

Metal Supported Rubber Coating (MSRC)©

Metal Supported Rubber Coating (MSRC) © develop by Tüfekçioğlu Kauçuk is a two component coating method that has been used in own flotation cells for many years and its industrial advantages have been demonstrated. Tüfekçioğlu flotation cells are tank type flotation cells equipped with a patented stator and rotor, designed as a result of a long R&D process. While the production of cells with a capacity of 1.5 -50 m3 continues in the current production, the design studies of cells with large volumes such as 100, 130 and 200 m3 have been completed and they are ready for production. The general view of the Tüfekçioğlu tank-type flotation cell and the different mixing zones in the tank are given in Figure 5.

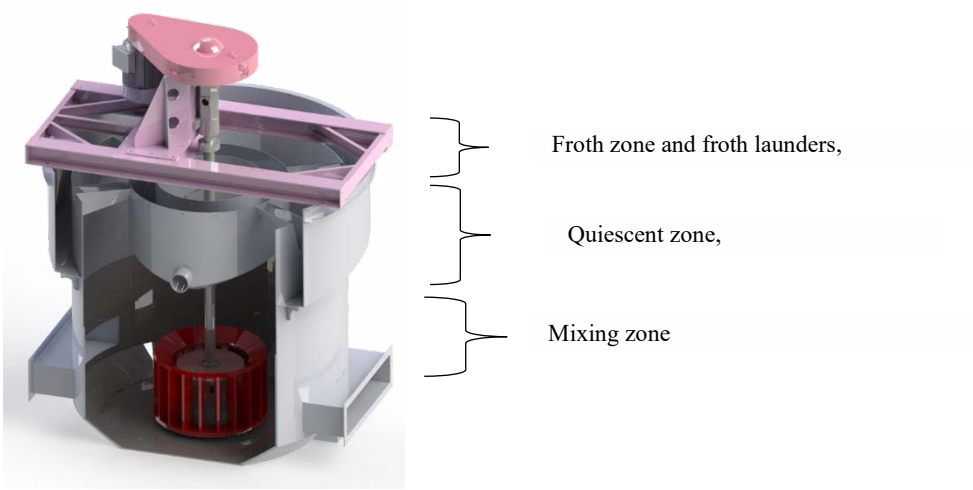


Figure 5. Tank type flotation cell mixing and froth zones

There is a froth layer at the top of the flotation cells. In this layer, there should be no agitation that will cause the grains stuck to the bubbles to return to the pulp again. In other words, severe mixing is not desired in this zone. Just below this froth layer must remain a calm zone that will not allow the particles adhering to the air bubbles to detached. The particles adhering to the air bubbles rise to the froth zone. Severe mixing is also not desired in the transport section. At the bottom, there should be a severe and turbulent zone where the mixing is the most intense, providing the formation of fine air bubbles and increasing the probability of bubble grain collision. This mixing pattern inside the cell is among the general design parameters. In this case, the highest friction forces occur at the bottom of the flotation cell. Due to this design requirement, the highest point of attrition is occur approximately at 1/3 of the way up from the bottom along the height of the cell (Figure 6).

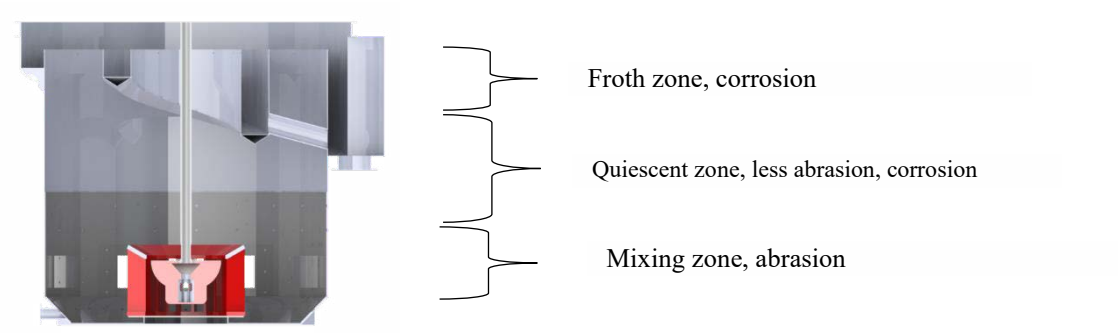


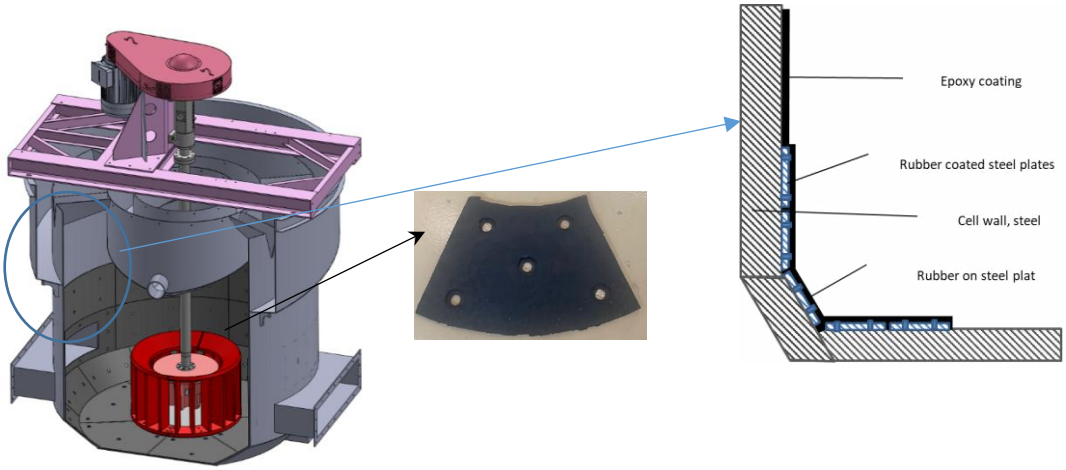
Figure 6. Mixing and wear zones in the cell

The Quiescent zone, the froth zone and the collecting launders are least subject to friction and abrasion. These places are the most difficult areas to apply rubber coating. For these sections, more easily applied protection measures will suffice instead of the rubber coating, which causes extreme coating problems. On the other hand, the rubber coating, where mixing is severe, must be applied inevitably in order to create resistance to abrasion on the cell base. Due to the extreme mixing conditions in the lower section of the cell, this section should be both coated with a corrosion resistant material and this coating should be bonded to the surface in a way that is resistant to the effects of severe pressure and turbulence. The inner surfaces of the cell in the upper parts are exposed to a relatively low friction effect.

For this reason, a coating method without delamination problems can be preferred, especially in the upper parts of the cell that are less affected by excessive mixing conditions. On the inner surface of the lower part, a non-flaking coating resistant to mechanical forces is an effective solution against to the operational problems. Considering the flow dynamics inside the cell, the development of a two-component coating method against wear and corrosion in flotation cells provides a great advantage in practice:

Zinc-based epoxy coating made by brushing or spraying on the upper parts, launders and connection areas is sufficient to provide the necessary resistance against corrosion. Plant operators generally do not prefer spray epoxy coating. However, the epoxy coating does not cause any problems, especially in the upper areas where there is no abrasion, and it is easy to apply. With this method perfect coating is provided in curved, angular and difficult joints. Hence, the rubber coating area where cold bonding is also reduced. This method narrows the area of cold bonding which causes gas trapping and spalling and will minimize the problems caused by the cold bonding. In addition, most of the problems stem from the cold bonding in the corners and joints will be eliminated. On the other hand applying rubber with a stronger bonding method instead of cold bonding on the bottom of the cell and lower of the inner cell walls solves the delamination problems in the tank to a great extent. Considering this situation, a different design was developed in order to cover the cell base and inside of the cell walls. The method is so effective that this coating of only the lower parts of the inner walls of the cell is very effective against wear. This method is defined as Metal Supported Rubber Coating (MSRC©).

In the Metal Supported Rubber Coating (MSRC©) method developed by Tüfekçioğlu Kauçuk A.Ş. the bottom and inner-side wall of the cells are protected with rubber-coated metal plates. In this method, 2-4 mm thick metal plates designed and cut according to the geometric shape of the cell are covered with 6 mm thick rubber. Metal plates are specially designed and cut according to each cell design. The rubber coating process of metal plates is carried out under high temperature and pressure in order to create the strongest rubber-to-metal bonding. In this way, the rubber adheres to the metal surface very strongly and smoothly. Since the rubber coating process on metal plates is done independently from the tank, it is also easy to manufacture. High temperature and vapor pressure also makes the rubber-metal bonding almost unbreakable. Then, rubber coated metal plates are mounted on the inner surface of the flotation tank. Thus, the bottom and inner walls of the tank are covered with rubber-coated metal plates in the form of tiles. The gap between the plates is filled with a filler with adhesive properties. This filler is a silicone-based filler as specified in the standards. While the rubber covered to the inner surface of the tank creates a serious resistance to abrasion, the metal plates supporting the rubber structure provide additional strength. Thus, problems such as gas trapping, delamination and ballooning of the rubber are definitely not observed. This coating method gives very high resistance to abrasion on the tank bottom and the lower parts of the tank inside surface, which are most exposed to abrasion. The general view of the coating is given in Figure 7.



Şekil 7. Metal supported rubber coating (MSRC©)

This technique can be applied up to the desired height on the inner wall of the cell. Other parts are covered with zinc-based epoxy coating. With the spraying method, the coating easily reaches every problematic corner and creates a very effective coating. This eliminates the rubber coating problems especially at the edges, corners and connection points. An example of epoxy coating method is also given in Photo 6.



Photo 6. Epoxy spraying

The two-component coating system developed by Tüfekçioğlu Rubber is given schematically in Figure 8.

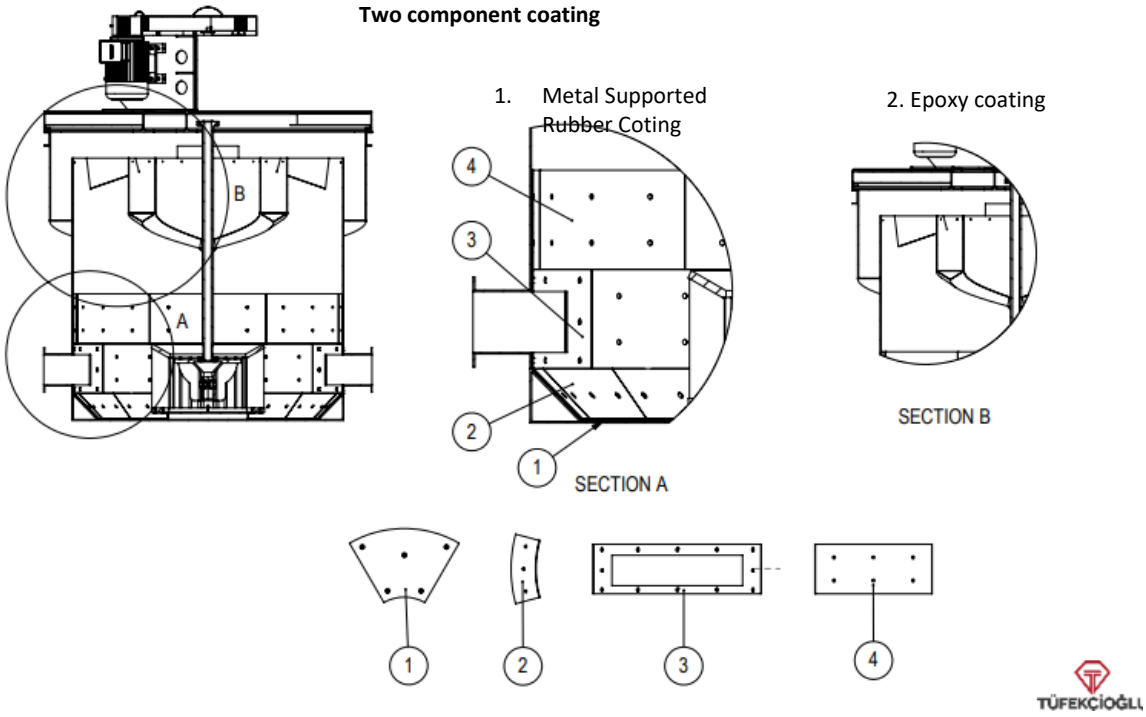


Figure 8. Metal Supported Rubber Coating (MSRC©) application diagram

In this application, polyurethane is used in the rotor and stator coating. Polyurethane gives these parts extreme strength.

The advantages of this method are listed below:

• Most of the problems caused by incorrect rubber coating method, use of incorrect materials and incorrect application are eliminated.
• There is no or very little renovation and repair.
• Zinc-based epoxy coating in the form of painting reaches every fine indentation and provides excellent protection in curved problematic areas.
• Rubber adhered to metal under high temperature and pressure does not cause gas trapping problems.
• MSRC© is very resistant to extreme pressure and strain
• Does not flake.
• MSRC© is long life. Warranty period is too long.

CONCLUSION

Metal Supported Rubber Coating (MSRC©) method is two component protection method for flotation cells developed by Tüfekçioğlu Kauçuk. It has been developed to eliminate the rubber coating problems inside the flotation cells. Tüfekçioğlu has applied this method to all the tank type flotation cells it manufactures since 2010. In general, there is no problem in applications due to rubber spillage.

In the two-component Metal Supported Rubber Coating (MSRC©) method, the parts that are exposed to severe mixing are covered with a thick protective layer. On the other hand, a problem-free coating is provided with the zinc-based epoxy coating applied as painting.

With Metal Supported Rubber Coating (MSRC©), it is possible to eliminate many adhesion problems observed in rubber coatings. The metal support under the rubber allows a more rigid structure. Even after the rubber coating wears off, the metal continues to protect against wear. Since the plates can be prepared in accordance with the desired tank dimensions, its application is also extremely easy. In this application, by coating the parts of the tank that are subject to less mixing with zinc-based epoxy, a problem-free coating is achieved in areas where cold bonding is extremely difficult, such as cell froth lips, launder interiors, and joints.

As a result;

Three important steps in protecting cells from wear and corrosion as smoothly as possible can be described as follows:

1. The edges, joints, sharp bends, narrow areas that cause problems during rubber bonding should be coated with zinc-based, epoxy spray application. Spraying reaches down to the smallest details.
2. The bottom of the cell, the parts of the inner cell walls near the bottom, which are exposed to the strong mixing effect of the rotor, should be covered with Metal Supported Rubber Coating (MDKK). In this way, the resistance against excessive coercive forces due to vigorous mixing increases. A zone resistant to peel off is formed.
3. Rotor and stator should be coated with polyurethane.

It emerges as an application method that provides great advantages in protecting the parts exposed to wear and corrosion in flotation cells.

REFERENCES

Blair Rubber Company, General Rubber Lining Principles, Section 13. Rubber Lining, BLAIR ENG 139 V6 REV. 0, rubber-lining-application.pdf (blairrubber.com)

Chandrasekaran, V.C. (2009). Tank Linings for Chemical Process Industries, iSmithers A Smithers Group Company.

Dan Chamberland, (2014), Rubber liner failure diagnosis and probable causes. Part 1
http://www.rubberlining.org/rubber-liner-failure-diagnosis-and-probable-causes-part-1/

TEMA Rubber Procedures.

DENSE MEDIUM SEPARATION TESTING IN A BASE METAL BENEFICIATION APPLICATION

N. van Vuuren

Consulmet (Pty) Ltd, Process Engineering Department
(nico@consulmet.com)

ABSTRACT

Dense medium separation (DMS) is a common mineral processing technique used to beneficiate gemstones (diamonds and rubies), ferrous metals (iron, manganese and chrome), precious metals (gold, PGM's), base minerals (lead, zinc, copper) and coal.

This paper emphasizes the paramount significance of pilot scale testing in understanding the intricacy involved when beneficiating ore with specific characteristics, like those typically encountered with base metal beneficiation. By bridging the gap between laboratory-scale tests and production scale designs, pilot scale testing ensures comprehensive understanding of the ore characteristics (particle size analysis, densimetric profile, mineralogy, etc) and its influence during separation.

Consulmet has recently built and commissioned a 5 tph pilot scale DMS at our facility in Johannesburg. The plant was designed to incorporate features that are normally lacking with conventional laboratory / pilot scale DMS plants. This includes design features such as the ability to treat large samples, inclusion of a desliming stage, industry norm feed, density and pressure control and the ability to feed the plant at medium: ore ratios typically used in industry.

In addition to the design data acquired using the pilot plant, it also enables Consulmet to generate large concentrate samples for offtake agreements, if required.

Keywords: Dense medium separation (DMS), base metal, gravity concentration criterion

INTRODUCTION

Beneficiation of low grade ores, generally using physical separation methods, is gaining importance in mineral processing (Cresswell 2001). Dense Medium Separation is one of the methods employed and is useful when a differential in Specific Gravities (SG) exists between the target mineral(s) and waste minerals(s).

Beneficiation of most base metals is typically done to reject a discardable low grade material to tailings while yielding an upgraded concentrate. This concentrate is typically used as feedstock to downstream processes or sold as a concentrate. One of the main advantages of DMS beneficiation prior to downstream milling and flotation is that most of the flotation inhibiting minerals could be removed leading to increased grade and reduced reagent consumption.

The gravity concentration criterion (1) is typically used to determine the suitability of gravity (and dense medium separation) based processes (Gill, 1991):

$$Gravity\ concentration\ criterion = \frac{SGconcentrate - SGwater}{SGtailings - SGwater} \quad (1)$$

With the use of dense medium separation in the beneficiation of andalusite ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$, SG of 3.2) and lithium based ores (petalite, $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8SiO_2$, SG of 2.6 and spodumene $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO2$, SG of 3.1) the application envelope where conventional dense medium separation has been used successfully, has increased to a minimum gravity concentration criterion of 1.25 at particle sizes down to 0.6 mm.

Due to the high mineral Specific Gravities (SG's) the gravity concentration criterion for most base metal applications is usually much higher than 1.25. One of the few exceptions to the rule is Chrysocolla ($(Cu, Al)_2H_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ which has an SG below 2.4. Table 1 lists a few of the commercially exploited base metal sulphides and carbonates.

Table 1. List of common commercially exploited base metal sulphides and carbonates

Mineral	Formula	SG
Galena	PbS	7.4 – 7.6
Cerussite	$PbCO_3$	6.5
Sphalerite	(Zn,Fe)S	3.9 – 4.1
Smithsonite	$ZnCO_3$	4.3 – 4.5
Chalcocite	Cu_2S	5.5 – 5.8
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	4.1 – 4.3
Azurite	$Cu_3[CO_3]_2(OH)_2$	3.8
Malachite	$Cu_2CO_3(OH)_2$	5.8 – 6.2

Heavy liquid separation is typically used to determine the densimetric profile of a specific ore sample. These results are typically used to generate theoretical yield / grade curves. It also indicates if the ore sample is sufficiently liberated, one of the key indicators for successful DMS application.

The presence of near-density material has a detrimental effect on the performance of a DMS and could cause deviation from the results predicted in the theoretical yield / grade curves. Near-density material is defined as material with an SG within +/- 0.1 of the required separation / cut density. A cyclone simulation could be used to predict the effect of the near-density material on cyclone performance.

The simulation is done by applying the generalised separation formula (Napier Munn, 1991) using an assumed EP (Ecarte probable, probable error of separation). For the purpose of the simulation the concentrate and tailings grade(s) in each density fraction is assumed to be the same as the corresponding feed grade(s). The required concentrate (or tailings) grade is used to determine the required separation / cut density (D_{50}) using a goal seek function.

$$PF_x = \frac{1}{1+e^{\left(1.099 \cdot \frac{D_{50}-D_x}{EP}\right)}} \quad (2)$$

Where:

- D_x = Density x
- PF_x = Partition factor at density x,
- D_{50} = Separation or cut density
- EP = Probable error of separation

Due to the capital required to build a DMS it is advisable to perform pilot scale tests to verify actual DMS performance. Almost all laboratory / pilot scale DMS plants are designed to handle small samples and

have insufficient feed and density control in place. Most of these plants are also operated at extremely high medium: ore ratio's. This means that the test conditions can't be replicated in actual commercial plant operations. In order to overcome these drawbacks, Consulmet has recently built and commissioned a 5 tph pilot scale DMS at our facility in Johannesburg (Photo 1). The plant was designed to incorporate the following features:

- Treatment of large samples (> 1t)
- Built-in desliming stage before separation
- Constant feed rate
- Industry standard medium: ore ratios in cyclone feed (adjustable for optimization purposes)
- Adjustable and controlled cyclone feed pressure
- Accurate density control (setpoint +/- 0.01)
- Ability to accurately measure overflow and underflow medium densities

The first sample run was recently completed on a zinc / lead sulphide rich sample from Turkey. This preliminary results from these tests are included below.



Photo 1. Photo of the Consulmet 5tph pilot scale DMS plant installed in Johannesburg

TESTING PROGRAM NORMALLY PROPOSED

Consulmet would generally recommend that the following tests be performed as part of a full preliminary / as well as pilot scale testing program:

Preliminary / scoping testing

The preliminary / scoping testing phase is used to verify grades and mineral species present. It is also used to determine the optimal feed size to the DMS using QEMSCAN analysis. From the QEMSCAN data, three crush sizes are selected to perform a liberation study. Each sub-sample is crushed down to the selected size and sent for:

- Particle size analysis and chemical / XRD analysis of each size fraction
- Fractional heavy liquid separation on deslimed fraction with chemical/XRD analysis of each fraction.

Using the data from the preliminary/scoping tests cyclone simulations are performed using the various heavy liquid separation results to determine the optimal crush size to be used for the pilot scale testing.

Pilot scale testing

For the pilot scale testing the balance of the sample is crushed down to the optimal size as selected from the preliminary / scoping testing. The following procedures are followed in the plant:

- Tracer testing to determine the theoretical conditions required to get the required separation / cut density
- Desliming of the sample using the feed preparation screen in the pilot DMS unit
- Preliminary pilot run at three cut densities (density determined from tracer testing +/- 0.1)
- Collection of floats and sinks samples from these three operating densities to determine yield and grades to determine the conditions for the final pilot run
- Final run at the conditions determined from the preliminary pilot run
    - Head grade
    - Heavy liquid separation on floats and sinks samples collected during final pilot run
- Report writing

If the full testing sequence is followed, the results received should ensure that the most optimal conditions for plant design is available.

1st SAMPLE RUN USING CONSULMET 5tph DMS PLANT

As stated above, the first sample run using the Consulmet 5 tph DMS plant was recently completed on a zinc / lead sulphide rich sample from Turkey. In this case the client has already done pilot scale test work at another facility and only requested Consulmet to do a pilot run at a separation / cut density of 3.0.

The DMS is supplied with a 250 mm dia Multotec cyclone that is supplied with a 46 mm x x46 mm square inlet. To prevent cyclone inlet blockages the ore was dry-screened at 12 mm to eliminate any +12mm material from the tests.

A representative aliquot of the sample was wet-screened at 1mm. The -12+1mm fraction as well as the -1mm fraction was sent for chemical analysis (Table 2).

Table 2. Head grade analysis

		Zn		Pb	
Sample description	Mass, %	Grade, %	Recovery, %	Grade, %	Recovery,%
-12+1mm	74.36	1.59	52.7	0.42	47.4
-1mm	25.64	4.14	47.3	1.35	52.6
Calculated head grade (-12mm)	100.00	2.42	100.0	0.66	100.0

As can be seen from the results in table 2, the valuable minerals tend to occur in higher concentrations in the -1mm fraction compared to the -12+1 mm fraction. This is a function of the mineralogy with the various sulphides in the ore being more brittle than the host rock. Tracer tests were performed at operating densities from 2.50 to 2.90 and cyclone inlet pressures of about 14 – 16D (pressure equivalent to 14 – 16 times the cyclone diameter) to determine the operating conditions required to achieve a separation / cut density of 3.0 (Fig.1). DMS Powders milled FeSi (270D grade of FeSi) was used as the suspension medium. The tracer tests indicated that an operating density of 2.8 gave a separation / cut density closest to 3.0. As a result, densities of 2.7, 2.8 and 2.9 was selected as the three densities those were tested as part of the preliminary runs. During the runs the plant was set up to maintain the density at exactly the required density and the plant was fed at a feed

rate of 5 tph. This equates to a medium: ore ratio of 7.5:1 (v/v). Both the floats and sinks generated over a period of 15seconds was collected and analysed to determine the material split as well as the floats and sinks grade (Table 3).

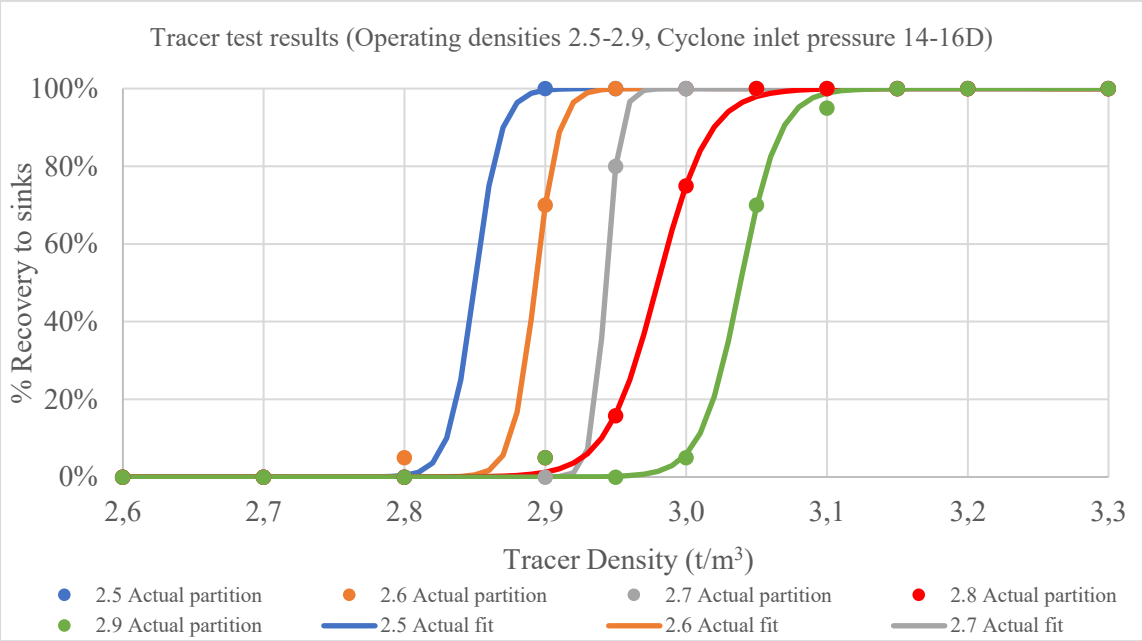


Figure 1. Tracer test results at operating densities from 2.5 – 2.9

The data from the preliminary run indicated a clear trend of increasing concentrate grade and reduced metal recovery with increased medium density. From the preliminary results it was decided with the client to perform the final DMS pilot test at a correct medium density of 2.70 to maximize zinc and lead metal recovery. The DMS feed was circulated through the system until the density stabilized to within 2.70 +/- 0.01 before sampling commenced. The floats and sinks samples generated was sent for head analysis (Table 4) as well as heavy liquid analysis. Each density fraction was sent for chemical analysis (Table 5) as well as XRD analysis (Table 6). The results from the final DMS pilot test differ slightly from the results from the preliminary grab samples taken at the same correct medium RD. This is reason for this is debatable but could probably be accounted to the fact that some of the sulphides were ground preferentially to the -1mm fraction by the pumping arrangement while the plant was circulating the ore while being commissioned. The cyclone inlet pressure as well as medium differentials were also comparable for both tests.

Table 3. Preliminary pilot test results

			Zn		Pb	
Operating density		Mass %	Grade, %)	Recovery,%	Grade,%	Recovery,%
2.70	Floats	75.06	0.23	7.7	0.08	8.4
	Sinks	24.94	8.34	92.3	2.49	91.6
	Calculated Head	100.00	2.25	100.0	0.68	100.0
2.80	Floats	77.11	0.25	9.1	0.09	11.2
	Sinks	22.89	8.37	90.9	2.40	88.8
	Calculated Head	100.00	2.11	100.0	0.62	100.0
2.90	Floats	78.02	0.29	10.6	0.11	12.8
	Sinks	21.98	8.76	89.4	2.56	87.2
	Calculated Head	100.00	2.15	100.0	0.64	100.0

Table 3. cont'd.

			Fe		S	
Operating density		Mass,%	Grade,%	Recovery,%	Grade,%	Recovery,%
2.70	Floats	75.06	1.66	19.1	1.16	11.3
	Sinks	24.94	21.16	80.9	27.40	88.7
	Calculated Head	100.00	6.53	100.0	7.70	100.0
2.80	Floats	77.11	1.74	21.1	1.23	12.8
	Sinks	22.89	21.89	78.9	28.28	87.2
	Calculated Head	100.00	6.35	100.0	7.42	100.0
2.90	Floats	78.02	1.92	23.1	1.42	14.6
	Sinks	21.98	22.7	76.9	29.58	85.4
	Calculated Head	100.00	6.94	100.0	7.61	100.0
			CaO		MgO	
Operating density		Mass,%	Grade,%	Recovery,%	Grade,%	Recovery,%
2.70	Floats	75.06	36.24	93.6	7.05	84.0
	Sinks	24.94	7.42	6.4	4.03	16.0
	Calculated Head	100.00	29.05	100.0	6.29	100.0
2.80	Floats	77.11	35.54	94.6	7.18	86.1
	Sinks	22.89	6.83	5.4	3.90	13.9
	Calculated Head	100.00	28.97	100.0	6.43	100.0
2.90	Floats	78.02	34.65	95.2	7.37	88.0
	Sinks	21.98	6.20	4.8	3.55	12.0
	Calculated Head	100.00	28.40	100.0	6.53	100.0

Table 4. Final pilot run head analysis

			Zn		Pb	
Operating density		Mass,%	Grade,%	Recovery,%	Grade,%	Recovery,%
2.70	Floats	74.80	0.28	11.7	0.07	9.2
	Sinks	25.20	6.22	88.3	2.19	90.8
	Calculated Head	100.00	1.77	100.0	0.68	100.0
			Fe		S	
Operating density		Mass,%	Grade,%	Recovery,%	Grade,%	Recovery,%
2.70	Floats	74.80	1.79	20.8	1.15	12.2
	Sinks	25.20	20.28	79.2	24.40	87.8
	Calculated Head	100.00	6.53	100.0	7.01	100.0
			CaO		MgO	
Operating density		Mass,%	Grade,%	Recovery,%	Grade,%	Recovery,%
2.70	Floats	74.80	34.85	92.5	7.38	82.6
	Sinks	25.20	8.35	7.5	4.62	17.4
	Calculated Head	100.00	28.17	100.0	6.69	100.0

Table 5. Pilot DMS run – Heavy liquid separation analysis results (Chemical analysis)

	Density fraction	HLS Mass %	Zn Mass %	Zn % Recovery	Pb Mass %	Pb % Recovery
Floats	Float @ 2.7	41.72	0.018	3.29	< 0.010	-
	2.7 – 2.8	23.02	0.186	18.68	0.062	21.77
	2.8 – 2.9	25.19	0.317	34.79	0.099	38.24
	2.9 – 3.0	9.29	0.851	34.45	0.235	33.33
	3.0 – 3.1	0.69	2.586*	8.79	0.560*	6.67
	3.1 – 3.2	0.08				
	Sink @ 3.2	0.01				
	Calc Head		0.229		0.065	
Sinks	Float @ 2.7	0.16	0.128#	0.01	0.075#	0.02
	2.7 – 2.8	0.44				
	2.8 – 2.9	2.42	0.402	0.13	1.27	0.15
	2.9 – 3.0	9.03	1.164	1.37	0.428	1.88
	3.0 – 3.1	13.55	2.405	4.26	0.695	4.58
	3.1 – 3.2	8.13	3.735	3.97	0.727	2.88
	Sink @ 3.2	66.28	10.417	90.26	2.805	90.80
	Calc Head		7.649		2.055	

** Sink @ 3.0 floats density samples combined for analysis purposes,*
 # Float at 2.8 sinks density samples combined for analysis purposes.

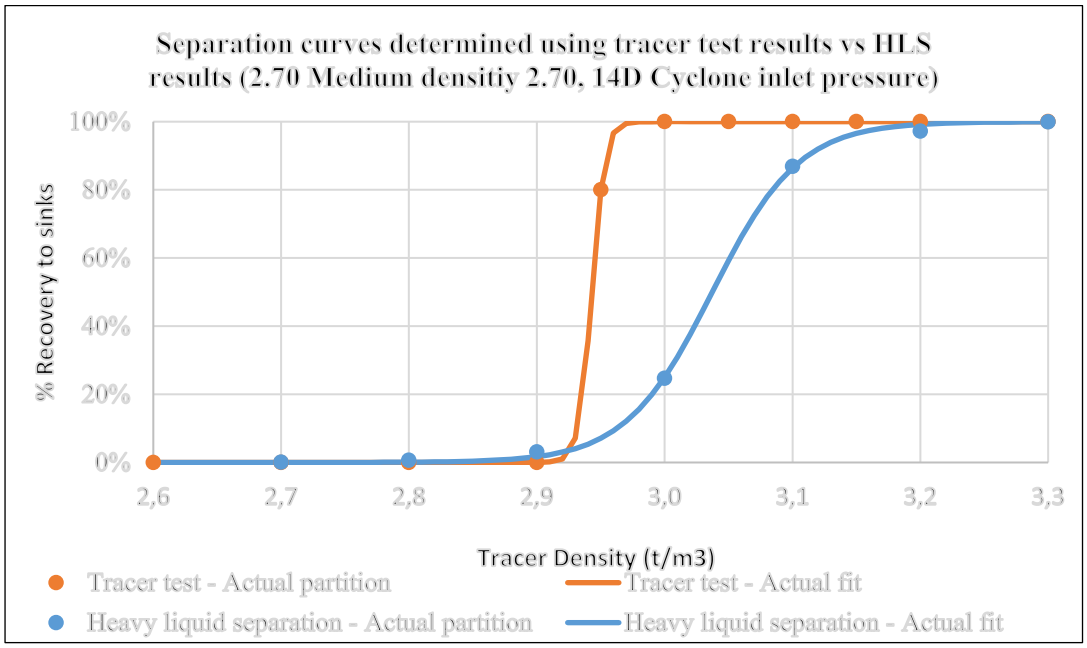
Table 6. Pilot DMS run – Heavy liquid separation analysis results (XRD analysis)

Density fraction	HLS Mass,%	ZnS	PbS	Ankerite	Dolomite	FeS_2	SiO_2	Biotite	Calcite
		Mass, %							
Floats									
Float @ 2.7	41.72	0.03	0.01	3.18	2.57	0.20	11.44	2.59	79.61
2.7 – 2.8	23.02	0.30	0.07	11.52	25.47	1.73	20.71	3.22	36.99
2.8 – 2.9	25.19	0.50	0.11	27.30	53.77	2.59	11.90	1.53	2.29
2.9 – 3.0	9.29	1.32	0.27	51.48	24.57	6.10	14.32	0.90	1.03
3.0 – 3.1	0.69	4.03*	0.65*	31.25*	6.94*	17.18*	32.98*	1.09*	5.89*
3.1 – 3.2	0.08								
Sink @ 3.2	0.01								
Calc Head		0.36	0.08	15.88	22.81	1.84	14.13	2.46	42.45
Sinks									
Float @ 2.7	0.16	0.21#	0.09#	10.43#	25.51#	1.87#	20.47#	2.09#	39.34#
2.7 – 2.8	0.44								
2.8 – 2.9	2.42	0.63	0.15	36.23	39.04	3.06	15.70	1.06	4.13
2.9 – 3.0	9.03	1.77	0.49	49.35	17.15	8.71	21.05	1.00	0.48
3.0 – 3.1	13.55	3.68	0.8	38.45	9.84	15.60	29.85	0.92	0.85
3.1 – 3.2	8.13	5.77	0.84	27.56	10.94	22.41	31.14	0.81	0.53
Sink @ 3.2	66.28	15.90	3.24	9.55	4.71	51.83	14.48	0.28	0.00
Calc Head		11.68	2.37	19.17	7.99	39.16	18.57	0.51	0.54

** Sink @ 3.0 floats density samples combined for analysis purposes,*
 # Float at 2.8 sinks density samples combined for analysis purposes.

The mass splits from the heavy liquid analysis was also used to determine the actual separation curve in order to compare it with the tracer test separation curve (Fig. 2). The results from the heavy liquid separation tests on the floats and sinks sample from the final DMS pilot test indicate the following:

- An EP value of 0.037 was calculated for the separation curve of the pilot test separation. This is an acceptable value at the industry norm medium ore ratios used for the test.
- The % near density material at the separation / cut density of 3.037t/m3 is 14.0%. This figure is low enough not to affect separation.
- The separation / cut density (D50) calculated from the heavy liquid analysis is 0.094t/m3 higher than the separation / cut density (D50) determined during the tracer tests. This is due to the tracer tests are done in an off-line regime and doesn't account for interparticle collisions. The degree of the offset deserves further attention and will be studied further during subsequent tests.
- The zinc and lead based minerals present are exclusively sulphide ores (sphalerite and galena). There were no ferromagnetic particles detected during the fractional XRD analysis, but almost all minerals detected could be classified as weakly magnetic. The magnetic separators used in DMS plants will however be too weak (2000 Gauss) to recover these minerals.



Graph 2. Graph showing the difference between the separation curves obtained from the tracer test results compared the heavy liquid separation results

CONCLUSION

The dense medium separation process could be applied to beneficiate the specific ore deposit as Zn and Pb in the -12+1mm fraction could be upgraded from 1.77% Zn to 6.22% Zn (Zn recovery of 88.3%) and 0.68% Pb to 2.19% Pb (Pb recovery of 90.8%). Yield to sinks for the process is 25.2% of the feed. The zinc and lead based sulphide minerals to occur in higher concentrations in the -1mm fraction compared to the -12+1mm fraction (4.14% Zn and 1.35% Pb in the -1mm fraction compared to 1.59% Zn and 0.42% Pb in the -12+1mm fraction). If required, the investigation could be expanded to include DMS separation down to 0.6mm or alternatively conventional gravity separation equipment could be used to separate the zinc and lead-bearing minerals in the -1mm size fraction. An EP value of 0.037 was calculated for the separation curve of the pilot test separation. This is an acceptable value at the industry norm medium:ore ratios used for the test.

The % near density material at the separation / cut density of 3.037t/m3 is 14.0%. This figure is low enough not to affect separation. The separation / cut density (D_{50}) calculated from the heavy liquid analysis is 0.094t/m3 higher than the separation / cut density (D_{50}) determined during the tracer tests. This is due to the tracer tests are done in an off-line regime and doesn't account for interparticle collisions. The degree of the offset deserves further attention and will be studied further during subsequent tests. The zinc and lead based minerals present are exclusively sulphide ores (sphalerite and galena). There were no ferromagnetic particles detected during the fractional XRD analysis, but almost all minerals detected could be classified as weakly magnetic. The magnetic separators used in DMS plants will however be too weak (2000Gauss) to recover these minerals.

REFERENCES

Cresswell, G.M. (2001). Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation. SAIMM Copper, Cobalt, Nickel and Zinc Recovery Conference, 16–18 July 2001, Victoria Falls, 10 pp.

Gill, C.B. (1991). Materials Beneficiation (Chapter 8, Gravity concentration), Springer-Verlag New York, Inc. 1991.

Napier-Munn, T.J. (1991). Modelling and simulating dense medium separation processes — A progress report. *Minerals Engineering,* 4, 3-4, 329-346.

EFFECTS OF PARAMETERS ON SCREENING AGGREGATE MATERIAL BY HIGH-FREQUENCY SCREEN FOR SAND WASHING: A CASE STUDY AND COMPARISON WITH SAND WASHING EQUIPMENT

O. Basaran

İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisi, Proses ve Satış Mühendisi
(basaranog@itu.edu.tr)

ABSTRACT

This technical research paper presents a case study investigating the effects of parameters on the screening of aggregate material for sand cleaning using a high-frequency screen. The assessment focuses on two key parameters: feed Particle Size Distributions and cut size. The results of the study aim to enhance the understanding of screening operations for sand cleaning and aid in optimizing the performance of such equipment. Furthermore, the theoretical comparison between high-frequency screens and sand-washing equipment will offer insights into the relative merits of these two approaches for sand cleaning. This evaluation will consider efficiency, water usage, energy consumption, capital investment and maintenance requirements. By comparing high-frequency screens with sand-washing equipment, it offers a theoretical basis for selecting the most suitable approach for specific sand-cleaning applications.

Keywords: Screening, energy efficiency, Aggregate, Sand washing

ÖZ

Bu teknik araştırma bildirisi, yüksek frekanslı elek kullanarak kum yıkama için agrega malzemesinin elenmesinde parametrelerin etkilerini araştıran bir vaka çalışması sunmaktadır. Değerlendirme iki temel parametreye odaklanmaktadır: besleme Tane Boyutu Dağılımları ve kesme boyutu. Çalışmanın sonuçları, kum temizleme için eleme işlemlerinin anlaşılmasını geliştirmeyi ve bu tür ekipmanların performansını optimize etmeye yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, yüksek frekanslı elekler ve kum yıkama ekipmanı arasındaki teorik karşılaştırma, kum yıkama için bu iki yaklaşımın göreceli değerlerine ilişkin öngörüler sunacaktır. Bu değerlendirmede verimlilik, su kullanımı, enerji tüketimi, sermaye yatırımı ve bakım gereksinimleri gibi faktörler göz önünde bulundurulacaktır. Yüksek frekanslı elekler ile kum yıkama ekipmanını karşılaştırarak, belirli kum temizleme uygulamaları için en uygun yaklaşımın seçilmesi için teorik bir temel sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Eleme, Enerji verimliliği, Agrega, Kum yıkama

INTRODUCTION

The demand for crushed sand is increasing as increasing cement and natural sand prices cause almost all quarry producers to produce crushed sand. However, crushed sand, which is generally produced with high-speed vertical shaft impactors (VSI), limits the usage areas of this crushed sand produced by the ratio of -0.063 mm, which is called filler. (Toprak, 2021) So, Sand washing which is the after stage of crushing and screening is an essential stage in aggregate production for increasing the quality of the end product. It removes impurities, such as clay, silt, and contaminants which are fine materials, from the surface of sand particles. After removing these impurities, the end product's cleanliness, and gradation (PSD) which is fundamental for achieving optimal durability of concrete and other construction materials are improved. (Patil & Raut, 2013)

Sand washing equipment is designed to scrub, wash and remove the material. To scrub, there are several machines such as log washers and blade mills (Figure 1). These machines are used for very clayey feed material and have heavy-duty parts to agitate the slurry and separate fine materials adhered to the surface of the sand.

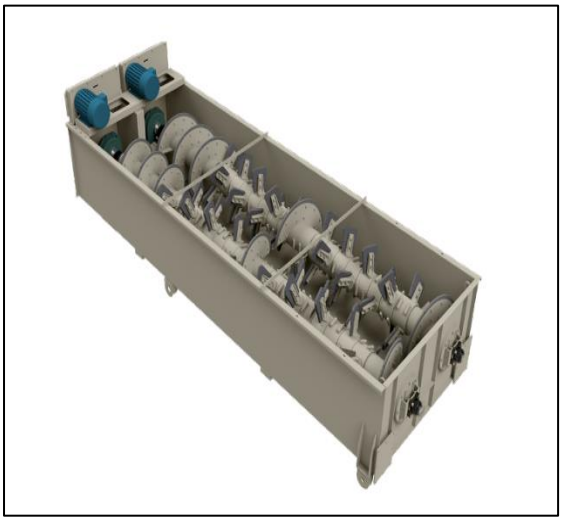


Figure 1. Two Shaft Blade Mill



Figure 2. Sand Washing System

Sand washing systems which are the subject of this paper have hydrocyclones and dewatering screens as shown in Figure 2. Hydrocyclones are used to separate -63 microns of fine material from the sand and also clean the surface of the sand by its high-pressure flow rate. After the removal of 63 microns of material, the underflow is sent to the dewatering screen and the final product is produced. After dewatering, the water passing under the screen and the impurities not separated in the hydrocyclone are either fed to the hydrocyclone or removed from the system according to the level of the tank.

HIGH-FREQUENCY SCREEN

Astec's high-frequency screens, which are used not only in the aggregate sector but also in other sectors, can be manufactured in sizes ranging from 4'x8' (1016mm x 2032mm) to 6'x24' (1524mm x 7296mm) depending on the application or capacity and can be manufactured in one to three decks. Depending on the capacity and the desired product, the working angles of the screens are steeper and easily changeable compared to conventional screens and they operate between 38°-45°. Changing the angle results in increasing or decreasing the retention time of the feed material on the screen. The screens with a maximum feed size of 19mm can be fitted with a screen cloth with a minimum 400-micron aperture, depending on the application and the characteristics of the material fed. Unlike conventional screens, the screen frame does not shake, the vibration is generated by electrically or hydraulically driven vibratory motors placed under the screen cloths as shown in Figure 3, each of which has an operating range of 0-4200 rpm and can be adjusted individually. (Toprak, 2021)

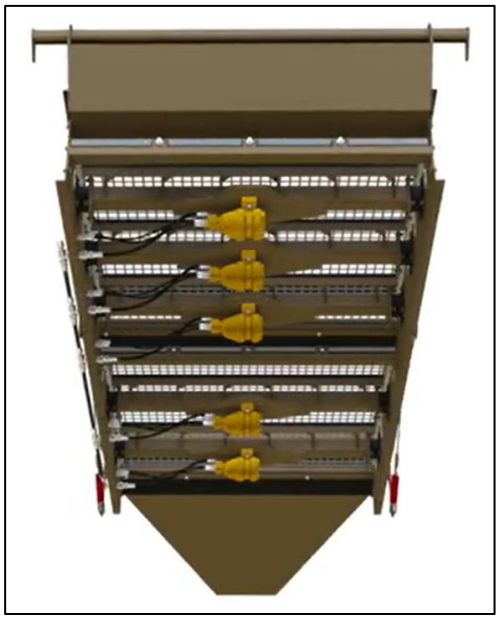


Figure 3. Vibration motors mounted under the screen wires

As shown in Figure 4., The main advantage of operating at a high speed of 3600-4200 rpm, applied directly to the screen wires, is that the fine particles in the material bed quickly reach the bottom and the coarse particles remain on top; in this way, small particles are immediately screened through the screen aperture and the efficient and higher capacity operation of the screen is achieved. It is also observed in Figure 4 that the frequencies are different for each motor in order to make the screening more efficient. this is why these screens are also called Vari Vibe.

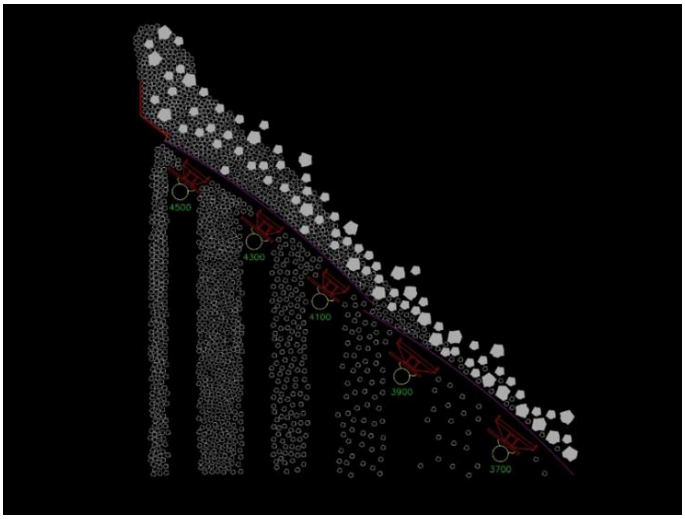


Figure 4. Screening of High-Frequency Screen

HIGH-FREQUENCY SCREENS VS. SAND WASHING SYSTEMS

As many machines and equipment, there are different parameters to change the efficiency, and capacity according to application. The parameters for both methods are listed below;

- High Frequency Screens
  - Frequencies of each motor
  - Aperture size
  - Aperture shape
  - Screen panel material (Steel wire, polyurethane)
  - Moisture of feed material
  - Volume of spray bar
  - Angle of the screen
- Sand washing system
  - Solid ratio
  - Dewatering screen aperture size
  - Screen panel's material
  - Hydrocyclone spigot and vortex finder

The sand washing system runs with slurry. Because of that, there are several additional parts such as slurry pump, float, pipes, and valves in addition to hydrocyclones and a dewatering screen. This makes maintenance costs higher than high-frequency screens.

Water is a very essential factor for the sand washing system. However, today, water-free systems are preferred due to water shortage. especially in dry regions such as the Middle East. This scarcity makes high-frequency screens more advantageous. Toprak stated that there are a lot of high-frequency screens in use for sand washing in many cold areas such as Russia and Canada due to the freezing of water in the winter (2021).

Another advantage of high-frequency screens is that there is no need to use water recovery equipment such as thickener tanks and filter presses used for the waste of washing systems. When the sand washing systems are used, there will be waste slurry with high water content. Because of waste regulations in industrial plants, the water must be recycled, or the solid waste must be dewatered even if there is no water scarcity. This makes capital and maintenance costs higher.

Since it is a screening application, for higher efficiency, the moisture content of the fed material must be below 5%. This results in blinding on the screening area. If it is above 5%, flex mat screen wires can be used to reduce the effects of moisture.

CASE STUDY

The high-frequency demo screen in Figure 5 is used for the test for adding dry sand washing process of finally crushed material by Vertica shaft impactor. The material is fed to the screen by a conveyor feeder to feed homogenous and constant.

In order to reduce -63 micron material from crushed sand, 800 mm and 1000 mm aperture size wires are used, respectively. As shown in Figure 6 which is Feed PSD, PSDs' graphic's axes are given in Ln. The reason for this is to create a curve in the Excel program suitable for the Gaudin-Schumann curve. For the percentage of -63 micron material, the equation of the curve can be used. All results are also given below as a table.

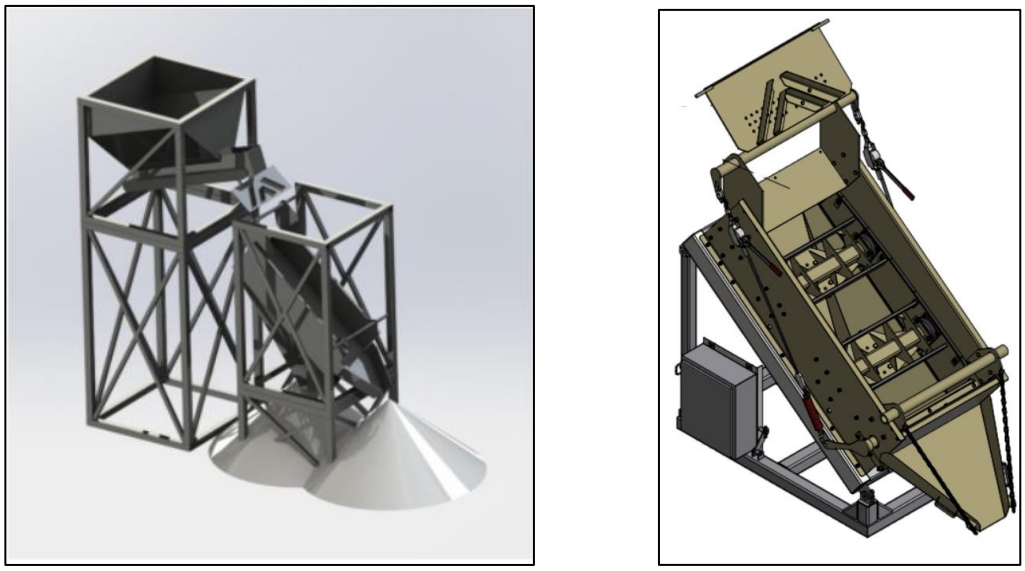


Figure 5. Demo High-Frequency Screen

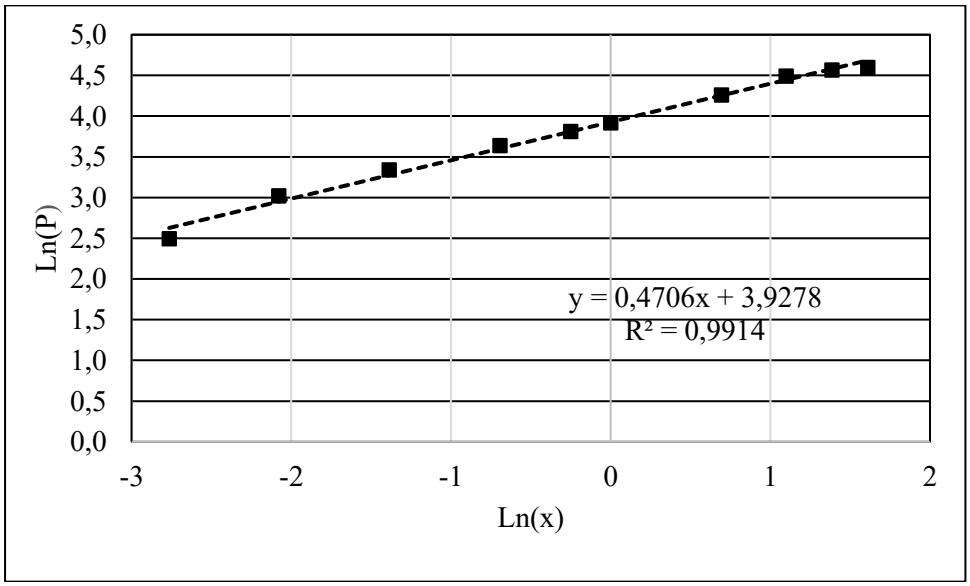


Figure 6. Feed material PSD in Ln axis

RESULTS

When 800 mm aperture size wire is used, the summarised PSD table can be seen in Table 1. According to the results, the -63 micron percentage is reduced from 12,1% to 1,7%. If the undersize PSD is examined, there is coarse material loss, normally.

Table 1. PSD table of samples from 800 mm screening

Test #	Aperture, mm	Feed ∑ passing,%	Oversize ∑ passing, %	Undersize ∑ passing, %
1	5.000	100.0	100.0	100.0
2	4.000	99.6	99.1	100.0
3	3.000	96.3	91.4	100.0
4	2.000	89.5	80.7	100.0
5	1.000	70.8	54.5	100.0
6	0.778	50.4	26.5	100.0
7	0.500	45.3	20.2	99.9
8	0.250	38.2	10.7	99.8
9	0.125	28.3	3.5	79.2
10	0.063	20.5	2.5	53.0
11	Pan	12.1	1.7	30.5

When 1000 mm aperture size wire is used, the summarised PSD table can be seen in Table 2. According to the results, the -63 micron percentage is reduced from 12,1% to 0,8%.

Table 2. PSD table of samples from 100 mm screening

#	Aperture mm	Feed ∑ passing, %	Oversize ∑ passing, %	Undersize ∑ passing,%
1	5.000	100.0	100.0	100.0
2	4.000	99.6	99.4	100.0
3	3.000	96.3	94.4	100.0
4	2.000	89.5	85.0	100.0
5	1.000	70.8	59.4	100.0
6	0.778	50.4	10.5	100.0
7	0.500	45.3	5.2	96.7
8	0.250	38.2	2.1	82.5
9	0.125	28.3	1.2	60.6
10	0.063	20.5	1.0	41.8
11	Pan	12.1	0.8	22.9

To compare the aperture sizes, -63 microns which is unwanted material reduced more when 1000 mm screening. However, when undersize cum. Passing percentages of both screening tests, loss of coarse material is higher. This can be acceptable or not according to product requirements.

The angle of the screen is a very important parameter of this application. The angle of the demo test was 38 º when tests were run. When the angle of the screen is steeper, the retention time of the material in the screen is decreased and there will be no time for the coarse materials to pass under the screen after the fine materials are screened at the beginning of the screen.

In conclusion, High-frequency screens can be used as an alternative to wet sand washing systems due to climatic conditions. It should not only be considered as a water problem, maintenance and energy costs will also be low. High-frequency screens can be flexible for all the changes in product requirements or raw materials. These parameters listed above can be changed to meet the requirement. However, sand washing plants cannot be flexible as HF Screen.

REFERENCE

Astec Industries, 2022, Washing and Classifying Technical Brochure, pp 1-24 https://www.astecindustries.com/products/details/modular-sand-classifying-plants

Astec Industries, 2021, Vari Vibe Screen®: High-Frequency Screen Technical Brochure, pp 1-2, https://www.astecindustries.com/products/details/high-frequency-screens

Patil, V. V., Raut, S., 2013, Sand Screening and Washing Machine. *The International Journal of Innovative Research and Development*, pp 208-212.

Toprak O., 2021, Using High-Frequency Screens at Crushed Sand Applications, pp 1-7

LEONARDİTLERİN ve LİNYİTLERİN KURUTULMASINA YÖNELİK KURUTUCU TASARIMI

EVAPORATOR DESIGN FOR THE DEHUMIDIFICATION OF LEONARDITES AND LIGNITES

G. Yapıcı*, E. Kulaç, M. Bilen, S. Kizgut, I. Toroglu, B. Akkaya, S. Yilmaz

Zonguldak Bülent Ecevit Universitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü
*(*Sorumlu yazar: gokhanegeyapici@gmail.com)*

ÖZ

Bu çalışmada ülkemiz leonardit ve linyitlerinin kurutulması için kurutucu tasarımı yapılmış ve kurutma işlemine ait parametrelerin eldesi için de laboratuvarda sıcaklıkla eş zamanlı olarak nem giderimin ölçümlenebileceği bir cihaz geliştirilmiştir. Bu amaçla eski bir kromatograf fırını deney seti olarak uyarlanmış ve programlanarak farklı sıcaklıklar ve farklı bekleme zamanlarının nem giderimi için etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda üç farklı maksimum sıcaklık değerlerinde 9 farklı bekleme zamanlarında çalışılmış ve nihai ürünlerin nem giderilme oranları karşılaştırılmıştır. Tane boyutunun kurutma üzerinde etkisini dolayısıyla da kurutucu tasarımındaki rolünü belirlemek için ise iki farklı boyut grubu (-10mm,-18+10 mm) malzemelerle çalışılmıştır. Numuneler belirlenen programda; belirlenen bekleme zamanları ile belirlenen sıcaklık artışlarından sonra tartılmış ve nem giderim potansiyelleri belirlenmiştir. Bu aşamada aynı örnek deney sayısına yeterli olacak şekilde numune alımı yoluyla örneklendirilmiş ve her bir örnekte sadece etkinin sıcaklık ve bekleme zamanı olması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre -10 mm malzeme grubu için nem miktarı maksimum %98.6 azaltılmış, -18+10 mm malzeme grubu için ise bu değer %91.78 olarak belirlenmiştir. Her bir nem giderimine karşılık olarak numunenin kurutma işlemi sonrasında numunede teorik olarak beklenen nem yüzdesi de belirlenmiştir. Bu beklenen nem yüzdesi -10 mm malzeme grubu için en düşük %1.24, -18+10 mm malzeme grubu için ise %7.07 olacağı tahmin edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Leonardit, kurutma, kurutucu, nem giderimi, sıcaklık, bekleme zamanı, tane boyutu

ABSTRACT

In this study, a dryer was designed for the drying of Turkish leonardites & lignites and a device was developed to measure moisture removal simultaneously with temperature in the laboratory to obtain the parameters of the drying process. For this purpose, an old chromatograph oven was adapted as an experimental set and programmed to determine the effects of different temperatures and different waiting times on moisture removal. In this context, three different maximum temperature values and 9 different waiting times were studied and the moisture removal rates of the final products were compared. In order to determine the effect of grain size on drying and thus its role in dryer design, two different size groups (-10 mm, -18+10 mm) were studied. The samples were weighed and their moisture removal potentials were determined after the determined waiting times and temperature ramps in the determined program. At this stage, the same sample was sampled by sampling to be sufficient for the number of experiments and it was aimed to have only the effect of temperature and waiting time in each sample. According to the results obtained, the maximum moisture content was reduced by 98.6% for the -10 mm material group, while this value was determined as 91.78% for the -18+10 mm material group. For each moisture removal, the theoretically expected moisture percentage in the sample after drying was also determined. This expected moisture percentage was estimated to be at least 1.24% for the -10 mm material group and 7.07% for the -18+10 mm material group.

Keywords: Leonardite, drying, dryer, moisture removal, temperature, dwell time, particle size

GİRİŞ

Kömür kurutma çalışmaları son yıllardaki enerji ihtiyacındaki artış ve enerji hammaddelerine erişimde yaşanan güçlükler sebebiyle oldukça önem kazanmıştır. Kömürlerin kurutulmasına yönelik araştırma yapan Chen ve Yang, yapmış oldukları çalışmada, temiz kömür teknolojisine katkısı amacıyla farklı kurutma teknolojileri ve hava yoğun akışkan yataklı kurutma sistemleri için kömür kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir.

Kanda ve Makino, Endonezya, Warra Bölgesi'ndeki subbitümlü kömürün sıvılaştırılımış dimetil eter ile kurutulması üzerine çalışmışlardır. Bu proses için ısı gereksinimine ihtiyaç yoktur. Bu işlem labaratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Uygulama yapılmadan önce ve sonra kömürün özellikleri incelenmiştir ve bu işlem için gerekli enerji gereksinimi hesaplanmıştır. İşlem sonucunda maksimum nem alma miktarı % 98,3 bulunmuş ve işlem sonrası kömürün özelliklerinde bir değişme görülmemiştir. İşlem için gereksinim duyulan enerji 2069 kJ/kg olarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda sıvılaştırılmış dimetil eter ile kurutma uygulamalarının etkinliği ve enerji verimliliği açısından önemi ortaya konmuştur.

Cronauer, subbitümlü kömürünün azot, hava ve azot-hava karışımlı gazlarla kurutulmasını inceleyerek sonraki kömür sıvılaştırma deneyleri için kömür hazırlama karakteristiklerini elde etme amacı gütmüşlerdir. Kömür kurutma işlemi 200°C'lik bir ortamda laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir. Net nem içeriği ve serbest oksijen miktarının artan sıcaklıkla zamana bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. İşlem sırasında salınan oksijen ve karbondioksit dışındaki tüm içerikler, kömürün özelliklerinin değişimine ve oksidasyon kinetiklerinin karakteristiklerine göre incelenmiştir. Kurutma esnasında oksijen tüketimi için iki farklı rejim elde edilmiştir. Bunlar yüksek hıza sahip ilk rejim ve devamında gelen daha yavaş olan ikinci rejimdir. Çalışma sonucunda maksimum net nem ve serbest oksijen miktarı belirlenmiştir. Ayrıca bu iki rejim bölgesindeki uçucu madde miktarları (CO_2 hariç) analiz edilmiştir.

Chen vd. yaptıkları bu çalışmada tek bir kömür parçacığının kızgın buharla kurutulmasını modellemiştir. Yapılan hesaplamalar literatürdeki seramik ve su damlacıklarının buharla kurutulması deneyleriyle kıyaslanmıştır. Oluşturulan model üzerinde, kömür kurutma sistem davranış etkilerinin ve parametrelerinin belirlenmesi amacıyla da çalışılmıştır. Bu modelle nemli iklim şartlarında yapılacak olan kurutma çalışmaları da araştırılmıştır. Hesaplamalar, termo fiziksel özelliklerin ve inversiyon sıcaklık (çoklu hava katmanı oluşma sıcaklığı) noktasının en önemli etki parametreleri olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda yüksek buhar akış oranının ve buhar sıcaklığının kurutma işlemini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca parça boyutu, parçanın ilk sıcaklığı ve parça yoğunluğunun kurutma üzerinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir.

Karl vd. linyiti kuru nitrojenden ortalama 20-80 derece sıcaklık elde ederek iki farklı modda kurutmuşlardır. Aynı şartlar altında ilk modda linyitin nem kaybı %80-85 iken ikinci modda bu oran %15-25 seviyelerindedir. Çalışma sonucunda bu iki mod arasındaki nem farkının bu kadar büyük olmasının sebebi moleküler yapı ile açıklanmıştır. İlk mod için aktivasyon enerjisi suyun buharlaşma ısısına oldukça yakındır. Ayrıca bu nem farkının bir diğer nedeni de gaz akış oranı ve örnek numunenin kalınlığı olarak açıklanmıştır.

Karthikeyan vd. yapmış oldukları bu çalışmada düşük dereceli kömürlerdeki kurutma işlemi gereksinimine değinmişlerdir. Dünya üzerinde bu kaynaklar oldukça sık bulundukları halde yüksek taşıma maliyetleri, ulaşım ve depolama sırasında meydana gelebilecek tehlikeli patlamalar ve yanma sırasındaki düşük verimleri nedeniyle istenilmemektedir. Bu tip kömürlerin içerisindeki yüksek nem içeriği daha fazla kendinden yanma eğilimini, ayrışma derecesi yüksekliğini ve toz alma karakteristiğini kısıtladığı için yaygın şekilde kullanılmamaktadırlar. Bu tip olumsuz etkiler sonucu genç kömürlerin fiyatı bu özellikler dâhilinde belirlenmekte ve fiyatları verecekleri ısı miktarına göre değişmektedir. Bu çalışmada kömür kurutma işlemi gereksiniminin neden doğduğu açıklanmıştır. Ayrıca efektif bir kömür kurutma için uygun ve kullanışlı

prosesler ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Günümüzde kullanılan sistemler ve yakın gelecekte kullanılması beklenilen teknolojiler incelenmiştir.

Levy ve arkadaşları iki ayrı kurutma sistemi üzerinde teorik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Model 1 ve model 2 bu çalışmanın yapıldığı kurutma sistemlerini göstermektedir. Model 1'de kurutma işlemi, türbinden çıkarak soğutma kulesine giden akışkanımızı bir ısı değiştiricisinden geçirerek, kurutma işlemi için kullanılacak havanın ısıtılmasıyla kömürden nem alınması gerektiğini göstermektedir. Model 2'de ise soğutma kulesine giden akışkanın bir kısmı hava ısıtıcısından geçirilirken bir kısmı da doğrudan akışkan yataklı kömür kurutucusuna yollanılarak kömürden nem alımı gerçekleşmektedir.

Ayrıca Avustralya'daki Monash üniversitesinde yapılan bir deneysel çalışmada Avustralya kahverengi kömürünün veya linyitinin nemi azaltıldığında, sera gazı emisyonlarının bir santral için %30 civarında azalacağı gözlemlenmiştir. Bu sonuç küresel ısınma olgusu açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada kömür örneklerinin nem içerikleri farklı zaman ve farklı sıcaklık rampları uygulanarak azaltılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı tasarlanacak kurutucu için farklı bekleme süreleri ile fırın içi sıcaklıklarının benzeştirilmesini sağlamaktır. Dolayısıyla farklı sıcaklık bölgelerinde farklı zaman aralıklarında bekleyecek kömürlerin kurutucu çıkışında hangi nem içeriğine sahip olacağının kestirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmayla elde edilecek sonuçlarla nem içeriği bilinen bir kömürün istenilen nem içeriğine kadar kurutulması için kurutucu tasarımı ve seçimi sağlanabilecektir.

Kömür Kurutma Metotları ve Tipik Kurutucular

1920 yılından bu yana kömürün neminin azaltılması, yüksek kalorifik değere sahip kömür üretimi yapılarak düşük taşınım harcamaları eldesi amacıyla, birçok değişik kurutma ve derece yükseltme çalışması geliştirilmiştir. Bunlar arasında Fleissner tarafından patenti alınan kızgın kurutma prosesi Doğu Avrupa'da ticari olarak uygulanmıştır. Bu proses kömür kurutma işlemi boyunca hiçbir risk olmaksızın yüksek kurutma sıcaklıklarına (>270 ℃) erişim imkanı sağlamıştır. Aslında bu patent, hava kullanan geleneksel kurutucular arasında gösterilebilir.

Kluttz vd. WTA prosesini atık ısıların kullanımıyla akışkan yatakta kurutma geliştirmiştir. Bu proses birkaç ısı değiştiricisiyle birleştirilmiş sabit akışkan yatakta üretilen hafif kızgın buharla, kömürün kurutulmasına dayanmaktadır.

Günümüzde ise Eagle yeni bir teknoloji olan karbon yakalama ve depolama ile birleştirilmiş, gazlaştırma kombine çevrimini geliştirmiştir. Bu işlemle daha düşük sülfür değerine sahip kömür eldesi mümkündür. Yine günümüzde K-Fuel teknolojisi geliştirilmiştir. Bu proses, ısı ve basıncı kullanarak daha yüksek ısıl değere sahip kömür eldesi imkanı sunmaktadır. Ayrıca bu işlem sırasında kömür içerisindeki safsızlıklardan (civa yoğunluğundan, sülfür dioksit ve nitrojenoksit emisyonlarından) kaynaklanan etkiler ortadan kaldırılmaktadır.

Konveksiyonel Buharlaşma ile Kurutma

Birbirine kıyasla değişik yönleri ileri seviyede olan birçok buharla kurutma teknolojisi mevcuttur. Bu kurutma proseslerinde sıcak hava, yanma gazları veya kızgın buhar kullanımı söz konusudur. Bu kurutucular direkt ve endirekt kurutucular, dönel fırınlar ve akışkan yataklı sistemler olmak üzere iki kategoride sınıflandırılır. Kurutucu seçimindeki en önemli nokta sıcak havaya maruz kömür tozları ve ateşin bir araya gelerek oluşturacağı tehlikeli operasyon şartlarının güvenliğidir. Direkt kurutucular (akışkan yataklar, şaftlı kurutucular, titreşimli akışkan yataklar) sıcak havayı veya yüksek sıcaklıklı yanma gazlarını kullanırlar. Bu gazlar kurutma öncesi 700- 900°C iken, kurutma sonrası 60-120°C sıcaklığındadırlar. Bu işlem sırasında en önemli nokta yüksek oksijen içeriğine ihtiyaç duyulmamasıdır. Böylece tehlikeli patlamalar ve ani yanmaların

önüne geçilebilir. Bu direkt sistemler için can alıcı bir noktadır. Çünkü düşük dereceli kömürler oldukça reaktiftirler. Bundan dolayı bu kömürler kendinden yanma olgusu nedeniyle ani patlama ve ateşlemelere oldukça yatkındırlar. Endirekt kurutucuların ise farklı avantajları söz konusudur. Endirekt ısıtmalı dönel kurutucular sert kömürlerde kullanılmaktadırlar. Bu sistemler, yüksek enerji verimliliği sağlarken 3100 kJ/kg seviyelerinde su buharı tüketirler. Titreşimli kurutucular sert ve kahverengi kömürler için kullanılmaktadır ve tükettiği enerji 3100-4000 kJ/kg seviyelerindedir. Potter vd. ıslak Victorian kahverengi kömürünü kızgın buharlı bir akışkan yatak kurutucu sistemi ile kurutmuşlardır. Faber vd. uygun bir buhar kurutucusu kurulumu yaparak kömür nemini %8 civarında azaltmışlardır. Bu sistemde buhar giriş sıcaklığı 300°C , çıkış sıcaklığı ise 150°C civarındadır.

Buharlaşma Olmaksızın Susuzlaştırma ve Kurutma

Faz değişikliği olmaksızın dehidrasyon işleminin oldukça verimli olduğu aşikârdır. Çünkü buharlaşma için ihtiyaç duyulan ısıya gerek yoktur, kullanılan ekipmanlar daha basit ve ucuzdur. Fakat bu teknolojinin kullanımında, nem içeriği ve parça boyutuna bağlı olarak çok özel malzemelerden yararlanılmaktadır. Kömür için parça boyutuna bağlı kullanılan materyaller değişmektedir. Disk ve dönel vakum filtreler ABD'de yaygın şekilde kullanılır. Basınçlandırılmış filtreler, vakum filtrelere göre daha efektiftir ancak pahalı ve işletme maliyetleri yüksektir. Son yıllarda kömür kurutma endüstrisinde gelişmekte olan bir kurutma teknolojiside elektro-susuzlaştırmadır. Bu sistemde sulu- çamur, pozitif iyon katyonunu temsil eder ve sürekli elektrik akımı altındadır. Viskoz etkiler sonucu çamur içerisindeki su molekülleri katoda taşınır ve böylece su çamurdan ayrılmış olur. Su kaybından kaynaklanan hacim kaybı elektroda mekanik güç verilerek sağlanır. Belirli basınçlar 28 altında, anot ve katot arasındaki mesafe ayarlanır. Bu işlem sonucunda %25-50 seviyelerinde kuruluk elde edilmiştir. Avustralyadaki CSIRO laboratuarında da yoğun bir şekilde, kömür maden atıklarının elektro-osmotik susuzlaştırılması üzerine çalışılmaktadır. Elektro-osmos daha iyi susuzlaştırma sağlamak için basınçlı filtreleme ile desteklenmiştir. Uygulanan diğer bir proseste vakum disk filtreler içinde seramik filtrelerin kullanılarak susuzlaştırılma işleminin yapılmasıdır. Bu filtrelerin gözenekleri çok incedir. Böylece yüksek vakum seviyelerinde bile çalışabilirler. Bazı santraller hiperbarik basınçlı filtreler kullanarak nem alma işlemi yapmaya başlamıştır.

Öğütme ile Kurutma

Kömür kullanılmadan önce öğütülme veya parçalanma işlemine tabi tutulmaktadır. Öğütülme işlemi sırasındaki ısı üretimi kullanılarak parça boyutu küçülürken aynı zamanda önemli ölçülerde nem azalımı yapılabilir. Bu teknoloji için verilebilecek en iyi örneklerden biri Kinetic Disintegration System Micronex öğütücü ve kurutucularıdır. KDS aslında bir değirmen odasıdır ve bu odada öğütme ve kurutma işlemi aynı anda yapılmaktadır. Kurutma mekanizması tamamen termaldir ve oda içindeki hava sıcaklığı 70 ile 90°C arasındadır.

Sıcak Sulu Kurutma

Bu proses Kuzey Dakota üniversitesindeki Energy and Environmental Research Center'de geliştirilmiştir. Kurutma işlemi yarı sıvı yakıtlar için üretilmiştir. Bu teknoloji için yüksek sıcaklık ve basınç gereksinimi söz konusudur. Bu teknoloji sulu kömürlerin kullanımı amacıyla ortaya çıkmıştır. Yüksek oranlarda nem düşüşü gözlenmiştir. HWD prosesi ıslak kömürün 240°C ve altındaki sıcaklıklarda, uygun doymuş buhar basıncı elde edilerek, nem alımını ifade eder. Bu işlem en az 10 dakika sürmelidir. Nem gözenekler içindeki karbondioksidin ayrışmasından ve genleşmesinden kaynaklanarak azalmaktadır.

Nonmetal Biyokütle Kurutucular

Gulftex Environmental Services of Texas çalışma grubu pülverizeli hava kurutucularını geliştirmişlerdir. Bu kurutucular ısı kullanmazlar fakat nem içeriğini biyokütleye bağlı olarak %80'lerden %10'a kadar azaltabilmektedir. PAD yüksek hızlı hava akımı kullanarak nem alımını gerçekleştirmektedir. Buharlaşma olmaksızın kurutma işlemi yapan diğer bir teknolojide Fleissner prosesidir. Bu prosesin temeli geçmişe dayanmakla beraber, bu proseste de nem alımı buharlaşmadan kaçınılarak doymuş buhar çevresinde gerçekleştirilmektedir. Bu proses yüksek basınçlar altında gerçekleştirilir. Böylece faz değişimi yüksek basınç sayesinde önlenmiş olur. Böylece enerji verimliliği bu proses için arttırılmış olmaktadır. Bu teknolojinin yatırım maliyeti hala tam olarak bilinememektedir. Avustralya'da bu konu hakkındaki çalışmalar devam etmektedir. Fakat ilginçtir ki bu proses diğer biyokütle teknolojilerine göre laboratuvar şartlarında oldukça başarılı sonuçlar vermiştir.

GELİŞMEKTE OLAN KURUTMA METOTLARI

Kömürün Kızgın Buhar ile Kurutulması

Kızgın buhar, geleneksel sıcak hava ile kurutma proseslerine oldukça iyi bir alternatiftir. Çünkü bu proses yangın tehlikesini ortadan kaldırmaktadır. Bu prosesin kömür kurutma üzerine getirdiği bazı avantajlar mevcuttur. Bunlar; yangın ve patlama riskinin azalması (oksijen yokluğu nedeniyle), emisyon oranındaki azalma (toz kaynaklı), daha yüksek kurutma oranları ve termal verimliliktir. Bu sistemlerde elde edilen yüksek kuruluk dereceleri daha fazla öğütülebilirlik kabiliyeti anlamına gelmektedir. Bir diğer avantajda 300-500°C buhar sıcaklıklarında %40-50 arasında sülfür içeriğinin azalmasıdır. Diğer bir avantajda 270-320°C buhar sıcaklıklarında kömür içerisindeki sodyum miktarının %50-90 oranında azalmış olduğunun görülmesidir. Tüm bu avantajları nedeniyle günümüzde kızgın buharlı kurutma teknolojileri tüm ilgiyi üzerine çekmiştir. Bu çalışmalara bir örnek Rheinbraun AG tarafından kahverengi kömürün kurutulması amacıyla incelenen bir akışkan yatak teknolojisidir. Aslında bu teknoloji ile ilgili ilk çalışmalar Avustralya Monash üniversitesinde Prof. O.E. Potter tarafından yapılmıştır. Rheinbraun bu çalışmanın devamı niteliğindeki incelemelerde 30 bulunmuş ve akışkan yatak teknolojisiyle iç ısı değiştiricilerini birleştirerek yeni bir dizayn elde etmiştir. Bu teknoloji WTA (Wirbelshicht-Trocknenymit İnterner Abwarmenutzung) kızgın buharlı kurutma prosesi olarak adlandırılmıştır. Bu proses aslında buharın uygun sistemlerde yeniden basınçlandırılma işlemine dayanmaktadır. Bu proseste kömür nem içeriği %55-60 sevilerinden %12'lere kadar düşürülmüştür. Bu teknoloji, dönel buhar-tüplü kurutuculara göre %80 daha az enerji tüketir ve %80 daha az toz salınımı yapar. Ayrıca WTA prosesinin yatırım maliyeti diğer sisteme kıyasla oldukça düşüktür.

Titreşimli (Darbeli) Yanma ile Kömürün Kurutulması

Darbeli yanma, kurutma potansiyeli olduğu düşünülen katı, sıvı veya gaz yakıtların yanma proseslerinin periyotlandırılması anlamına gelmektedir. Darbe yanmalı kurutma teknolojisi çoklu veya tek bir darbe yakıcılarını kullanarak, yüksek sıcaklık ve yüksek hızlı darbeli jet oluşumu sağlar. Kısa kurutma süresi, yüksek enerji verimliliği, kurutma sonrası elde edilen ürünün kalitesindeki gelişim ve çevre açısından yan etkilerinin oldukça az olması bu teknolojinin avantajları arasındadır. Ellmann vd. (1966) bu teknolojiyi linyitin kurutulmasında deneysel amaçla kullanmışlardır. Çalışma sonucunda linyitin nemi kurutma sonrasında %10 civarında azaltılmıştır. Bu teknolojinin birçok avantajı olmasına rağmen çözülmesi gereken problemleride mevcuttur. Bunlar, yüksek gürültü ve prosese başlamadan önce çözümlenmesi gereken ölçek hatalarıdır.

Pülverizeli Kurutma Sistemleri

Pülverizeli kurutma sistemleri; öğütücülerin, karıştırıcıların, nem alıcıların ve homojenleştirici materyallerin bir arada kullanıldığı bir prosestir. Bu proses çok yönlü, maliyet yönünden daha efektif, verimli, dayanıklı ve değişik pazarlarda kullanım uygulamalarının olması yönüyle oldukça avantajlıdır. Pülverizeli

kurutma sistemleri hassas döküm türbinleri, hava arındırma sistemleri, yüksek hızlı miller ve güç ünitelerinden oluşur. Hassas döküm türbinleri bu sistemin kalbidir. Bu türbinler oldukça yüksek hızlarda çalıştığından, yüksek kalitedeki paslanmaz çeliklerden imal edilirler. Pülverizeli kurutma sistemlerinde yapılan bir çalışmada, bu sistemin bitümlü kömürün nemini %15'ten %2'lere kadar düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ancak bu proses sırasında yüksek hızlarda çalışıldığından enerji tüketimi de oldukça yüksek olmaktadır. Ayrıca bu sistemin bir diğer dezavantajı da yüksek nem alma prosesleri sırasında sülfür değerinde meydana gelen artıştır.

LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

İki farklı tüvenan kömür örneğinden analizler için numune alındıktan sonra iki tüvenan örneği birleştirilmiş ve sonraki deneyler için hazırlanmıştır.

Boyutlandırma

Birleştirilmiş tüvenan kömür 50, 18, ve 10 mm'de elenmiştir. 10 mm altı ayrıca dar boyut gruplarında da sınıflandırmaya tabi tutulmuştur. Her bir boyut grubu örneği ayrı ayrı stoğa alınmış ardından bu boyut gruplarından kimyasal analizler için, yüzdürme batırma ve kurutma deneyleri için temsili örnekler alınmıştır. Tüvenan numunenin elek analizi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tüvenan kömür elek analizi sonuçları

BOYUT	Miktar % (M)	Kül % (K)	MxK	Miktar % ∑M↓	∑MxK↓	∑MxK↓ / ∑M↓	Miktar % ∑M↑	∑MxK↑	∑MxK↑ / ∑M↑
+50 mm	27.29	42.07	1148.09	27.29	1148.09	42.07	100.00	4362.73	43.63
-50+18 mm	30.21	44.26	1337.09	57.50	2485.18	43.22	72.71	3214.64	44.21
-18+10 mm	12.84	42.97	551.73	70.34	3036.92	43.17	42.50	1877.55	44.18
-10 mm	29.66	44.70	1325.82	100.00	4362.74	43.63	29.66	1325.82	44.70
	100.00	43.63	4362.74						

Tüvenan kömür örneğinin %70.34'ü 10 mm ve üzerinde olup kül değeri %43.17'dir. Boyut grubu olarak 10 mm altı miktarı %29.66 olup bu fraksiyonun kül değeri %44.70'dir. Tüvenanın kül değeri ise %43.63'dür.

Tüvenan Kömürün Isıl Değerinin Yükseltilmesine Yönelik Çalışmalar

Tüvenan kömürün ısıl değerinin yükseltilmesine yönelik çalışmalar nem giderilmesi ve yüzdürme batırma aşamaları takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

Doğrudan Kurutma Çalışmaları

Kurutma deneyleri üç ana grupta nem giderme potansiyellerini değerlendirmek amacıyla farklı nem içeriklerinde kurutma sürelerinin ve dolayısıyla da göreceli olarak kurutucu kapasitesini anlamaya yönelik olarak yapılmıştır. Bu aşamada daha önceden tasarlanan ve kurulması planlanan kurutucu için kömür örneklerinin maruz kalabileceği sıcaklar ve zaman aralıkları kestirilmesi amaçlanmıştır. Burada kullanılan örnekler 18 mm üzeri boyut grubunun 10 mm altına indirilmesi ile ve daha sonra boyut etkisini de görmek için 10-18 mm'lik boyut gruplarından oluşmaktadır. Kırılmış -10 mm boyut grubu kurutma deneylerinden elde edilen sonuçlar esas alınarak önerilerde bulunulmuştur. Ancak, boyut etkisinin de görülmesi için 10-18 mm boyut grubunda sınırlı sayıda örnekle kurutma deneyleri yapılmıştır.

Tasarlanan kurutucu için öngörülen maximum sıcaklık değerleri 3 farklı değer için gruplandırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha açık ifade etmek gerekirse, A, B ve C grubu deneyler 250, 200 ve 150 °C maksimum sıcaklık değerlerinde 2, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ve 24 dakikalık zaman aralıklarında yapılmıştır.

A-) Max Sıcaklık 250 °C
B-) Max. Sıcaklık 200 °C
C-) Max. Sıcaklık 150 °C
Her bir maximum sıcaklık değerine karşılık gelen farklı zaman aralıklarında çalıştırılan programlar da gruplandırılarak A_1, … A_n, B_1, … B_n, C_1, … C_n, şeklinde gerçekleştirilmiştir.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Tablo 2.-10 mm boyut grubu tüvenan örneği için yapılan deney sonuçları

-10 mm	Deney Metodu	Maksimum Sıcaklık (°C)	100 °C sıcaklıktan maksimum sıcaklığa erişme süresi (dakika)	Nem Kaybı (gr) (100 gr nemli örnek için)	Nem Kaybı Yüzdesi (%) *	Kurutma Ürününün Beklenen Nem Yüzdesi (%)
A	A_1	250	2	14.4	29.97	39.31
	A_2	250	4	25.8	53.69	29.99
	A_3	250	6	31	64.52	24.71
	A_4	250	9	34.7	72.22	20.44
	A_5	250	12	40.9	85.12	12.10
	A_6	250	15	45.1	93.86	5.37
	A_7	250	18	44.7	93.03	6.06
	A_8	250	21	47.4	98.65	1.24
	A_9	250	24	46.9	97.61	2.17
B	B_1	200	2	14.4	29.97	39.31
	B_2	200	4	18.7	38.92	36.10
	B_3	200	6	26.3	54.73	29.51
	B_4	200	9	28.7	59.73	27.14
	B_5	200	12	37.3	77.63	17.15
	B_6	200	15	38.6	80.33	15.39
	B_7	200	18	41.7	86.78	10.89
	B_8	200	21	43.2	89.91	8.54
	B_9	200	24	44.9	93.44	5.72
C	C_1	150	4	14.5	30.18	39.24
	C_2	150	6	19.5	40.58	35.47
	C_3	150	9	24.1	50.16	31.55
	C_4	150	12	28.3	58.90	27.55
	C_5	150	15	32.1	66.81	23.49
	C_6	150	18	35.2	73.26	19.83
	C_7	150	21	36.5	75.96	18.19
	C_8	150	24	38.4	79.92	15.67

* %48.05 tüvenan baz nemi esas alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. -18+10 mm boyut grubu tüvenan örneği için yapılan deney sonuçları

-18+10 mm	Deney Metodu	Maksimum Sıcaklık (°C)	100 °C sıcaklıktan maksimum sıcaklığa erişme süresi (dakika)	Nem Kaybı (gr) (100 gr nemli örnek için)	Nem Kaybı Yüzdesi (%) (48.05 % nem)	Kurutma Ürününün Beklenen Nem Yüzdesi (%)
	A_1	250	6	31.6	65.76	24.05
A	A_3	250	12	44.1	91.78	7.07
	B_2	200	9	33.9	70.55	21.41
B	B_4	200	15	41.5	86.37	11.20
	C_3	150	12	31.9	66.39	23.72
C	C_6	150	24	41.9	87.20	10.59

*-18+10 mm boyut grubunda da örneğin 48.05 nem içerdiği varsayılmıştır.

- Maksimum 250 °C'de yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar:

Maksimum 250 °C'de yapılan deneylerde nem kaybının özellikle 21 ve 24 dakikalık deneyler ile maksimuma eriştiği görülmüştür. Bu deneylerde örnek sıcaklığının fırın sıcaklığı olan 250 °C üzerinde 270 °C seviyelerine kadar çıktığı da gözlemlenmiştir. Bu durum bize örnekte kızışma başladığını nem yanı sıra kısmen organik uçucuların da çıkmaya başladığını işaret etmektedir. Bu nedenle maksimum nem giderme için %93.86 ile 15 dakikalık deney süresinin kurutma için sınır olarak alınmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Deney süresinin 2 dakika ile elde edilen nem giderme oranı yaklaşık olarak %30 olarak nem giderilmiş buna karşılık olarak ürün beklenen neminin ise %40 civarlarında olmuştur. Artan kurutma deney süresi ile sınır kurutma süresi olarak öngörülen 15 dakikalık kurutma deney süresinde nemin yaklaşık %94'lık kısmı giderilmiş ve kurutma ürünün de beklenen nem değerinin de yaklaşık %5'e karşılık geleceği hesaplanmıştır.

- Maksimum 200 °C'de yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar:

Maksimum 200 °C'de yapılan deneylerde nem kaybının özellikle 21 ve 24 dakikalık deneyler ile maksimuma eriştiği görülmüştür. Bu deneylerde örnek sıcaklığının fırın sıcaklığı olan 200 °C üzerinde 220 °C seviyelerine kadar çıktığı da gözlemlenmiştir. Bu durum örnekte kızışmanın bu sıcaklıklarda başladığına işaret etmektedir. Maksimum 250 °C uygulanan deneylerde nem kaybı %93.86 ile 15 dakikalık deney süresinde elde edilirken maksimum 200 °C ile yapılan deneylerde bu nem kaybı değeri 24 dakika ile yapılan deneyde elde edilmiştir. Maksimum 200 °C ile yapılan deneyde 24 dakika sonrasında nem kaybı %93.44 ve kurutulmuş ürünün beklenen nem miktarının ise %5.72 olarak belirlenmiştir (Bakınız Tablo 1). Deney süresinin 2 dakika ile elde edilen nem giderme oranı yaklaşık olarak %30 olarak nem giderilmiş buna karşılık olarak ürün beklenen neminin ise %40 °Civarlarında olmuştur. Artan kurutma deney süresi ile sınır kurutma süresi olarak öngörülen 24 dakikalık kurutma deney süresinde nemin yaklaşık %94'lık kısmı giderilmiş ve kurutma ürünün de beklenen nem değerinin de yaklaşık %5'e karşılık geleceği hesaplanmıştır.

- Maksimum 150 °C'de yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar:

Maksimum 150 °C'de yapılan deneylerde nem kaybının özellikle 24 dakikalık deneyler ile maksimuma eriştiği görülmüştür. Bu deneylerde örnek sıcaklığının fırın sıcaklığı olan 150 °C üzerinde 160 °C seviyelerine kadar çıktığı da gözlemlenmiştir. Bu durum örnekte uzun süreli periyotlarda düşük sıcaklıklarda bile fırının set sıcaklığının üstünde seyredebileceğini göstermektedir. Maksimum 250 °C uygulanan deneylerde nem kaybı %93.86 ile 15 dakikalık deney süresinde elde edilirken, maksimum150 °C ile yapılan deneylerde maksimum nem kaybı değeri 24 dakika ile yapılan deneyde yaklaşık %80 olarak elde edilmiştir. Maksimum 150 °C ile yapılan deneyde 24 dakika sonrasında nem kaybı %79.92 ve kurutulmuş ürünün beklenen nem miktarının ise %15.67 olarak belirlenmiştir (Bakınız Tablo 1). Deney süresinin 4 dakika ile elde edilen nem giderme oranı yaklaşık olarak %30 olarak nem giderilmiş buna karşılık olarak ürün beklenen neminin ise %40 °Civarlarında olmuştur. Artan kurutma deney süresi ile sınır kurutma süresi olarak öngörülen 24 dakikalık kurutma deney

süresinde nemin yaklaşık %80'lık kısmı giderilmiş ve kurutma ürünün de beklenen nem değerinin de yaklaşık %16'ya karşılık geleceği hesaplanmıştır.

DEĞERLENDİRME

Yalnızca kurutma ile ısıl değer yükseltilmesine yönelik çalışmalarda %20 nem içeren ürün hedefine 250 °C kurutma gazı sıcaklığında yaklaşık 9 dakikada erişilmektedir. Kurutma gazı sıcaklığının 200 °C inmesi durumunda kurutma süresinde 3 dakikalık bir artış dolayısıyla da kurutma fırın kapasitesi %25 düşecektir. Kurutma gazı sıcaklığı 150 °C'a düşürüldüğünde ise kurutma süresi 9 dakikalık bir artış göstermekte, bu da fırın kapasitesinin %50 düşmesi anlamına gelmektedir. Tüvenanın %43.8'ine karşılık gelecek miktarda ;%20 nem içeriğine sahip ve ısıl değeri 2453 kcal/kg olan kömür eldesinin sadece kurutma ile elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Bu seçeneğin kullanılması durumunda leonardit (-10 mm) miktarı tüvenanın %30'una karşılık gelecek olup, nemi %50 ve organik içeriği ise kuru bazda yaklaşık %55 olacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Akkoyunlu M. (2011). Termik santrallerde kullanılan kömürün kurutuması ve santral performansı üzerine etkisinin incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji Programı Yüksek Lisans Tezi.

Akyürek, B., Bilginer, E., Çatal, E., Dağer, Z., Soysal, Y., ve Sunu, O. (1980). Eldivan Şabanözü (Çankırı), Hasayaz-Çandır (Kalecik-Ankara) dolayının jeolojisi: MTA derleme rap. No: 6741.

Ateşok, G. (2009). Kömür hazırlama ve teknolojisi, Beril Yayıncılık Matbaacılık Ltd. Şti. 376 s.

Bongers vd. (2000). Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review. Yüksek basınçlı buhar ile kurutma.

Buzkan, İ. (1987). Kömür petrografisi teknikleri ve endüstriyel uygulama, Madenciik, ss,31-39.

Celen P. (2019). Düşük kaliteli tek kömür tanesinin buhar ve hava ile kurutulmasının deneysel incelenmesi ve modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 119 s.

Chen ve Yang (2003). Development of dry beneficiation of coal in china. Farklı kurutma teknolojileri ve hava yoğun akışkan yataklı kurutma sistemleri için kömür kurutma karakteristikleri.

Ellman. (1966). Titreşimli (darbeli) yanma ile kömürün kurutulması.

Enerji Bakanlığı (2021). Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, Tabi Kaynaklar 2021 yılı kömür rezervleri.Karadenizli, L.,1999, Çankırı-Çorum Havzasındaki Orta Eosen-Erken Miyosen Tortullarının Sedimantolojisi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 51-195, Ankara.

Karadenizli, L., Kazancı, N. (2000). Çankırı-Çorum havzasındaki paleoyükselti ve alt havzalar, Cumhuriyetimizin 75. Yıldönümü ve Madencilik Kongresi MTA, 209-227., Ankara.

Karthikeyan. (1982). Low-rank coal drying technologies—current status and new developments. Düşük derecelerdeki kömürlerin kurutulması işlemleri.

Levy. (1997). Air heater charcoal dryer. Hava ısıtıcılı kömür kurutma sistemleri.

MTA (2004). Kömür arama araştırmaları ve Türkiye' de kömür sahaları ve potansiyel kullanım alanları.

Olivella, M. A., del Rio. J. C. J., Palacios, M. A. and Vairavamurthy, de las Heras. (2002). Characterization of humic acid from leonardite coal: An integrated study of PY – GC – MS – XPS and XANES Techniques. *J. of Analytical and Applied Prolyses*, 63: 59-68.

Pekcan T. (2017). Leonardit kökenli organik materyallerin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi (U. Ü. ZİRAAT FAKÜLTESİ DERGİSİ, 2018, Cilt 32, Sayı 1, 31-41)

Pusat, Ş. (2015). Konya-Ilgın linyitinin kurutma karakteristiğinin belirlenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji Programı Doktora Tezi.TKİ, 2009, Kömür sektör raporu. Sayfa 7-15

Siyako, F. (1987). Şabanözü-Çankırı-Çandır çevresinin jeolojisi ve kömür olanakları: MTA derleme rap. No: 8149.

Turgut, A.T. ve Altınay, A. (1981). Çankırı-Şabanözü ve Orta ilçeleri civarındaki linyitli sahaların jeoloji raporu: MTA derleme rap. No:7017.

TRAKYA BÖLGESİNDE TAM MEKANİZE UZUNAYAKLARIN ÜRETİM HIZININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE PRODUCTION SPEED OF FULLY MECHANIZED LONGWALL SYSTEM IN THE THRACE REGION

O. Yazıcı*, S. Keskin, T. Parlak, G. Karşı

Kiremitçiler Grup-Özşen Maden İşletmeleri
*((*Sorumlu yazar: oktayyazici@ozsenmadencilik.com.tr)*

ÖZ

Uzunayak kömür madenciliği, yeraltı üretim yöntemleri içerisinde yüksek verimliliğe sahip bir yöntem olarak bilinmektedir. Uzunayak madenciliğinde üretimin ve randımanın yüksek olması büyük ölçüde üretim hızı ile bağlantılıdır. Hızlı üretim için ekipman seçimi ve ekipmanların verimli kullanılması önemlidir. Dünya'da yeraltı kömür madenciliğinde hızlı üretimler genellikle mekanize ocaklarda gerçekleşmektedir. Bu çalışmada, Özşen Maden İşletmeleri tarafından işletilen ve işletmesi bitirilen 3 ayrı üretim panosunda tam mekanize üretimde kullanılan ekipmanlar ve üretim hızları incelenmiştir. Aylar ve yıllar arasında ki ilerleme hızlarının değişimlerine bakıldığında ayak boylarında ve ocak derinliğinde ki artışa rağmen ilerleme hızlarında artışlar olmuştur. Ama fay ya da damar ondülasyonunun fazla olduğu bozuk zon olarak tabir edilen yerlere gelindiğinde üretim arınlarının çok hızlı yenildiği görülmüştür. Buda o bölgelerde ilerleme hızlarını negatif yönde etkilemektedir. Trakya da daha önce bu yöntemle üretim yapılmadığı için tecrübe arttıkça üretim hızları ve buna bağlı verimler artacaktır.

Anahtar Sözcükler: Mekanize üretim, kömür, Trakya, uzunayak madencilik

ABSTRACT

Longwall coal mining is known as a method with high efficiency among underground production methods. The high production and efficiency in longwall mining are largely related to the production speed. Equipment selection and efficient use of equipment are important for fast production. Rapid production in underground coal mining in the world is usually carried out in mechanized quarries. In this study, the equipment and production speeds used in fully mechanized production in 3 separate production panels operated and completed by Özşen Maden Enterprises were examined. When we look at the changes in the progress rates between months and years, there has been an increase in the feed rates despite the increase in foot length and quarry depth. However, when it comes to the so-called damaged zones where fault or seam corrugation is high, it has been observed that the production faces are eaten very quickly. This negatively affects the progress rates in those regions. Since production has not been done with this method before in Thrace, production rates and related yields will increase as experience increases.

Keywords: Mechanized production, coal, Thrace, longwall mining

GİRİŞ

Çağa ayak uydurmaya çalışan ülkemiz sanayisinin hammadde ve enerji talebinin hızla artması, özellikle kömür madenciliğindeki üretim miktarlarının artırılmasını gerektirmektedir. Fakat artan maliyetler karşısında madencilik faaliyetinin devam edebilmesi için daha verimli hale getirilmesi şarttır. Genellikle yeraltı kömür işletmelerinde üretim ve randıman artışı büyük ölçüde ayak ilerleme hızlarının artırılması ile mümkün olmaktadır. Hızlı ilerlemenin ve yüksek üretimin yapıldığı ocaklar ise genellikle teknolojik gelişmelere bağlı olarak geliştirilen makine-ekipmanın kullanıldığı tam mekanize işletmelerdir (Hekimoğlu, 1991; aktaran Çavuşoğlu vd., 2009).

Kömür madenciliğinin en yaygın üretim yöntemlerinden birisi uzunayak işletme yöntemidir (Çavuşoğlu vd., 2009). Uzunayak kömür işletme yöntemi, Batı Avrupa orijinli olmasına rağmen, Dünya'daki uygulamaları bu coğrafi sınırların ötesine taşarak, giderek daha yaygın bir üretim sistemi olarak gelişmektedir. Özellikle ABD ve Avustralya'da 1980'li yıllardan sonra önem kazanan bu yöntem kömür madenciliğinde verimliliği önemli ölçüde geliştirmiştir. Yöntemin yaygınlaşmasındaki en önemli sebeplerden bir tanesi de 1980'lerden günümüze kadar teknolojiye de bağlı olarak geliştirilen makine-ekipmanların bu sisteme uyarlanması ile birlikte verimliliği iki kat arttırmasıdır (Ünver, 1996; aktaran Çavuşoğlu vd., 2009). Bu çalışmada Özşen Maden İşletmelerinde Tam mekanize ekipmanlarla yapılan üretimin hızı incelenmiştir.

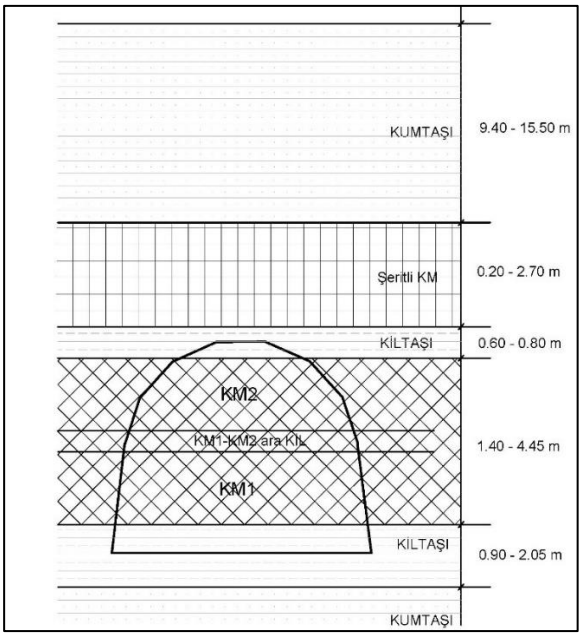
İŞLETME BİLGİLERİ

Havzadaki linyit arama çalışmaları, Malkara-Keşan-Uzunköprü bölgesinde potansiyel kömür damarlarını arayan Dr.R.F.Lebküchner (1962,1973) tarafından yapılmış olup, rapor ve haritalar MTA arşivlerinde yer almaktadır. Bu raporlara göre bölgedeki linyit oluşumları Oligosen yaşlı kumtaşı-kiltaşı-marn-siltaşı-linyit ardalanması ile tanımlanan Danışmen Formasyonu içerisinde yer almaktadır. Bu çalışmalarda 11 ana kömür damarı F.Lebküchner (1973) tarafından adlandırılmıştır.

F.Lebküchner (1973)'in yaptığı araştırmaya göre ruhsat sahasında mevcut açık işletme ve yeraltı işletmesi 4 numaralı linyit damarında çalışmaktadır. Damar eğim yönü genel olarak 5 KD, damar doğrultusu K65B olarak kabul edilebilir. Ruhsat alanımız içerisinde çalışılan 4 numaralı linyit damarı kendi içerisinde; Şeritli KM, tavan kiltaşı, KM2, ara kesme, KM1 ve taban kiltaşı olarak adlandırılmıştır. Ortalama üretim damar stampı 3.30 metredir. Kaynak ve rezerv hesaplamalarında da 4 numaralı linyit damarı KM-1 tabanı ile KM-2 tavanı arasında değerlendirilmiş, toplamda 31.50 milyon ton gösterilmiş ve ölçülmüş jeolojik Linyit Kaynağı hesaplanmıştır. Stratigrafik kesit Şekil 1' de verilmiştir.

Ruhsatlı saha içerisinde kaynak olarak güneyde 3, 2 ve 1 numaralı linyit damarı varlıkları bilinmektedir. Çalışılan linyit damarının altında bulunan 3, 2 ve 1 numaralı damarların da doğrultuları ve eğimleri genellikle birbirine paralel olup farklı kalınlıktadır. Bu damarlarla ilgili kaynak raporu çalışması devam etmektedir.

Yeraltı çalışması yapılan 4 numaralı damar için üretim yöntemi olarak Tam Mekanize Geri Dönümlü Arkadan Göçertmeli Uzun ayak (SPL) madencilik yöntemi seçilmiştir. Tam mekanize olarak üretim yapılan ocaklardaki uzunayak teçhizatları kesici-yükleyici (Şekil 4), yürüyen tahkimat üniteleri (Şekil 2, Şekil 3), ayak zincirli konveyörü, aktarma zincirli konveyörü (Şekil 5), bant konveyör, güç üniteleri, nakliyat üniteleri vb. gibi donanımlardan oluşmaktadır. Kesici yükleyicinin kömürü kazmasıyla başlayan üretim işleminde kömür nakliyatı, ayak içi zincirli konveyör, aktarma konveyörü ve bant nakliyat sistemlerinin de devreye girmesiyle gerçekleşmektedir (Çavuşoğlu vd., 2009).



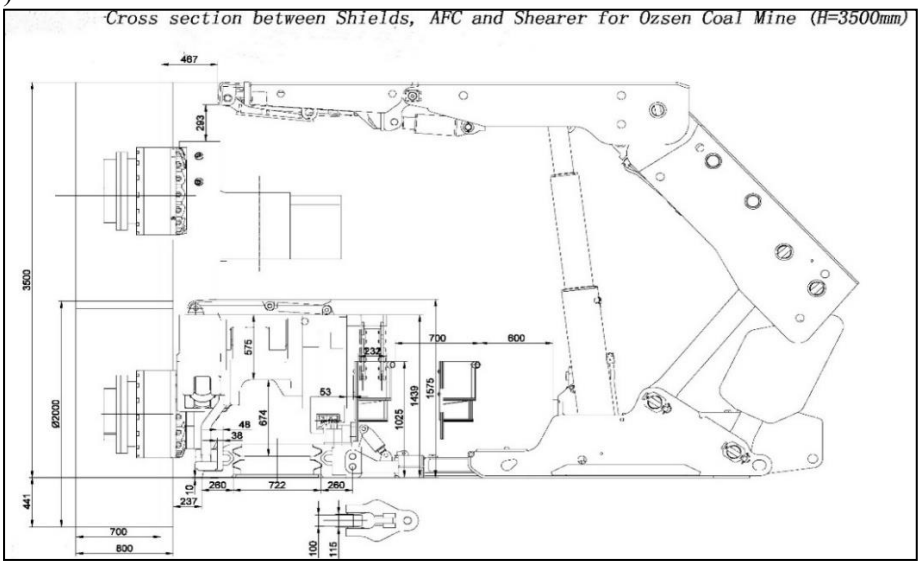
Şekil 1. 4 Numaralı Linyit Yatağının stratigrafik kolonu (Kiremitçiler, 2023)

Üretimde Kullanılan Ekipman Bilgileri

Yapılan jeolojik ve jeoteknik sondajlar verileri, proje çalışmaları ve yıllık üretim planlamasına göre ekipman seçimi yapılmıştır.

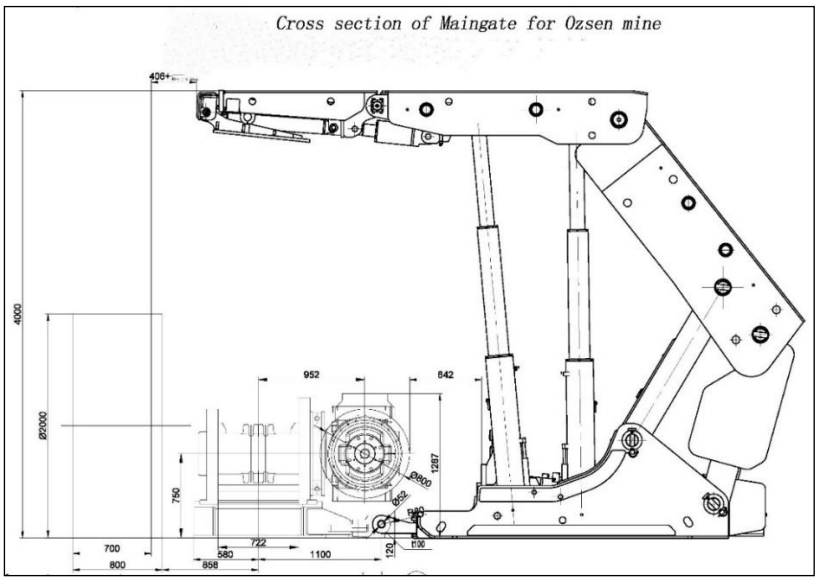
Yürüyen Tahkimat (shield): Hidrolik yürüyen tahkimatlar ±10° meyilde çalışabilmektedir ve 80 MPa yüke dayanacak şekildedir. Yürüyen tahkimatlar ile ayak içi konveyörü ilerleme yönünde 70 cm ilerleyebilmektedir. Normal ve özel olarak iki tipte yürüyen tahkimat kullanılmaktadır;

- Normal yürüyen tahkimatlar 2 pistonlu olup 2.00 – 3.80 m aralığında açılabilmektedir. Genişlikleri 1.43 m olup; çalışma aralığı 2.50 – 3.60 m' dir. Pompa basıncı 32 MPa ve tasarım ağırlığı 15 tondur (Şekil 2).



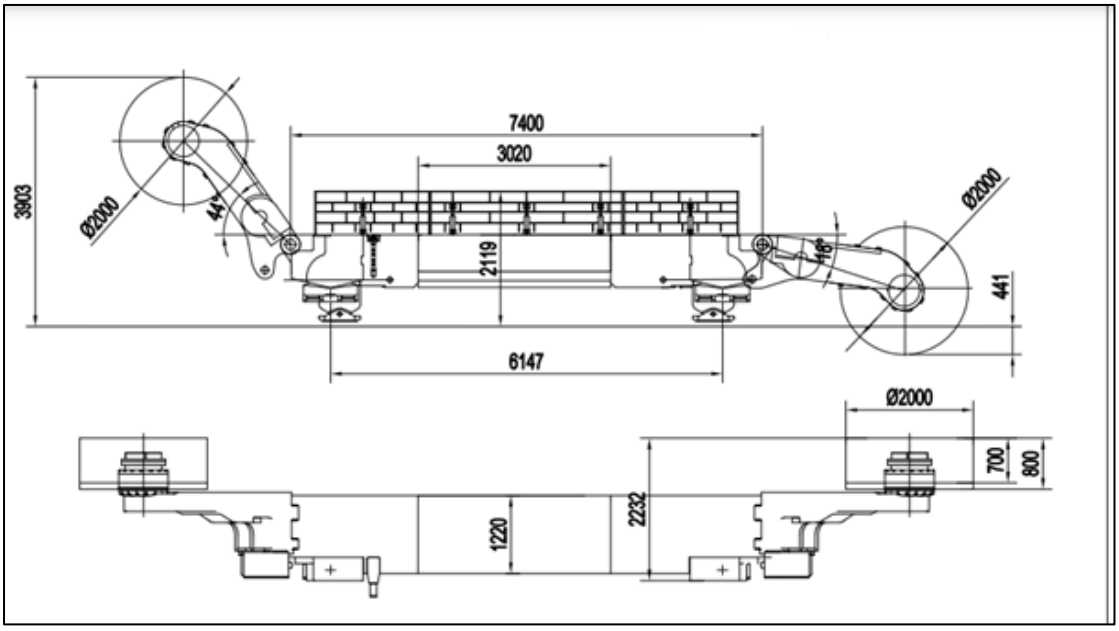
Şekil 2. Normal yürüyen tahkimat ünitesi, ayakiçi konveyörü ve kesici-yükleyici yerleşimi (Kiremitçiler, 2023)

- Özel yürüyen tahkimatlar 4 pistonlu olup 2.00 – 4.20 m aralığında açılabilmektedir. Genişlikleri 1.43 m olup; pompa basıncı 32 MPa'dır. Tasarım ağırlığı 17,8 tondur (Şekil 3).



Şekil 3. Özel Yürüyen tahkimat ve ayakiçi konveyörü yerleşimi (Kiremitçiler, 2023)

Çift Tamburlu Kesici Yükleyici: Üretim yöntemine uygun olarak, ayak içi konveyörü üzerinde hareket eden çift tamburlu kesici-yükleyici makineler kullanılmaktadır (Şekil 4). Kesim aralığı 2.00 – 3.90 m arasındadır. En fazla çalışma eğimi 15° dir. Motor gücü; 300 kW x 2 adet kesici motor gücü, 55 kW x 2 adet yürüyüş motor gücü ve20 kW hidrolik motor gücü olmak üzere toplam 730 kW'dır. Tambur çapı 2.00 m., kesme hızı en fazla yükte 9 m/dk, çekme kuvveti 731 kN'dur. Kablosuz uzaktan kumanda, kesici üzerindeki düğmeler ve acil durum kontrol cihazı ile kontrolü yapılmaktadır. Toplam ağırlığı 46.5 tondur.



Şekil 4. Çift tamburlu kesici yükleyici genel çizimi (Kiremitçiler, 2023)

Nakliyat Sistemleri

Zincirli Konveyörler: Üretim panolarında ayakiçi ve alt taban yollarında kullanılan iki tip zincirli konveyör vardır. Bunlardan birincisi ortadan çift zincirli ayakiçi konveyörü (AFC)'dür. Uzunluğu genelde ~175 m olup; taşıma kapasitesi 900 t/h'dır. 500 kW/1100 V motor gücüne sahiptir. İleri ve geri hareket edebilme özelliğine sahiptir. Konveyör zinciri 30x108 mm'dir. Diğeri ise ortadan çift zincirli aktarma konveyörü (BSL)'dür. Uzunluğu kırıcı dahil 50 m olup; taşıma kapasitesi 1000 t/h'dır. 12° eğimde çalışabilmektedir. 240 kW/1100 V motor gücüne sahiptir. İleri ve geri hareket edebilme özelliği vardır. Konveyör zinciri 30x180 mm'dir.

Bant Konveyörler: İşletme içerisinde, yeraltında üretilen tüvenan kömürün yerüstüne nakli için çeşitli uzunluk ve özellikte bant konveyörlerde kullanılmaktadır. Bunlar;

- Üretim panoları alt taban yollarında kullanılan 1000 mm genişlikte, ilerlemeye bağlı uzunluğu değişen, 60 m teleskop ünitesi olan 2 x 200 kW gücünde üretim bandı,
- Ana nakliye yolunda kullanılan 1000 mm genişlikte, 600 m uzunlukta, 2x 200 kW gücünde 2.band
- Ana Nakliye yolunda kullanılan 1000 mm genişlikte 610 m uzunlukta 3x 200 kW gücünde 1.band
- Karo sahasında kullanılan 1000 mm genişlikte 100 m uzunlukta 110 kW gücünde 0.band

olarak sıralanabilir.

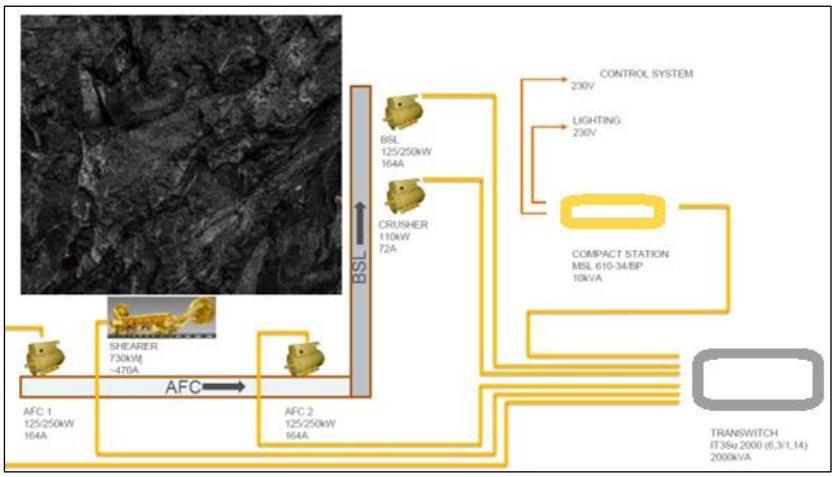
Malzeme ve Personel Nakliyatı: Ocak içerisinde açılan tüm galerilerde malzeme ve personel nakli bağlara asılı olan raylar vasıtası ile kullanılan dizel monoray ile yapılmaktadır. Taşınan malzeme ağırlığına göre gerekirse ağır yük kirişleri kullanılarak taşınan yük ağırlığı daha geniş alana yayılarak birim alanda asılı olan raylara, zincirlere, keplere daha az yük gelmesi sağlanmaktadır. Kullanılan monoraylara ilişkin teknik özellikler Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1. Monoray teknik özellikleri (Kiremitçiler, 2023)

Yakıt tipi	Dizel
Gücü (maks.)	81 kW
Soğutma	Basınçlı su soğutmalı
Egzost gazlarındaki NOx oranı	max. 350 ppm (0.035%)
Hidrolik Devre basıncı (maks.)	32 Mpa
Çalışma Eğimi (maks.)	30°
Uzunluğu	8650 mm
Yüksekliği	1425 mm
Genişliği	850 mm
Ağırlığı	4800 kg
Çekme kuvveti (maks.)	80 kN
Hızı (maks.)	7.2 km/sa

Güç Üniteleri

Üretim panolarında kullanılan enerji yerüstünden hatlar vasıtası ile yeraltı üretim alanına 6300 volt olarak taşınmakta, burada 2000 kVA kapasitesindeki kendiliğinden yol vericili trafo ile 1100 volta çevrilmekte ve ekipmana gerekli güç sağlanmaktadır (Şekil 5).

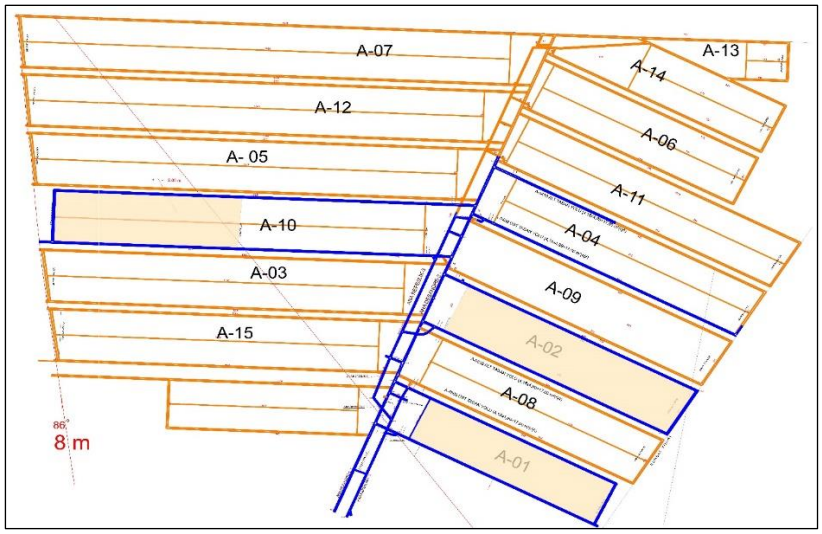


Şekil 5. Üretim ekipmanları enerji dağıtım şeması (Kiremitçiler, 2023)

MEKANİZE ÜRETİM YÖNTEMİ

Üretim yöntemi olarak tam mekanize geri dönümlü arkadan göçertmeli uzun ayak (SPL) madencilik yöntemi seçilmiştir. Üretim yapılacak sahada kömür örtü derinliği 70-200 m arasında değişmektedir. Panolar arası 20 m topuk bırakılarak pano tasarımı yapılmış ve üretimi yapılacak iki pano arasında bir pano bırakılarak tasman etkisinin diğer panoyu etkilememesi sağlanarak (1-2 yıl), üretimin daha emniyetli bir şekilde yapılması hedeflenmiştir.

Saha da ilk üretim A-01 panosunda yapılmış, bunu sırasıyla A-02 ve A-10 panosu takip etmiştir. İlk üretim yapılan A-01 panosunun ayak boyu yatay mesafesi 151 m, A-02 panosunun 171 m ve şu an üretimi devam eden A-10 panosunun 172.80 metredir (Şekil 6). A-01 panosu yüzeye en yakın panodur ve saha tecrübesi edinebilmek için daha kısa ayak boyu ve pano boyunda açılmıştır. Üretim stampı, bu çalışmaya konu olan panolarda ortalama 3.30 m, jeomekanik yönden tavan kiltaşı 4-15 MPa, KM2 6 MPa, ara kesme 4 MPa, KM1 6.5 MPa ve taban kiltaşı 5-13 MPa olarak kabul edilebilir. Tam mekanize ayakta üretim stampının tamamı kesici-yükleyici ile kesilmekte ve ayakiçi konveyör (AFC) yardımıyla aktarma konveyörüne (BSL) taşınmaktadır. Ayak arkasından kömür üretimi yapılmamaktadır.



Şekil 6. Pano tasarım planı (Kiremitçiler, 2023)

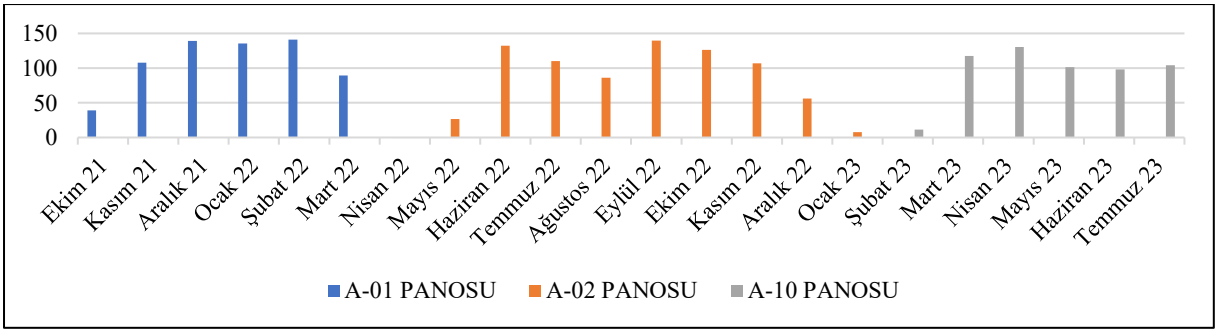
Üretim Hızının Belirlenmesi

Uzun ayak üretim yöntemiyle üretim yapılacak bir panoda üretim hızını belirleyen birçok etken vardır. Planlanan yıllık üretim miktarı, kömürün kendiliğinden yanabilirliği, kömürün gaz içeriği, kullanılan ekipmanların kapasiteleri, ekipman çalışma verimleri, jeolojik yapı, tasman oluşum süresi, personel yetkinliği ve duraklama süreleri bu etkenlerden en önemlileridir. Pano tasarımları üretim ilerleme yönünde ortalama -1° olacak şekilde yapılmıştır. Burada ki amaç zayıf olan yan kayaç ve üretim stampının üretim sırasında kendiliğinden kopmasını ve olası göçükleri engellemektir. Fakat faylı bölge ya da ezik zonların geçildiği zamanlarda üretim aynalarında akmalar olmaktadır.

Şekil 7 detaylı incelendiğinde aylık üretim hızlarının en fazla 140 m/ay olduğu, söküm-montaj dönemini saymazsak ortalama 115 m/ay ilerleme yapıldığı anlaşılmaktadır. A-01 ayak içi uzunluğu 151 m iken A-02 ayak içi uzunluğu 171 m olmasına rağmen ilerleme hızlarında düşüş olmamıştır. İlerleme hızlarının düştüğü aylar genellikle bozuk formasyonların geçildiği dönemlerdir. A-10 panosunda Mart ve Nisan 2023 aylarında artarak giden üretim hızının mayıs ayında düşmesinin sebebi buna en iyi örnektir.

Çizelge 2'de Ekim 2021 tarihinde üretim çalışmalarına başlanan ilk pano olan A-01, daha sonra üretilen A-02 ve şuan üretimine devam edilen A-10 panosunun Temmuz 2023 sonu itibariyle üretim verileri karşılaştırılmıştır. Bu verilere bakıldığında A-01 ve A-02 panosunda günlük ortalama ilerlemenin ~3.60 m, A-10 panosunda ise 2023 Temmuz ayı sonuna kadar günlük ortalama ilerlemenin 3.53 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Burada A-10 panosunun ortalama günlük ilerlemesinin daha düşük olmasında:

- Üretim sırasında ~200 m boyunca aralıklı olarak devam eden 2.50 m ile 0.50 m arasında atımların gözlemlendiği faylı bir bölgenin geçilmesi
- A-01 ve A-02 panosunda ayak eğimleri (ayak başı-kuyruk arası) 3° ile 5° arasında değişiklik gösterirken, A-10 panosunda ise üretim yapılan alanda 7° ile 8° arasında değişmesi
- A-01 panosunda üst örtü kalınlığının 70-100 m, A-02 panosunda 100-130 m iken, A-10 panosunda ise 130-145 m arasında olması etkili olmuştur.



Şekil 7. Üretim panolarının aylara göre üretim hızları (Kiremitçiler, 2023)

Çizelge 2. Yeraltı Üretim Verileri (Kiremitçiler, 2023)

Pano adı	Yıl	Pano üretim zamanı,ay	Toplam zaman dak.	Üretim zamanı dak.	Günlük çalışma dak/gün	Fiili kesim periyodu%	Üretilen pano boyu, m	Ortalama kesme derinliği m	Ortalama ilerleme m/gün
A-01	2021-22	5	259,200	116,640	648	45%	652	0.66	3.62
A-02	2022-23	8	338,400	169,200	769	50%	791	0.68	3.60
A-10*	2023-	7	230,400	122,531	681	47%	540	0.68	3.53

** A-10 bilgileri 2023 Temmuz ayı sonu verileridir. Panoda üretim devam etmektedir.*

Yukarıdaki verilere bakıldığında genel olarak çalışma süresinin ortalama %50 si üretim yapma işiyle, geri kalan %50 ise diğer işlerde geçmektedir. Bu diğer işler; işin gereği yapılması gerekli yan işler, maden, mekanik, elektrik arızalarına bağlı duraklamalar ve vardiya değişimleri gibi işleri kapsamaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİ

Enerji üretiminin çok önemli olduğu günümüzde, bu enerjiyi yerli kaynaklarla elde etmek kritik öneme sahiptir. Trakya bölgesinde bulunan düşük kalorili (1800-2000 kcal/kg) linyit kaynaklarımızdan, daha çevreci teknolojilerin kullanıldığı termik santraller kurularak enerji ihtiyacı büyük ölçüde karşılanabilir. Fakat artan maliyetler madencilik yapmayı çok zorlaştırmaktadır. Burada en önemli konu yapılan madencilik faaliyetinin en verimli şekilde yapılabiliyor olmasıdır. Teknolojik gelişmelerden faydalanılan işletmelerde üretim randımanlarında pozitif değişimler olmuş ve madencilik faaliyetinin sürdürebilirliği artmıştır.

Trakya havzasındaki kömür oluşumları ülkedeki diğer kömür oluşumları ile kıyaslandığında tektonik hareketlerden daha az etkilenmiştir. Tüvenan kömür kalitesine bakıldığında Türkiye ortalamasında, ortalama damar eğimleri düşük, kükürt oranları çalıştığımız bölgede çok düşük (0.1-0.3), gaz ve su gelirleri de diğer bölgelere göre daha azdır. Bölgede günümüze kadar çoğunlukla açık işletme yöntemi ile belirli derinliğe kadar üretim, daha derin kısımlarda ise klasik yöntemle yeraltı madenciliği yapılmıştır. Fakat bu yöntemle üretim derinliği az, üretim randımanları düşük kalmıştır. Bölgede daha önce tam mekanize uzun ayak madenciliği denenmediği için A-01 panoda yapılan çalışma tecrübe edinilmesi açısından çok önemlidir. Çünkü bölgede bu üretim yöntemini bilen personel yok denilecek kadar azdır ve bu hızlarda üretim yapıldığında formasyonda neler olacağıyla ilgili bir çalışma yoktur.

Çalışma alanında yapılan üretim faaliyetleri incelendiğinde 151 m ayak uzunluğu olan A-01 panosunda ortalama hız 3,62 m/gün iken 171 m ayak uzunluğu olan A-02 panoda ortalama hız 3,60 m/gün olduğu görülmektedir. Ayrıca ayak boyu 172,80 m olan A-10 panosunda şuana kadar yapılan çalışmada alt taban yolundan girip ayak içerisinde sonlanan, 2.50 m atım miktarlarını bulan ve ~200 m ayak ilerlemesi boyunca etkisi görülen bir fayı geçmesine rağmen 3.53 m/gün ortalama hızla üretim yapıldığı görülmektedir. Ayak boyları ilk panoya göre uzun olmasına rağmen ortalama ilerleme hızlarında değişiklik olmamıştır. Personel yetiştirildikçe ve çalışılan bölgede jeolojik formasyon daha iyi tanındıkça üretim hızları ve buna bağlı üretim randımanları artacaktır.

KAYNAKLAR

Çavuşoğlu İ., Şenfilo L., Tarhan Ş., ve Turan H., 2009, Çayırhan yeraltı işletmelerinde yüksek arınlı mekanize uzun ayakların üretim hızlarının incelenmesi, Türkiye 2. Maden Makinaları Sempozyumu, Zonguldak.

Lebküchner R.F., 1962, Tekirdağ-Malkara ve Edirne-Keşan linyit Ümitli sahalarında yapılan detay jeolojik ve cevher yatakları etütlerinin neticeleri hakkında rapor, MTA.

Lebküchner R.F., 1973, Orta Trakya oligoseninin jeolojisi hakkında (Çev. Zerrin BENGİ).

Kiremitçiler, 2023, İşletme Projesi Tanıtım Raporu, (yayınlanmamış).

AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU TEKNOLOJİSİ
FLUIDIZED BED DRYER TECHNOLOGY

A.S. Satılmış [1, *], Z.E. Savcı[2]

[1] Asos Proses Makina San ve Tic A.Ş.
*(*Sorumlu yazar: arzu@asos.com.tr)*

ÖZ

Akışkan yataklı kurutucu teknolojisi, uzunca yıllardır cevher hazırlama ve zenginleştirme, maden, kimya, atık, gıda, tarım ürünleri ve daha birçok alanda kullanılan köklü bir teknolojidir. %100 Türk sermayesi ile kurulmuş olan firmamızda temel ve detay mühendislik, projelendirme, imalat, montaj ve devreye alım aşamaları dahil olmak üzere anahtar teslim olarak akışkan yataklı kurutucu tesisleri kurmaktayız. Anahtar teslim olarak kurulan akışkan yataklı kurutucu tesisleri; silis kumu, feldspat, kromit, borik asit ve daha birçok tüvenan cevher ve ürünün kurutulması ve zenginleştirilmesi amacıyla sektöre hizmet etmektedir. Firmamız referans sayısının artması ile öncelikli olarak kullandığı vibrasyonlu tipte olan akışkan yataklı kurutucu teknolojisini; statik tip ve sallamalı (shaking) tip olarak 2 yeni farklı teknoloji ile çeşitlendirmiş, tane boyutu, nem değeri, kapasitesi değişken olan birçok ürün grubu için de akışkan yataklı kurutucu teknolojisinin uygulanabilirlik alanlarını genişletme yoluna gitmiştir. Ürün çeşidi ve özelliklerine göre akışkan yataklı kurutucu tipleri değiştirildiğinde; kurutma verimi artırılabilmekte, kurutma için gerekli enerji tüketimi düşürülebilmekte ve ürün tanelerinin kırılarak tane boyutunun değişmesinin önüne geçilebilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Akışkan yataklı kurutucu, kum, maden, akışkanlaştırma

ABSTRACT

Fluid bed dryer technology is a well-established technology that has been used for many years in ore preparation and enrichment, mining, chemistry, waste, food, agricultural products and many more. In our company, which was established with 100% Turkish capital, we establish turnkey fluidized bed dryer facilities, including basic and detailed engineering, project design, manufacturing, assembly and commissioning stages. Fluid bed dryer plants installed on a turnkey basis; serves the industry for the purpose of drying and enriching silica sand, feldspar, chromite, boric acid and many other run-of-the-mill ores and products. With the increase in the number of references, our company primarily uses the vibratory type fluid bed dryer technology; It diversified with 2 new different technologies as static type and shaking type, and expanded the applicability areas of fluid bed dryer technology for many product groups with variable grain size, moisture value and capacity. When fluid bed dryer types are changed according to product type and features; drying efficiency can be increased, the energy consumption required for drying can be reduced, and the grain size of the product can be prevented from breaking by breaking.

Keywords: Fluid bed dryer, sand, mine, fluidizing

GİRİŞ

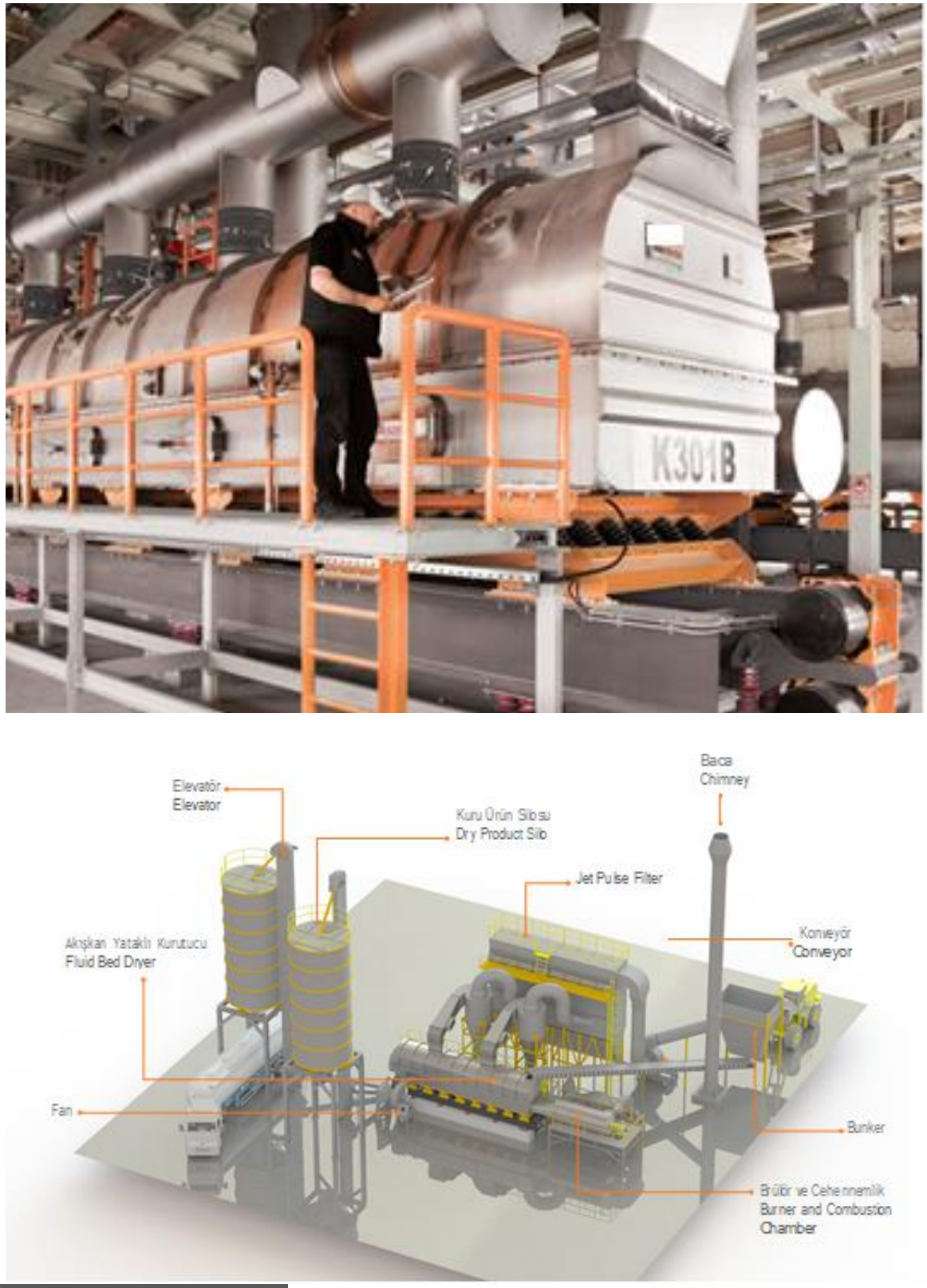
Endüstriyel ve tarım ürünleri şeklinde farklı nem oranları yer alan ürünlerin korunmasında kullanılan metotlar içerisinde kurutma yer almaktadır. Bu kurutma aşamasında, endüstriyel uygulamalarda ürünün içerisindeki sıvının alınarak istenen nem seviyesine ulaşması için en az bir kurutma basamağı gerçekleşir. Kurutma işlemi genel anlamda ürünün sahip olduğu nemin katıdan gaz fazına taşınarak alınması şeklinde ifade edilir. Katılar için her biri kendi özelliklerine özgü kurutma çeşidi metotları geliştirilmiştir. Tanecikli yapıya sahip malzemelerin kurutulması için akışkan ve sabit yatak kurutması gibi birçok kurutma teknikleri geliştirilmiştir. Kurutma işleminin termal etkinliği düşünüldüğünde akışkan yatak tekniği katı tanecikli maddeler için daha yaygın tercih edilirken ısıl etkenlik göz önünde bulundurulduğunda ise kurutucu akışkan yatak uygulamaları en etkili yöntemlerden biridir ve çeşitli kurutma uygulamalarına da uygundur. Bunun sebebi olarak akışkan yataklarda katı tane ile gaz fazının temas alanının çok fazla olması, yoğun ısı ve kütle geçişiyle tanenin tüm yüzeyinden kısa sürede nemin çekilmesine olanak vermektedir. Çoğunlukla gıda sektörünün yanı sıra, kimya, metalürji, maden ve ilaç endüstrisinde de akışkan yataklar yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kurutma işlemini karakterize eden herhangi bir işlem kaçınılmaz şekilde malzemenin fiziksel yapısına yani şekil değişimine ve öz kütlesine bağlıdır. Kurutulan maddeler su kaybından kaynaklı olarak hacimsel değişime maruz kalırlar. Bu değişim kurutma işlemi boyunca sürer ve katının fiziksel özelliklerini ve iletim özelliklerini de etkiler (Deniz, 2010).

J.F Davidson 1950 yılının sonunda temel mühendislik prensiplerini akışkan yatak profiline uygulayarak önceki çalışmalara teorik bir açıklama getirmiştir (Deniz, 2010). Kömür tozunda metan elde etmek için gaz akışkanlaştırılması ticari olarak ilk Fritz Winkler tarafından kullanılmıştır. Kömür gazlaştırılması 1922 yılında patentleşmesi ile birlikte 1926 yılında ilk ticari amaçlı üretimine başlanmıştır (Kuni ve Levenspiel, 1969). Akışkan yataklı kurutucular için günümüze kadar çeşitli deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Genel olarak teorik çalışmalarda homojen model baz alınarak gaz ve katı ortalama değerleri üzerinden modellemeler yapılmıştır. Bazı modellerin hidrodinamik ve termodinamik koşulları enerji etkinliği ve ekserji etkinliği üzerindeki etkisi analiz edilmiştir (Dinçer ve Sahin, 2004). Akışkan yatak süreçlerini örneklemek için; kütle, momentum ve ısı geçişi için taşınma olayları prensipleri Mikami ve ark. (1998) Hjertager (1999), Wang ve Chen'in modelleri (1999) ile Seibert ve Burn'ün (1996) daha gelişmiş modelinde olduğu gibi pek çok çalışmada kullanılmıştır.

ENDÜSTRİDE AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCULAR

Üretimini yapmış olduğumuz Akışkan yataklı kurutuculardа akışkanlaştırma işlemi; fan aracılığıyla basınçlandırılan havanın akışkanlaştırılarak katı parçacıklar arasından ürüne etki eden yerçekimi kuvvetine karşı yüksek hızla geçirilerek parçacıkların askıda tutulmasıdır. Askıda kalan üründe homojen bir yapı meydana gelir. Bu da kurutulmak istenen üründe maksimum verim sağlar. Akışkan yataklı kurutucular ve soğutucular, agrega ve mineral endüstrisi için ideal bir çözümdür. Mineraller ve agrega için kurutma sistemleri, yüksek işletme maliyetleri ve düşük marjlara yol açan çok miktarda enerji tüketir. İşlenen malzemelerin aşındırıcı özelliklerinden ötürü aşınma ve yıpranma aynı zamanda sık bakım ve onarım veya değiştirme masrafları anlamına gelir. Bu giderler Akışkan Yataklı Kurutucular sayesinde minimum seviyelere inmiştir. Akışkan yataklı kurutucular çalışma prensipleri gereği diğer kurutuculara oranla % 25-30 enerji maliyeti azaltma imkanı sunar. Isı geri kazanım sistemi ile birlikte akışkan yataklı kurutucular bacadan attıkları sıcak havayı geri kazanarak enerji verimliliğinde önemli rol oynarlar (Anonim, 2023).

Akışkan yataklı kurutucu ve ek ekipmanlarını içeren örnek bir tesis yerleşimine aşağıdaki Şekil 1'de yer verilmiştir.



Şekil 1. Örnek akışkan yataklı kurutma sistemi ve ekipmanları

Makinenin Fonksiyonu

Kurutulacak olan ürün kurutucu içerisinde bir giriş akım tabanı (delikli plaka, kavisli elek, özel altlık) üzerine yerleştirilir ve orada sıcak veya soğuk hava veya gaz şeklindeki başka bir kurutma aracı ile aşağıdan yukarıya doğru akış sağlanır. Bu arada ürün sürekli titreşimlerle ısıtılır ve ürünün nemi giderilir. Sürekli titreşimler her ferdi ürün için isteğe göre çözümleri mümkün kılmaktadır.

Titreşim vasıtasıyla şu özellikler elde edilmektedir; İnce taneli ürünlerde akışkan yatakta kabarcık oluşumları önlenmekte ve böylece de daha iyi enerji kullanımı ortaya çıkmaktadır. Geniş tane spektrumu olan ürünlerde ayrışma önlenmektedir. Titreşim, iri taneler için de çözülmeyi sağlamaktadır. Parçacıkların titreşim yoluyla kurutucu içinde sevk edilebilmesinden dolayı kurutucu sorunsuzca boşaltılabilmektedir. Böylece kolay ürün değişimi mümkün kılınmaktadır. Kalış süresine ve titreşime uyarlanması yoluyla kurutulacak ürünün kalitesine etki edilebilmektedir.

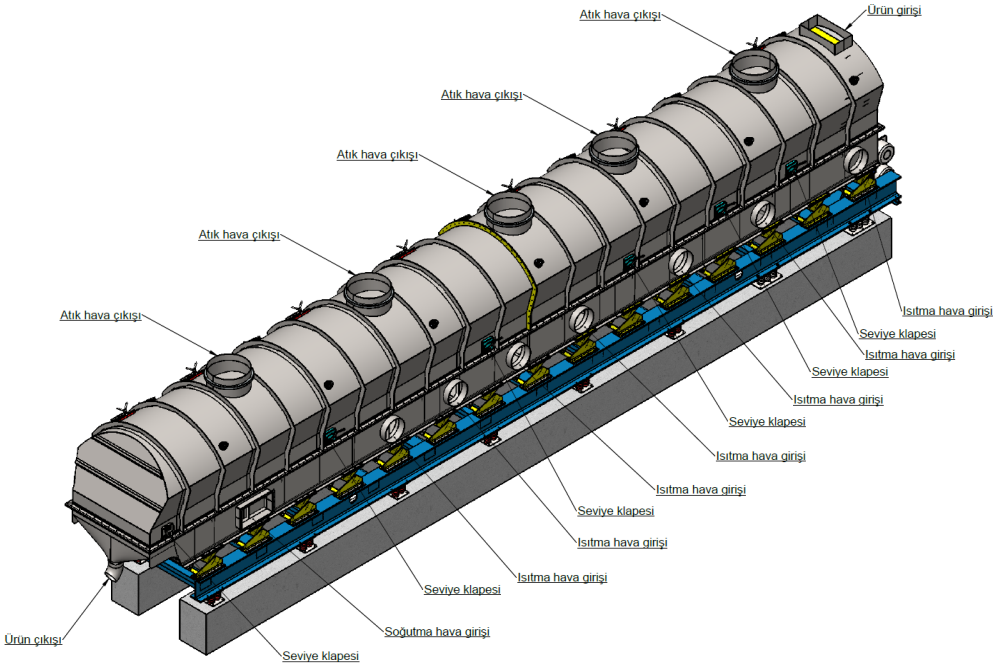
Akışkan yataklı kurutucuların avantajları;

1. Diğer kurutmalara göre daha tasarruflu enerji tüketimi
2. Farklı yakıt tiplerine göre enerji kaynağı kullanılabilmesi
3. Aynı kurutma gövdesinde farklı ürünlerin kurutulması
4. Aynı gövde üzerinde kurutma ile birlikte soğutma işlemi yapılabilme imkanı
5. Hızlı ve eşboyutlu ısı transferi
6. Kısa kurutma süresi
7. 100 mikron-5 mm arası boyutlarda ürün kurutma
8. Düşük sıcaklıkta kurutma yapılabilmesi
9. Akışkan yataklı kurutucular granül ve kristal maddeler için en uygun çözümdür. (Anonim, 2023)

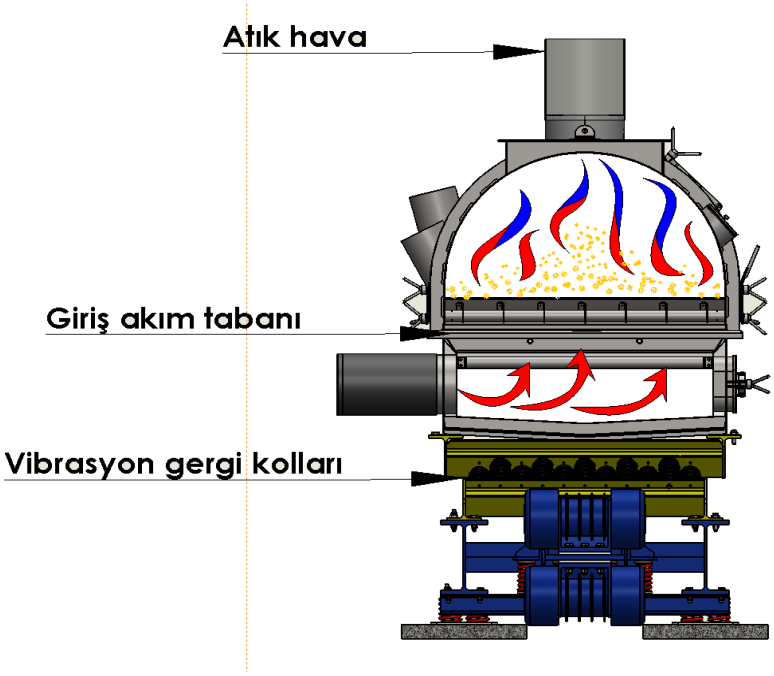
Vibrasyonlu Tip (VFD) Akışkan Yataklı Kurutucu

Şekil 2 ve 3'ten incelenebileceği üzere akışkan yataklı kurutucular ana olarak; Taşıyıcı ve hareketlendirici alt taban, alt hava kanalı ve ürün kanalı olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Vibrasyonlu tip için taşıyıcı ve hareketlendirici alt taban; vibro motorlar, gergi kolları, yaylar ve şase bölümlerini içermektedir. Belirli bir açı ve ağırlık %'si ile ayarlanan vibromotorlar, makinenin üst gövdesinin titreşim ile hareket etmesini sağlamaktadır. Bu hareket ürünün akışkanlaşmasına yardım ederken aynı zamanda ürünün ileri doğru taşınmasını da sağlamaktadır. Alt hava kanalı; kurutma işlemini gerçekleştirmek için elde edilen sıcak hava akımının makine gövdesine giriş yaptığı noktadır. Hava kanalı boyunca uygulanan geometri ve yönlendiricilerle taban boyunca eşit hızda hava akışı sağlanır. Ürün kanalı; bir elek üzerinde kurutulmak istenen ürünün akışkanlaştırıldığı, ısıtıldığı ve sürekli hareket halinde sistemde ilerlediği bölümdür.

Vibrasyonlu tip akışkan yataklı kurutucular, ürünün minimum akışkanlaşma yüksekliğinde, 45˚bir açı ile akışkanlaşıp ilerlemesini sağlar. Alt hava kanalı ve üst gövde vibrasyon etkisi ile sürekli hareket halinde olur. Ürünü kurutmak için kullanılan sıcak hava akımı ile de sürekli bir ısıya maruz kalır. Vibrasyonlu tip akışkan yataklı kurutucular, 60-70 ton/h ürün besleme miktarı kadar yüksek kapasitelerde kullanılabilirler. Ancak özellikle yüksek kapasitelerde sürekli titreşim ve ısıyla çalışan makine gövdesinde, zaman içerisinde yıpranma, aşınma, yorulma meydana gelebilir. Bu nedenlerle uzun kalış süresinde kurutma sağlanan, ürün kapasitesi yüksek olan makineler için tarafımızdan yeni bir makine tasarımı olan statik tip akışkan yataklı kurutucu kullanılmaya başlanmıştır.



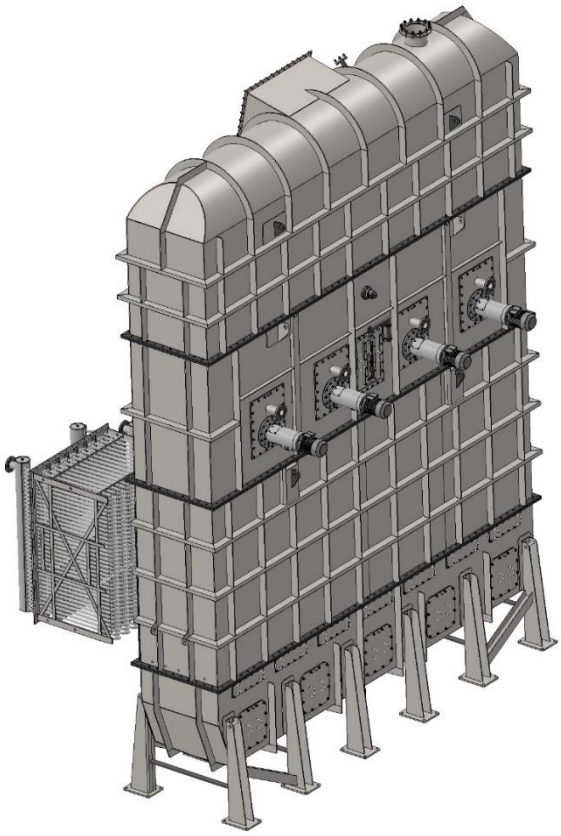
Şekil 2. Vibrasyonlu tip akışkan yataklı kurutucu gövde elemanları



Şekil 3. Vibrasyonlu tip akışkan yataklı kurutucu gövdesi yan görünüş

Statik Tip Akışkan Yataklı Kurutucu

Statik (durgun) tip akışkan yataklı kurutucular, ürün besleme kapasitesi olarak 100 ton/h değerlere kadar çıkabilen ekipmanlardır. Ana olarak 3 bölümden oluşurlar; taşıyıcı alt gövde, hava kanalı ve ürün kanalı. Taşıyıcı alt gövde üzerinde vibromotor, yay gibi hareket sağlayan ekipmanlar bulunmaz. Ürün ilerlemesi ve akışkanlaşması ürün kanalı altında bulunan delikli elek vasıtası ile sisteme giren sıcak hava akımı ile sağlanır. Aynı zamanda şaseye verilen eğim ile makine kalış süresi ayarlaması yapılabilir. Gövdenin titreşim ve sallanma gibi bir harekete maruz kalmaması, vibrasyonlu tipe göre malzemede daha az yorulma, yıpranma görülmesini sağlar. Statik akışkan yataklı kurutucu Şekil 4 ile verilmiştir.



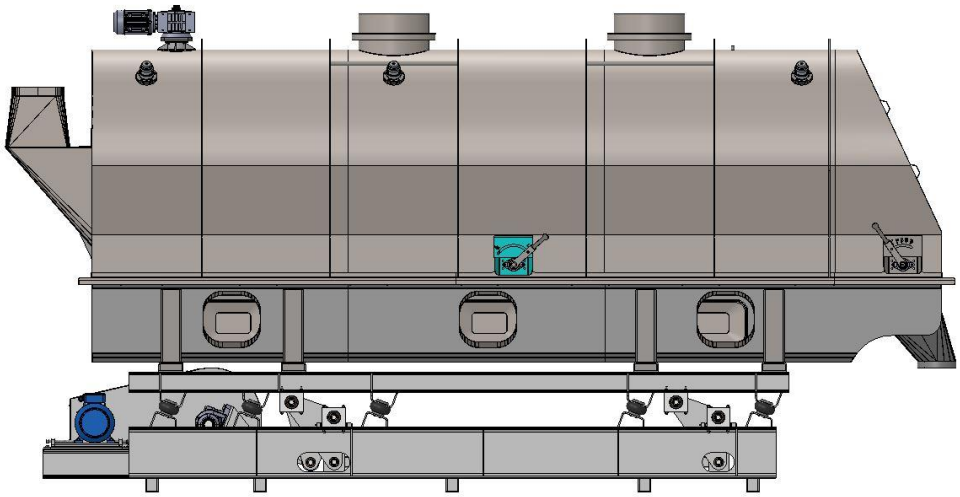
Şekil 4. Statik tip akışkan yataklı kurutucu

Statik tipte diğer akışkan yataklı kurutucuların aksine çok daha yüksek kapasitelere çıkılması sağlanabilmektedir. Delikli elek üzerinde bulunan ürün yatağı yüksekliği 2 m yüksekliğe kadar çıkarılabilmektedir. Ürünün yatak boyunca aynı sıcaklığa sahip olabilmesi için ise, yatak içerisinde serpantin grubu kullanılmaktadır. Boru tipi serpantin içerisinden geçirilen buhar ya da kızgın yağ sıcaklığını serpantinler aracılığıyla ürüne aktarmaktadır.

Sallamalı (Shaking Tip) Akışkan Yataklı Kurutucu

Şekil 5'te sallamalı (shaking) tip akışkan yataklı kurutucu gövdesi verilmiştir. Sallamalı (shaking) tip akışkan yataklı kurutucularda alt şase üzerinde bir tahrik motoru ile üst gövdeye sürekli bir salınım hareketi yaptırılır. Vibrasyonlu tipte görülen hafif titreşim hareketinin aksine bu makinede dikey eksende daha fazla ilerleme ve hız vardır. Sallamalı tip akışkan yataklı kurutucu, büyük tane boyutuna sahip ve yüzeyi yapışkan özellik gösteren ürünlerin kurutulması için özel olarak kullanılmaktadır. Bu tip ürünlerin akışkanlaştırılması

için hava akış hızı(m/s) yanı sıra, dikey eksendeki hareket ürünün taneleri rasındaki boşlukları daha fazla açarak kurutma havasının geçtiği alanı büyütmektedir. Ürün akışkanlaşma yüksekliği orta seviyededir. Delikli elek üzerinde bulunan ürün yatağı yüksekliği 300 mm'ye kadar çıkarılabilmektedir. Özellikle dış yüzeyi nemli ve yapışkan özellik gösteren ürünler için, dikey eksendeki hareket dış yüzeyin öncelikli olarak kurumasını sağlayabilmekte, ve makine boyunca ürünün homojen akışkanlaşmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 5. Sallamalı (shaking) tip akışkan yataklı kurutucu

Aşağıdaki Çizelge 1'de farklı ürün özelliklerine göre kurutma tipinin seçilmesi için yol gösterici nitelikte değerler yer almaktadır.

Çizelge 1. Ürün tiplerine göre akışkan yataklı kurutucu tiplerinin karşılaştırılması (Anonim,2023)

Teknik parametreler	Vibrasyonlu Tip (VFD) Akışkan Yataklı Kurutucu	Statik Tip Akışkan Yataklı Kurutucu	Sallamalı (Shaking tip) akışkan yataklı kurutucu
Ürün tane boyutu	100 mikron- 2mm	300 mikron- 3 mm	500 mikron- 5 mm
Kapasite (maksimum)	70 ton/h	100 ton/h	60 ton/h
Nem	% 0,5-20	% 0,5-40	% 0,5-40
Dış yüzey yapışkanlık	Yok/az miktarda	Yok/az miktarda	Orta miktarda

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Akışkan yataklı kurutucular; silis kumu, feldspat, kuvars, bentonit gibi maden cevherleri, borik asit, potasyum nitrat gibi kimyasal maddeler, katkı maddeleri, tarım ürünleri gibi gıda maddeleri, atık çamur, odun talaşı gibi atık maddelerin kurutulması için kullanılabilmektedir. Genel olarak 3 farklı tipte sınıflandırılan akışkan yataklı kurutuculardа, kurutulmak istenen malzemenin tane boyutu, kapasitesi, aşındırıcılık özelliği, dış yüzey yapışkanlığı gibi özelliklerine göre uygun olan tipte seçilebilmektedir. Bir tesis kurulumunda işletmelerin her zaman kurulum maliyetinin yanında işletme maliyetini de göz önünde bulundurması gerekir. Enerji verimliliği değerlendirildiğinde, akışkan yataklı kurutucular diğer kurutucu tiplerine göre işletme maliyeti daha düşük olan kurutuculardır. Akışkan yataklı kurutucuların diğer kurutma tiplerine göre bir diğer avantajı tek bir gövde üzerinde kurutma işleminin yanı sıra soğutma işleminin yapılmasına da imkan sağlamalarıdır. Akışkan yataklı kurutucu tipinin öncelikli olarak kurutulacak ürüne en uygun olacak şekilde seçilmesi gerekir.

KAYNAKLAR

Anonim (2023). Asos Proses Makine San ve Tic A.Ş. Firma kataloğu http://www.asos.com.tr/tr/icerik/akiskan-yatakli-kurutucu

Deniz, Z. (2010). Akışkan Yataklı Kurutucu Modellemesi ve Analizi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Hjertager, B.H., V. Mathiesen, ve T. Solberg. 1(999). Computational analysis of some fluidized systems. AIChE Symposium Series, 321 (95), pp. 1- 6.

I. Dinçer , A. Z. Sahin. (2004). Thermodynamic anaysis of a drying process, *International Journal Of Thermal Scieces,* 47, 645-652.

Kuni, D ve O. Levenspiel. (1969). Latereal dispersion of solid in fluidized bed. *J.Chem. Eng. Japan*. 2 (1): 122-125.

Mikami, T., H. Kamiya, and M. Horio. (1998). Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed. *Chem. Eng. Sc.*, 10 (53), 1927-1940.

Seibert K.D., ve M.A. Burns. (1996). Simulation of fluidized beds and other fluid-particle systems using statistical mechanic. *AIChE Journal*, 3 (42), 660-670.

Wang, Z. H., ve G. Chen. (1999). Heat and mass transfer during low intensity convection drying. *Chem. Eng. Sc.,* 54, 3899-3908.

TÜRKİYE STRATEJİK HAMMADDELERİNİN FİZİKSEL ZENGİNLEŞTİRME OLANAKLARI

POSSIBILITIES OF PHYSICAL BENEFICIATION OF STRATEGIC RAW MATERIALS OF TÜRKİYE

G. Ersever Angur [1*], T. Uysal[2], C. Erust Ünal[3]

[1]*Munzur University, Rare Earth Elements Application and Research Center*
*(*Sorumlu yazar: gerseverangur@munzur.edu.tr)*

ÖZ

Son on yılda, ileri teknoloji uygulamalarında, hammadde arzı ve aksaklıkların potansiyel olumsuz etkileri konusundaki artan endişelerle birlikte stratejik ve/veya kritik hammaddelere olan talep hızla artmıştır. Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke bu hammadde talebini karşılayamamakta ve bu metallerin ithalatına bağımlılıkları nedeni ile kritik hammadde listelerini oluşturmaktadırlar. İleri teknoloji uygulamalarında kullanılan ve stratejik hammaddeler olarak tanımlanan (örn. NTE, V, Nb, Li, Mg, Co vb.) hammaddeler için uluslararası pazarda ciddi seviyede tedarik riski bulunmaktadır. Bu hammaddelerin uluslararası pazardaki tedariklerinin başta Çin olmak üzere sınırlı sayıda ülke tarafından sağlanması yüksek teknoloji üreten ülkeler için ciddi bir risk olarak ortaya çıkmaktadır. Yükseköğretim Kurulu ve Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından desteklenen Bölgesel Kalkınma Odaklı Misyon Farklılaşması ve İhtisaslaşması Projesi kapsamında "Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları" alanında Munzur Üniversitesinin ihtisaslaşma projesi uygun görülmüştür. Bu projenin alt projesi kapsamında stratejik öneme sahip hammaddelerin, birincil jeolojik kaynaklardan fiziksel/fizikokimyasal yöntemlerle konsantre üretimini kapsamaktadır. Bu çalışmada Eskişehir-Kızılcaören NTE cevherinin zenginleştirilmesi için literatürdeki çalışmalara bağlı olarak bir akım şeması önerilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Stratejik hammadde, nadir toprak elementleri, cevher hazırlama

ABSTRACT

In the last decade, the demand for strategic and/or critical raw materials has increased rapidly with increasing concerns about the raw material supply and the potential adverse effects of disruptions in advanced technology applications. Many developed and developing countries create critical raw material lists due to the inability to meet this raw material demand and their dependence on imports of these metals. There is a serious supply risk in the international market for raw materials defined as Strategic Raw Materials (eg REE, V, Nb, Li, Mg, Co etc.). The fact that these raw material supplies are provided by a limited number of countries, especially China, emerges as a serious risk for high technology producing countries. The specialization project of Munzur University in the field of "Strategic Raw Materials and Advanced Technology Applications" was approved within the scope of the Regional Development-Oriented Mission Differentiation and Specialization Project supported by the Higher Education Council and the Presidency of Strategy and Budget. The sub-project of this project covers the production of strategically important raw materials from primary geological sources by physical/physicochemical methods. In this study, a flow chart has been proposed for the beneficiation of Eskişehir-Kızılcaören REE ore based on the studies in the literature.

Keywords: Strategic raw material, rare earth elements, mineral processing

GİRİŞ

Hammadde üreten ülkelerin siyasi ve ekonomik durumları, arz yoğunluğu, tedarik daralmaları, ikame potansiyeli, geri dönüşüm oranı ve bunların ekonomi üzerindeki etkileri dikkatle değerlendirildikten sonra "kritik" olarak isimlendirilmektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke bu hammadde talebini karşılayamadığından, metal ve metal konsantrelerin ithalatına bağımlılıkları nedeni ile her üç yılda bir bölgesel kritik hammadde listelerini oluştururlar. 2023 yılında Avrupa Komisyonu, bölgesel endüstrilerin ortaya çıkan birçok önemli teknolojisi için kritik olan ve olası siyasi gerginlikler nedeniyle önemini vurgulayan 34 hammadde listesini yayınlamıştır (Avrupa Komisyonu, 2023). 2020'de kritik hammadde olmayıp 2023 listesine eklenenler Helyum, Feldispat, Manganez, Nikel*, Bakır* hammaddeleridir. Bakır ve nikel, kritik hammadde eşiklerini karşılamaz, ancak stratejik hammaddeler olarak dahil edilir.

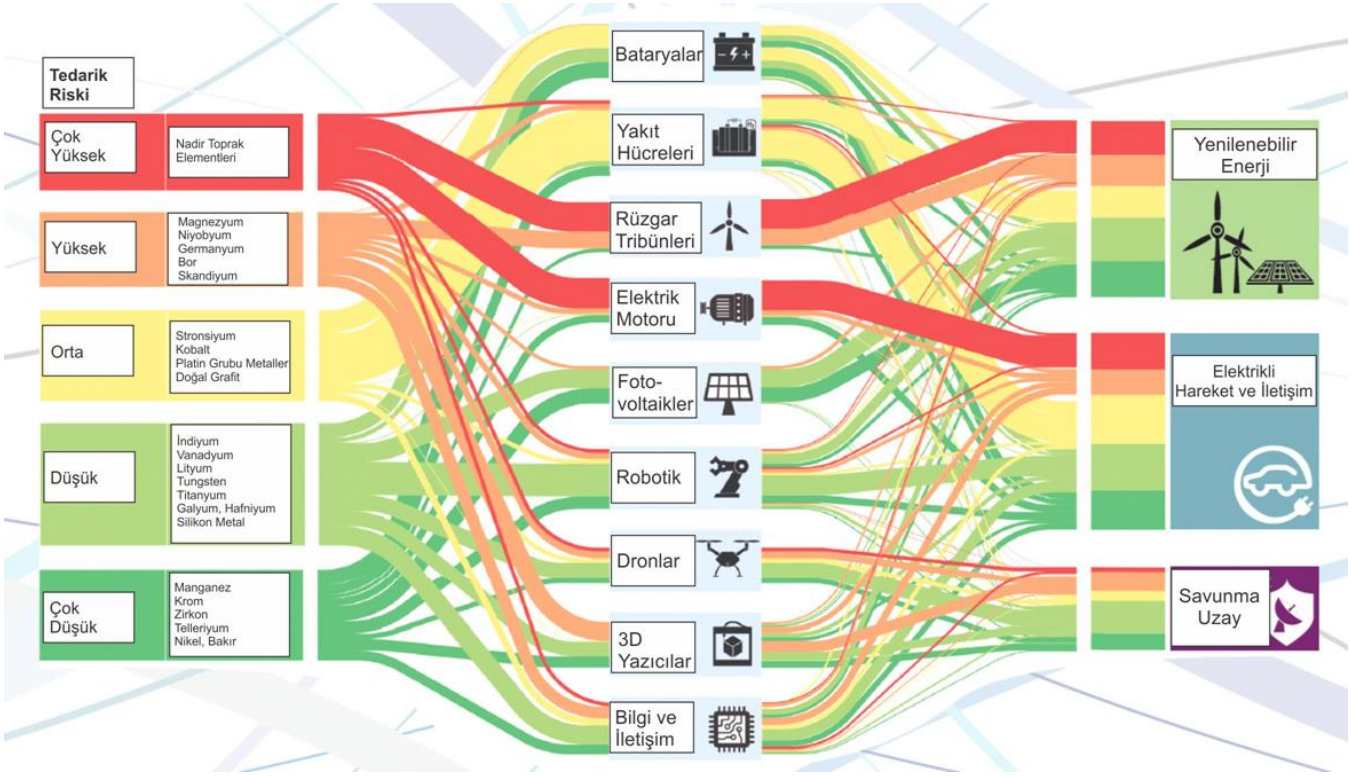
AB'ye benzer şekilde Amerika Birleşik Devletleri (ABD) de, ulusal güvenliği ve ekonomisi için 35 hammaddenin kritik öneme sahip olduğunu tespit etmiş ve bunların içinde 31 hammaddenin ithalatında %50'den fazlasına bağımlı durumdadır. Özellikle yaşanan siyasal gerilimler teknoloji üreten ülkelerin ihtiyaç halinde bu hammaddeleri "kendi kendine yetebilme" refleksi ile güvenilir şekilde kendi kaynaklarından temin edebilmesinin zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla, son yıllarda teknoloji üreten ülkeler (AB, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Güney Kore, Kanada ve Avustralya) kendi sınırları içerisinde yüksek ticaret hacimlerine sahip üretim faaliyetlerini sürdürülebilir kılmak adına ihtiyaç duydukları kritik hammaddeleri listeler halinde yayınlamaya başlamışlardır.

İleri teknoloji uygulamalarında kullanılan ve Stratejik Hammaddeler olarak tanımlanan (örn. NTE, V, Nb, Li, Mg, Co vb.) hammaddeler için de uluslararası pazarda ciddi seviyede tedarik riski bulunmaktadır. Bu hammaddelerin uluslararası pazardaki tedariklerinin başta Çin olmak üzere sınırlı sayıda ülke tarafından sağlanması yüksek teknoloji üreten ülkeler için ciddi bir risk olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle son 10 yılda, teknoloji üreten tüm ülkeler (ABD, AB, Japonya, Güney Kore, Avustralya, Kanada vb.) yüksek tedarik riski bulunan bu hammaddeler için güvenilir ve kesintisiz tedarik zincirleri kurma yönünde Ar-Ge projeleri ile ciddi adımlar atmakta ve çeşitli önemler almaktadır. Tüm dünya tarafından 2050 yılına kadar hedeflenen sıfır karbon emisyonu kapsamında yeşil teknolojilere dönüşüm hızlı bir şekilde artacak ve bu teknolojilerin üretiminde kullanılmak zorunda olunan stratejik hammaddelere duyulan ihtiyaç da doğru orantılı olarak artış gösterecektir. Bu nedenle, Ülkemizde özellikle yerlilik oranlarının sürekli artış gösterdiği savunma sanayi ve diğer ileri teknoloji uygulamalarında (elektrikli araç, rüzgâr tribünleri, fiber optik vb.) hammadde olarak ihtiyaç duyulan girdiler için güvenilir ve kesintisiz tedarik zinciri kurulması gerekmektedir (Şekil 1).

TRB1 BÖLGESİ STRATEJİK HAMMADDE KAYNAK DURUMU VE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Munzur Üniversitesi, Yükseköğretim Kurulu ve Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından Bölgesel Kalkınma Odaklı Misyon Farklılaşması ve İhtisaslaşması Projesi kapsamında "Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları" alanında ihtisaslaşması uygun görülmüş ve bu kapsamda Fiziksel Zenginleştirme Koordinasyon Birimi oluşturulmuştur. Tunceli-Malatya-Elazığ-Bingöl illerinden oluşan TRB1 bölgesi özellikle Nadir Toprak Elementleri, Niyobyum, Lityum, Magnezyum, Fosfat, Vanadyum, Krom gibi kritik ve stratejik hammaddelerce zengin durumdadır. Bölgede 322 işletme ile 9856 kişiye madencilik alanında istihdam sağlanmaktadır. Bölgedeki en önemli demir yatakları; Hekimhan-Hasançelebi, Deveci, Karakuz demir yataklarıdır. Bunların yanı sıra Arapgir, Hekimhan, Kuluncak ve Doğanşehir'de yüksek titan içeriği nedeniyle işletilemeyen demir yatakları bulunmaktadır. Bingöl'ün Genç ilçesindeki Avnik demir yatak ve zuhurlarından sahası, demir-çelik işletmelerinin istemiş olduğu limitlerin üzerinde apatit içerdiğinden yatak işletilememektedir. Fosfat yatak ve zuhurları, Genç ilçesinde yer almakta olup, bölgedeki fosfat yatakları demir ile birlikte işletildiğinde ve zenginleştirme çalışmalarının olumlu olması halinde ekonomik olabilecektir. Bakır, kurşun ve çinko yatakları; Yeşilyurt, Arguvan, Keban, Sivrice, Palu, Baskil, Ovacık ve Genç ilçelerinde, Gümüş ve Altın Rezervleri Keban'da, linyit yatakları Karlıova ve Arguvan'da mevcuttur. Halen 26 milyon ton

olan Türkiye krom potansiyelinin %45'lik bölümü Elazığ-Alacakaya bölgesinde bulunmaktadır. Ayrıca, Hekimhan, Ovacık, Pülümür ve Mazgirt'te krom cevheri mevcuttur (Fırat Kalkınma Ajansı, 2014).



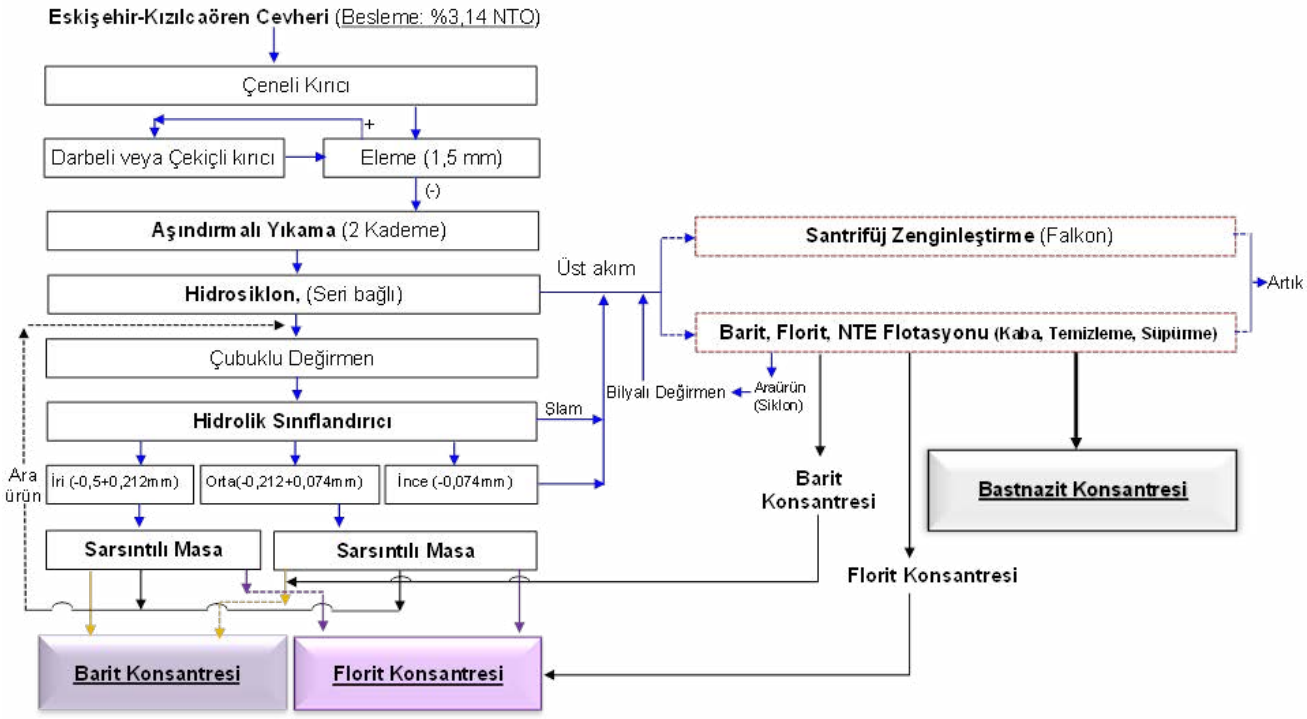
Şekil 1. Yeşil teknolojilere dönüşüm kapsamında talep artışı beklenen ve tedarik riski bulunan kritik hammaddeler (Avrupa Komisyonu, 2020)

Cevher hazırlama ve zenginleştirme teknolojileri stratejik hammaddelerin değerlendirilmesinde kilit rol oynamaktadır. Stratejik hammaddelerin endüstriyel olarak işlenmesi için çeşitli fiziksel zenginleştirme yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, flotasyon, gravite, manyetik ve elektrostatik tekniklerden oluşan bir kombinasyonu içerir. Cevher hazırlamada aralarında yoğunluk farkı olan mineralleri ve içerdikleri safsızlıkları birbirinden ayırmak için fiziksel yöntemler yaygın ve ekonomik olarak uygulanmaktadır. Gravite ayırma teknikleri genellikle en düşük maliyetli zenginleştirme teknolojileridir. Gravite teknikleri tam ayrılmanın sağlanamadığı durumlarda bile, genellikle bir ön konsantre üretilmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Gravite ayrımı, dünyanın en büyük NTE madeni Bayan Obo da dahil olmak üzere Çin'deki birçok NTE tesisinde, bastnazit ve monazitin flotasyon öncesinde konsantre edilmesi için kullanılmıştır (Jordens vd., 2016). Spiraller ve sarsıntılı masa gibi ayırıcılar, gravite yöntemi ile ön zenginleştirme adımları olarak kullanılmaktadır. Sarsıntılı masalar, spiraller, koni ayırıcıları veya jig gibi yöntemlerde, taneler çökelme hızları farkı ve hareketi etkileyen efektif kuvvetler uyarınca farklı ürün gruplarına ayrılmaktadırlar. (Gombköto ve Bohm, 2013; Jordens vd., 2016). Çok ince nadir toprak minerallerini konsantre hale getirmek için, Multi Gravite Ayırıcısı, Falcon Konsantratörü ve Knelson Konsantratörü gibi santrifüj gravite ayırıcıları da başarıyla uygulanmıştır. Flotasyon, çok ince tane boyutlarına sahip tanelerin zenginleştirilmesine olanak sağlaması ve bir yatağın kendine özgün mineralojisine göre prosesin biçimlendirilebilmesi gibi nedenlerle nadir toprak elementleri cevherlerinin zenginleştirilmesinde yaygın olarak uygulanmaktadır (Jordens vd., 2013).

Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören cevherinin endüstriyel olarak üretimine yönelik, 1960'lı yıllardan beri yapılan çalışmalar sonucunda; bölgede maden sahasının cevher oluşumunun morfolojik özelliklerinin heterojen dağılım gösterdiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, MTA raporlarında; cevher sahasının, hidrotermal oluşumlu

kompleks dissemine cevher oluşumuna sahip olduğu ve yapılan ayrıntılı mineralojik etütler sonucunda, cevherin 150 µm tane boyutundan küçük değerlerde dahi, tam bir serbestleşmeye ulaşamadığı, hemen her boyutta floritlerin daima mikro ve kripto oluşumlar halinde barit ve nadir toprak elementlerini içerdiği belirtilmiştir. Cevherin bu teknik özelliği ve içeriğinin farklı olmasından dolayı bu yatağa özgü zenginleştirme yönteminin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Özbayoğlu vd., (1995, 2000) yaptıkları çalışmada, Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören cevherinin minerolojik analizi sonucu nadir toprak oksitlerin çok ince bir tabaka halinde barit ve florit minerallerini sıvadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda yapılacak çok ince öğütme kırılgan olan baritin kazanılmasını güçlendirecek, hem de ince fraksiyonda toplam nadir element tenörünü azaltacaktır. Bu nedenle nadir toprak elementlerinin aşındırmalı-yıkama ile yüzeyden koparılarak serbest duruma getirilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir. Değişik boyutlarda yapılan aşındırmalı-yıkama işlemleri sonucunda aşındırmalı yıkama için en uygun tane boyunun -1,65 mm olduğu tespit edilmiştir (Özbayoğlu vd., 1995; Özbayoğlu ve Atalay, 2000). Yapılan literatür çalışmalarına bağlı olarak Eskişehir- Kızılcaören NTE cevherinin zenginleştirilmesi için önerilen akım şeması Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Eskişehir- Kızılcaören için önerilen fiziksel zenginleştirme akım şeması

Şekil 2 incelendiğinde kırıcıların çıkış ürünlerinin köşeli ve pürüzlü olması nedeniyle flotasyon verimlerinin önemli oranda arttığı literatürde birçok çalışmada belirtilmesinden dolayı buna uygun kırıcı seçilmelidir (Ulusoy ve Yekeler, 2005; Uysal vd., 2021). Akım şemasında çubuklu değirmen seçiminin nedeni çubuklu değirmende tanelerin aşırı ufalanmaması ve homojen tane boyuna sahip olması dolayısıyla sarsıntılı masa verimini artıracağı düşüncesiyle tercih edilmiştir. Ayrıntılı mühendislik çalışmalarıyla uygun ikincil kırıcı ve değirmen seçimi yapmak daha doğru olacağı değerlendirilmektedir. Önerilen akım şemasında hidrolik sınıflandırıcıdan alınan ince boyut (-0,074 mm) fraksiyonu ve hidrolik sınıflandırıcı şlamı sarsıntılı masa yerine flotasyon ve/veya santrifüj zenginleştiricilere beslenerek bu sayede alt akıma giden (kayıp) NTE'nin geri kazanımı sağlanabileceği öngörülmektedir.

Geliştirilen bu akım şemasında kesikli çizgilerle verilen alternatif yöntemlerden (flotasyon veya flotasyon+santrifüj) cevherdeki minerallerin özgül ağırlıklarının birbirine yakın olması ve flotasyon yönteminin seçiciliğinin fazla olması dolayısıyla flotasyon yöntemi tercih edilebilir. Son zamanlarda NTE cevherlerinin zenginleştirilmesinde yeni geliştirilen flotasyon toplayıcılar ve hibrit zenginleştirme yöntemleri (flotasyon + santrifüj/manyetik) üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Erust vd., 2023). Bu yeni kolektör çalışmalarına bir örnek olarak, bastnazitin kalsitten seçici yüzdürülmesi için alkil fosfat (Liu vd., 2019), bastnazitin florit ve lauril fosfattan seçici yüzdürülmesi için izobütanohidroksamik asidin (Duan vd., 2020) üstün flotasyon kazanımı sağladığı belirlenmiştir. Everly vd., (2021), bastnasit flotasyonu için geliştirilen 19 farklı kollektörden en uygun kollektörün N, 2 dihidroksibenzamid olduğunu tespit etmişlerdir. Bunlara ek olarak son zamanlarda Mountain Pass (ABD) cevheri üzerine çalışılan hibrit zenginleştirme yöntemlerinden (flotasyon+falkon) olumlu sonuçlar alınmıştır (Williams ve Anderson, 2019; Norgren ve Anderson, 2021). Şekil 3 incelendiğinde fiziksel zenginleştirme yöntemleri ile elde edilen florit konsantresi ve barit konsantresi de yan ürün olarak kullanılabilecek niteliktedir.

SONUÇLAR

Tunceli-Malatya-Elazığ-Bingöl illerinden oluşan TRB1 bölgesi özellikle Nadir Toprak Elementleri, Niyobyum, Lityum, Magnezyum, Fosfat, Vanadyum, Krom gibi kritik ve stratejik hammaddelerce zengin durumdadır. TRB1 bölgesi stratejik ve kritik hammaddeler rezervi bakımından zengin bir potansiyele sahip olmasına rağmen ülke genelinde üretilen konsantre ürün miktarı yeterli düzeyde değildir. Ülkemizde stratejik öneme sahip ekonomik önemdeki Nadir Toprak Elementi içeren cevherdeki safsızlık içerik oranlarının incelenmesi, tane serbestleşme boyutu değerleri zenginleştirme proses yönteminin geliştirilmesi için oldukça önem arz etmektedir. Bu ihtisaslaşma projesi kapsamında geliştirilecek olan cevher hazırlama ve zenginleştirme prosesleri ile ülkemizdeki stratejik ve kritik hammadde ürün kalitesi artırılmış olacaktır. Ayrıca stratejik öneme sahip hammaddelerin, birincil jeolojik kaynaklardan sürdürülebilir, çevre dostu yöntemler ile kazanılabilirliği araştırılacaktır.

KAYNAKLAR

Anderson, A. (2014). Literature review of methods used to produce rare earth metals. *Society of Mining, Metallurgy and Exploration Annual Conference*.

Avrupa Komisyonu, 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials. Erişim tarihi: 25.04.2021. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en. Eurostat, 2022.

Duan, H., W. Liua, X. Wang, L. Zhao, P. Fang, and X. Gu. (2020). Preparation of a novel bis hydroxamic collector and its impact on bastnaesite flotation. *Minerals Engineering*, 156, 106496. doi:10.1016/j. mineng.2020.106496.

Erust, C., Karacahan, M.K., Uysal, T. (2023). Hydrometallurgical roadmaps and future strategies for recovery of rare earth elements, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,.https://doi.org/10.1080/08827508.2022.2073591.

Everly, D., C. Anderson, S. J. Popova, V. Bryantsev, and B. Moyer. (2021). Beneficiation of bastnaesite ore with new flotation collector ligands. *Aspects in Mining & Mineral Science,* 7(2). AMMS:000657

Fırat Kalkınma Ajansı, (2014), Faaliyet Raporu.

Gombköto I., Bohm J. (2013). New developments in gravity concentration of critical raw materials, *Journal of Environmental Research and Protection*, 34, 1-6.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics explained/index.php?title=File:EU_trade_in_raw_materials, _2002-2021.png. Erişim tarihi: 15.06.2022.

https://www.researchgate.net/publication/329526029_Literature_Review_of_Methods_used_to_Produce_Rare_Earth_Metals. Erişim tarihi: 25.11.2021.

Jordens, A., Cheng, Y.P., Waters, K.E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals, *Minerals Engineering*, 41, 97-114.

Jordens A., Shreidan R. S., Rowson N. A., Waters K. E. (2014). Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation, *Minerals Engineering*, 62, 9-18.

Jordens A., Marion C., Langlois R., Grammatikopoulos T., Rowson N. A., Waters K. E. (2016). Beneficiation of the Nechalacho rare earth deposit. Part 1: Gravity and magnetic separation, *Minerals Engineering*, 99, 111-122.

Liu, W., X. Wang, and J. D. Miller. (2019). Collector chemistry for bastnaesite flotation – recent developments. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40 (6), 370–79. doi:10.1080/08827508.2019.1647840.

Norgren, A., and C. Anderson. (2021). Recovery of rare earth oxides from flotation concentrates of bastnaesite ore by ultra-fine centrifugal concentration. *Metals*, 11 (9), 1498. doi:10.3390/met11091498.

MTA, (2012), Nadir toprak elementleri, özellikleri, cevherleşmeleri ve türkiye nadir toprak element potansiyeli, MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 13, 1-8.

Özbayoğlu G., Atalay Ü., Hiçyılmaz C. (1995). Beylikahır kompleks cevherinin zenginleştirilmesi, *14th Mining Congress of Turkey*.

Özbayoğlu G., Atalay M.Ü. (2000). Beneficiation of bastnaesite by a multi-gravity separator, *Journal of Alloys and Compounds*, 303-304, 520-523.

Ulusoy, U., Yekeler, M. (2005). Correlation of the surface roughness of some industrial minerals with their wettability parameters, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44 (5), 555-563.

Uysal, T., Guven O., Ozdemir, O., Karaagaclioglu, I.E., Tunç, B., Çelik, M.S. (2021). Contribution of particle morphology on flotation and aggregation of sphalerite particles, *Minerals Engineering*, 165, 106860.

Williams, N. (2018). Bastnasite beneficiation by froth flotation and gravity separation. MSc Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.

KIZILDAĞ (KARAMAN-TÜRKİYE) ŞEYL CEVHERİNİN NTE KAZANIMI İÇİN KARAKTERİZASYONU

CHARACTERIZATION OF KIZILDAĞ (KARAMAN-TURKEY) SHALE ORE FOR REE RECOVERY

T. Uysal[1], T. Kıyak[2,*], C. Erust Ünal[1], H. Sis[2], M. Erdemoğlu[2]

[1]Munzur University, Rare Earth Elements Application and Research Center
[2]İnönü University, Department of Mining Engineering (Mineral Processing)
*(*Sorumlu yazar: tkiyak23@hotmail.com)*

ÖZ

Arz riski ve ekonomik önem açısından Nadir Toprak Elementleri (NTE) kritik hammaddelerin en başında yer almaktadır. Bu kritik NTE'lerin üretimi için kullanılabilecek başlıca ikincil jeolojik kaynaklar; kırmızı çamur, uçucu küller, iyonik killer ve boksit ilişkili şeyl cevherleridir. NTE'lerin ikincil rezervi olarak görülen boksit ilişkili şeyl cevherleri üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda daha da önem kazanmaktadır.

Bolkardağı Bölgesinde yer alan lateritik tip Kızıldağ boksit cevherleşmesinin protoliti (kaynak kayacı) olan şeyl seviyesi nispeten yüksek oranda NTE potansiyeli ihtiva etmektedir. Bu çalışmada, Kızıldağ şeyl cevherinin NTE üretiminde kullanılabilirliği araştırılacaktır. Ayrıca, liç işleminden önce uygulanan ve minerale "termal aktivasyon" sağlayan kalsinasyon işlemi yerine enerji verimi yüksek değirmenlerde gerçekleştirilen "mekanik aktivasyon" işleminin etkisi incelenecektir. Öncelikle bu kapsamda Ayrancı-Karaman bölgesinden alınan şeyl cevheri cevher hazırlama yöntemleriyle hazırlandıktan sonra, mineralojik (XRD, ince kesit), kimyasal (ICP, XRF), morfolojik (SEM) ve termal (TG-DSC) analizler ile cevher karakterizasyonu yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre cevherin başlıca; pirofillit, kuvars, muskovit, paragonit ve kaolinit minerallerinden oluştuğu görülmüştür. Ortalama olarak %28,8 Al_2O_3 ve %42,70 SiO_2 içeren cevherin, sıfır atık hedefiyle yan ürün olarak alümina ve silika kaynağı olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Cevherin toplam NTE içeriği ise 473 ppm olup sınır tenör dahilinde değerlendirilebilir bir içeriğe sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Şeyl, nadir toprak elementleri, alümina, silika

ABSTRACT

Rare Earth Elements (REE) are one of the most critical raw materials in terms of supply risk and economic importance. The main secondary geological resources that can be used for the production of these critical REEs are; red mud, fly ash, ionic clays and bauxite-related shale ores. Studies on bauxite-related shale ores, which are seen as secondary reserves of REEs, have gained more importance in recent years.

The shale level, which is the protolith (source rock) of the lateritic type Kızıldağ bauxite mineralization in the Bolkardağı region, has a relatively high REE potential. In this study, the usability of Kızıldağ shale ore in REE production will be investigated. In addition, the applicability of the "mechanical activation" process, which is performed in high energy efficient mills, instead of the calcination process, which is applied before the leaching process and provides "thermal activation" to the mineral, will also be investigated. First of all, after the shale ore taken from Ayrancı-Karaman region was prepared by ore preparation methods, ore characterization was carried out with mineralogical (XRD and thin section), chemical (ICP and XRF), morphological (SEM) and thermal (TG-DSC) analyzes. According to the results of this analysis, the ore mainly consists of pyrophyllite, quartz, muscovite, paragonite and kaolinite minerals. It is thought that the ore containing 28.8% Al_2O_3 and 42.70% SiO_2 on average can be considered as a source of alumina and silica as a

by-product with the goal of zero waste. The total REE content of the ore is 473 ppm and it has been determined that it has an evaluable content within the cut-off grade.

Keywords: Shale, rare earth elements, alumina, silica

GİRİŞ

Dünya emtia arzı ve talebi göz önüne alınarak çeşitli kuruluşlar (Avrupa Komisyonu, ABD Enerji Bakanlığı) tarafından Nadir Toprak Elementleri (NTE'ler) kritik hammaddelerin en başında yer almaktadır (EC, 2020). Nadir toprak elementleri, kimyasal olarak benzer özellikler gösteren lantanit grubu, skandiyum ve itriyumdan oluşan 17 elementi içermektedir. İyon yükü genellikle +3 değerlikli olan bu NTE'ler atom numaraları ile doğada bulunma sıklıklarına göre hafif (La, Ce, Pr, Nd, Sm) ve ağır (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu ve Y) nadir toprak elementleri olarak sınıflandırılmaktadır. Dünya genelinde hafif NTE'ler (HNTE) büyük oranda birincil jeolojik kaynaklardan (örn. karbonatitler) temin edilirken, ağır NTE'ler (ANTE) ise ikincil jeolojik kaynaklardan (örn. iyon adsorpsiyon killeri ve karbonatit lateriti) üretilmektedir (Çimen, 2021). NTE içeren pek çok mineral bulunmasına karşın NTE üretiminin yapıldığı en yaygın mineraller bastnazit, monazit ve ksenotimdir. Bunlarla birlikte iyon adsorbe eden killerde önemli bir NTE kaynağıdır (Zhang ve Edwards, 2012; Haque vd., 2014; Jha vd., 2016).

NTE'ler modern malzeme ve enerji teknolojilerinin vazgeçilmezidir. Malzeme üretiminde ağırlıkça kullanım miktarlarının az olmasına karşın malzemeye kazandırdığı üst düzey mekanik, manyetik, elektrik ve optik özellikler nedeniyle nadir toprak elementleri malzemenin vitamini ve malzemenin tohumu olarak nitelendirilmektedir. NTE, kalıcı mıknatıslar (uçak, elektrikli araçlar ve rüzgar türbinleri), elektrik-elektronik cihazlar (cep telefonu, bilgisayar ve TV gibi), şarj edilebilir piller (NiMH piller), modern tıp cihazları (MR cihazı gibi), katalitik dönüştürücüler, seramik sanayi, petrol rafineri ve güneş panelleri gibi ileri teknolojik pek çok cihaz ve ekipmanın üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Binnemas vd., 2013; Krishnamurthy ve Gupta, 2016; USGS, 2021; Ünal vd., 2023). Hibrit/elektrikli araçların, rüzgâr türbinleri ve güneş panellerinin kullanımının yaygınlaşmasıyla beraber nadir toprak elementlerine olan talep giderek artmaktadır. Özellikle mıknatıs üretiminde kullanılan NTE'lere (Tb, Dy, Nd ve Pr) olan talebin artacağı ve bu elementlerin tedarikinde ise 2025 yılından itibaren tedarik sorunu yaşanacağı düşünülmektedir. 2019 yılı verilerine göre toplam NTE üretiminin yaklaşık %62'sini Çin üretmekte olup onu sırasıyla ABD (%12) ve Avustralya (%10) takip etmektedir. Günümüzde ABD, Japonya ve Avrupa Birliği üye ülkelerinde yeterli kaynak olmaması, mevcutların da üretim maliyetleri açısından Çin ile rekabet edememeleri nedeniyle NTE bakımından Çin'e bağımlıdırlar.

Dünya genelinde özellikle az sayıda ülkede bulunan ve üretilen NTE miktarı yakın gelecekte talebi karşılayamayacak durumdadır. Bu nedenle ülkeler U ve Th içeriği düşük olan iyonik killer gibi ikincil jeolojik kaynaklardan NTE üretimi arayışına girmişlerdir. Nadir Toprak Oksitleri (NTO) üretimi için kullanılabilecek ikincil kaynaklardan, kırmızı çamur (Borra vd., 2016), termik santral artığı uçucu küller (Kurşun ve Terzi, 2018), özellikle iyonik killer (Yang vd., 2013; Papangelakis vd., 2014; Ji ve Zhang, 2021) ve boksit ilişkili cevherler (Hanilçi, 2013; Öztürk vd., 2019) oldukça dikkat çekmektedir. 1988-2007 yılları arasında Çin'in toplam NTE üretiminin %26'sını iyonik killer oluştururken, 2009'dan sonra bu üretim %36'ya çıkmıştır (Yang vd., 2013). Çin'in güneyinde, Jiangxi bölgesinde 200'den fazla iyon adsorpsiyon tipi kil yataklarından NTE üretilmektedir. Hâlihazırda Çin dışında NTE üretimi yapılan iyonik kil yatakları; Serra Verde (Brezilya), Liberty Hill (Amerika) ve Zandskopdrift (Güney Afrika) yataklarıdır.

Ülkemizdeki Kızıldağ ve Kemiklitepe boksit cevherleşmeleri Bolkardağı boksit provensinde yer almaktadır. Bu provens, Toros dağlarının Mersin ile Ayrancı (Karaman) arasındaki Bolkardağları kesiminde yer almaktadır. Bolkardağı boksit cevherleşmesinin protoliti yani kaynak kayaçları şeyl olarak tanımlanmıştır (Hanilçi, 2013). Bu yataklarda ağır NTE zenginleşmesi tipik olup bunların boksit yatakları ile bunların protolitleri potansiyel kaynak olabilecek nitelikte NTE içermektetir. Bolkardağ provensinde başlıca boksit

cevherleşmeleri; Camızalanı, Karakuyu, Karataş, Göztaşı, Devebağırtan, Baharpınarı, Kemiklitepe, Bolkardede, Boluardıç, Arpaçukuru, Kızıldağ ve Öşün olup görünür rezervinin yaklaşık 10 milyon ton civarında olduğu belirtilmiştir (Hanilçi, 2013).

Bu çalışmada, boksit ilişkili NTE yatakları çok daha az radyoaktivite içermeleri ve üretiminin daha düşük maliyetli olması nedeniyle gelecekte daha çok tercih edileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, Bolkardağı bölgesindeki NTE'ce zengin (~500-1500 ppm NTO) şeyllerden NTE eldesi için TÜBİTAK 3501 projesi kapsamında araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, Bolkardağı bölgesinden alınan cevherin hazırlanma süreci ve tüvenan cevherin karakterizasyonu ayrıntılı olarak verilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Boksit ilişkili şeyl numunesi, Demireller Madencilik A.Ş'ye ait Toros dağlarının Mersin ile Ayrancı (Karaman) arasındaki Bolkardağları kesiminde yer almaktadır. Kızıldağ şeyli sahada sarımsı-kahve renkleri, ince çubuksu klivaj ve dağılgan özellikleri ile belirgindir. Maden ocağından Kızıldağ şeyl cevheri temsili olarak parça iriliğinde seçilerek temin edilmiştir. Temin edilen cevherin karakterizasyonu çalışmaları yöntem bölümünde verilen aletsel analiz yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir.

Yöntem

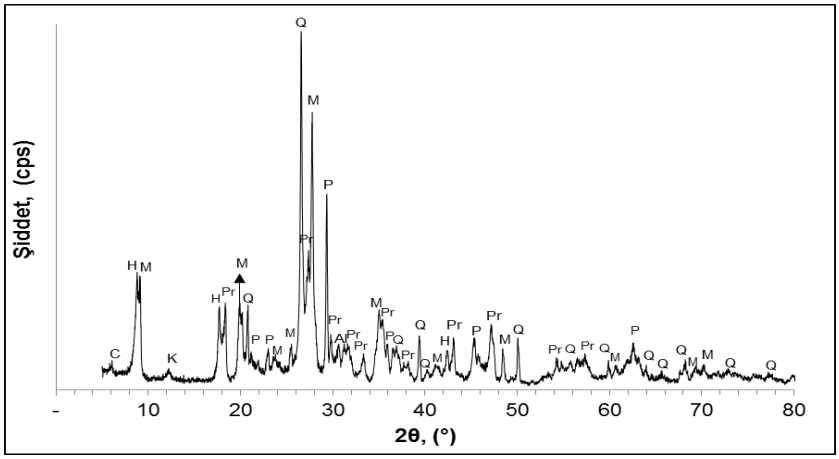
Parça iriliğindeki şeyl cevheri, çeneli kırıcı yardımıyla kademeli olarak -2 mm boyutuna kırılmıştır. Kırılan cevher seramik bilyeli değirmende -212 µm tane boyutuna öğütülmüştür. Kızıldağ şeyl cevherinin XRD analizi Rigaku marka MiniFlex 600 model XRD cihazı (Munzur Üniversitesi) ile CuKα (λ= 1.5405 Å) ışımasında, 2°/dakika tarama hızında ve 5-80º aralığında değişen difraksiyon açılarında gerçekleştirilmiştir. Minerallerin tanımlanması için cihazla birlikte bulunan "The International Centre for Diffraction Data" Powder Diffraction File (ICDD PDF) veri bankasından yararlanılmıştır. Cevher örneklerinin kimyasal içeriğini belirlemek için ise Perkin Elmer Elan 9000 model ICP-MS ve ICP-AES cihazları (ALS Labs) kullanılmıştır. Mikromorfolojik özelliklerin belirlenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM, Hitachi SU3500 model) kullanılmıştır. Cevherin termal davranışını belirlemek üzere ise termogravimetri analizi (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) (Setaram LabSys 60 model) analizleri yapılmıştır.

SONUÇLAR

Kızıldağ Şeyl Cevherinin Tanımlanması

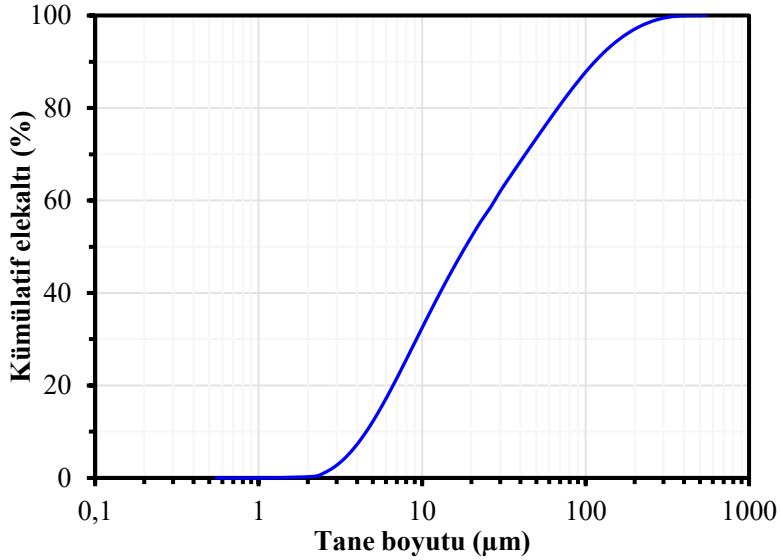
XRD analizi

Kızıldağ şeyl cevherinin mineralojik içeriği XRD analiziyle belirlenmeye çalışılmış ve Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre cevherde bulunan başlıca mineraller; pirofillit ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$), kuvars (SiO_2), paragonit ($NaAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$), muskovit ($KAl_3Si_3O_{10})(OH)_2$ ve kaolinittir ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$).



Şekil 1. Kızıldağ şeyl cevherinin XRD deseni (M: Muskovit, P: Pirofillit, Pr: Paragonit, Q: Kuvars, K: Kaolinit, H: Halloysit, Al: Albit, Kl: Kalsit)

Öğütülmüş cevherin tane boyut dağılımı Malvern marka Mastersizer 2000 model (İnönü Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü) cihaz ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'deki sonuçlara göre -0,212 mm tane boyutundaki örneğe ait d_{25}, d_{50} ve d_{75} değerleri sırasıyla 0,005 mm, 0,019 mm ve 0,114 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 0,212 mm iriliğe ufalanmış Kızıldağ cevher örneğinin tane boyut dağılımı eğrisi

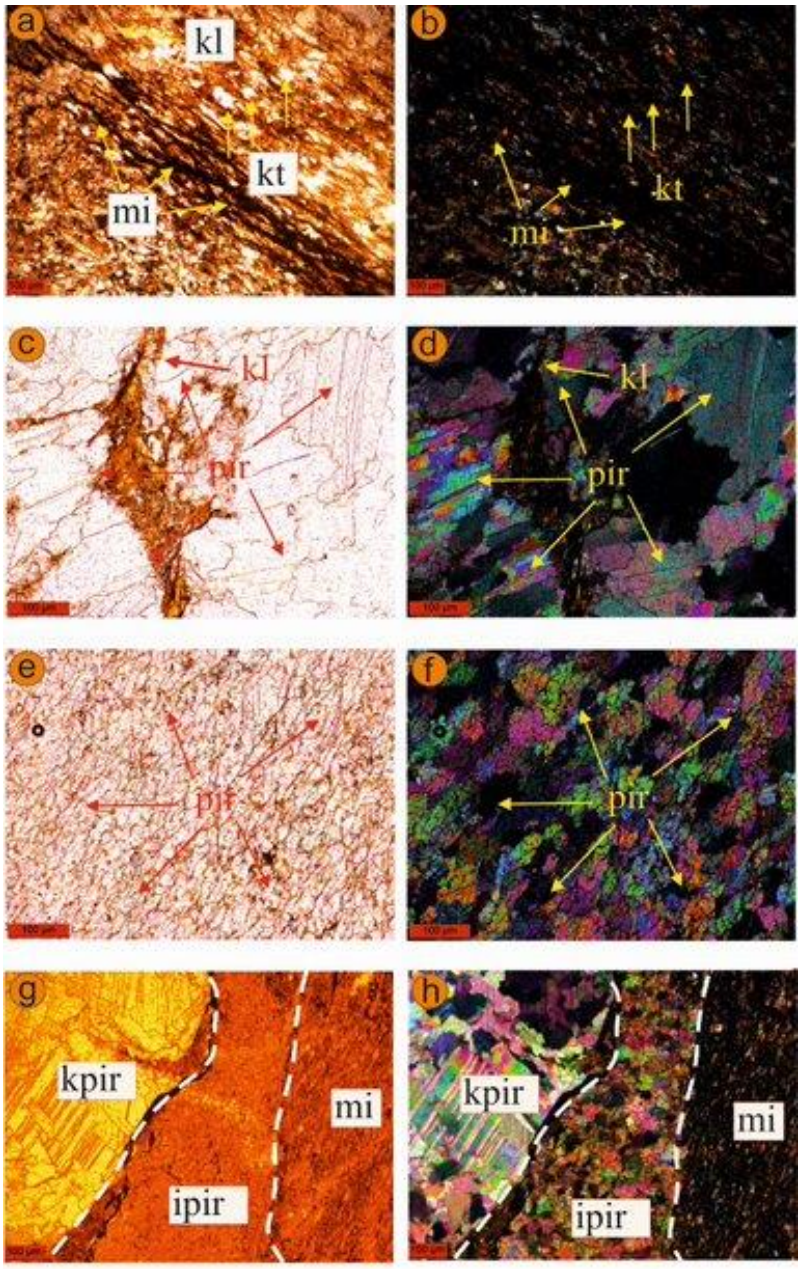
Jeolojik analizler

Kızıldağ cevherinin mineralojik bileşimleri ve dokusal yapısını belirlemek üzere MTA Laboratuvarlarında ince kesit analizi yapılmıştır. Buna göre Kızıldağ cevherine ait polarizan mikroskop görüntüleri Resim 1'de verilmiştir.

Cevher; epiklastik bileşenler, çimento ve tali bileşenlerden oluşmaktadır. Epiklastik bileşenler, kuvars, feldispat, karbonat ve mika minerallerinden oluşmaktadır. Kuvars, yarı yuvarlak-yarı köşeli, homojen dağılımlı, silt-kum boyu arasında tane boyuna sahip ve dalgalı sönme gösteren taneler şeklinde gözlenmiştir. Feldispat bileşeni yarı köşeli, heterojen dağılımlıdır. Karbonat mineralleri, yarı köşeli, homojen dağılımlı, mika

mineralleri ise yer yer yönlü muskovit ve biyotit şeklinde gözlenmiştir. Çimento bileşeni, serizit ve karbonat şeklinde, tali bileşenler ise yarı özşekilli, homojen dağılımlı opak mineral şeklindedir.

Numunede, uçları açık-kapalı çatlaklarda karbonat ve demir oksit/hidroksit şeklinde süreksizlikler izlenmiştir. Ayrıca numunede yer yer sıcaklık yükselmesine bağlı olarak mika minerallerinin tane boylarında büyümeler ve belirgin yönlenmeler (seviyeler şeklinde) izlenmiştir (Resim 1 a-b). Karbonat mineralleri, mezokristalin kalsit mineralleri şeklinde olup metamorfizma etkisi ile kalsit mineralleri yer yer uzamış, çok az oranda kayma ikizleri oluşmuştur. Mezo-makrokristal karbonat kristallerinin izlendiği kısımların süreksizlikler (damar) şeklinde numuneyi kesen kısımlar olduğu düşünülmektedir (Resim 1 c-h).



Resim 1. Kızıldağ cevheri örneklerine ait ince-kesit görünümleri (Soldaki resimler tek nikol, sağdakiler tek nikol, Pir: Pirofillit, Kpir: Kaba taneli pirofillit, ipir: ince taneli pirofillit, kt: Kuvars, Kl: Kaolinit, Mi: Mika)

İnce kesit çalışmalarıyla elde edilen bulgular, XRD analiziyle ortaya çıkarılan cevher parajenezi ile uyumludur. Kızıldağ şeyli hakkında yapılan tüm çalışmalarda da bu parajenezdeki minerallerin varlığından söz edilmektedir (Öztürk vd., 2019; Hepvidinli, vd., 2019).

Kimyasal analiz

Cevherin kimyasal içeriğinin doğruya en yakın biçimde belirlenmesi için şeyl cevheri tam çözündürme uygulanarak ICP yöntemiyle kimyasal olarak analiz edilmiştir. ICP analizi ALS Global Analiz Laboratuvarlarında (İzmir) yapılmış olup majör oksitler için ICP-AES ve NTE analizi için ise ICP-MS analizlerinin birleşimi olan ME-MS81d kodlu analiz yapılmıştır. Aynı laboratuvara bir de referans kil örneği de gönderilerek laboratuvarın güvenilirliği test edilmiştir. ICP-AES analizi için 2 adet cevher numunesi verilmiş ve ortalama değerleri alınmıştır. ICP-AES analizi sonucu Çizelge 1'de, ICP-MS sonucu ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. ICP-AES analizlerine göre Kızıldağ şeyl (protolit) cevherinin kimyasal içeriği

Numune	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**Na_2O**	**K_2O**	**TiO_2**	**MnO**	**P_2O_5**	**A.K**
Protolit 1	42,9	29,0	4,27	5,55	0,56	3,05	3,08	1,41	0,03	0,05	9,37
Protolit 2	42,5	28,6	4,30	5,82	0,55	3,03	3,00	1,40	0,02	0,05	9,60
Ortalama	42,7	28,8	4,29	5,69	0,56	3,04	3,04	1,41	0,03	0,05	9,49

Çizelge 1'deki ICP-AES analizi sonucu Protolit 1 ve 2 aynı numune olup benzer sonucu verdiği, ayrıca referans kil örneğinin sonuçları tayin sınırları dahilinde analiz laboratuvarı tarafından doğru olarak bulunmuştur. Böylece yapılan analizlerin güvenilir olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre Kızıldağ protolit cevheri ortalama %42,70 SiO_2 ve %28,8 Al_2O_3 içeriğine sahip olduğu böylece cevherin yan ürün olarak alümina ve silika kaynağı olarak da değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Mineralojik analizlerin sonuçlarına bakılırsa, Al_2O_3 ve SiO_2'nin kaynağının Alüminyum silikatlı kil minerallerinin (pirofillit, paragonit, kaolinit ve halloysit) olduğu rahatlıkla anlaşılabilir. Üstelik Na_2O'nun kaynağının paragonit olduğu, K_2O'nun kaynağının ise muskovit olduğu da açıktır. Bunlarla birlikte, cevherdeki Fe_2O_3'ün varlığının sebebi demir oksitler yerkabuğunun yüzeye yakın bölümlerinde birincil ya da ikincil oluşumlu olarak bolca bulunmasından kaynaklanmaktadır. Cevherdeki ortalama %5,60 CaO kaynağı ise kalsit mineralidir. Henüz anlaşılamamış olan ise ve %1,40 değeriyle TiO_2 varlığıdır.

Çizelge 2. ICP-MS analizlerine göre Kızıldağ şeyl cevherinin kimyasal içeriği

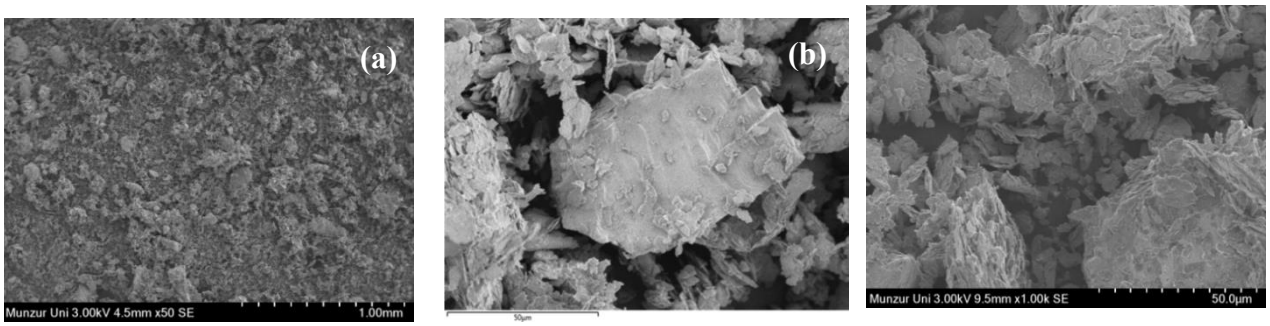
Numune	**Ce**	**La**	**Y**	**Nd**	**Nb**	**Sc**	**Pr**	**Dy**	**Er**	**Gd**	**Sm**
Protolit 1	115	82,0	87,4	58,8	31,2	28,0	15,5	11,9	7,4	10,2	10,4
Protolit 2	117	83,6	80,2	59,6	32,1	28,0	15,8	11,5	7,5	10,7	11,2
Ortalama	**116**	**82,8**	**83,8**	**59,2**	**31,7**	**28,0**	**15,7**	**11,7**	**7,5**	**10,5**	**10,8**
Numune	**Yb**	**Ho**	**Lu**	**Eu**	**Tb**	**Tm**	**∑NTE**	**Rb**	**Th**	**U**	
Protolit 1	7,31	2,50	1,08	1,91	1,76	1,10	**473,0**	114	21,4	4,31	
Protolit 2	6,81	2,54	1,00	1,85	1,70	1,07	**472,0**	110	22,0	4,47	
Ortalama	**7,06**	**2,52**	**1,04**	**1,88**	**1,73**	**1,85**	**472,5**	**112**	**21,7**	**4,39**	

Literatürde iyonik killerin yaklaşık olarak 500 - 3.000 ppm NTE arasında olduğu ifade edilmektedir (Krishnamurthy ve Gupta, 2016). Çizelge 2'te ∑NTE içeriği 473 ppm olup düşük içeriğe sahip olduğu saptanmıştır. Hepvidinli tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada Kızıldağ cevherinin NTE içeriğinin 240-

3.000 ppm arasında değişken olduğu belirtilmiştir. Sınır tenör dahilinde bu cevherin değerlendirilebilir bir içeriğe sahip olduğu düşünülmektedir. Bu değişkenliğin Kızıldağ bölgesinde allanit ve serit gibi NTE minerallerinin farklı bölgelerinde oluşumundan kaynaklı olabileceği değerlendirilmektedir. Geçiş zonu olan saprolit cevherinin ∑NTE içeriğinin 214 ppm gibi oldukça düşük olmasının sebebi ise geçiş zonunda NTE'nin çözünerek uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır.

Elektron mikroskopi (SEM) analizi

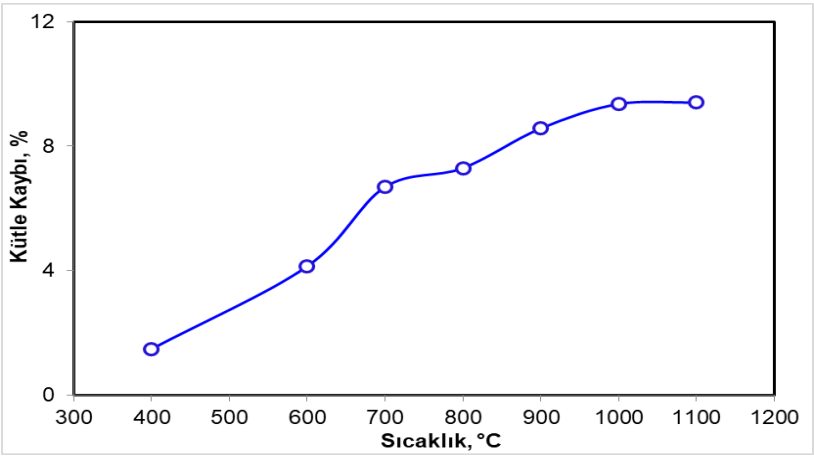
Tüvenan cevherin SEM görüntüleri Resim 2'de verilmiştir. Resim 2a'da tanelerin öğütmenin etkisiyle aglomera olduğu görülmektedir. Resim 2b'de görülen hekzagonal yapılı tanenin kuvars olduğu ve öğütmeden çok fazla etkilenmediği sadece köşe noktalardan kırılmalar olduğu görülmektedir. Resim 2c'de ise tabakalı/yapraksı yapılı tanelerin ise kil mineralleri olduğu değerlendirilmektedir.



Resim 2. -212 µm tane iriliğindeki tüvenan cevherin SEM görüntüleri

Termal analiz

Isıtma işlemi maksimum 1200 °C sıcaklığa kadar çıkabilen kamaralı fırında izotermal olmayan koşullarda 400, 600, 700, 800, 900, 1000 ve 1100 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Isıtma süresi ise literatürdeki bu konudaki çalışmalar temel alınarak 120 dakika olarak seçilmiştir. Fırın ısıtma sıcaklık artış hızı 20 °C/dakika olarak sabit tutulmuştur. İlk numune ağırlığı ile ısıtma sonrası soğutulmuş son numune ağırlığı arasındaki fark % kütle kaybı olarak ifade edilmiştir. Cevher örneklerine ait kütle kaybı değişimi Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Kızıldağ cevherinin ısıtma sıcaklığına bağlı kütle kaybı değişimi (Tane boyutu: -212 µm, ısıtma süresi: 120 dakika, ısıtma hızı: 20 °C/dk)

Termal analiz eğrileri incelendiğinde, kütle kaybındaki değişimi 400-700 °C, 700-900 °C ve 900-1100 °C olmak üzere üç bölgede incelemek mümkündür. Kütle kaybındaki en belirgin azalmanın görüldüğü birinci bölgede 400-700 °C aralığındaki birinci bölgede doğrusal bir artış ile maksimum kütle kaybı %7 civarındadır. Bu kütle kaybı 600-700 °C aralığında hidratlı yapının parçalanmaya başladığı, dehidratasyonun ve dehidroksilasyon reaksiyonlarının meydana geldiği ve bu süreç sonunda tabakalar arası suyun uzaklaşmaya başladığı düşünülmektedir. Ayrıca bu bölgedeki dehidratasyonun ve dehidroksilasyon reaksiyonlarının endotermik olduğu bilinmektedir. 700-900 °C aralığındaki ikinci bölgede kütle kaybı yaklaşık %3'tür. Bu ikinci bölgede de dehidroksilasyonun devam ettiği düşünülmektedir. Üçüncü bölge olan 900-1100 °C'de kütle kaybında belirgin bir değişimin olmadığı 1000 °C'den sonra hemen hemen sabitlendiği görülmektedir. ICP-MS analizinde de 1000 °C'de kütle kaybı miktarı %9,37 iken aynı sıcaklıkta Şekil 3'deki kütle kaybı miktarı ise %9,36 olup birbiriyle benzer olduğu görülmektedir. Amorflaşma başlangıcı olarak düşünülen bu bölgede çeşitli faz geçişlerinin ve yeniden kristallenme gibi önemli değişimlerin meydana geldiği tahmin edilmektedir. Ayrıca bu bölgedeki amorflaşma piklerinin ekzotermik karakterli olma ihtimali oldukça yüksektir. Nitekim amorflaşma reaksiyonlarının ekzotermik olduğu literatürde (Sánchez-Soto, Pérez-Rodriguez, 1989; Erdemoğlu vd., 2020) sıkça bahsedilmektedir.

SONUÇLAR

Türkiye'de bulunan NTE yatakları çoğunlukla birçok minerali bünyesinde bulunduran kompleks yataklardır. Bu kompleks yataklarda gerçekleştirilecek çalışmalarda kritik ve stratejik öneme sahip NTE kazanılmasının yanı sıra sıfır atık hedefiyle yan ürün olarak yüksek içeriğe sahip elementlerin kazanılması da oldukça önem arz etmektedir. Bundan dolayı çalışılacak sahadaki cevherin en iyi şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada Kızıldağ şeyl cevheri (Karaman) mineralojik, kimyasal ve termal olarak büyük oranda tanımlanmıştır. Buna göre cevher başlıca; pirofillit, muskovit, paragonit, kuvars ve kaolinit içermekte olup ortalama 473 ppm NTE ve %28,8 Al_2O_3 tenörüne sahiptir. Çalışmada şuana kadar cevher hazırlama, cevher karakterizasyonu ve termal aktivasyon (kalsinasyon) çalışmaları tamamlanmıştır. Termal aktive cevherin karakterizasyonu, mekanik aktivasyon ve tüvenan cevherin liçi çalışmaları ise devam etmektedir.

KAYNAKLAR

Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review, *J. Clean. Prod.* 51, 1-22, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037.

Borra, C.R., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., Gerven, T.V. (2016). Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue (Red Mud): A Review, *J. Sustain. Metall.* 2:365–386, Doi 10.1007/s40831-016-0068-2.

Çimen, O., 2021. Nadir Toprak Elementleri Ekosistemi Hakkında Doğru Bilinen Yanlışlar, Nadir Toprak Elementleri ve Atıklardan Geri Kazanımı Çalıştayı, İTÜ.

EC, 2020. Report on Critical Raw Materials for the EU. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en. Son erişim tarihi: 19.07.2022

Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T. (2020). Thermal behavior of pyrophyllite ore during calcination for thermal activation for aluminum extraction by acid leaching, *Clay and Clay Science*, 10.1007/s42860-019-00061-w, Vol.68, No. 2:89-99

Hanilçi, N. (2013). Geological and geochemical evolution of the Bolkardağı bauxite deposits, Karaman, Turkey: Transformation from shale to bauxite, *Journal of Geochemical Exploration*, 133, 118-137.

Haque, N., Hughes, A., Lim, S., Vernon, C. (2014). Rare earth elements: Overview of mining mineralogy uses sustainability and environmental impact, *Resources,* 3, 614–635.

Hepvidinli, B. (2019). Kızıldağ ve Kemiklitepe (Ayrancı-Karaman) Boksit Cevherleşmeleri ve İlişkili Kaynak Kayaçlarının Nadir Toprak Element İçeriklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Jha, M.K., Kumari, A., Panda, R., Kumar, J.R., Yoo, K., Lee, J.Y. (2016). Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals, *Hydrometallurgy*, 165, 2-26.

Ji, B., Zhang, W. (2021). The effect of mechanical grinding and thermal treatment on the recovery of rare earth elements (REEs) from kaolinite, *Powder Technology*, 394, 622–631.

Krishnamurthy, N., Gupta, C. K. (2016). Extractive Metallurgy of Rare Earths (Second Edition). CRC Press-Taylor & Francis Group.

Kurşun, I.Ü., Terzi, M. (2018). Distribution of trace elements in coal and coal fly ash and their recovery with mineral processing practices: A review, *Journal of Mining and Environment*, 9 (3), 641-655.

Öztürk, H., Hanilçi, N., Altuncu, S., Kasapçı, C. (2019). Rare earth element (REE) resources of Turkey: an overview of their characteristics and origin, *Bulletin of the Mineral Research and Exploration,* 159: 143-129.

Papangelakis, V.G., Moldoveanu, G.A. (2014). Recovery of rare earth elements from clay minerals, In: Proceedings of the 1st Rare Earth Resources Conference, Milos, 191-202.

Sánchez-Soto P. J., Pérez-Rodriguez J. L., (1989). 'Thermal-Analysis of Pyrophyllite Transformations Thermochimica Acta, 138, 267–76.

U.S. Geological Survey, (2021). Mineral Commodity Summaries 2021. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Ünal E.C., Karacahan, M., Uysal, T. (2023). Hydrometalurgical roadmaps and strategies for recovery of rare earth elements, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,* http://doi.org/10.1080/08827508.2022.2073591.

Yang, X.J., Lin, A.J., Li, X.L., Wu, Y.D., Zhou, W.B., Chen, Z.H. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation, *Environmental Development*, 8, 131-136.

Zhang, J., Edwards, C., (2012). A review of rare earth mineral processing technology. 44th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors. CIM, Ottawa, pp. 79-102.

HPGR INFLUENCES ON DOWNSTREAM BALL MILL ACCORDING BOND TESTS AND ENERGY CALCULATIONS

F. Heinicke [1, *], H. Lieberwirth [2], M. Pfeifer [3]

[1] *Köppern Aufbereitungstechnik, Freiberg, 09599.*
[2] *Institute for Mineral Processing Machines and Recycling Systems Technology, Technical University Bergakademie Freiberg, 09599*
[3] *Köppern Aufbereitungstechnik, Freiberg, 09599*
*(*Corresponding Author: F.Heinicke@koeppern.com)*

ABSTRACT

HPGRs (high pressure grinding rolls) have been developed within the last decades for energy efficient processing of a wide variety of ores. Special interest has been raised by projects increasing the capacities of processing plants by installing HPGRs prior to ball mills. Bond ball mill tests have been used for decades as a base for ball mill dimensioning in mineral circuits. For final CAPEX-OPEX considerations of the processing circuit, one key question is about the level of grinding energy split between HPGR and downstream grinding stages. This is especially interesting if the downstream process comprises multiple grinding stages combined with separation steps.

The paper presents investigations on grinding energy consumption, size distribution and microfracturing of HPGR products, which affect the efficiency of the whole comminution and sorting process.

Keywords: Grinding, energy efficiency, mineral processing, comminution

INTRODUCTION

The comminution process of High Pressure Grinding Rolls (HPGR) was discovered in the 1980s by the research work of the German Professor Schönert. Its main advantage is the high energy efficiency in comparison to ball mill grinding which has been the benchmark process in the cement industry by then (Schönert, 1988). Since then, a worldwide trend towards HPGR application has been established (Klymowsky et al, 2002), first in the cement industry but soon after also in ore processing.

Nevertheless, it has to be noted that the technology has its roots much earlier. Köppern, as one supplier of HPGR, has been working for more than 120 years on roller presses, starting with the formation of coal briquettes between two rollers. Subsequently, other fields of application, eg for fertilizer compaction, emerged (Schönert, 1966).

Even based on this history, it was a large step to transfer this process principle to minerals applications due to the much higher wear caused by the higher abrasivity of those materials. The first applications started in iron ore concentrate grinding. Meanwhile, with the optimisation of the roller surfaces using studs (Morley, 1995), the service life of the rollers substantially increased and the technology has been well established for ores and hard rock applications.

Figure 1 refers to a common installation of a HPGR for iron ore. Other set-ups with primary ball mills in circuit with cyclones which are prevalent in non-ferrous industries shall not be addresses in this paper. The material is pre-crushed to a feed size of 25 mm and then processed by HPGR within a pregrinding application

in front of a primary ball mill (Morely, 1995). The HPGR is designed to work in open circuit in this case, with the transfer size to the ball mill being in the range of 80 per cent passing 7 mm. The primary ball mill is operated in a closed circuit with a screw classifier, followed by a magnetic separation stage. Tailings of this stage are reground in a ball mill hydrocyclone circuit for further processing.

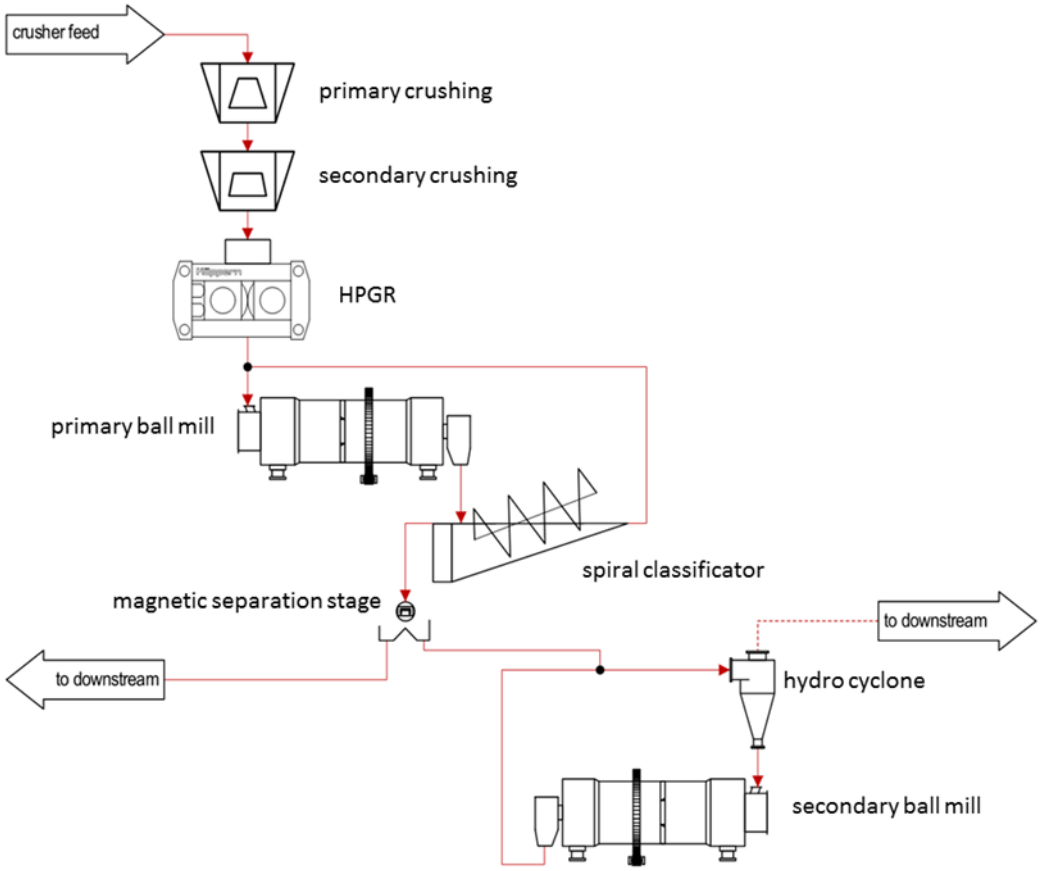


Figure 1. Typical Flow sheet of HPGR processing in front of ball mill

To achieve the best grinding efficiency, HPGR are available in a wide size range. Figure 2 shows a state-of-the art Köppern type HPGR. The key questions for sizing of such a machine are:

1. What throughput is to be processed by the machine?
2. What is the desired transfer size to the downstream process?
3. Which energy input shall be achieved?
4. How does the downstream flow sheet look like?
5. Which downstream effects shall be fostered, especially with regard to the subsequent ball mill grinding stage?

All those questions need to be answered in the process design phase, prior to selecting and sizing the key equipment.



Figure 2. Typical example of a state-of-the-art HPGR

SIZING KEY EQUIPMENT

The performance of HPGR primarily depends on the ore and its characteristics (Morley, 2006). Grinding tests are still indispensable to determine those characteristics and to predict the operational behaviour of the machine comminuting a certain material. The most important parameters are the specific throughput and specific energy consumption which allows selection of the appropriate HPGR for the required material and process parameters (Heinicke, 2016a and Gruendken, 2008). The specific energy consumption is a mass rate normalised value to describe the amount of energy transferred to the material in one single grinding pass.

$$W_{Sp,HPGR} = \frac{(P_{t,HPGR} - P_{i,HPGR})}{\dot{M}_{HPGR}} \quad (1)$$

where:
WSp,HPGR mass specific energy consumption of HPGR
Pt total power draw under load
Pi idle power draw
M ̇_HPGR total HPGR throughput equals fresh feed rate in open circuit operation
The Bond ball mill test (Bond, 1952) is a proven method to predict the performance of a ball mill. The power draw can be calculated respectively, using the following formula:

$$W_{Sp,BM} = W_i * k * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right) \quad (2)$$

where:
WSp,BM power draw of ball mill
Wi Bond work index as material specific parameter
k product of correction factors according to Bond
P80 80 per cent product size passing of ball mill
F80 80 per cent feed size passing of ball mill

If the formula is analyzed in an analytical way there are three influences to reduce the energy consumption which have different level of effect:
- reduce F80 at low impact

- reduce P80 at medium impact
- reduce work index at highest impact.

Figure 3 shows those effects on the throughput of a ball mill (varied parameters as per Table 1):

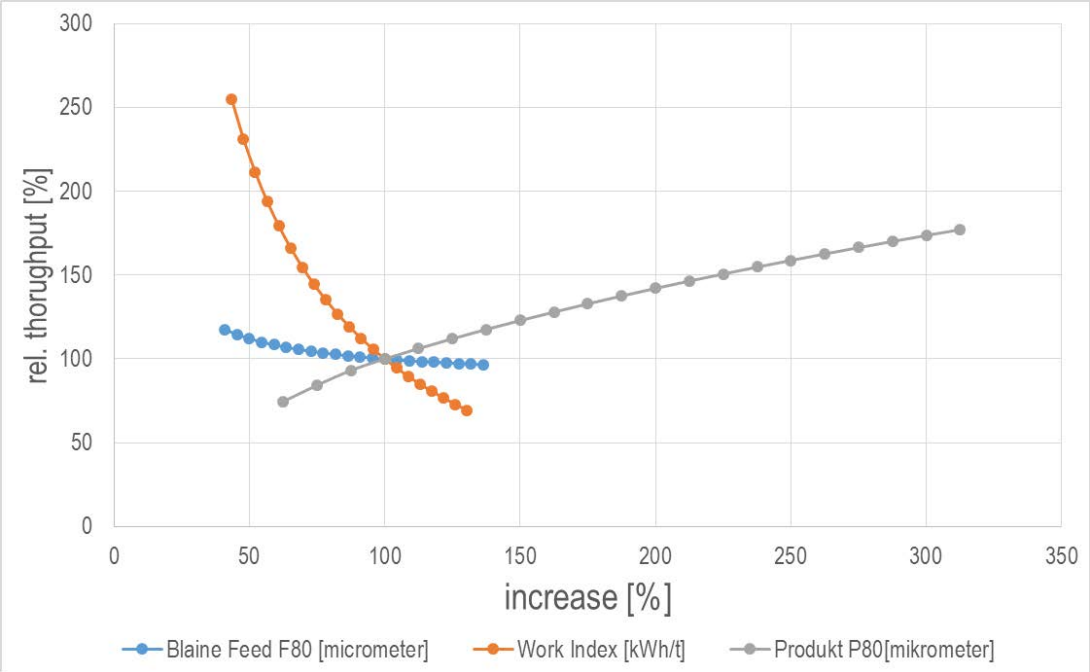


Figure 3. Effect on throughput of Bond parameters

Table 1. Input parameters for Bond variation graph of a brownfield plant (see also Povey, 2017)

Feed rate	466 t/h
Feed size F_{80}	11 mm
Product size P_{80}	0.181 mm
Mill power effective	3575 kW
Estimated Bond Wi	11.5 kWh/t

The total grinding energy according to the flow sheet shown in Figure 1 can be calculated as follows:

$$P_{TOTAL} = P_{HPGR} + P_{BM,1} + P_{BM,2} \quad (3)$$

where:

PTotal total grinding power consumption
PHPGRpower consumption of HPGR
PBM,1/2 power consumption of primary (1) and secondary (2) ball mill

The combination of (1) and (3) results in (4):

$$P_{TOTAL} = W_{Sp,HPGR} * \dot{M}_{HPGR} + W_{Sp,BM,1} * \dot{M}_{BM,1} + W_{Sp,BM,2} * \dot{M}_{BM,2} \quad (4)$$

where:

$\dot{M}_{BM,1/2}$ total primary (1) and secondary (2) ball mill throughput

$W_{Sp,BM,1/2}$ primary (1) and secondary (2) ball mill work index

If a mass split of 50 per cent is assumed in the magnetic separation stage, the masses are related as follows:

$$\dot{M} = \dot{M}_{HPGR} = \dot{M}_{BM,1} = \dot{M}_{BM,2} * 2 \quad (5)$$

where:

$\dot{M}$ fresh feed rate

Thus, the combination of (2), (4) and (5) results in (6):

$$P_{TOTAL} = \dot{M} \left\{ \begin{array}{c} \left(P_{t,HPGR} - P_{i,HPGR}\right) + W_{i,1} * k * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80,\mathrm{BM1}}}} - \frac{10}{\sqrt{P_{80,\mathrm{HPGR}}}}\right) \\ +W_{i,2} * k * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80,\mathrm{BM2}}}} - \frac{10}{\sqrt{P_{80,\mathrm{BM1}}}}\right) * 0{,}5 \end{array} \right\} \quad (6)$$

where:

$W_{i,1/2}$ Bond ball mill work index as material specific parameter of primary (1) and secondary (2) ball mill

k product of correction factors

In a given brownfield application, the installed power of the ball mills is fixed which means that the product of specific energy and maximum attainable throughput has to be the same for each mill at all times. Also, the transfer size to the downstream process after second ball mill is defined by the material characteristics and respective specifications of the downstream process such as liberation size and throughput. The product size of the HPGR, however, can be adjusted by increasing the hydraulic piston pressure in the machine. Thus, also the feed size to the primary ball mill can be controlled. An increase of the hydraulic pressure in the HPGR leads to an increased power draw of the HPGR roll drives as well (see Figure 4).

Moreover, the high pressure grinding regime leads to micro-fractures within the product as shown in Figure 5. Those micro-fractures reduce the strength of the ore fed to subsequent comminution machines. In the presented flow chart, they reduce the Bond ball mill work index of the material transferred from the HPGR to the primary ball mill. Thus, the throughput or the size reduction degree of the primary ball mill can be increased to fully exploit the installed power of the ball mill. It became clear that there is an optimization potential between energy efficient grinding in the HPGR and downstream ball mill grinding.

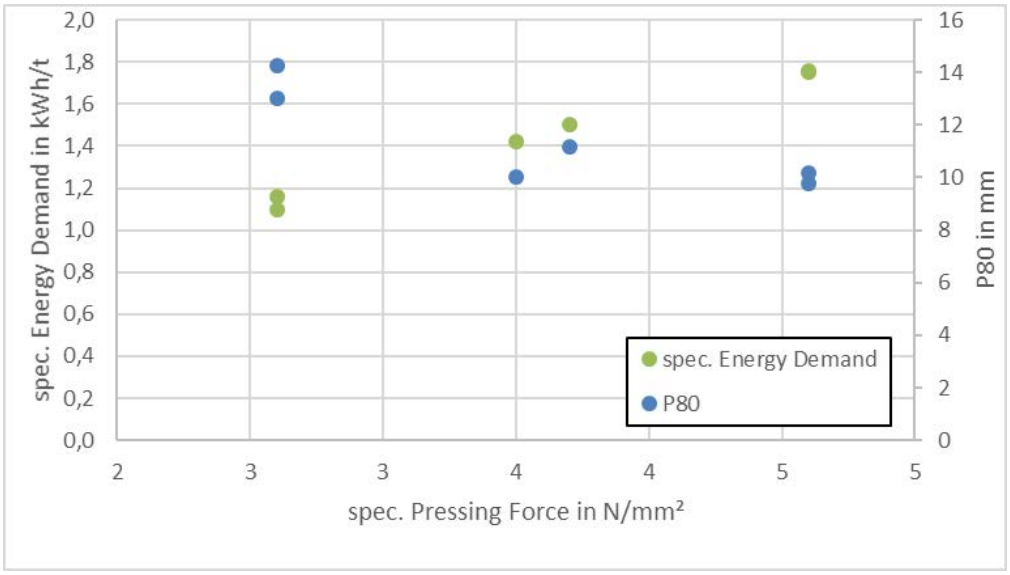


Figure 4. Correlation of specific hydraulic pressure and specific energy demand from a test series with iron ore



Figure 5. Example of a micro-fractured particle of a HPGR

Such an optimization has to include the whole downstream process. A simple increase of the throughput in the primary ball mill would mean that the second ball mill would receive a higher feed rate as well. It can be assumed that the micro-fracturing initiated by the HPGR will be exploited in the primary ball mill. Therefore, the secondary ball mill has to be designed considering a higher Bond ball mill work index than the primary one. The best way to avoid a potential overload of the secondary ball mill is to reduce the transfer size from primary ball mill. This affects the sorting behavior and impacts the optimum process as well. The micro-fracturation of the particle is known to increase the liberation degree and therefore can influence the magnetic separation (Michaelis, 1995). Again, the design of mass flows is influenced and need to be optimized. For this optimization, it is essential to understand of the differences between ball mill grinding and HPGR grinding in view to the downstream energy efficiency effects.

INFLUENCES ON BOND WORK INDEX USING HPGR

To assess the energy efficiency effect of HPGR, various Bond ball mill test series were performed (see also Brüggemann, 2019), all of them following the stipulations of Bond. The feed material for the Bond tests was a medium grained granodiorite from Kindisch (Germany) with a compression strength of σ¬D = 176 MPa, produced by a hammer mill with grate (HAZEMAG Unirotor 490/380), a single toggle jaw crusher (Retsch BB 250 XL) and an HPGR (Köppern HPGR 60/10–230 and HPGR 22/3), see Figure 6. In those three machines, the material is stressed in different ways, merely by compression in the jaw crusher and the HPGR or by blow and shear in the hammer mill.

Despite the upper limit of the feed size of the material for the tests was always the same (-3150 µm), the particle size distributions PSD vary significantly. The first mayor difference is the slope of the particle size distribution curve (see Figure 7). While the particle size curves distribution curves of the jaw crusher and hammer mill product in the respective size range show only minor differences, the slope of the HPGR product size distribution is shallower, which is a common observation for HPGR grinding (Heinicke, 2012).

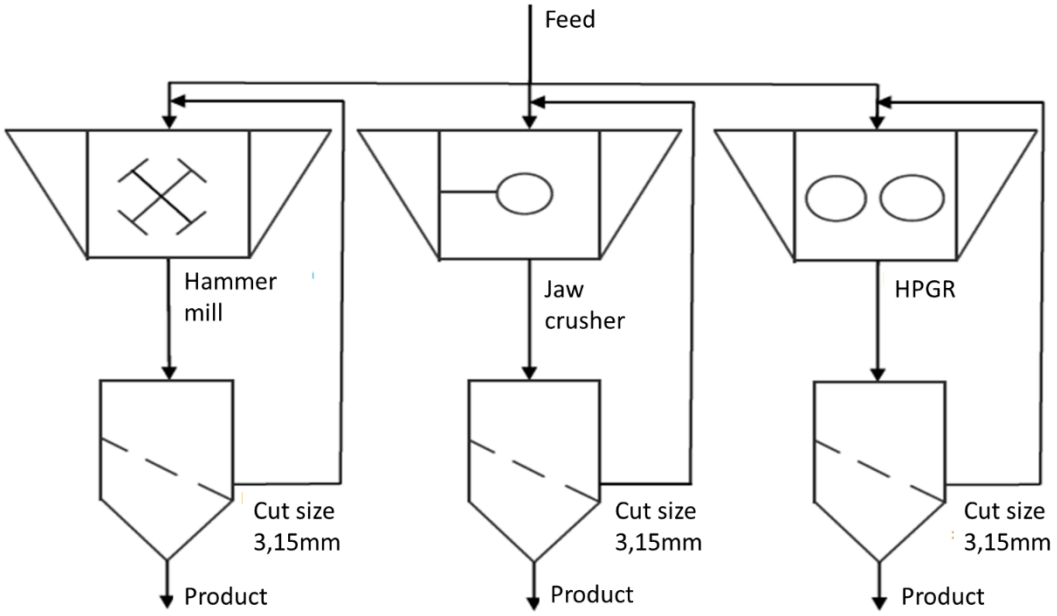


Figure 6. Test work set-up for preparation of sample

It has been well established, that among others the preparation of the feed material influences the results of the Bond test (Gonzáles, 2021; Weier and Chenje, 2018; Vizcarra and Wong, 2019) but the experimental error is usually small (Ballantyne and Giblett, 2019). The small experimental error was also confirmed in our own tests with the scatter of three repeated tests being around 0.4 per cent (±0.07 kWh/t of a medium 18.08 kWh/t). Therefore, the Bond test is used also in this paper to assess the influence of micro-fractures generated by HPGR onto the grindability. Initially the Wi values were assessed for the PSD of the materials as obtained by just screening at a cut size of 3150 µm, see Figure 7. The resulting values of the Bond test are given in Table 2. They showed a reduction of the Bond work index of up to 8 per cent for the material ground by the HPGR.

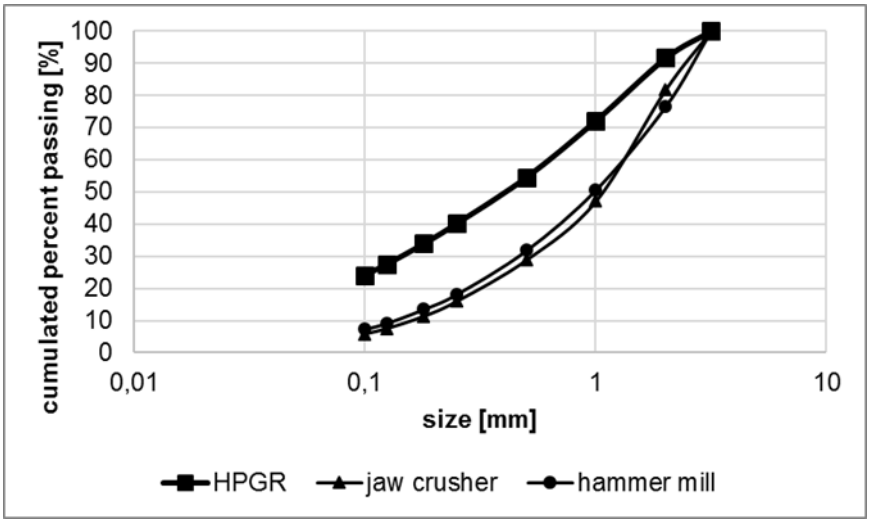


Figure 7. Particle sizes for different preparations

Table 2. Overview of Bond work index for different feed preparations

Preparation aggregate	W_i [kWh/t]
Hammer mill	17.89
Jaw crusher	18.09
HPGR	16.79

This reduction included potential effects of micro-fractures caused by HPGR as well the difference of the three feed materials. To reduce the influence of the differing PSD distributions, the product materials of jaw crusher and hammer mill were screened and classified into eight size fractions between 0 and 3150 µm. For comparison, the same procedure was also conducted for the original fresh secondary crushed material from the quarry (fraction -3150 µm directly separated from original feed size -32 000 µm without further comminution). Afterwards, the mass per each fraction was adjusted to the shear of the respective fraction in the HPGR product. The modified fractions of each feed material were combined again and thoroughly blended and homogenized, finally well matching the particle size distribution of the HPGR product.

With the three modified feed materials, the Bond tests were repeated. The results are presented in Table 3. The reduction of the Bond work index increased even further to 15 per cent which indicates a remarkable effect for the power draw of a ball mill installed after the HPGR.

Table 3. Overview of Bond index for different feed preparations at same feed PSD

Preparation aggregate	W_i [kWh/t]
Hammer mill screened to match HPGR	19.34
Jaw crusher screened to match HPGR	18.34
Fresh feed screened to match HPGR	18.32
HPGR	16.79

A further effect of an HPGR installation prior to ball milling in ore processing can be seen in the high comminution selectivity, as shown in Figure 8 (Kühnel, 2021). During size reduction in the sample preparation for the Bond tests deploying different machine types, the coarser particles report to the finer classes depending on their mineral content and the type of stressing introduced by the comminution machines. While selectivity in comminution is generally limited with machines such as jaw or cone crushers, machines deploying the confined bed comminution principle such as HPGRs may support such selectivity as shown in Figure 8. Here, the fine fractions (-1 mm) exhibit a remarkable reduced quartz content while the iron is enriched.

A sample collected from such material for the Bond test by just classifying the -3150 µm fraction would simply reflect the increased content of the softer iron containing minerals. Assessing such a sample in a Bond test may again result in overdesigning mills for a production process which do not account for the special comminution characteristics with an HPGR. This effect has not been quantified so far as the preparation method of material for the Bond tests is not further specified and typically does not reproduce the real production conditions appropriately for HPGR.

Those effects have to be carefully analyzed for HPGR test work design. Typical vendors of HPGR have this ability and knowledge and will consult the individual clients accordingly for the individual ore type of the project (Heinicke, 2016b).

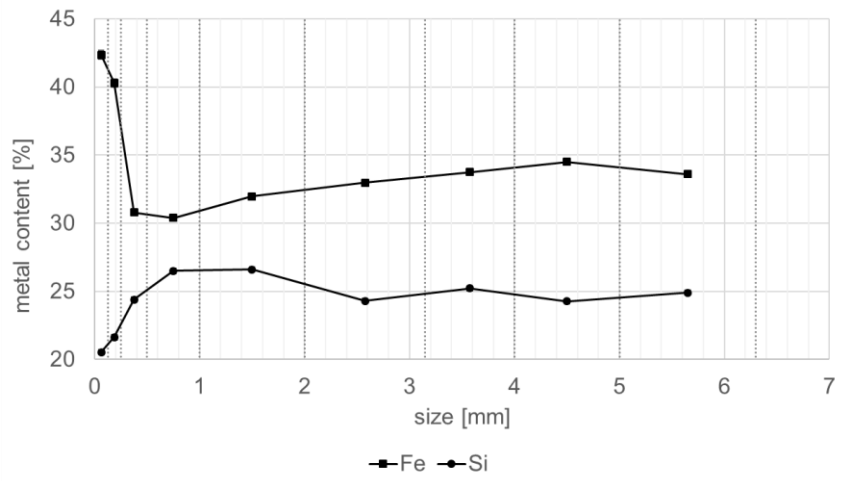


Figure 8. Selective comminution effects in feed material processed by HPGR for an ore with high quartz and low iron contents

CONCLUSIONS

The grinding with HPGR showed remarkable effects on the downstream energy efficiency in ore processing. To quantify those effects, common test routines according Bond may be overstating the actual specific energy consumption as they are influenced by size distribution, particle weakening and selective grinding effects of HPGR. A careful planning of HPGR test series has to be done to balance the effect to downstream processes correctly. As the ores will differ from project to project this procedure shall be addressed by client and vender for each individual project.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by Köppern within a research cooperation with Technical University of Freiberg. The authors would like to thank Köppern for the right to publish this paper and Jonas Brüggemann for the excellent test work performed within his thesis.

REFERENCES

Ballantyne, G. and Giblett, A. (2019). Benchmarking comminution circuit performance for sustained improvement. SAG Conference, Vancouver.

Bond, F. C. (1952). The third theory of comminution. *Mining Engineering*, 484-494.

Brüggemann, J. 2019. Diskretisierung des Bondtest für GBWM Anwendungen. Masterarbeit. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Gonzáles, G. G., Coello-Velazquez, A l, Fernandez, B, Menendez-Aguado, J. (2021). multivariate analysis of the ball mill bond's standard test on 2 tantalum ore. *Metals*, 11, 1606.

Gruendken, A, Matthies, E, vanderMeer, F. D. (2008). Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls. Proceedings of Comminution 08, pp 1-37.

Heinicke, F. 2012. Beitrag zur Modellierung der Zerkleinerung in Gutbettwalzenmühlen. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Heinicke, F., Guenter, H., Kamptner, A. (2016a). How to avoid errors in HPGR product characterization. Proceedings of Procemin, in Santiago de Chile, pp 1-11.

Heinicke, F., Lieberwirth, H., Guenter, H. (2016b). Modelling of HPGR Edge recycling data with progressive grinding data. Proceedings of Comminution, pp 1-11.

Klymowsky, R., Patzelt, N., Knecht, J., Burchardt, E. (2002). Selection and sizing of High Pressure Grinding Rolls. SME Handbook, pp 1–40.

Kühnel, R. (2021). Untersuchungen zur trockenen Aufbereitung von Magnetiterzen unter besonderer Berücksichtigung des Trennverhaltens im Luftstrom. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Michaelis, H. (1995). Real and potential metallurgical benefits of HPGR in Hard Rock Ore Processing. Randol Conference, pp. 1-9.

Morley, C. (1995). The case for High Pressure Grinding Rolls. Randol Conference, pp. 1-16.

Morley, C. (2006). Flowsheets for HPGR. SAG Conference, pp. IV172-IV189.

Povey, B. C., Nol, Lifanov, D. (2017). The introduction of HPGRs to the SGOK magnetite plant in Russia. Proceedings of Metplant, pp 1-19 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Schönert, K. 1966. Einzelkorn-Druckzerkleinerung und Zerkleinerungskinetik. Untersuchungen an Kalkstein-, Quarz-, und Zementklinkerkörnern des Größenbereiches 0,1–0,3 mm. Dissertation. TH Karlsruhe.

Schönert, K. (1988). A first survey of grinding with high-compression roller mills. *International Journal of Mineral Processing*, 22, 401-412.

Vizcarra, T., Wong, B. (2019). Testwork variabililty – implications for grinding circuit design. SAG Conference, Vancouver.

Weier, M. L., Chenje, T. (2018). Accuracy of the Bond ball mill test and its implications. 14th International Mineral Processing Conference & 5th International Seminar on GeoMetallurgy. Santiago, Chile, Procemin-Geomet.

MADENCİLİKTE KARIŞTIRMALI DEĞİRMEN KULLANIMI

USE OF STIRRED MILLS IN MINING

B. Akkaya *, I. Toroglu, S. Kizgut, M. Bilen, S. Yılmaz

[1] *Zonguldak Bülent Ecevit Universitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü*
*(*Sorumlu yazar: barisakkaya2010@gmail.com)*

ÖZ

Bu çalışmada, karıştırmalı değirmenlerin genel özellikleri ve madencilikteki öğütme işlemlerinde kullanımının getirdiği teknik ve ekonomik avantajlar üzerine bir inceleme yapılmıştır. İlk olarak karıştırmalı değirmenler hakkında genel bilgiler verilmiş ve neden bu değirmenlere ihtiyaç duyulduğu irdelenmiştir. Bunun için gerekli olan karıştırmalı değirmenler ile mevcut öğütme sistemleri arasındaki gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Son olarak da karıştırmalı değirmenlerin mevcut öğütme işlemleri içerisindeki mevcut payı ve gelecekteki yeri tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Öğütme, karıştırmalı değirmen, enerji

ABSTRACT

In this study, a review on the general characteristics of stirred mills and the technical and economic advantages of their use in grinding processes in mining has been made. Firstly, general information about stirred mills is given and why these mills are needed is analyzed. Necessary comparisons are made between the mixing mills required for this purpose and existing grinding systems. Finally, the current share of stirred mills in current grinding processes and their future place are discussed.

Keywords: Grinding, stirred mill, energy

GİRİŞ

Bir malzemenin tane boyutunun incelmesi ona yüksek homojenlik, yüksek yüzey alanı ve bununla birlikte kolay yanma, tepkime ve çözünme gibi belirgin teknolojik üstünlükler sağlamaktadır. Çok ince malzemeye olan ihtiyaç gelişen teknoloji ile giderek artmaktadır. Bunun yanında cevher zenginleştirme işlemlerinde istenen serbestleşme derecesi için gerekli minimum serbestleşme boyutu giderek tüketilen kaynaklar nedeniyle azalmaktadır. Serbestleşme için gerekli boyutun incelmesi de ince öğütmeye olan talebi arttırmaktadır.

Madencilik endüstridinde yeni teknolojilerin geliştirilmesi uzun zaman alan bir süreç olduğu için 1950'lerden beri uygulama alanı bulabilen Karıştırmalı değirmen (KD) leri yeni bir teknoloji olarak kabul etmek yanlış olmaz (Mankosa vd., 1986). Öğütme cevher hazırlama işlemleri içinde enerji tüketiminin % 40'lık bir kısmını oluşturur (Nikolay vd., 2021). Öğütmeden istenen ürün incelik talebi arttıkça, enerji tüketimi bu talebin üstel bir değerinde artış gösterir. Öğütme işleminde geleneksel olarak aktarmalı ortamlı değirmenler kullanılır ve bunların başında bilyalı değirmenler gelir.

Geleneksel öğütme işleminde elde edilen ürünün tane boyutu genel olarak ağırlıkça % 80'inin geçebileceği tane boyutu olarak kabul edilir ve d80 olarak kabul edilir (Jankovic ve Valery, 2002a). Bu boyut 75 μm ve daha iri ise bilyalı değirmenler kullanışlı olabilirler ancak bu boyuttan daha fazla incelik istenirse

enerji tüketimi açısından ekonomik olmaktan uzaklaşmaktadırlar. Bu durumda öğütme işleminde yeni kabul edilebilecek olan KD teknolojisi çok daha ince ürün boyutları için bile verimli olabildiği için giderek artan bir talep görmektedir.

Öğütmede enerji kullanımının yüksek maliyeti, çelik medya maliyeti, öğütme medyası aşınma oranı ve değirmenin karmaşık tasarımı, öğütme malzemesinin yüksek maliyetinin nedeni olan sermaye maliyetinde bir artışa neden olmaktadır (Borzone vd., 2019). Bu faktörlerin üstesinden gelmek için araştırmacılar, çelik medyanın yerine daha geleneksel bir tür bularak ya da öğütme odasının yapısını değiştirerek enerji tüketimini azaltmanın yollarını bulmuşlardır

Geleneksel Değirmen Teknolojisi

Yaş ve ultra ince öğütme için üçüncü nesil öğütme değirmenleri kullanılmadan önce, aktarmalı ortamlı tamburlu değirmenler kullanılıyordu. Devir sayısı, ortamın öğütülmesi için güç tüketimini kontrol eden bir değişkendir. Bu nedenle, orta derecede daha küçük bir güç yoğunluğuna sahiptir. Ancak, ultra ince öğütme için, öğütme için gereken süre oldukça uzundur. Çelik çubuklar (çubuklu değirmen durumunda), bilyalar (bilyalı değirmen durumunda) veya cevherin kendisi (otojen değirmen durumunda) gibi öğütme ortamlarından oluşan bir tamburlu değirmen olan geleneksel değirmen, dönen bir gövdenin çalışma olgusuna sahiptir ve verilen hareket değirmen gövdesine yüklenmektedir. Hareketin türü, her bir ortam parçası arasındaki mesafe, miktar ve parçacığın boyutu, tamburlu değirmende öğütmeyi etkileyen bazı değişkenlerdir. Bir cevher tanesinin öğütücü ortam (bilyalar, çubuk, vb.) arasındaki bir bölgeye girmesi ve girdikten sonra bir kırılma olayının meydana gelme olasılığı öğütme derecesini tanımlar. Genel olarak, 20 mm boyutundaki bir besleme ince öğütme olarak kabul edilir ve 150 mm kaba öğütme olarak kabul edilir. Benzer şekilde, yuvarlanan değirmenler 5 ila 250 mm ve 25 ila 300 µm arasındaki tane boyutlarını küçültür (Borzone vd., 2019).

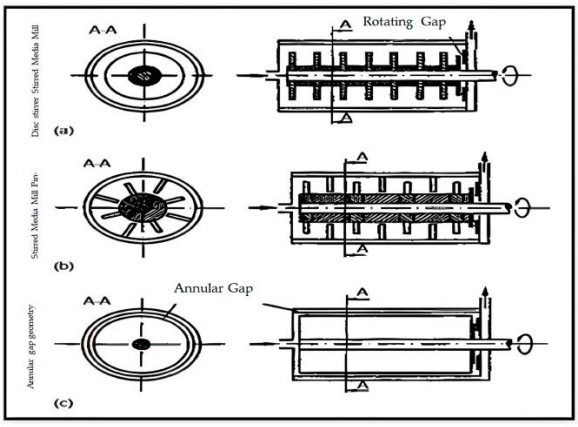
Karıştırmalı Değirmen

Dikey sabit öğütme hazneleri ilk olarak 1928 yılında yavaş dönen bir karıştırıcı ile tanıtılmıştır. 1950 yılında, metal ve seramik öğütme için 6 m/s çevresel hıza sahip aşındırıcılar üretilmiştir. Bu karıştırmalı ortam değirmenleri düşük hıza sahiptir. Aynı zamanda, 1948 civarında, boya endüstrisi için 8 ila 20 m/s çevresel hıza sahip aşındırıcılar geliştirilmiştir. Dikey haznenin uzunluğu ve çapının oranı artırılırken daha küçük öğütme ortamına sahip olmuştur. Bu değirmenler yüksek hızlı karıştırmalı ortam değirmenleridir. 1990-1991'de, araştırmacılar, metalik işlemlerde malzemenin yeniden öğütülmesi için ekonomik bir seçeneğe sahip olmak amacıyla, %80'e kadar ürün öğütme için verimli bir yöntem olduğunu kanıtlayan yatay değirmenleri ortaya çıkardılar. 1994 yılında, düşük maliyetli öğütme ve uygun maliyetli aşınma malzemesi sağlayan ilk tam ölçekli MW IsaMill kurulmuştur. Karıştırmalı değirmenler silindirik bir değirmen gövdesi ve bu gövde eksenine yerleştirilmiş bir elektrik motorundan tahrikli bir karıştırıcıdan oluşur. Bu karıştırıcının değirmen gövdesine konulan farklı malzemelerden yapılmış öğütücü ortamı ve öğütülecek malzemeyi birlikte karıştırması mekanizmasıyla öğütme yapan öğütücü cihazlardır. Karıştırmalı değirmenlerin geleneksel değirmenlere göre en temel farklılığı, öğütülecek malzemeye kırma etkisinin doğrudan bu karıştırıcı vasıtası ile verilmesidir. Diğer geleneksel aktarmalı ortamlı değirmenlerde bu etki değirmen gövdelerinin hareketi ile dolaylı olarak malzemeye iletilmektedir. Öğütme işleminin gerçekleşmesi için en önemli durum malzemeyi oluşturan bireysel bir tanenin kendisini tutan iç kuvvetlerin yenilmesiyle elde edilir (Hacıfazlıoğlu, 2015). Bu iç kuvvetlerin yenilmesi için gerekli olan etki tanelere çarpma etkisinin verilmesi ile sağlanır. Çarpma kuvveti için malzemeye çarpması beklenen öğütücü ortama momentum etkisi kazandırılmalıdır. Momentum kütle ile hızın çarpımıdır. Doğrudan tahrikin verilmediği geleneksel aktarmalı ortamlı değirmenlerde öğütücü ortam taneleri büyük olabildiği için momentum için gerekli kütle etkisi sağlanır ve taneler düşük bir hız ile yeterli momentum ile çarpma etkisini malzemeye iletir ve belirli bir inceliğe kadar etkin bir şekilde ufalama işlemi gerçekleştirilebilir. Karıştırmalı değirmenlerde malzeme doğrudan tahriki karıştırıcıdan aldığı için öğütücü ortamın boyutu sınırlıdır. Bu durum değirmenin de boyutunu sınırlandırmaktadır. Çünkü doğrudan büyük bir öğütücü ortam ve malzeme şarjını karıştırmak önemli bir problemdir. Bu durumda kütle açısından boyutu nedeniyle

sınırlandırılan öğütücü ortama istenen momentumun sağlanması için yüksek hız kazandırılmalıdır. Geleneksel yönteme göre çok daha fazla sayıda olan öğütücü ortam taneleri, yüksek hızda nispeten daha az bir gövde hacmi içerisinde öğütme işlemini gereçekleştirir. KD'lerde öğütme etkisi genel olarak aşındırma etkisindedir. Wills'e (1985) göre aşındırma etkisi geleneksel ortamlı değirmenlerdeki etkin darbe ve baskı kuvvetlerine göre çok daha fazla ince tane üretebilmektedir. Öğütücü tasarımlarında önemli parametrelerden biri enerji yoğunluğudur ve KD'lerde bu değer 300 kWh/m^3'e kadar çıkabilmektedir (Jankovic ve Valery, 2002b). Mineral endüstrisinde karıştırmalı değirmenlerin ortaya çıkmasıyla mineral serbestleştirme boyutlarına ulaşmak için gerekli olan ince öğütme derecesine ulaşılabilinmiştir. Bilyalı değirmen için 20 kW/m3 olan güç yoğunluğuyla karşılaştırıldığında, karıştırmalı değirmen 40 ila 300 kW/m3 arasında daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahiptir. Bu, aynı enerji girdisi için tesis alanı gereksinimini azaltır. Geleneksel öğütme devrelerine, son derece hızlı ve dikkate değer bir etkinlikle uyum sağlamışlardır. Karıştırmalı değirmenlerin ana uygulama alanı mineral endüstrisidir ve 15 µm'nin altındaki parçacık boyutuna kadar mineralleri serbestleştirmek için ultra ince bir boyut üretme kapasitesine sahiptir. Genel olarak, manyetit, bakır, kurşun, çinko ve platin minerallerinin serbest bırakma boyutları, karıştırmalı değirmenler tarafından kullanılabilen ultra ince boyutlardır (Gupta ve Yan, 2013). Bu değirmenler popülerdir çünkü malzemeleri geleneksel bilyalı değirmenlere göre benzer bir sonuca öğütmek için %30-40 daha düşük enerji kullanırlar. Ayrıca daha az para gerektirir ve önemli ölçüde daha küçük karbon ayak izlerine sahiptirler. Karıştırmalı değirmenler, bilyalı değirmenlere kıyasla darbe enerjisi yerine kesme enerjisine öncelik verir. Bu durum, 50 µm ortam boyutundaki P80 ile ince öğütmeyi, ince ortam boyutuyla birleştirildiğinde daha enerji verimli hale getirir. Karıştırmalı değirmenlerde, değirmen gövdeleri yatay veya dikey konumda sabit olarak monte edilir. İç karıştırıcının hareketi yük momentumunu verir. Karıştırmalı değirmenlerde 15 µm'den küçük taneler ultra ince öğütülür (Wills, 2016).

Karıştırmalı Değirmen Tasarımı

Değirmenler, değirmen haznesi, karıştırıcı geometrisi ve ayırma cihazına dayanan çeşitli tasarımlarla ayırt edilir. Öğütme ortamının değirmenden çıkmasını ve elek tarafından öğütme odasında tutulmasını önlerken, ayırıcı cihaz ürünün serbest akışı için çok önemlidir. Birkaç yüz mikrondan daha küçük öğütme ortamlarının geliştirilmesiyle birlikte, döner boşluklar pahasına elekler popülerlik kazanmıştır (Stehr, 1988). Elekler sabittir, öğütme haznelerinde ölü bölgeler oluşturmaz ve elek kartuşları öğütme haznesini tamamen boşaltmadan ortam değiştirme olanağı sağlar. Santrifüj kuvvetleri, öğütme ortamını elekten ayrı tutmaya yardımcı olur. Bu, özel bir tür ayırıcı tekerlek sınıflandırıcı kullanılarak bile sağlanabilir. Karıştırmalı ortam değirmeninin yapımı, karıştırıcı geometrisine ve değirmen haznesine göre Şekil 1'de da gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı tip değirmenlerin karakteristik hazne ve karıştırıcı geometrisinin şematik diyagramı (a) Disk karıştırıcılı Karıştırılmış Ortam Değirmeni; (b) Karıştırılmış Ortam Değirmeni Pimli-karşı pimli karıştırıcı; (c) Dairesel boşluk geometrisi.

- Disk karıştırıcı Karıştırmalı Ortam Değirmeni
- Karıştırmalı Ortam Değirmeni Pimli-karşı pimli karıştırıcı
- Dairesel boşluk geometrisi

En basit karıştırıcı geometrisi olan diskli karıştırıcılar, delikli, yarıklı vb. olup kaprisli bir şekilde sabitlenirler. Karıştırıcıdan öğütme ortamına enerji aktarımı için yapışma ve yer değiştirme kuvvetlerini kullanırlar. Benzer şekilde, pim-karşı-pim karıştırıcı öğütme ortamını hareket ettirmek için yer değiştirme kuvveti kullanır. Dairesel boşluk geometrisine sahip bir karıştırmalı değirmen, enerji aktarımı için yapışma kuvvetlerini kullanır ve en yüksek güç yoğunluğuna dairesel boşluklu değirmenin öğütme haznesi ile ulaşılır. En yüksek güç yoğunluğu için pimlerle donatılmıştır.

Karıştırmalı Değirmenlerin Çalışma Prensibi

Stehr, 1988'de yatay ve dikey karıştırmalı ortam değirmenlerini göstermiştir (Stehr, 1988). Ona göre, en homojen öğütücü ortam dağılımını üreten öğütme değirmeni, öğütme haznesinin etkin kullanımında daha fazla avantaja sahiptir. Sürekli besleme değirmen gövdesi ön yüzünden gerçekleştirilirken, süspansiyon öğütme haznesine itilir. Öğütme silindiri içine yerleştirilen tahrikli mil ve karıştırıcı eleman, değirmen gövdesi içerisindeki öğütücü ortam ve öğütülecek malzeme için gerekli hareketi üreterek öğütme işlemine yardımcı olur. Diskler deliğin içine yerleştirilir. Disk uçlarının 20 ms-1'e varan çevresel hızları kullanılır ve bu da yerçekiminin 50 katından daha fazla santrifüj ivmesi ile sonuçlanır. Boyut küçültme mekaniğine göre, spirallerin, disklerin veya pimlerin dönme ve santrifüj etkisi, ortam ile bulamaçtaki cevher parçacıkları arasında önemli bir yer değişimi kaymasına neden olur. Yüksek kesme hızı, aşındırıcı bir etki ile bulamaçtaki mineral parçacıklarının boyutunu düşürür. Bilyalı değirmenlerin aksine, karıştırmalı değirmenler parçacık boyutunu küçültmek için kırma veya helezonik kuvvetler kullanmaz. Hem akışkan yataklar hem de yerçekimine bağlı yataklar, 90'lı yıllarda Helsinki, Finlandiya'da üretilen Metso karıştırıcılı dikey değirmenlerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Öğütme ortamı, öğütme haznesi duvarına doğru karıştırıcı diske yaklaştırılır. Yine de, öğütme ortamının çapının yarısından daha az bir genişliğe ve ağ boyutuna sahip döner ayırma boşluğu veya bir elek veya belirli bir santrifüj ayırma nedeniyle değirmende kalırlar. Sürekli işlem nedeniyle, malzemeler karıştırıcı şaftın yakınında hareket ederek öğütme ortamının dönme hareketini oluşturur. Yerçekimi ivmesi yalnızca karıştırıcı şaftın bitişiğinde oluşur ve burada santrifüj ivmesi oldukça küçüktür. Lagrangian yaklaşımı, öğütme ortamının hesaplanan hız alanı içindeki hareketini takip etmek için kullanılır. Boncuğun hesaplanan alanın sınır çizgisine temas etmesiyle oluşan merkezi çarpışmalar, öğütme sürecinin önemli bir parçası olan kinetik enerji transferine neden olur. En yüksek enerjinin depolandığı bölge öğütme bölgesi olarak adlandırılır. Öğütme bölgesi, tahminen bir inç kalınlığında dış ucun diskinin yakınında yer alır (Kwade ve Schwedes, 2007).

Dikey konumlandırılmış bir karıştırmalı ortam değirmeninde öğütme ortamı hareketi kavramı ilk olarak Bosse tarafından yayınlanmıştır. Burada, ortamın diskli karıştırıcıya yaklaşma, öğütme haznesi duvarına hareket etme ve karıştırıcı şaftına geri dönmesi arasında ileri geri hareket etmesine neden olan döngüsel bir hareket oluşmaktadır.

Karıştırmalı değirmen, öğütme haznesinden yukarı veya yatay malzeme akışını temsil edecek şekilde dikey veya yatay olarak konumlandırılabilir. Karıştırmalı değirmenler, değirmen hizalama ve karıştırma çerçevesi varyasyonlarına ek olarak enerji yoğunluğu bakımından da değişiklik gösterebilir. Elenmiş silika kumu, çelik silindirler, çelik bilyeler veya seramik boncuklar yaygın öğütme ortamlarıdır (Young, 2019). Dönen ayırma boşluğu, genişliği öğütme ortamının yarısının çapından daha az olması gereken öğütme ortamını değirmen içinde tutar. Ürün sıcaklığa duyarlı olduğunda, öğütme haznesi rotor ile birlikte soğutulmalıdır. Karıştırmalı ortam değirmenleri, son derece yüksek enerji girdilerine sahip olma avantajına sahiptir.

Öğütme ortamı ve malzemeler öğütme haznesi içinde hareket ettikçe, dikey yapısı nedeniyle malzeme döner disk etrafında sınıflandırılır. Daha ince taneler disk açıklığından yukarı doğru hareket eder ve ufalanmamış taneler, yerçekimi nedeniyle yerinde kalan öğütme ortamı ile birlikte uzun süre hazne çevresinde kalır. Üstte bulunan harici sınıflandırıcı, öğütme odasından hiçbir taneciğin çıkmamasını sağlar. Bunun dışında herhangi bir harici sınıflandırıcı kullanılmamaktadır. Değirmenin önünde, ürün ince tanelerinin elimine edilmesine ve bulamaç-katı içeriğinin hedeflenen değirmen gereksiniminde korunmasına yardımcı olan bir siklon bulunmaktadır. Devre ürünü, değirmen tahliyesi ve siklon taşmasının toplamıdır.

Karıştırmalı Değirmenlerde Ortam Türleri

Kullanılacak uygun öğütme ortamını tespit etmek kritik önem taşır. İşlenecek öğütme malzemesinin türü ve istenen incelik, boyut ve ortam türü ile ortamın yeterliliği ve sertliği, dikkate alınması gereken önemli unsurlardan bazılarıdır. Karıştırıcının geometrisi, öğütme odasının geometrisi, verim, çevresel hız ve çalışma yöntemi gibi işletim faktörleri, çap, yoğunluk, sertlik ve doldurma oranı gibi öğütme ortamı özellikleri ve bir bütün olarak besleme malzemesi, parçacıkların boyut dağılımı (sertlik, konsantrasyon, yoğunluk) üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Üst boyutta parçacık kırılmasını sağlarken, büyük bir ortam boyutunun (6 mm) benimsenmesi değirmenin iç parçalarında önemli ölçüde aşınmaya yol açmıştır.

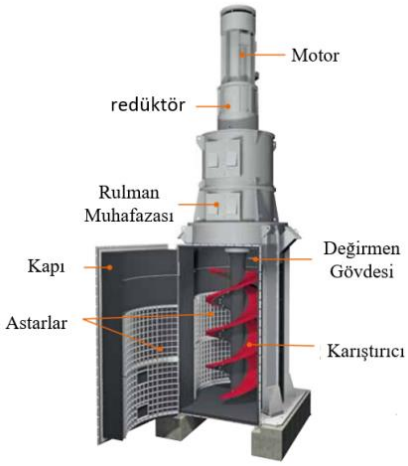
Cam, seramik ve çelik bilyeler, zirkonyum ve nehir kumu, karıştırmalı değirmenlerde öğütme ortamı olarak kullanılmıştır. Ortam boyutu 25 mm'den 6 mm'ye kadar çelik bilyalar ve vertimill ve kule değirmen durumunda 1 mm'den 5 mm'ye kadar silipebler olabilir. Yüksek dereceli alümina ve kum ortamı SMD, Metso, Finlandiya ve Netzsch, Selb, Almanya/IsaMill, Brisbane City, Avustralya'da kullanılmaktadır.

Öğütücü medyanın performansının yanı sıra maliyetine de odaklanıldığında, 25 mm'nin altındaki öğütücü ortam boyutları için daha maliyetli hale gelir ve kullanımlarında bir kısıtlamaya neden olur. Ancak bu durum, döküm medya ve çelik bilyelerin kullanılmaya başlanmasıyla aşılmıştır. Öğütücü ortam olarak demir içeren veya içermeyen maddeler kullanılabilir. Demir içermeyen maddeler arasında silika kumu, düşük dereceli seramik boncuklar ve yüksek dereceli alümina bilye ve boncuk gibi maddeler bulunur. Düşük maliyetli yerel öğütücü ortamın benimsenmesi uygulamaya yeterli özgül enerji sağlayabilirken, Öğütücü ortamn kırılması ve değirmen aksamının aşınması öğütücü ortamı ticari açıdan uygunsuz hale getirebilir. Daha yüksek kaliteli ortamlar daha küçük ekipman boyutlarının da önünü açabilir.

Karıştırmalı Değirmen Tipleri

Kule Değirmen (Tower Mill)

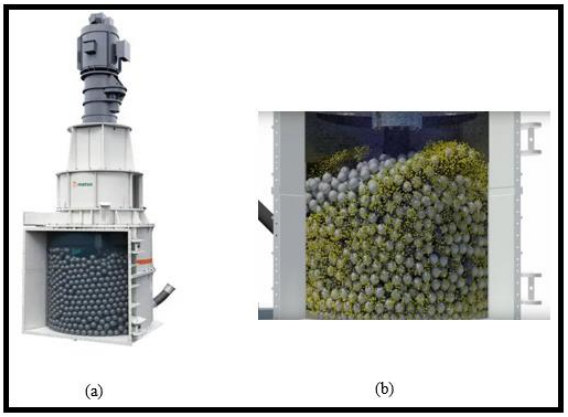
Japonyada Kubota firması tarafından üretilmiş olan ilk düşük hızlı Karıştırmalı Değirmenlerdir. Bu değirmenler, yüksek geri dönüşlü kapalı devre çalışan öğütme sistemleri için tasarlanmışlardır ve öğütücü ortam olarak 10-12 mm çaplı çelik öğütücü ortam kullanılmaktadır (Yıldırım ve Kaytaz, 1996). Bu değirmenler ile 50 ton kapasite ile 70 µm'dan ince öğütülmüş ürün elde edilebilir. Çelik öğütücü ortam yerine seramik bilya veya abrasif mineral kökenli öğütücü ortam kullanılabilir. Bir gövde ve öğütücü ortamı karıştırmak için dikey konumlandırılmış spiral bir karıştırıcıdan oluşmuştur. Genellikle yaş öğütme uygulaması yapılmaktadır. Besleme malı pulp halinde hazırlanır ve değirmenin üst kısmından beslenir ve öğütülen bulamaç halindeki malzemenin yukarı doğru hareketi bir pompa vasıtasıyla sağlanır. öğütme sırasında incelen taneler hep yukarı doğru taşma eğiliminde iken, iri taneler değirmen gövdesi içinde alt kısmı doldurmuş öğütücü ortam içine doğru çökelirler. Öğütücü ortam spiralin hareketi ile gövde içerisinde yukarı doğru hareket eder ve bu hareket sırasında malzemeyi aşındırma etkisi ile öğütür. Öğütücü ortam en üst noktaya geldiğinde spiral ile gövde arasındaki boşluktan tekrar gövde alt bölmesine düşer (Katırcıoğlu, 2010). Şekil 2'de kule değirmen gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. Kule değirmen (Eirich TowerMill, 2018)

Dikey Değirmen (Verti Mill)

Tasarım olarak Kubota kule değirmenine benzer tasarımında olup Swedala firması tarafından imal edilmiştir. 1990'lı yılların başlarında sektöre dahil olmuştur. Şekil 3'de vertimil genel görünümü ve öğütücü ortam hareketinin gösterimi verilmiştir.



Şekil 3. (a) Dikey değirmen genel görünümü (b) öğütücü ortam hareketi (Metso, 2013)

Stirred Media Detritor (SMD)

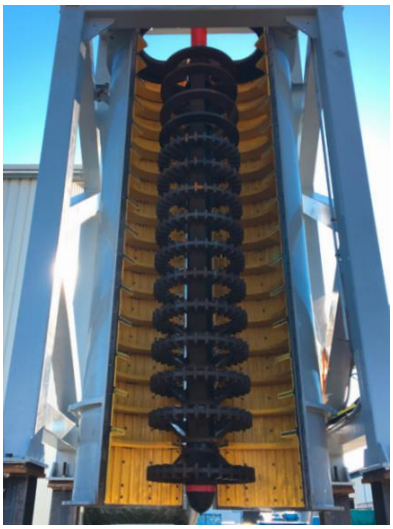
Bu tür değirmenler akışkanlaştırılmış bir kum ortamını kullanan ince ve çok ince öğütme için dikey olarak tasarlanmış aşındırma değirmenleridir. Bir ana gövde içerisinde merkezi bir şaft ve bu şaft üzerinde karıştırıcı amaçlı pinlerden oluşmuştur. Özellikle öğütücü ortam nedeniyle kirlenmenin istenmediği kaolin ve kireç öğütme uygulamalarında ve ayrıca kurşun çinko tesislerinde olmak üzere bir çok uygulaması mevcuttur. Bu değirmenlere beslenen malzeme genel olarak d_{80} boyutu 100 µm veya daha incedir ancak bazı durumlarda daha iri de olabilir. Açık ve kapalı devre olarak çalıştırılmaya uygun öğütücü cihazlardır (Metso, 2013). Metso Mineral ltd tarafından geliştirilmiştir. yükseklik/çap oranı 1:1, karıştırıcı hızı 11 m/s, çok ince öğütmede besleme malı d_{80} boyutu 45 µm, ürün d_{80} boyutu 7.5 µm olabilir., özgül enerji tüketimi 34-37 kWh/t'dur. öğütücü ortam boyutu 1-2 mm'dir. En büyüğü 355 kW'lık bir motor gücü ile tesis edilmiştir (Katırcıoğlu, 2010). Şekil 4'de karıştırmalı ortam aşındırıcısı resmi gösterilmiştir.



Şekil 4. Karıştırmalı ortam aşındırıcısı resmi (Metso, 2013)

Outotech HIGmill

Bu değirmenler bir gövde, diskli karıştırıcılı şaft, gövde iç kısmına bağlı statik disklerden oluşmuşlardır. Öğütücü ortam değirmen gövdesi etkin hacminin % 70'ne kadar doldurulur. Değirmene malzeme beslenmesi, gövde altındaki bir bağlantı ile yapılır. Malzeme yukarı doğru hareketi boyutnca öğütülür. Öğütülmüş malzeme gövde üst kısmından değirmeni terk eder. Uzun ve dar değirmen gövdesi öğütücü ortamın düzgün ve aynı oranda dağılmasına ve mazlzemenin öğütücü ortam ile daha yoğun temas etmesini sağlayarak kayda değer bir öğütme verimi sağlar. Şekil 5 de Outotech Higmill kesiti verilmiştir.

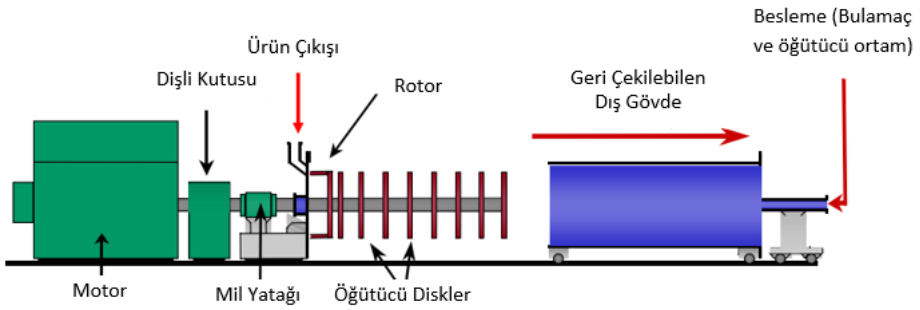


Şekil 5. Outotech HIGmill gösterimi (Outotech HIGmill, 2019)

Isa Mill (Isa Yatay Değirmeni)

Bu değirmen 1990 yılında Mount Isa Mining şirketi ve Netzch Feinmahltechnik Gmbh şirketinin ortak girişimi ile faaliyete geçmiştir. Isa yatay değirmeni bir vites kutusu ve motor düzeneği ile sürülen bir mil üzerine bağlı sekiz öğütücü diskten oluşmuştur. Bu diskler 21-23 m/s çevresel hız ile 300 kW/m^3 güç yoğunluklarına ulaşabilir. Değirmen uygun bir öğütücü ortam ile doldurulur ve her bir disk arasındaki bölge öğürtme odası görevini görür. Böylece art arda sekiz farklı öğütme odası oluşur. Öğütücü ortam, öğütücü disklerin hareketi ile merkezden değirmen iç gövdesine doğru hızlandırılır. Öğütücü ortam öğütücü disklerin arasında dışarı yönde hareketlendirilme yerine mil üzerine doğru geri yönde hareketlendirilir. Bu durum her bir öğütme odasında diskler ile öğütücü ortam arasında sürtünme ve aşındırma hareketini oluşturan bir dolaşım hareketi

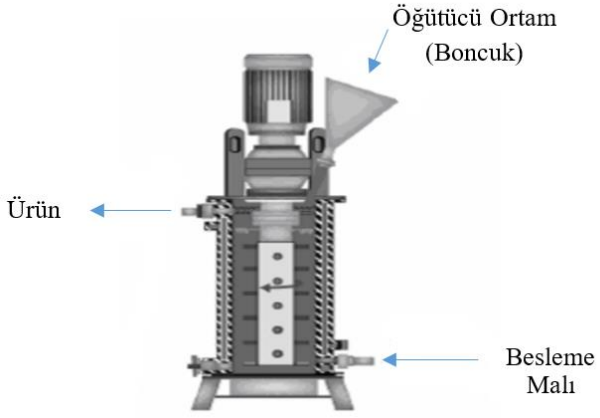
sağlar. Mineraller bu aşınma ve sürtünme mekanizması ile öğütülürler. Isa yatay değirmeninin tasarımı Şekil 6' da gösterilmiştir.



Şekil 6. Isa-Mill şematik gösterimi (IsaMill, 2008)

Sala Agitated Mill (SAM)

Bu değirmen orijinal olarak SALA firması tarafından imal edilmiş dikey pinli bir değirmendir. Dünya çapında uygulama alanı bulan KD türlerinden biri de; SALA Int. AB (İsveç) tarafından geliştirilen ve günümüzde Metso Group (İngiltere) tarafından üretilen dikey pinli değirmenlerdir. Tamburlu değirmenlerin 1/10'u kadar yer kaplarlar. Bu değirmenler, bir gövde ve bu gövde içerisindeki kalın bir mil üzerinde mil'e dik olarak konumlandırılmış volfram karbit'den yapılmış çubuklardan oluşmaktadır. Değirmen milinin kalınlığı öğütücü ortamın belirli bir çevresel hıza ulaşabilmesini sağlar ve böylece değirmen gövdesi eksenine yakın bölgedeki verimsiz öğütme bölgesinin dez avantajı büyük ölçüde azaltılmış olur . Kuru ve yaş öğütmeye uygundur. Geleneksel öğütme işlemine göre % 20 ile 50 arasında spesifik enerji tüketiminde azalma sağlanabilmektedir. Küçük boyutlu öğütücü ortam kullanılmaktadır. Şekil 7'de SAM türü bir değirmenin resmi gösterilmiştir.



Şekil 7. Sala agitated mill (Katırcıoğlu, 2010)

Kuru öğütme işleminde öğütme yardımcısı olarak amin kullanımı ile malzemenin öğütme hızı ve kuru malzemenin akışkanlığı arttırılabilir. Böylece öğütme verimi artar.

Ani Metprotech SVM Mills

Sala Agitated Mill'e benzer bir tasarıma sahiptir. büyük ölçekli bir Karıştırmalı Değirmen türüdür. İnce (30-10 µm) ve çok ince (-10 µm) öğütme işlemlerinde kullanılabilirler. Avustralyalı Metprotech şirketi tarafından üretilmektedirler. Besleme bulamacı doğrudan öğütücü üniteye pompalanmakta ve değirmendeki

öğütücü ortam bilyaların dikine akışı söz konusu olmamaktadır. Böylece devreden yük ile birlikte siklon ve pompa sayısı azaldığından yüksek öğütme hızına ulaşılır. Birim hacim başına enerji girişi tamburlu veya kule değirmenlerde 20–30 kW/m^3 iken bu değirmenlerde 100–150 kW/m^3'e ulaşmaktadır. Değirmende kalma süresinin azalmasıyla yüksek kapasiteli ince öğütme sağlanmaktadır Avustralya'da *Ammtec Pty Ltd.* firması tarafından refrakter altının kazanımında çok ince yaş öğütmede kullanılmaktadır (Katırcıoğlu, 2010).

Maxmill

Bu değirmenler**,** iri boyutlu malzeme beslenebilmesi için Almanyadan Maschinenfabrik Gustav Eirich firması tarafından tasarlanmışlardır. Geliştirilen Maxxmill değirmeni ile birkaç mm partikül boyutunda besleme yapmak mümkün olabilmektedir. KD'ler çoğunlukla 200 µm altındaki malzemeyi besleme malı olarak kabul etmektedir. Maxmill, bu değirmenlere besleme malı üretmek için bu öğütme devrelerinde kullanılabilir (Katırcıoğlu, 2010).

Karıştırmalı Değirmenlerin Kullanım Alanları

Karıştırmalı değirmenler, yukarıda sayılan üstünlükleri sayesinde;

- Boya sektöründe cila vernik ve bazı dağıtıcı boyaların üretiminde,
- Kimya ve ilaç sektöründe çeşitli ürünlerin üretilmesinde,
- Elektronik sektöründe yüksek dayanımlı seramiklerin, elektronik bileşenler için gerekli bazı oksitlerin öğütülmesinde, sürekli mıknatıslar için gerekli sır malzemelerinin üretiminde,
- Cevher hazırlama ve mineral endüstrisinde kireçtaşı dolgu malzemesi, kağıt kaplama, baca gazı kükürtsüzleştirme ve değerli minerallerin serbest hale getirilmesinde,
- Tarım kimyasalı olarak böcek ilaçları ve mantar ilaçlarının üretiminde,
- Yiyecek sektöründe kakao çekirdeği kabuğu, yer fıstığı ve susamın öğütülmesinde,
- Biyoteknolojide mikroorganizmaların hücrelerinin parçalanmasında, enzim çıkışının sağlanması için maya hücrelerinin parçalanmasında,
- Kauçuk endüstrisinde polimerlerin çözücü içerisinde çözünürlüğünün devamlılığının sağlanması için,
- Kömür ve enerji sahasında, kömür-yağ ve kömür-su karışımlarının elde edilmesinde, geleneksel öğütücülerin geri dönüş yüklerinin öğütülmesinde, gaz türbinleri için mikronize öğütmede, kömürün zenginleştirilmesi ve kükürtsüzleştirilmesi amaçları için çok sayıda kullanım alanı bulmaktadırlar (Stehr, 1988).

KD'lerde kullanılan özgül enerji (10 – 2000 kWh/ton) büyük farklılıklar göstermektedir (Stehr, 1988) KD'lerin kullanım alanları incelendiğinde ürün kalitesinin çok ince tane boyutuna gereksinim duyduğu nano teknolojilere doğru bir yönelim söz konusudur.

DEĞERLENDİRME

Malzemelerin tane boyutları inceldiğinde kazandığı teknik üstünler ve cevher hazırlama endüstrisindeki doğal olarak zenginleşmiş iri boyutta serbestleşen cevherlerin tükenmesi nedeniyle giderek daha ince boyutta serbestleşebilen cevherlerin üretilebilmesi ince tane boyutuna olan talebi giderek arttırmaktadır. Geleneksel öğütme işlemlerinin de bu ince tane boyutunun eldesindeki bazı teknik dezavantajları nedeniyle öğütücü ortamı daha homojen bir dağılım ile daha küçük bir hacimde hızlı bir şekilde öğütme arayışı günüğmüzdeki karıştırmalı değirmen teknolojisini oluşturmuştur. İnce boyuttaki malzemeye olan bu artış eğilimi bu teknolojinin geliştirilmesindeki en öncelikli olgudur. Bu teknolojinin geliştirlmesi için öncelikle çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışma günümüzde kullanılan karıştırmalı değirmenlerin mevcut türleri, ulaştığı teknolojiyi okuyucuya belirli bir ölçüde sunmak ve dikkati bu teknolojiye çekmek için derlenmiştir.

Karıştırmalı değirmenin en temel üstünlüğü geleneksel öğütücüler ile teorik olarak olsa da pratikte ulaşılamayacak ince öğütmelerin mümkün olmasıdır. Geleneksel öğütmede ulaşılabilecek boyutlar için de % 40 ile 60 arasında bir enerji tasarrufunu sağlayabilmesi mümkündür. Bu anlamda karıştırmalı değirmen ile ilgili incelemelerin giderek daha cazip olabileceğini ve en ilgi çekici konunun da enerji tüketimi üzerinde yoğunlaşmasını öngörebilmek zor değildir. Bunun için karıştırmalı değrimenlerin işletme ve tasarım parametrelerini istatistiksel tabanlı modelleme araçlarıyla analiz etmek ve özellikle sınıflandırıcı ile olan etkileşimini tespit etmek bütünsel bir yaklaşım için önerilebilir.

KAYNAKLAR

Adel, G. T. and Toon, R. H. (1986). Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal. *Powder Technology*, 49: 75-82.Borzone, L.A.; Order, R.R.; Hagy, J.T. Fine grinding of coal using the Pitt mill. In Proceedings of the 7th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA, USA, 3–6 September 2019; 1990; pp. 643–652.

Eirich Tower Mill - Vertical agitated media mill. (21.02.2018) Google. Adres: https://www.eirich.com/fileadmin/user_upload/Eirich_Bilder/1.Produkte_Verfahren/2.Mahltechnik/5.TowerMill/TM1843_3_en.pdf.

Gupta, A., Yan, D. (2016). Chapter 10. Stirred mills—Ultrafine grinding. In Mineral Processing Design and Operations, 2nd ed. (Eds.) Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 287–316. ISBN 9780444635891.

Hacıfazlıoğlu, H. (2015). Kırma ve Öğütme Ders Notları. İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Böl. Avcılar/İSTANBUL. https://www.academia.edu/35490543/Kırma ve öğütme işlemleri, kırıcılar değirmenler.

IsaMill (2008). Wikivand. Adres: https://www.wikiwand.com/en/IsaMill.

Jankovic, A. and Valery, W. (2002a). Mine to mill optimization for conventional grinding circuits- a scoping study. *Joining of Mining and Metallurgy*, 38 (1-4) A 49-66.

Jankovic, A.,Valery, W. and LaRosa, D. (2002b). Fine grinding in the australian mining industry. Metso Minerals Process Technology Australia and Asia-Pacific.

Katırcıoğlu, D. (2010). Niğde bölgesindeki kalsitin karıştırmalı bilyeli değirmende yaş öğütülmesi ve bazı işlem parametrelerinin ürün inceliğine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde, 79 s.

Kwade, A. Schwedes, J. (2007). Wet grinding in stirred media mills. In Handbook of Powder Technology; Mills, S.M., Salman, A.D., Ghadiri, M., Hounslow, M.J., Eds.; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2007; Volume 12, pp. 251–382. ISSN 0167-3785. ISBN 9780444530806.Mankosa M J,

METSO Stirred Milling machine development and application extension. (13.11.2013) Google, Adres:https://www.directindustry.com/prod/metso-corporation 9344.html.

Nikolay K., Bodurov P., Ganchev V., Simpson B., Malero M.G and Aguado J.M.M. (2021). A comparative study of energy efficiency in tumbling mills with the use of Relo grinding media *Metals*, 11(5), 735.

Outotech HIGmıll – energy-efficient high-intensity Grinding. (t.y.) Google. Adres : https://Www.Stmminerals.Com/Files/1596528943_Higmill_Brochure_2019.Pdf.

Stehr, N. Recent developments in stirred ball milling. Int. J. Miner. Process. 1988, 22, 431–444

Wills, B. A. (1985). Mineral Processing Technology 3rd Ed. Pergamon. Oxford in Great Britain. 630 pp.

Wills, B. A. (2016). Grinding Mills. In Wills' Mineral Processing Technology; An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 147–179.

Yıldırım, D., Kaytaz, Y., Boyut küçültme teknolojilerindeki gelişmeler, 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu'96, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 287-300. 1996.

Young, C.A. SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook; Society for Mining, Metallurgy & Exploration: Englewood, CO, USA, 2019.

EFFECTS AND SEQUENCING OF GRINDING PARAMETERS FOR ULTRAFINE TALC GRINDING IN A VIBRATING BALL MILL: A TESTS-BASED APPROACH

O. Basaran [1, *], A.E. Yüce [2],

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisi, Turbo Makina Satış Mühendisi*
[2] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü*
*(*Sorumlu yazar: basaranog@itu.edu.tr)*

ÖZ

Talkın ultra ince öğütülmesini sağlamak, çok ince partikül boyutlarında doğal elastik özellikleri nedeniyle önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Talk öğütme için, doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmenlerin optimizasyonu; frekans, bilya boyutu ve besleme miktarı gibi temel parametrelerin dikkatle değerlendirilmesini gerektirir. Başarılı talk öğütme için en uygun parametre kombinasyonunun belirlenmesi kritik önem taşır. Bu çalışmada, doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmen kullanılarak bir dizi öğütme testi gerçekleştirilmiştir. Frekans, bilye boyutu, ortam ve besleme miktarı, öğütme performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için sistematik olarak değiştirilmiştir. Elde edilen partikül boyutu dağılımı, istenen ultra ince talk boyutuna ulaşmada öğütme işleminin etkinliğini değerlendirmek için birincil bir ölçüt olarak hizmet eder. Doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmen, öğütme verimliliğini artıran yüksek frekanslı titreşimler sağlama kabiliyeti nedeniyle umut verici bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca bu çalışma, araştırmada kullanılan doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmenin benzersiz tasarım özelliklerini ve performansını vurgulamaktadır. Bu tasarım unsurları, değirmenin yapısal bileşimi, titreşim tahrik mekanizması da dahil olmak üzere dikkatlice açıklanmıştır. Ayırt edici tasarım özellikleri, değirmenin talk öğütmedeki verimliliğine ve performansına katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: İnce öğütme, enerji verimliliği, cevher hazırlama, boyut küçültme

ABSTRACT

Achieving ultrafine grinding of talc presents a significant challenge due to its inherent elastic properties at very fine particle sizes. The optimization of natural frequency vibrating ball mills for talc grinding requires careful consideration of key parameters, including frequency, ball size, and feed amount. Determining the optimal combination of parameters is critical for successful talc grinding. This study conducts grinding tests using the natural frequency vibrating ball mill. The frequency, ball size, media and feed amount are systematically varied to evaluate their impact on the grinding performance. The resulting particle size distribution serves as a primary metric to assess the effectiveness of the grinding process in achieving the desired ultrafine talc size. The natural frequency vibrating ball mill offers a promising solution due to its ability to impart high-frequency vibrations, enhancing the grinding efficiency. Additionally, this study highlights the unique design features, and performance of the natural frequency vibrating ball mill used in the research. These design elements are carefully explained, including the mill's structural composition, vibration drive mechanism, and material handling system. The distinctive design aspects contribute to the mill's efficiency and performance in talc grinding.

Keywords: Fine grinding, energy efficiency, mineral processing, comminution

INTRODUCTION

Talc is an industrial raw mineral which is used in many industries ranging from cosmetics to plastics due to its physical and chemical properties (Zazenski R. et al. 1995). In order to use it as an additive, the particle size of Talc must be ultrafine 10-15 microns. To achieve this size reduction, dry grinding is required. The major issue of talc grinding is its inherent elastic nature at very fine particle sizes. This property becomes increasingly critical as the particle size reduces and causes challenges in reaching the desired ultrafine particle sizes during grinding operations (Kim, H. N.et al.,2019)

Since conventional milling methods or equipment often face limitations in efficiently grinding talc to the desired ultrafine size, other solutions have been investigated after understanding talc's elastic properties is key in the development of innovative grinding strategies (Kano J., 2000). Approaches such as the use of special grinding equipment, such as vibratory ball mills, can be considered to deal with the elastic behaviour of talc, as they only grind by abrasion and not by impact and abrasion like other grinding methods.

GRINDING METHOD

The mill which was tested for ultra-fine grinding of talc is a horizontal vibratory mill called VIBRA-DRUM® of General Kinematics. As seen in Figure 1, the structure of inside the mill is similar to the conventional rotary mill. However, there is no need for any significant and special lining like lifter bar, because of the movement of the material and grinding media. According to application and material, grinding media can be balls or rods.

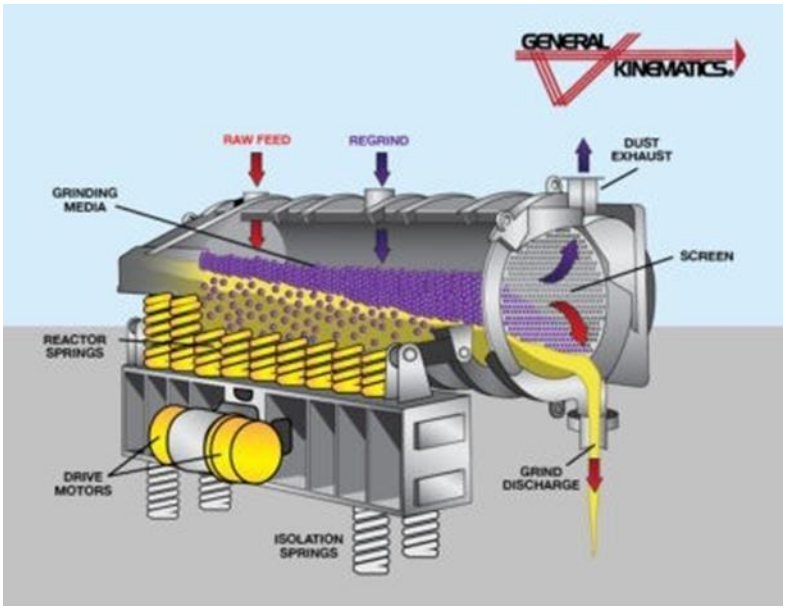


Figure 1. VIBRA-DRUM®

The grinding chamber of VIBRA-DRUM® can be divided and they can be used for pre-grinding and final grinding. If different grinding chambers are required in the grinding process, the grinding media is avoided to pass to the other part with the help of a screen. Discharge of the mill also has a screen to keep the grinding media in the mill.

Except for the main discharge of the mill, there is also a dust collection system when there is a dry grinding system. In a closed-circuit system design with a classification system, whether it is a dry or wet process, the circuit load can be fed from the centre of the mill in order to reduce the load of the mill (Fig. 1). The reference grinding applications are shown in Table 1.

Table 1. Grinding Application of VIBRA-DRUM

Grinding Applications	
Alumina	Magnetite
Aluminium Oxide	Metallic Slag
Barite	Nickel/Ferro Chrome Alloys
Barium Ferrite	Chrome Carbide
Calcined Magnesite	Petroleum Coke
Ceramics	Phosphate
Clay	Quartzite
Ferro-Silicon	Silica Sand
Ferroalloys	Silicon Carbide
Graphite & Synthetics	Titanium
Iron Oxides	Tungsten Carbide

As Figure 2 shows the movement of media in conventional rotary mills, there is two movements of the grinding media which are cataracting and cascading (Danha, 2013). Cataracting grinds the material by impact and cascading grinds the material by abrasion. Conventional rotary mills use energy for both movements. The movement of grinding media includes just cascading moves in VIBRA-DRUM®. Because of it, there is no dead zone which can be seen in Figure 2 and also the consumption of energy for lifting the media. This helps to reduce the wear of the lining. Since the contact zone is only 60% of the grinding chamber's circumference in the VIBRA-DRUM® Grinding Mill, only that zone requires replaceable liners which is representing considerable savings in initial installation and mill downtime.

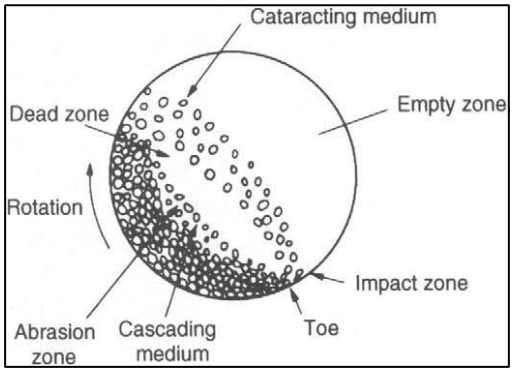


Figure 2. Schematic view of the material movement of rotary ball mills (Danha, 2013)

Impaction in the grinding process by VIBRA-DRUM® is the result of the action of grinding media as a big mass thanks to the vibration system. Furthermore, unlike mills which grind by abrasion such as stirred and tower grinding mills, the VIBRA-DRUM® Grinding Mill uses the grinding principle by impaction, which results in clean breakage and does not coat the material with slime.

The VIBRA-DRUM® achieves significant energy savings (35-50%) thanks to a unique vibration system called Two-Mass System which is explained below and rotary material movement that is more efficient than conventional ball or rotary grinding mills, providing a unique and effective competitive advantage. Other advantages can be seen below;

- Due to its compact design, there are no drive speed reducers, additional machines or large support bearings.
- Having a small number of moving parts reduces maintenance costs.
- Since it has small dynamic loads, a large concrete foundation isn't required, unlike the typical conventional rotary grinding mill unit.
- Structural steel supports are designed to bolt the grinding mill to a suitable load-bearing floor.

The parameters of VIBRA-DRUM® can be listed as follows:

- Frequency/Stroke
- Retention Time
- Grinding media Load
- Grinding Media Size
- Feed Amount
- Moisture Content
- If it is wet grinding solid ratio of the pulp is very crucial

TWO-MASS SYSTEM

All of the conventional vibratory equipment uses a brute force system which has a single vibratory mass with a rotating driving force in the mining industry. This brute force unit is designed with eccentric rotating weights and large eccentric weights as driving force to have an isolated vibrating action and to generate high centrifugal forces, respectively (Frank G. et al. 2022). Frank et al. stated that the difference between brute force and two-mass system is that a two-mass system is designed as two separate vibrating masses connected to each other through a spring system. One of them is the equipment's main body which is called trough and the other is called an exciter or driving mass (Leonida et al., 2021).

As shown in Figure 3, The spring system between two-mass provides a sub-resonant frequency which results in the requirement of a much smaller force to desired stroke than brute force (Frank et al., 2022). Because of the usage of a smaller force, the energy consumption for the same stroke or frequency will be less. To better understand, Figure 4 shows a two-mass screen with an exciter on top of the screen body. The benefit of spring connecting of exciter with vibratory motors and screen body is to avoid cracks and deformation on the screen because of the vibration. This provides less maintenance and operation cost.

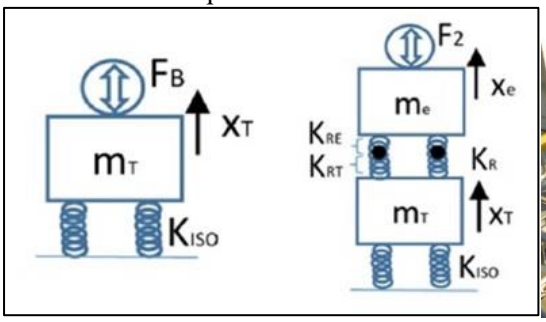


Figure 3. Comparison Between Brute Force and Two-Mass System



Figure 4. Two-Mass Screen

This technology has a lot of advantages according to Frank et al. (2022), such as;

- Less kW/h (up to 70% energy savings)
- More capacity than other equipment of the same size
- Longer retention time which results in higher efficiency.
- Smoother shutdown and startup
- Less dynamic loads

It has been proved that the increase of the capacity and efficiency through a case study of STM-Screen achieve to change the capacity from 1,800 mtph to 2,400 mtph with the same footprint (Frank et al. 2022). The unique technology of General Kinematics is used in every piece of equipment in the company's manufacturing range. This includes VIBRA-DRUM®. The exciter with 2 vibratory motors connected to the grinding chamber can be seen in Figure 5. Thanks to vibration, the material and grinding media can be moved.

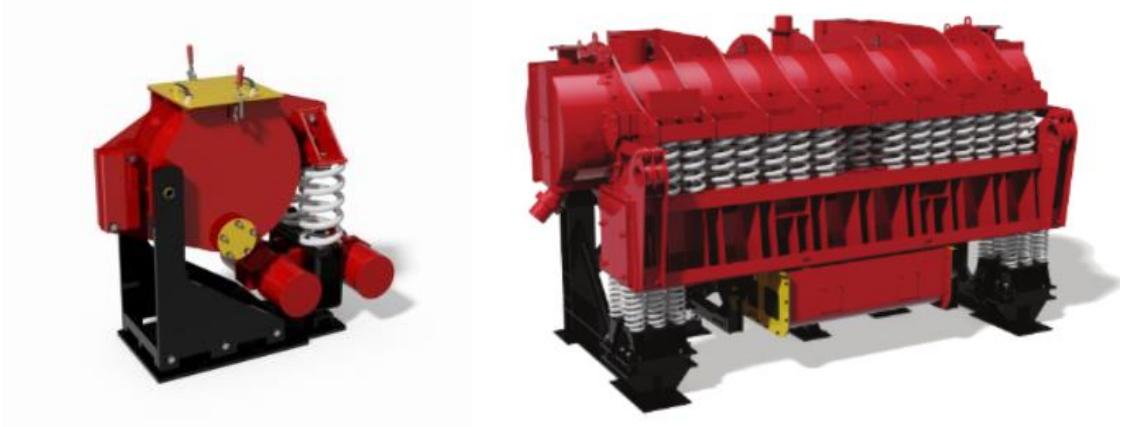


Figure 5. Lab Scale Grinding Vibra-Drum (left), Industrial Scale Vibra-Drum (right)

GRINDING EXPERIMENT

First, for the feed preparation, all the raw material was screened to 2 mm and the feeds of all tests are -2 mm. During the experiments, frequency/stroke, feed amount and average ball size are focused as crucial parameters. The purpose of the paper is not to reach the desired particle size of the Talc product which is generally 15 microns. The aim of the paper is to establish the sequencing of the parameters given above. Retention time is 1 hour for all tests. The moisture of the feed material is 3% which is not crucial for dry grinding. Focused parameters were changed and conducted 16 tests which details can be seen in Table 2. As shown in Table 2 the ball sizes are given in average. 19 mm average ball size is referred to as a mixture of the equal amount of 13 and 25 mm balls. However, 13 mm and 25 mm ball sizes are not averaged, they contain one size of ball. In all tests, the grinding media amount is 200 kg.

Frequency and stroke which are the third of the parameters are designed as low, middle and high. To reach the same stroke, frequency values are a little bit changing as Table 2 shown. Because of that, stroke values are focused for better mathematical comments. So, low, middle and high can be considered as 9, 12, and 15 mm, respectively.

Table 2. Experiment design with parameters

Experiment No	Average Ball Size mm	Feed Amount kg	Frequency rpm	Stroke mm
1	13	30	1004	9
2	13	30	1066	11
3	13	30	1114	15
4	13	20	1006	9
5	13	20	1074	12
6	13	20	1113	15
7	25	30	1009	9
8	25	30	1073	12
9	25	30	1127	15
10	25	20	1010	9
11	25	20	1073	12
12	25	20	1120	15
13	19	30	1004	9
14	19	30	1115	15
15	19	20	1004	9
16	19	20	1111	15

RESULTS and COMMENTS

Some measurements were conducted to see the difference between initial grinding and after 30 minutes such as decibel and frequency/stroke reading. The decibel value is measured by a decibel meter to see the grinding process according to decibel. Frequency/stroke are measured by the vibration meter of General Kinematics which gives the values online in the mobile app.

Decibel changes can be seen in Table 3. After 30 minutes, it is observed that the decibel increases. This is due to the decrease in particle size and thus the increase in the contact between the balls. The results show that grinding can be controlled in the plant by decibels. Also, high-frequency grinding makes noise more than low-frequency grinding.

Table 3. Decibel changes

Experiment No		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Initial Decibel	Db	87	90	95	87	89	96	90	95	98	96	97	101	90	98	90	98
Decibel After 30 min.	Db	90	94	99	92	95	99	99	101	101	101	105	107	93	99	99	103

Another measurement is frequency/stroke to better show the Two-Mass System's stable stroke vibration. As the particle size and the volumetric material decreases, the impacts and effects of the balls are greater and a slight change in the stroke is expected as time passes. However, as shown in Table 4 and Figure 6, the stroke was nearly stable thanks to Two-Mass System.

Table 4. Frequency and Stroke changes after 30 minutes

Experiment No	Frequency RPM	Stroke mm	+30 Frequency RPM	+30 Stroke mm
1	1004	9	1006	9
2	1066	12	1073	12
3	1114	15	1120	16
4	1006	9	1006	8
5	1074	12	1074	11
6	1113	15	1115	15
7	1009	9	1006	9
8	1073	12	1070	11
9	1127	15	1122	15
10	1010	9	1007	9
11	1073	12	1067	11
12	1120	15	1112	14
13	1004	9	1005	9
14	1115	15	1123	15
15	1004	9	998	9
16	1111	15	1115	15

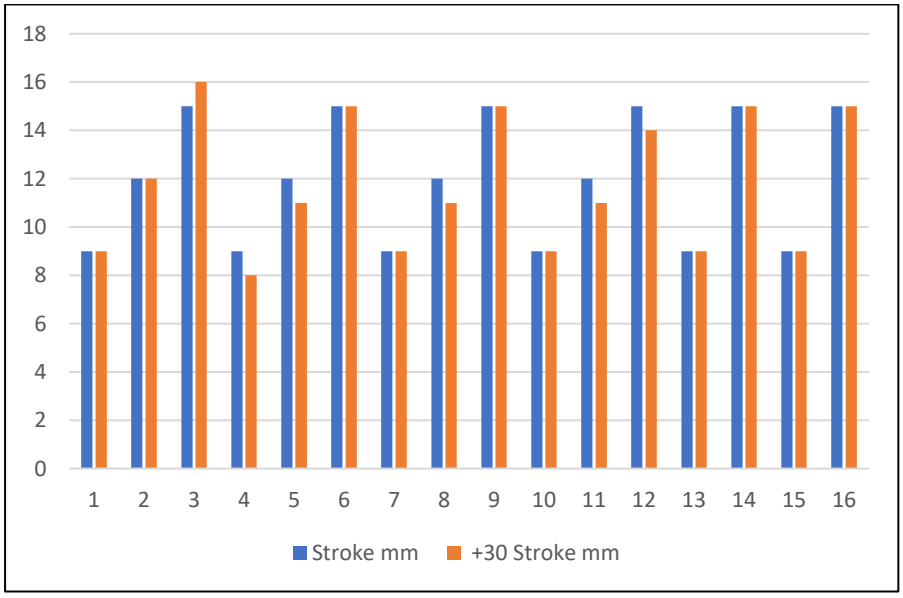


Figure 6. Stroke changes graphic after 30 minutes

The final measurement which is product particle size distribution was done by Malvern Mastersizer. This paper focused on D_{90} of the products which can be seen in Table 5. Since it is not the aim of this study to reduce Talc to the desired size, as can be seen in the table, the products are coarse compared to the desired dimensions. However, after rough modelling, it can be predicted how to make changes to reduce it to the desired size. The modelling is done according to the D_{90} value.

Table 5. Test results as D_{90}

Experiment No	P_{90} microns	Experiment No	P_{90} microns
1	72.799	9	83.039
2	67.500	10	81.897
3	60.221	11	79.135
4	70.530	12	71.427
5	66.059	13	79.658
6	59.121	14	69.881
7	89.444	15	77.174
8	80.024	16	66.652

Experiment No. 6 has the finest product which is 59.121 microns. The parameters of experiment 6 are the smallest ball size and feed amount and highest stroke. This result shows that the product size will decrease when ball size and feed amount decrease and stroke increase. The regression analysis shows that below as well.

Regression analysis is done according to Table 6. After analysis, the multiple R-value was calculated as 0.970620849 which is very close to 1. This R-value indicates that the test results are reasonable according to the parameters.

Table 6. Summarized Test Results

Experiment No	Variables			Results
	Average balls size, mm	Feed amount, kg	Stroke, mm	P90, microns
6	13	20	15	59.121
3	13	30	15	60.221
5	13	20	12	66.059
16	19	20	15	66.652
2	13	30	12	67.500
14	19	30	15	69.881
4	13	20	9	70.530
12	25	20	15	71.427
1	13	30	9	72.799
15	19	20	9	77.174
11	25	20	12	79.135
13	19	30	9	79.658
8	25	30	12	80.024
10	25	20	9	81.897
9	25	30	15	83.039
7	25	30	9	89.444

The regression analysis states the effects of all the variables by giving factor valuable which can be seen in Table 7. The biggest coefficient in the equation belongs to variable 3 which is frequency/stroke. It is understood from this that the product size changes at most when the stroke is changed. The impact ranking continues with the ball size and the feed amount, respectively. A negative factor means that the results change oppositely.

Table 7. Factors of variables

	Coefficients
Intersection	60.82718056
X Variable 1	1.232444444
X Variable 2	0.3821375
X variable 3	-1.698916667

Finally, the equation of the desired product size can be written as below roughly by using factors for parameters.

$$P90 = 60.83 + (1.23 * Ball\ Size) + (0.38 * Feed\ Amount) - (1.70 * Stroke)$$

Further studies should focus on other parameters such as retention time, bond index values and energy consumption.

REFERENCES

Danha, G., 2013, Identifying opportunities for increasing the milling efficiency of a Bushveld Igneous complex (BIC) upper Group (UG) 2 ore, Doctoral dissertation, University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment, p 20.

Frank G., Massman S., Kerkera D., Fernandez A., Wubben M., 2022, Two-Mass vs Brute Force Technology in The Mining Industry, Pp 1-6

General Kinematics, Vibra-Drum® Grinding Mill & Solutions Brochure, 2022, pp 1-2

Kano, J., Miyazaki, M., Saito, F., 2000, Ball mill simulation and powder characteristics of ground talc in various types of mill, *Advanced Powder Technology*, 11(3), pp 333-342.

Kim, H. N., Kim, J. W., Kim, M. S., Lee, B. H., & Kim, J. C., 2019, Effects of ball size on the grinding behavior of talc using a high-energy ball mill. *Minerals*, 9(11), 668. p. 14

Leonida, C., 2021, Screens offer new era in Process Efficiency, *Engineering and Mining Journal*, 222(5), pp 32-37.

Zazenski, R., Ashton, W. H., Briggs, D., Chudkowski, M., Kelse, J. W., MacEachern, L., Gettings, S. D., 1995, Talc: occurrence, characterization, and consumer applications, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 21(2), p 218.

PREPARATION OF NZVC FROM INDUSTRIAL SOLVENT EXTRACTION PROCESS THROUGH GREEN AND CHEMICAL METHODS

B.N. Akhgar [1, *], M. Kavanlouei [2]

[1] *Urmia University, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, Urmia, Iran*
[2] *Urmia University, Engineering Faculty, Material Engineering Department, Urmia, Iran*
*(*Corresponding Author: b.n.akhgar@urmia.ac.ir)*

ABSTRACT

Nano zero-valent copper (NZVC) preparation from the solvent extraction solution through cost-effective methods has advantages due to the rising application of advanced materials and the importance of environmental issues. Moreover, the present investigation studied the influence of synthesis routes on NZVC properties. Therefore, the different properties of NZVCs synthesized through the green and chemical methods were investigated. The results verified that NZVC was synthesized through green and chemical techniques by titrating ascorbic acid and $NaBH_4$ to the industrial Cu-enriched solution. According to the XRD and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), the oxidation of synthesized NZVCs was proved. Based on the microstructural studies, the amorphization degree of NZVC was increased from about 3% in the green NZVC to about 87% in chemically synthesized NZVC, respectively. Also, the results verified that the crystallite size and unit cell were reduced from 50.3 nm 3.61 Å in green NZVC to 41.1 nm and 3.11 Å in chemically synthesized NZVC. Also, the microstrain increased from 3.2E-3% in the green NZVC to 6.2E-4% in chemically synthesized NZVC, respectively. The findings of FE-SEM indicated that the chemically synthesized NZVC had smaller particles. Consequently, the antibacterial tests uncovered the inhibitory effect of the chemical NZVC against gram-positive Listeria monocytogenes.

Keywords: Hydrometallurgy, precipitation methods, nano zero-valent copper, microstructural properties

INTRODUCTION

Nano zero-valent Copper (NZVC) has been applied widely due to its advantages such as cost-effectiveness of production processes, enhanced surface reactivity, promoted properties, non-toxicity, antibacterial activity, and improved performance in various fields related to electronics, medical, military, and environmental applications. The importance of NZVC is dramatically increasing over previous years in these application areas (Zhu et al, 2018; Rana et al., 2020; Sarwar et al, 2021). NZVC is synthesized either through mechanochemical routes or chemical ones. The mechanochemical method used for the preparation of NZVC is based on the top-down approach of high-energy ball milling for example as conducted on copper chips for NZVC preparation under inert argon atmosphere to avoid oxidation (Ramesh et al, 2020). The chemical preparation routes can be divided into chemical precipitation and green synthesis methods based on used reducing agents. In chemical precipitation methods, the copper ions are precipitated from pure solutions of metal salts by adding synthetic agents such as sodium borohydride, while natural precipitants were used during the green synthesis (Habashi, 1999; Huang et al, 2012).

In nature, copper-associated metal exists in combination with other elements to form various ores or minerals. Regarding the essential limitation of mineral processing procedures, the generation of metal-bearing solutions is unavoidable during mineral processing and hydrometallurgical treatment of subjected minerals. Different ions can enter leach liquors and acid mine drainage (AMD) of tailing dams in mineral processing plants. Therefore, there are many metal-bearing solutions produced during mining activities, rising serious

environmental concerns (Habashi, 1999; Ochromowicz et al, 2011). The application of these solutions as a precursor solution for the NZVC preparation can be an promising issue due to the following achievements; preparation of advanced nanopowders such as NZVC and solving the disposal problems of the metal-bearing solutions.

One of the abundant metal-bearing solutions on an industrial scale is the raffinate solution produced during hydrometallurgical processing of chalcopyrite, a copper sulfide mineral, in copper complexes. A simplified flowsheet of chalcopyrite hydrometallurgical processing for the introduction of the raffinate solution is illustrated in Figure 1. It can be seen that the obtained pregnant leach solution (PLS) is treated through a solvent extraction (SX) process to remove main impurities and coexisting ions, such as iron, aluminum, magnesium, calcium, and other interfering ions. After the SX process, the PLS will be ready for the electrowinning (EW) step in which pure copper is produced. The SX process is exerted in two steps of extraction and striping through the mixing of organic solvent and aqueous solutions. In the extraction step, the aqueous PLS is mixed with a fresh organic solvent to withdraw copper ions from the aqueous PLS to the organic solvent. Then, the SX process is applied with the striping step in which the copper-containing organic solution is remixed with a fresh aqueous solution (without any interfering ions) to reload copper ions to the fresh aqueous solution from the pregnant organic solution. Finally, the aqueous copper PLS is sent to the EW step while the impurities such as iron, aluminum, magnesium, and other interfering ions are mostly remaining in the leaving aqueous solution from the SX process known as raffinate. The iron-bearing raffinate solution is recycled to the leaching process on the copper ore heap (heap leaching step). A part of expired raffinate is discharged as effluent and replaced with a new leach solution. The well-known heap leaching method used for industrial hydrometallurgical processing of chalcopyrite has been illustrated in previous works (or in the literature) (Habashi, 1999; Allen et al, 1998).

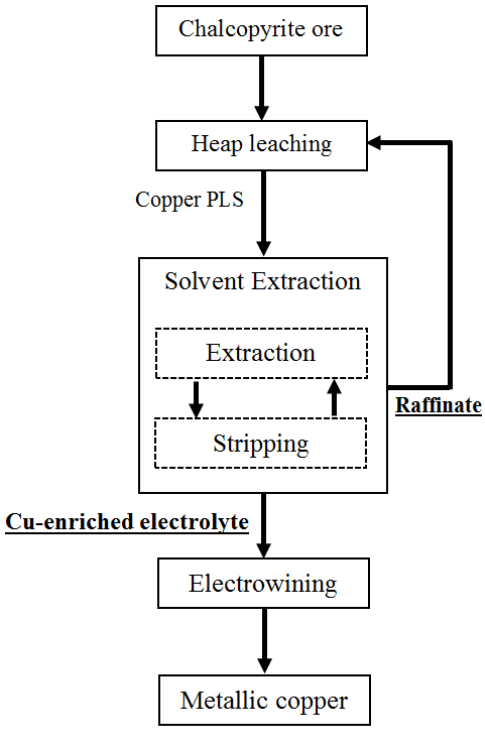


Figure 1. The simplified flowsheet of hydrometallurgical processing of copper ores

As mentioned before, in most of the related literature, NZVC has been prepared using pure metal salts as the precursor solution. On the other hand, there are many investigations conducted on the PLS of copper ores and industrial SX process for many deals, while preparation of NZVC from the Cu-bearing SX solutions has not been held (Allen et al, 1998; Sadeghi et al, 2011; Vakilabad et al., 2016; Rezazadeh et al, 2019; Rahmati et al, 2019; Mokmeli et al, 2020). Regarding the reports, it was concluded that the synthesis of NZVC from obtained solutions during the SX process of copper PLS is not reported before. Thus, the present study aims to apply the Cu-enrich solution as the precursor solution for the direct preparation of NZVC. It was found necessary to perform a preconditioning step to provide a proper solution for NZVC. After the precondition, NZVC has been prepared by using a green synthesis method with titration of acid ascorbic and through chemical precipitation method with sodium borohydride titration. The NZVC nanopowders prepared were characterized and compared through XRD, FE-SEM, EDS, and BET analysis. Finally, the antibacterial properties of the NZVCs prepared through chemical and green methods were examined briefly.

EXPERIMENTAL

The Initial Precursor Solutions

As cited before, it seems that among industrial copper solutions, the strong electrolyte of Cu-enriched solutions obtained from the industrial SX step is very suitable for preparing NZVC nanoparticles regarding their easy access and low cost. The solutions were obtained from the industrial copper solvent extraction plant in the Sarcheshmeh Copper Complex located in the Kerman province of Iran. The concentration of major ions in the Cu-enriched solutions as the precursor solutions were measured by an ICP instrument (Agilent 7900, USA) (Table 1).

Table 1. The measured concentration of different ions in the initial raffinate of the SX plant in the Sarcheshmeh copper complex

Ions	Concentration (mg/L) in Cu-enriched solution
Fe	2263.66
Al	2238.6
Mg	1456
Cu	38504.2
Zn	456.148
As	15.61
Mo	5.7
Ca	120
P	44
Na	51
Mn	544.68
Co	71.26
Si	15
Cr	1.58
Cd	4.5

The NZVC Synthesis Procedures

Various methods have been used for the synthesis of NZVC. Among the methods, the green methods are attracting more attention, observing environmental principles without using chemical materials. Also, the chemical method of preparing NZVC is very applicable due to its simplicity and availability of initial materials. In the methods, various pure salts and sources of copper are used to prepare NZVC despite the present study in which initial precursor solutions used have been obtained from industrial SX operation.

In the beginning, the dilution and pH adjustment steps were performed on the initial Cu-enriched solution reducing pH and metal ions concentrations. Then, NZVC was synthesized by green and chemical methods with ascorbic acid (2.18 g / 50 mL H_2O) and sodium borohydride (4.68 g / 50 mL H_2O) as reducing agents, respectively. Native β-cyclodextrin (0.50 g / 50 mL H_2O) was used as a nanoreactor and a capping agent in the formation of NZVC. In both procedures, the reducing ascorbic acid and sodium borohydride were titrated to the Cu solution at a 10 mL/min rate. The participated NZVC powders were washed using the ethanol solution and dehydrated with the freeze dryer before storing. The morphology, chemical composite, and structure of synthesized NZVC were characterized by FE-SEM, EDS, and XRD. As depicted in Figure 2, the schematic routes were used to prepare the metallic Cu nanopowders from the industrial SX solutions.

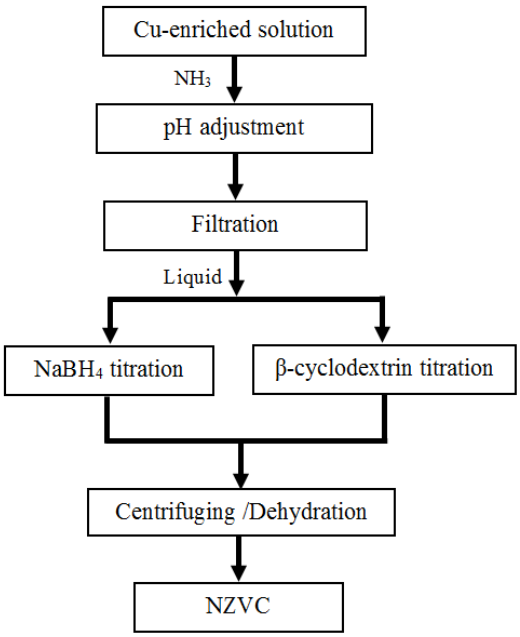


Figure 2. Schematic flow sheets for NZVC preparation used in the present study

Characterizations

The X-ray diffraction patterns were collected using a Philips X'pert instrument with Co Kα radiation (λ= 1.7890 Å) at 40 kV and 30 mA. The patterns were recorded using a step size of 0.02 and a counting time of 0.7s per step over the two-theta range between 20º-80º and 20º-75º. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) was conducted by the MIRA3 FEG-SEM instrument [TESCAN, Czech Republic]. The FE-SEM analysis is necessary to provide valid evidence for the preparation of the metallic nanopowders in the nanoscale. All the materials used in the study were provided by Merck and other valid companies applied as received without more treatments, and all needed solutions were prepared with distilled water.

RESULT AND DISCUSSION

As described before, the NZVC was prepared from Cu-enriched solutions through two methods of chemical and green methods. The result can be used for comparison of the prepared NZVC nanopowders. For characterization of the NZVC nanopowders synthesized by green and chemical synthesis methods, XRD analysis was performed, as illustrated in Figure 3. The obtained XRD patterns verified that the main phases of copper (Cu - JCPDS No. 1-085-1326) and copper oxide (Cu_2O-JCPDS No. 1-077-0199) are detectable in the green synthesized NZVC. For chemically synthesized NZVC, The XRD result is different where the main phases of copper oxide (CuO-JCPDS No. 1-080-0076) and copper iron oxide (CuFeO-JCPDS No. 12-0752) were detected, indicating the oxidation completely occurred during the synthesis method. The copper iron oxide

in the XRD pattern of chemically synthesized NZVC proved that iron and copper were coprecipitating from the Cu-enriched solution by the chemical agent, increasing the impurity of the nanopowder as confirmed with EDS studies in the following (Table 2).

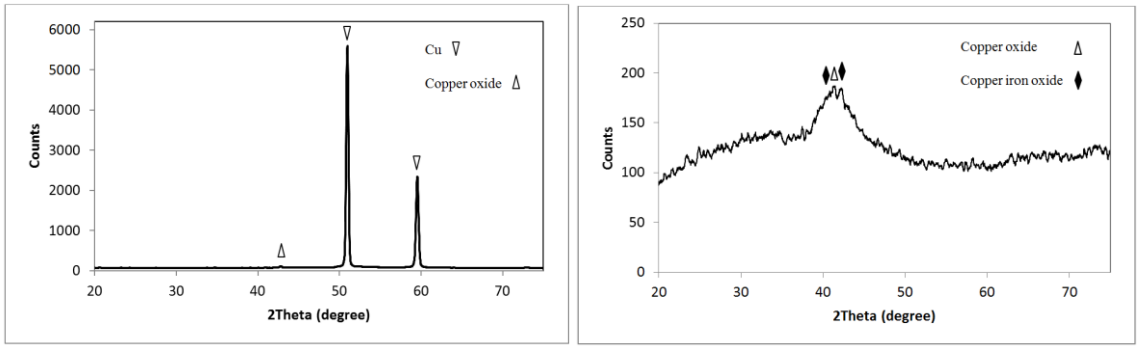


Figure 3. XRD patterns of NZVC prepared through left) green synthesis, right) $NaBH_4$ titration

The morphology of the nanopowders was investigated through the field-emission scanning electron microscope (FE-SEM). As shown in Figure 4, the FE-SEM images indicated that the green synthesized NZVC was prepared in nanoscale, the same as obtained nanopowder through the chemical method. The FE-SEM results also proved that the nanopowders obtained through the chemical method have smaller particles than the green synthesized NZVC.

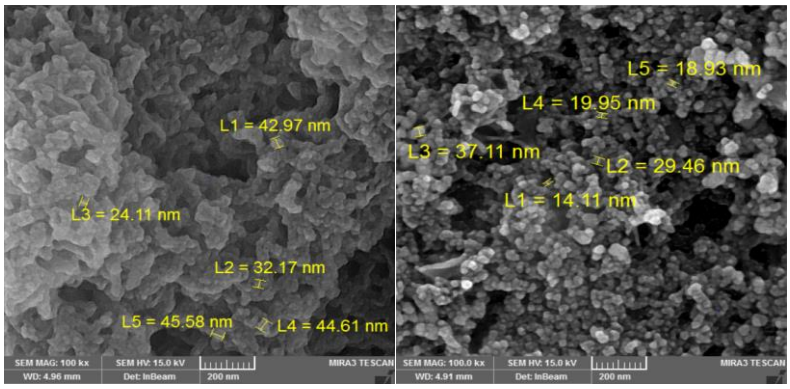


Figure 4. FE-SEM images of nanopowders prepared through left) green synthesis and right) $NaBH_4$ titration

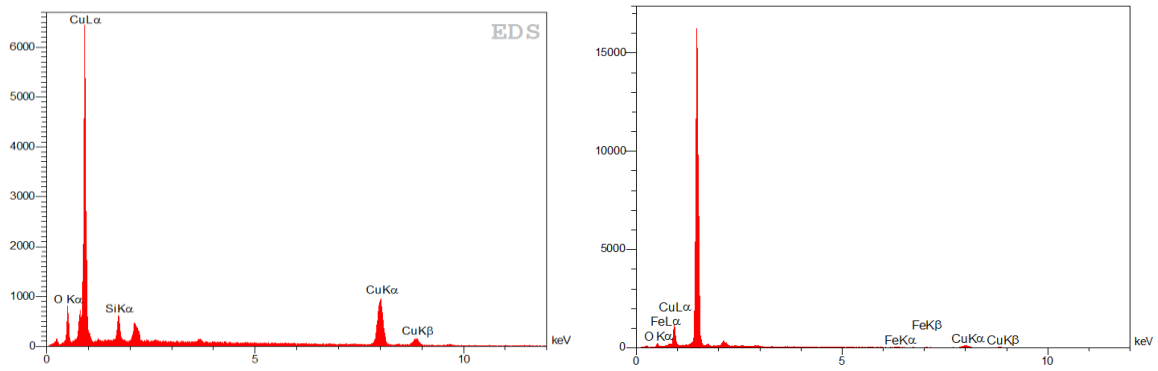


Figure 5. EDS spectrums of NZVC prepared through left) green synthesis and right) $NaBH_4$ titration

Table 2. The chemical composition of NZVCs prepared through chemical and green synthesis methods

Content (wt.%)	Cu	Fe	O
Chemical NZVC	75.4	1.5	23.1
Green NZVC	86.6	-	3.8

The EDS analysis was conducted on NZVC to obtain additional information about chemical composition to compare oxidation progress in the used methods (Figure 5 and Table 2). The result demonstrated that oxidation progress in the chemically synthesized nanopowders was more than in green synthesized NZVC. A reason for the promoted oxidation progress of chemically synthesized Cu-bearing nanopowder can be its smaller particle size, as concluded in Figure 4. In addition, the results also proved that ascorbic acid as a precipitant agent had the same role, as polyphenols, in decreasing oxidation progress during green synthesis. Additionally, smaller particles of Nano zero-valent metals enhance the oxidation rate as described before (Karim et al, 2016).

The results obtained from green and chemical synthesis of NZVC from industrial SX solution provide proper conditions for comparison of the methods as summarized in the following; the green synthesis methods prepared nanopowders with coarser particles and lower oxidation progress.
Next, some primary tests related to the potential application of synthesized NZVC powders by using antibacterial tests. The results were shown in Figure 6. The disk diffusion tests were conducted by using the chemical NZVC with a concentration of 1250 ppm (12.5%) to study the inhibitory effect against gram-positive Listeria monocytogenes (not effective against gram-negative Salmonella typhimurium). Consequently, the antibacterial tests uncovered the inhibitory effect of the chemical NZVC against gram-positive Listeria monocytogenes.

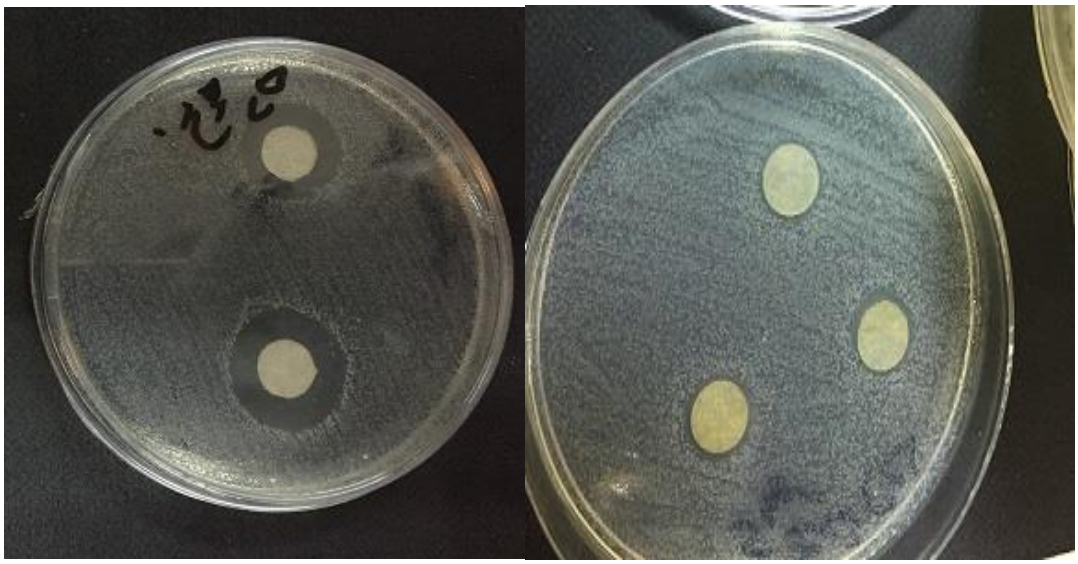


Figure 6. Inhibitory effect of copper nanoparticles on left) Listeria monocytogenes Gram-positive bacteria and right) gram-negative Salmonella typhimurium

Finally, parameters such as amorphization degree, crystallite size, microstrain and Unit cell of the green and chemical NZVCs were measured by applying the obtained XRD patterns. The above-mentioned microstructural parameters were calculated using the Rietveld method (X'pert high score plus software) as described before (Pourghahramani and Akhgar, 2015). The results have been summarized to compare the prepared NZVCs in Table 3.

The results indicated that the synthesis methods significantly affected the microstructural properties of the obtained NZVCs. As shown in Table 3, the amorphization degree was increased from 2.7% in the green synthesized NZVC to 86.1% in the chemical NZVC, respectively. As reported before (Pourghahramani and Akhgar, 2015), the increasing amorphization degree can accelerate the reactivity and thus oxidation in the chemical NZVC. Other parameters studied were crystallite size and microstrain (Table 3). The green NZVC has a more crystallite size than chemical NZVC, like FE-SEM results wherein the green NZVC was coarser. Due to the smaller crystallite size, the reactivity of chemical NZVC has to be more than green NZVC. As shown in Table 3, The green NZVC had more microstrain than the chemical NZVC. The results indicate that the unit cell of NZVC reduced with the oxidation progress as the synthesis method changed from green to the chemical method. Regarding the results, the microstructural parameters, except the NZVC microstrain, changed in favor of reactivity promotion and oxidation progress in chemical NZVC. The microstrain values of chemical NZVC were reduced in comparison with the green NZVC, with a negative impact on its reactivity. The results of the microstructural study related to NZVCs reactivity were also consistent with oxidation progress and particle size obtained by XRD and FESEM/EDS analyses.

Table 3. The microstructural properties of NZVCs prepared through the green and chemical methods

	Amorphization (%)	Crystallite size (nm)	Microstrain (%)	Unit cell (Å)
Chemical NZVC	86.1	41.1	6.2E-4	3.11
Green NZVC	2.7	50.3	3.2E-3	3.61

CONCLUSION

The present study aims to apply an industrial metal-bearing solution obtained from the solvent extraction plant in the Sarcheshmeh copper complex as the precursor solution for the NZVC preparation. The $NaBH_4$ titration method and green synthesis method were conducted on the obtained SX solutions to prepare NZVC powders. By using the XRD, FE-SEM, and EDS analyses, the following facts were concluded. The XRD patterns of prepared nanopowders from Cu-enriched solution proved that green synthesized NZVC contains Cu and Cu_2O as main phases and also chemically synthesized nanopowders have main phases of copper oxides such as CuO and $CuFeO_2$. The result indicated that the prepared copper oxide nanopowder was oxidized more than green synthesized NZVC through the chemical method. The FE-SEM analysis proved the obtained powders through the used synthesis methods was prepared in the nanoscale while NZVC prepared by green synthesis methods had larger particles than nanopowders prepared through the chemical methods. The EDS spectrum analysis confirmed the XRD results as the oxidation progressed further in the NZVC prepared with the $NaBH_4$ titration. The antibacterial property of the chemical NZVC was examined revealing that the chemical NZVC has an inhibitory effect against gram-positive Listeria monocytogenes despite gram-negative Salmonella typhimurium. The results indicated that the microstructural parameters, except the NZVC microstrain, changed in favor of reactivity and oxidation promotion in chemical NZVC.

REFERENCES

Allen, G.C., Nebeker, N.J., Burns, G.R. (1998) Copper solvent extraction and electrowinning process, US005849172A.

Habashi, A. (1999). Textbook of Hydrometallurgy, (Second ed.), Québec City, Canada, Métallurgie Extractive Québec

Huang, C., Lo, S., Lien, H. (2012). Zero-valent copper nanoparticles for effective dechlorination of dichloromethane using sodium borohydride as a reductant. *Chemical Engineering Journal, 203*, 95-100.

Karim, W., Kleibert, A., Hartfelder, U., Balan, A., Gobrecht, J., van Bokhoven, J.A., and Ekinci, Y. (2016). Size-dependent redox behavior of iron observed by in-situ single nanoparticle spectro-microscopy on well-defined model systems. *Scientific Report, 6*, 18818.

Mokmeli, M. (2020). Pre-feasibility study in the hydrometallurgical treatment of low-grade chalcopyrite ores from Sarcheshmeh copper mine, *Hydrometallurgy*, *191,* 105215.

Pourghahramani, P., and Akhgar, B.N. (2015). Characterization of structural changes of mechanically activated natural pyrite using XRD line profile analysis, *International Journal of Mineral Processing, 134,* 23-28.

Rahmati, S., Ahmadi, A., Hosseini, M.R., and Molaei-Nasab, M. (2019). Optimization of continuous air-assisted solvent extraction for treating dilute Cu leach solutions using response surface methodology, *Mineral Engineering, 131,* 154-163.

Ramesh, S., Vetrivel, S., Suresh, P., Kaviarasan, V. (2020). Characterization techniques for nanoparticles: A practical top-down approach to synthesize copper nanoparticles from copper chips and determination of its effect on planes. *Materials Today: Proceedings, 33*, 2626-2630.

Rana, A., Yadav, K., and Jagadevan, S. (2020). A comprehensive review on green synthesis of nature-inspired metal nanoparticles: mechanism, application and toxicity. *Journal Clean Production, 272*, 122880.

Rezazadeh, L., Sharafi, S., Schaffie, M., and Ranjbar, M. (2019). Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles from raffinate of industrial copper solvent extraction plants, *Materials Chemistry and Physics, 229,* 372-379.

Ochromowicz, K., and Chmielewski, T. (2011). Solvent extraction in the hydrometallurgical processing of polish copper concentrates. *Physicochemical Problems of Mineral Processing, 46,* 207-218.

Sadeghi, R., Mohebbi, A., and Baniasadi, M., (2011). CFD modeling of the launder of settler of an industrial copper solvent extraction plant: A case study on Sarcheshmeh copper complex, Iran, *International Journal of Mineral Processing, 98*, 55-65.

Sarwar, N., Humayoun, U.B., Kumar, M., Zaidi, S.F.A., Yoo, J.H., Ali, N., Jeong, D.I., Lee, J.H., Yoon, D.H. (2021). Citric acid mediated green synthesis of copper nanoparticles using cinnamon bark extract and its multifaceted applications. *Journal Clean Production*, *292*, 125974.

Vakylabad, A.B., Schaffer, M., Naseri, A., Ranjbar, M., and Manafi, Z. (2016). A procedure for processing of Pregnant Leach Solution (PLS) produced from a Chalcopyrite-Ore Bio-heap: CuO Nano-Powder Fabrication, *Hydrometallurgy, 163,* 24-32.

Zhu, F., Ma, S., Liu, T., and Deng, X. (2018). Green synthesis of nano zero-valent iron/Cu by green tea to remove hexavalent chromium from groundwater, *Journal Clean Production, 174*, 184-190.

ALTIN MADENCİLİĞİNDE YIĞIN LİÇİ UYGULAMALARINDA MOBİL TELESKOPİK KONVEYÖR UYGULAMALARI

MOBILE TELESCOPIC CONVEYORS USED IN GOLD MINES FOR HEAP LEACHING APPLICATIONS

O. Toprak

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
(oguzhan.toprak@yahoo.com)
Astec Industries

ÖZ

Altın madenciliği, altın fiyatlarındaki artış nedeniyle önemini artıran bir sektördür. Yığın liçi, altın kazanımında yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Ancak, yığın dizaynı ve yüksek kapasiteler, bu tip uygulamalarda önemli bir darboğazdır. Bu nedenle, mobil kamyon boşaltma sistemleri, mobil transfer konveyör sistemleri ve teleskopik konveyörler gibi ekipmanlar gün geçtikçe sıkça bu tip uygulaması olan madenlerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerin en önemli özellikleri, hareketli olmaları ve teleskopik konveyör sayesinde hızlı ve düzgün bir yığın yapabilme yetenekleridir. Bu nedenle, madencilik şirketleri tarafından yaygın olarak tercih edilirler.

Mobil kamyon boşaltma sistemleri, madencilik sahasındaki kamyonlardaki malzemeleri hızlı bir şekilde boşaltarak, madenciliğin verimliliğini artırır. Mobil transfer konveyör sistemleri, malzemeleri taşımak için kullanılır ve madenciliğin daha hassas bir şekilde yapılmasına olanak tanır. Teleskopik konveyörler ise malzemeleri emniyetli bir şekilde taşır ve yığın oluşturma işlemini hızlandırır. Bu ekipmanlar, madencilik şirketlerinin üretim kapasitelerini artırarak, altın kazanımındaki verimliliği yükseltir. Ayrıca, hızlı ve düzgün yığın yapma özellikleri, işçi sağlığı ve güvenliğini de artırır. Sonuç olarak, mobil kamyon boşaltma sistemleri, mobil transfer konveyör sistemleri ve teleskopik konveyörler, altın madenciliğinde kullanılan verimliliği artıran ekipmanlardır. Bu ekipmanlar, madenciliğin daha etkili, hızlı ve güvenli bir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu bildiride hem bu ekipmanlardan hem de güncel uygulamalarından ve avantajlarından bilgiler verilmektedir.

Anahtar Sözcükler: yığın liçi, altın madenciliği, mobil konveyör, teleskobik konveyör, cevher hazırlama.

ABSTRACT

Gold mining has become an increasingly significant sector due to the surge in gold prices. Heap leaching is a widely-used practice for gold recovery, but heap design and high capacity constraints pose as major bottlenecks for these applications. Consequently, the utilization of equipment, such as mobile truck unloading systems, mobile transfer conveyor systems, and telescopic conveyors, have become increasingly prevalent in mines associated with these types of applications.

The mobility of these systems, as well as the ability to establish fast and consistent heaps through the use of telescopic conveyors, are considered to be the most noteworthy features of such equipment. As a result, mobile truck unloading systems are inclined to expedite mining efficiency through the swift discharge of materials from trucks in the mining area. Mobile transfer conveyor systems demonstrate their utility by enable more precise mining tactics during material transportation. Finally, telescopic conveyors increase heap formation pace while maintaining safe material transportation.

In this fashion, this equipment enhances mining companies' production capacities and efficiency in gold recovery by offering faster and consistent heap formation capabilities. Moreover, these systems promote worker safety, as fast and consistent heap formation capabilities also enhance various health and safety measures. Overall, mobile truck unloading systems, mobile transfer conveyor systems, and telescopic conveyors are advanced equipment that augments mining efficiency in gold mining by promoting more effective, quicker, and safer mining activities. This paper provides a comprehensive overview of this equipment, highlighting its current applications and advantages.

Keywords: heap leaching, gold mine, telescopic conveyors, mobile conveyors, mineral processing.

GİRİŞ

Altın madenciliği, altın fiyatlarındaki artış nedeniyle önemini artıran bir sektördür. Yığın liçi, altın kazanımında yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Ancak, yığın dizaynı ve yüksek kapasiteler, bu tip uygulamalarda önemli bir darboğazdır. Bu nedenle, mobil kamyon boşaltma sistemleri, mobil transfer konveyör sistemleri ve teleskopik konveyörler gibi ekipmanlar gün geçtikçe sıkça bu tip uygulaması olan madenlerde kullanılmaya başlanmıştır.

Yığın lici yapacak firmaların kullandığı konveyör sistemleri genel olarak mobil sistemler olmalıdır ki zamanla yarışılan bir sektörde hızlı hareket kabiliyetine sahip, kolay yer değiştirilebilinen sistemler faaliyet hızını da olumlu yönde arttırmaktadır. Çoğu maden genel olarak lastik tekerlekli konveyör sistemleri kullanılarak yığın lici yapmaktadır, ayrıca yığın yapılacak alanda nihai konveyör de döner konveyör olarak kullanılır, son zamanlarda bu sistemler daha da gelişmiş, lastik tekerlekli konveyörlere ek olarak paletli kendi kendine hareket edebilen aktarma konveyörleri, yine paletli bir yatay indeks konveyör ve mobil teleskopik ve otomasyon sistemli bir nihai döküş konveyörü kullanılmaya başlanmıştır. Bu konuda sektörde oncu firma Telestack firmasının çözümleri de dünya genelinde kendinden söz ettirmekte ve birçok maden de yığın liçi uygulamalarına ekipman sağlamaktadır. Öncelikle genel olarak uygulamada kullanılan ekipmanların teknik özelliklerini incelememiz gerekmektedir;

Mobil Paletli veya Lastik Tekerlekli Kamyon Boşaltma Sistemleri

Mobil paletli veya Lastik tekerlekli kamyon boşaltma sistemleri, Kırma eleme tesisinden çıkan ve cevher ihtiva eden kırılmış ve elenmiş malzemeleri yığın liçi sahasına getiren çeşitli ebattaki kamyonların malzemeyi boşaltıp, yığına taşıyacak konveyörlere düzgün, homojen ve güvenli bir bicimde beslenmelerini sağlarlar (Şekil 1). Genel olarak besleme yapan kamyon boyutlarına göre bir bunkeri, bunker altı hidrolik tahrikli paletli bir besleyici ve bir döner konveyör vasıtasıyla aktarma konveyörlerine besleme yaparlar.

Bu sistemler lastik tekerlekli veya paletli olabilir, daha çok paletli sistemlerin mobilizasyonu kolay olduğu için tercih sebebidir. Ayrıca kamyon boşaltma ve taşıma konveyörüne döküş esnasında toz önlemek için toz bastırma sistemi veya bunker, konveyör üstlerinin kapanması opsiyonları bulunur; besleme hızının ayarı için bir frekans konvertörüne de sahiptirler, uzaktan kumanda opsiyonu da mevcuttur. Bunker içi hardoks astarlar ile aşınmaya karşı dayanıklı ve uzun ömürlü hale getirilmiştir.

Genel olarak 0-350mm malzeme besleme boyutuna kadar ulaşan bu bantlar, yığın liçi uygulamalarında 0-25mm (0-5mm, 0-10mm, 0-15mm, 0-20mmde olabilir) aralığında malzemeyi taşımakta kullanılır ve 50-3000ton/saat kapasiteye sahiptirler.



Şekil 1. Mobil kamyon boşaltma sistemi

Mobil Paletli veya Lastik Tekerlekli Aktarma Konveyörleri

Mobil konveyörler yığın liçi sisteminde kamyon boşaltma ekipmanın ardından kullanılmaktadır ve beslenen malzemeyi yığının yapılacağı alana düzenli ve homojen bir biçimde sevk etmek amaçlı kullanılır, yığın dizaynına göre artan veya azalan bir şekilde aradan bir konveyör çıkarılarak veya yeni bir konveyör eklenerek yığının daha ileriye gitmesini veya geriye gelmesini sağlarlar (Şekil 2). İlk yatırım maliyeti ucuz olsun diye genel olarak lastik tekerlekli kullanılan bu konveyörler aslında paletli olanlar kadar mobil olmadıklarından dolayı, yer değiştirmesi, ekleme ve çıkarma operasyonu paletlilere göre daha uzun surede yapılır ve ekstra bir makine yardımı ile yapılması gerekmektedir, bu hem ekstra bir makine yatırımı hem de operasyonun durma suresini arttırmaktadır. Lastik tekerlekli aktarma konveyörlerine (Şekil 3, 4) alternatif yukarıda belirtilen paletli konveyörlerdir, bu konveyörler uzaktan kumanda ile kolaylıkla kendinden hareketli olup çok hızlı bir şekilde sisteme eklenebilir veya sistemden çıkarılabilir, ayni zamanda hızlı bir bicimde ileri geri sağa sola hareket edebilirler.

Kamyon boşaltma sistemlerinde olduğu gibi bu konveyörlerde birçok opsiyonel donanıma sahiptirler. Başlıcaları; uzaktan kumanda, bant kantarı, toz bastırma sitemi, döküş oluğudur. Genel olarak 0-350mm malzeme besleme boyutuna kadar ulaşan bu bantlar, yığın liçi uygulamalarında 0-25mm aralığında malzemeyi taşımakta kullanılır ve 0-3000ton/saat kapasiteye sahiptirler.



Şekil 2. Paletli Aktarma konveyörleri



Şekil 3. Lastik Tekerlekli Aktarma konveyörleri



Şekil 4. Lastik Tekerlekli Aktarma konveyörlerin yer değişimi için gerekli ekstra ekipman

Mobil Yatay İndeks Konveyörü

Mobil indeks yatay konveyörler, (Şekil 5) stoklama yapacak teleskopik konveyöre sürekli besleme sağlar ve yaklaşık 100 metre genişliğinde lineer bir stok alanı oluşturmak için gereken hareket miktarını minimuma indirmek amaçlı kullanılır, homojen, lineer ve düzenli besleme sağlamak ve öncekindeki aktarma konveyörlerinin hareket kabiliyetini arttırmak ve teleskopik konveyörün düzgün stoklamasını sağlamak için minimum hareket edip, segregasyonu en aza indirmeye yardımcı olmak amaçlı kullanılır.

Bu sistemlerin genel olarak önlerinde tekerlekler ve besleme kısminin altında hareket kabiliyetini maksimize edecek paletler vardır, bu sayede mobilizasyonu kolay olduğu için tercih sebebidir. Ayrıca toz önlemek için toz bastırma sistemi opsiyonu bulunur; besleme hızının ayarı için bir frekans konvertörüne de sahiptirler, uzaktan kumanda opsiyonu da mevcuttur.

Mobil Palet-Lastik Tekerlekli Teleskopik Yığın Konveyörü

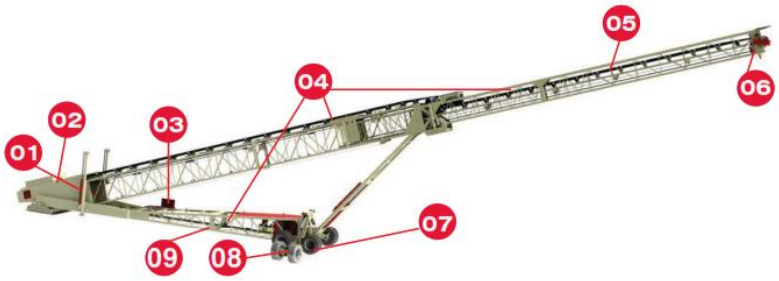
Sistemin son parçası ve en kritik ekipmanı olan teleskopik mobil yığın konveyörü radyal, teleskopik ve ileri geri gidebilen ikincil konveyörü sayesinde, malzeme stoklaması yapılırken operatöre tam kontrol imkânı sağlamakta ve malzemenin ayrışması, bozulması, kontamine olması ve sıkışması gibi sorunları ortadan kaldırmaktadır (Şekil 6, 7). Yenilikçi tasarımı, hem çok düzenli bir yığın yapmaya yardımcı olur hem de aynı uzunluktaki standart, teleskopik olmayan bir konveyör ile karşılaştırıldığında aynı yüzey alanında "uygun" malzemeden oluşan stoğun +%30 daha fazla olmasına imkân tanır.



Şekil 5. Paletli Yatay İndeks konveyörü

Sistem ilk çalışmaya başladığında geri çekilmiş halde olan iç konveyör, yere yakın ve düşük döküş açısıyla başlayarak sırasıyla soldan sağa doğru radyal yay hareketi yapar. Ünite stoğun üzerinden tam bir geçiş yaptığında, iç konveyör uzatılır ve stoğun üzerinde radyal hareketine devam eder. Stoğun yüksekliği arttıkça, konveyörün de yükselme ve boşaltma açısı otomatik olarak artar. Tamamen madenin ihtiyacına, stok yüksekliğine, acısına ve genişliğine göre PLC kontrol sistemi ile ayarlama ve planlanan stoku karşılamak için yüksek bir teknolojiye sahiptir. Farklı uzunluk ve genişliklerde bulunan radyal teleskopik konveyör serisi, tam otomatik PLC teknolojisini kullanarak daha küçük bir alan üzerinde "uygun" malzemedeki daha büyük stoklamalara olanak sağlar. PLC teknolojisi, ürünlerinin yüksek kaliteli ve verimli bir şekilde sunulmasında kilit rol oynamaktadır.

Genel olarak 0-300mm malzeme besleme boyutuna kadar ulasan bu bantlar, yığın liçi uygulamalarında 0-25mm aralığında malzemeyi stoklamak için kullanılır ve 0-3000ton/saat kapasiteye sahiptirler. 20m yüksekliğe kadar yığın oluşturabilmektedir ve ayrıca 270 derece açıda 200.000 ton malzeme stoklama kapasitesine de sahiptirler. Oldukça fazla opsiyonel donanıma sahip olan bu konveyörlerden başlıca opsiyonlar; otomatik stoklama sistemi, uzaktan kumanda, toz bastırma sistemi, acil durdurma butonları, tek veya çift yan yürüme yoludur.



Şekil 6. Teleskopik yığın konveyörü komponentleri

01: Makinenin rahat taşınabilir hale gelmesi için hidrolik olarak yükselen arka bölüm (opsiyon)
02: Malzemenin konveyör üzerine eşit dağılımına imkân vermek için besleme noktasında etki merkezi rulolar (opsiyon)
03: Otomatik stoklama PLC'si, HMI seçimi ve ekranı
04: Maksimum destek için tasarlanmış ağır hizmet tipi şasi
05: Maksimum kapasite ve esneklik için uzatılabilir ve geri çekilebilir teleskopik çıkış konveyörü

06: Otomatik olarak yükseltme/alçaltma işlemi için entegre yükseklik sensörleriyle döküş pozisyonu
07: Maksimum stok kapasitesi için radyal tekerlekler kullanılarak potansiyel olarak 270°'ye kadar radyal hareket
08: Radyal işlevi sağlamak için hidrolik katlanabilir tekerlekler
09: Mevcut güç ve kontrol seçenekleri (elektrik veya dizel)

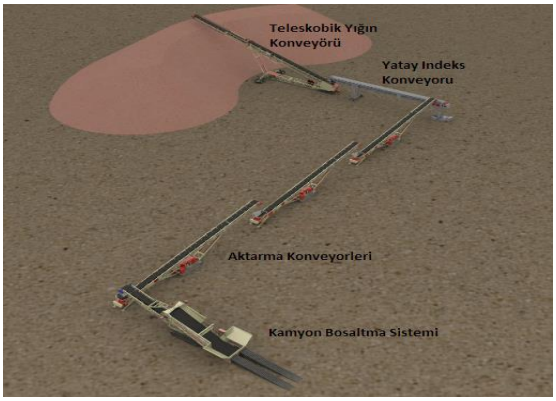


Şekil 7. Teleskopik Yığın konveyörü

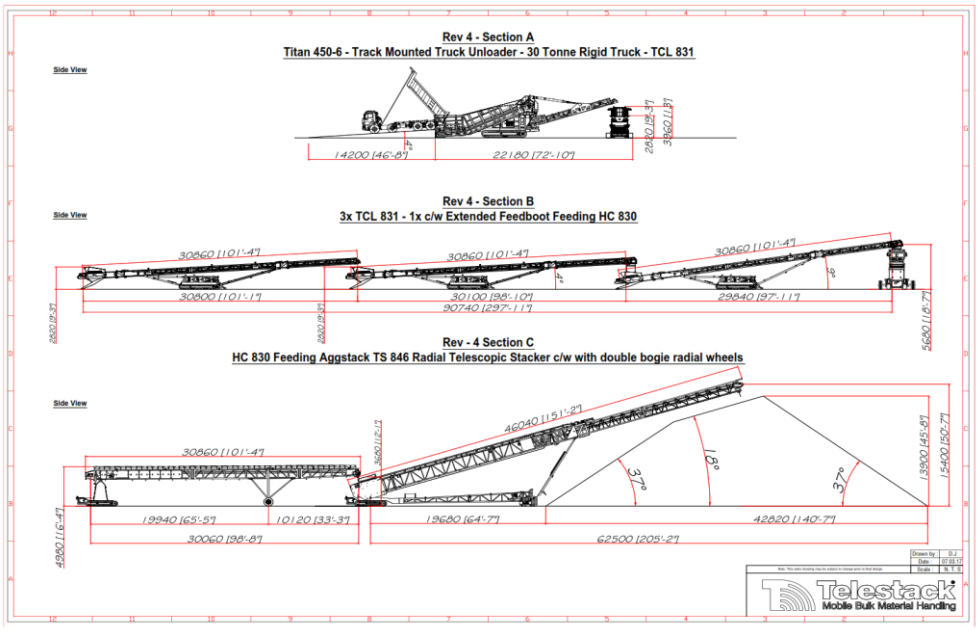


Şekil 8. Teleskopik konveyör yığın uygulaması

Sistemin Komple Görünümü Ve Çizimleri



Şekil 9. Tipik bir mobil yığın liçi konveyör sistemi konveyörü



Şekil 10. Tipik bir mobil yığın liçi konveyör sistemi yerleşim planı

Dünya Genelinde Bazı Uygulama Detayları

1- Kazakistan Sary Arka altın ve bakır madeni (Şekil 11)

Besleme 50 Ton/saat Belaz Kamyonlar
Toplam Sistem Kapasitesi 1200 Ton/saat
1 adet T800-6 Kamyon Boşaltma Sistemi
3 adet Mobil paletli konveyör
1 Adet HIC 30 İndeks Konveyörü
1 adet TS42 Mobil Stok Konveyörü



Şekil 11. Kazakistan Sary Arka Madeni yığın liçi uygulaması

2- Rusya Polyus Gold Altın madeni (Şekil 12)

Kırma Eleme tesisinden konveyör ile
Toplam sistem kapasitesi 1000 Ton/saat
1 adet TC621 Mobil aktarma konveyörü
1 Adet HIC 30 İndeks Konveyörü
1 adet TS42 Mobil Stok Konveyörü



Şekil 12. Rusya Polyus Gold Madeni yığın liçi uygulaması

3- Rusya Nord Gold Altın Madeni (Şekil 13)

Besleme Mobil Kırma eleme sistemlerinden direkt konveyör üzerine
Toplam sistem kapasitesi 3x400 toplam 1200 Ton/saat
Mobil tekerlekli aktarma konveyörleri
3 adet TS42 Mobil Stok Konveyörü



Şekil 13. Rusya North Gold Madeni yığın liçi uygulaması

4- Şili ACF Altın Madeni (Şekil 14)

Besleme Lastik Tekerlekli Yarı-Mobil kırma eleme tesisinden
Toplam Sistem Kapasitesi 1500 Ton/saat
6 adet TCL Mobil paletli konveyör
1 adet TS42 Mobil Stok Konveyörü



Şekil 14. Şili ACF Gold Altın Madeni yığın liçi uygulaması

5- Namibya Altın Madeni (Şekil 15)

Besleme 35ton taşıma kapasiteli Volvo Belden Kırmalı Kaya Kamyonlar
Toplam Sistem Kapasitesi 500 Ton/saat
1 Adet Titan 450 Kamyon Boşaltma Ekipmanı
1 adet TS42 Mobil Stok Konveyörü



Şekil 15. Namibiya altın madeni yığın liçi uygulaması

SONUÇLAR

Sonuç olarak, mobil kamyon boşaltma sistemleri, mobil transfer konveyör sistemleri ve teleskopik konveyörler, altın ve diğer metalik madenciliğinde yığın liçi uygulamalarında kullanılan verimliliği artıran ekipmanlardır. Yığın liçi uygulamaları daha hızlı, kolay, güvenli ve verimli hale getiren bu ekipmanlar hem madencilikte yeni bir soluk hem de madenlerdeki bu tip uygulamaların daha verimli yüksek kapasiteli olmasına olanak tanımakta ve gün geçtikte daha çok yeni uygulamalar ile yüksek kapasite, dayanıklılık ve mobiliteleri ile takdir kazanmaktadır.

HİBRİT AŞINMA PLAKALARININ DARBELİ ABRAZYON AŞINMA DAVRANIŞLARININ LABORATUVAR ÖLÇEĞİNDE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF IMPACT ABRASIVE WEAR BEHAVIOR OF HYBRID WEAR LINERS AT LABORATORY SCALE

T. Dokuz [1, *], İ.C. Duman [1], G. Pürçek [2]

[1] Çolakoğlu Mühendislik Mak. San. ve Tic. Ltd. Şti.
[2] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü
*(*Sorumlu yazar: tugce@colakoglumakina.com)*

ÖZ

Maden tesislerinde ilk yatırım, işletme ve enerji tüketim maliyetleri en yüksek ekipmanlar taşıma, işleme, aktarım olukları ve değirmenlerdir. Transfer edilen malzemelerin mineralojik yapısı ve çalışma koşulları bu ekipmanlarda kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Madenlerde cevherlerin transferi sırasında malzemeler arasındaki temastan kaynaklanan abrazif ve korozif aşınma ekipmanları kullanılmaz hale getirmektedir. Ekipmanların çalışma ömrünü uzatma amacıyla yaygın olarak yüksek manganlı çelikler ve hardox serileri kullanılmaktadır. Çeşitli sertlik ve kalınlıkta kullanılan bu çelik malzemeler halen uzun süreli koruma sağlayamamaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda çelikler gibi monolitik aşınma plakaları yerine hibrit aşınma plakalarının kullanılabileceği ortaya atılmış ve ilk uygulamalar hayata geçmeye başlamıştır. Bu çalışmada, hibrit plakalar için hardox, kauçuk ve seramik malzemeler kullanılmıştır. Monolitik ve hibrit aşınma plakalarının laboratuvar ortamında özel darbeli abrazyon aşınması testleri yapılmıştır. Aşınma testleri bu çalışmalar için özel olarak geliştirilen döner tambur test sisteminde gerçekleştirilmiştir. Aşınma sonrası her plakanın kütle değişimleri incelenmiştir. Kauçuk ile hibritlenen aşınma plakalarının seramik ile hibritlenen aşınma plakalarına kıyasla aşınma testi sonrası daha az kütle kaybına uğradığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar derlenerek, aşınma plakalarının performans testleri için ön bilgiler elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Aşınma plakaları, hibrit aşınma plakası, darbeli abrazyon aşınması, korozif aşınma

ABSTRACT

Conveying, processing, transfer chutes and mills are the equipment with the highest initial investment, operating and energy consumption costs in mining plants. The mineralogical structure and working conditions of the transferred materials cause permanent deformations in these equipment. Abrasive and corrosive wear caused by contact between materials during the transfer of ores in mines renders the equipment unusable. High manganese steels and hardox series are widely used to extend the service life of the equipment. These steel materials, which are used in various hardnesses and thicknesses, still cannot provide long-term protection. In some studies, it has been suggested that hybrid wear plates can be used instead of monolithic wear plates such as steels and the first applications have started to be realised. In this study, hardox, rubber and ceramic materials were used for hybrid plates. Special impact abrasion wear and corrosive wear tests of monolithic and hybrid wear plates were carried out in laboratory environment. Abrasion tests were carried out on a rotating drum test system specially developed for these studies. The mass changes of each plate after wear were analysed. It has been observed that wear plates hybridized with rubber undergo less mass loss after wear testing, compared to wear plates hybridized with ceramics. By compiling the results, preliminary information regarding the performance of the wear plates has been obtained for wear testing purposes.

Keywords: Wear liners, hybrid wear liners, impact abrasive wear, corrosive wear

GİRİŞ

Maden tesislerinde taşıma, işleme, aktarım olukları ve değirmenler enerji tüketiminde en yüksek paya sahiptir. Hem enerji tüketimi hem de yatırım maliyetinden kaynaklı bu ekipmanların uzun süreli korunması ve kesintisiz çalışması çok önemlidir. Bu ekipmanlar genel olarak malzemelerin mevcut konumundan başka bir yere aktarımı veya malzemenin işlenmesinde kullanılmaktadır. Tüm bu süreçlerde malzeme ve ekipman arasındaki temastan ve çalışma koşullarından kaynaklı çeşitli aşınma mekanizmaları oluşmaktadır. Malzemelerin teması sonucunda en sık görülen aşınma mekanizmaları darbeli ve kaymalı abrazif aşınmadır. Bu aşınma türleri özellikle cevherin mineralojik yapısından kaynaklanmaktadır. Bunların yanı sıra çevre koşullarının etkisi ile de özellikle içeriğinde sülfür mineralinin bol olduğu cevherlerde kaymalı ve abrazif aşınmaya ek olarak korozif aşınma meydana gelmektedir. Tüm bu aşınma mekanizmaları zamanla ekipmanlarda kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır ve ekipmanları kullanılmaz hale getirmektedir. Dolayısıyla ekipman içerisine aşınmaya dayanıklı koruyucu astarlar yerleştirilerek ekipman ömrünün uzatılması sağlanmaktadır.

Aşınma astarları çok çeşitli malzemelerden üretilebilmektedir. Genelde astar malzemesi olarak yüksek manganlı çelikler, paslanmaz çelikler, hardox çelikleri, çeşitli kauçuk türleri ve seramikler tercih edilmektedir (Pavlak, 2015; Cıkıt, 2015). Kullanım alanına göre tercih edilen aşınma astarları değişkenlik göstermektedir. Örneğin korozif aşındırıcı malzemenin transfer edildiği bir bölgede, gelen malzeme boyutu ve akış özelliklerine bağlı olarak, kauçuk veya seramik çeşitleri tercih edilebilmektedir (Chandasekaran, 2017). Başka bir örnek olarak malzeme akışı esnasında ekipman yüzeyinde yapışma problemi olan bölgelerde paslanmaz çelik veya teflon gibi malzemeler kullanılabilmektedir.

Ayrıca maden tesislerinde, genel bakım rutinlerinde bulunan planlı duruşlar haricinde ekstra duruşlar ciddi maddi kayıplara sebep olmaktadır. Planlı duruşlar makine/ekipman bakımı ve plaka değişimleri gibi gereksinimlerden dolayı yapılmaktadır. Plaka değişim süreleri üretici firmanın taahhüt ettiği sürelere göre belirlenmektedir. Ancak bu sürelerin belirlenmesi kişiye bağlı teknik bilgi ve birikim esasına göre yapılanmaktadır. Personelin manuel kontrollerini düzenli gerçekleştirmemesi gibi ihmallerden doğacak sonuçlarda ana ekipmanın zarar görmesi ile birlikte plansız duruşlar meydana gelmektedir.

Maden tesisinin verimli bir şekilde üretimine devam edebilmesi için bu aşınma plakalarının uzun süre değiştirilmeden dayanabilmesi, ekstra duruşların minimize edilebilmesi ve üretim sürekliliğinin sağlanabilmesi gerekmektedir. İngiltere'de yapılan bir çalışmaya göre altın madeninin verimli bir şekilde çalışabilmesi için 1 sene boyunca durmadan çalışması gerektiği bildirilmiştir (URL-1, 2019). Yapılan çalışmalar incelendiğinde aşınma plakalarının monolitik formda kullanılması yerine, çalışma koşullarına bağlı olarak seçilen uygun malzemelerle, hibrit formda kullanılması tesis verimliliğini arttırmaktadır. Saha testleri devam etmekte olan bu hibrit aşınma plakalarının mono aşınma plakalarına göre en az üç kat daha uzun ömürlü olduğu öne sürülmektedir. Yurt dışında yaygınlaşmakta olan bu ürünlerin Türkiye'de yeni bir pazar oluşturacağı ön görülmektedir.

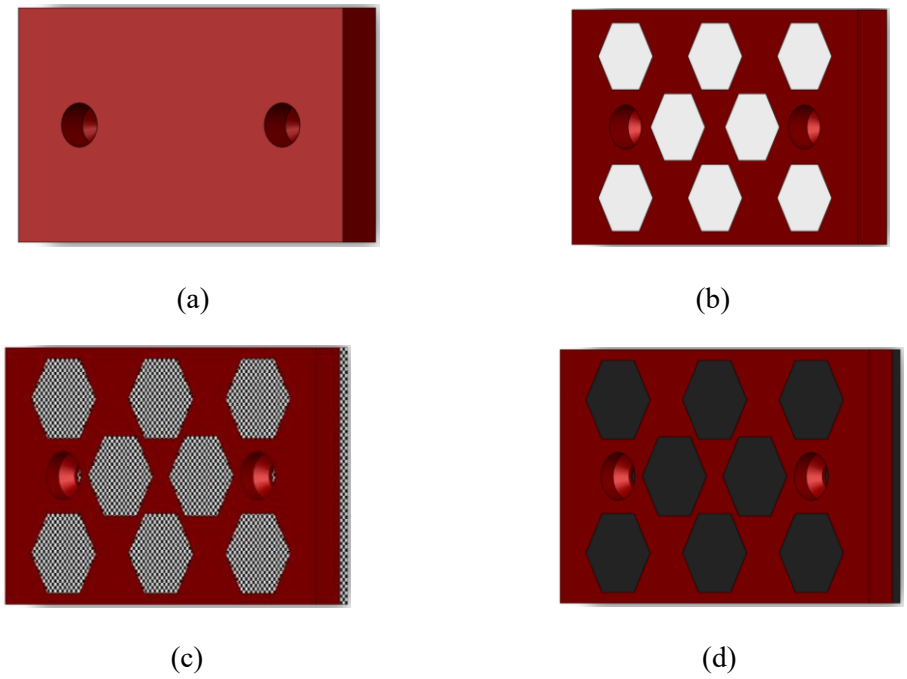
Mevcut çalışmada Hardox500 malzemesi referans monolitik aşınma plakaları olarak kabul edilmiştir. Hibrit aşınma plakalarında kullanılmak üzere Hardox500 ile alümina, neopren kauçuk ve seramik katkılı neopren kauçuk malzemeler kombine edilmiştir. Aşınma tamburu test cihazında 192 saat boyunca darbeli aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Monolitik ve hibrit aşınma plakalarının ağırlıkları test öncesi ve sonrası ölçülmüştür. Aşınma sonra ağırlık kayıplarına göre monolitik ve hibrit aşınma plakalarının darbeli abrazyon aşınması altında gösterdiği aşınma davranışları incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır.

MALZEME VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalar için Hardox500, neopren kauçuk ve alümina (%96 saflıkta Al_2O_3) monolitik ve hibrit aşınma plakaları hazırlanmıştır. Çizelge 1'de monolitik ve hibrit aşınma plakalarının numune kodları ve içerikleri verilmiştir. Şekil 1'de ise monolitik ve hibrit aşınma plakalarının üç boyutlu görselleri verilmiştir. Tüm plakalar; en, boy ve kalınlık olmak üzere sırasıyla 200x116x20 mm boyutlarındadır.

Çizelge 1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Aşınma Plakaları

Numune kodu	Plakada kullanılan malzemeler	Plaka türü
TAP.01	Hardox500	Monolitik Aşınma Plakası
TAP.02	Hardox500 + Al_2O_3	Hibrit Aşınma Plakası
TAP.03	Hardox500 + Al_2O_3 Katkılı Neopren Kauçuk	Hibrit Aşınma Plakası
TAP.04	Hardox500 + Neopren Kauçuk	Hibrit Aşınma Plakası



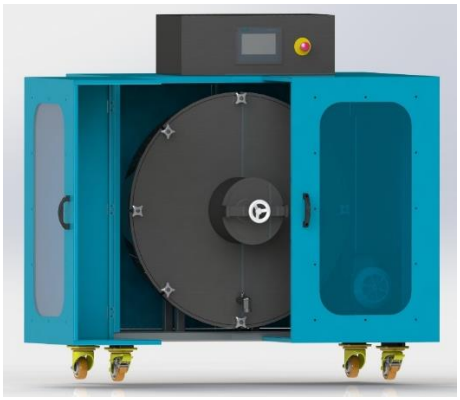
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 1. Monolitik ve hibrit aşınma plakaları: (a) TAP.01, (b) TAP.02, (c) TAP.03 ve (d) TAP.04

Monolitik ve hibrit aşınma plakalarının aşınma davranışlarının belirlenmesi için Şekil 2'de gösterilmekte olan aşınma tamburu test cihazı Çolakoğlu Ar-Ge Merkezi tarafından tasarlanarak geliştirilmiştir. Bu test cihazı sayesinde darbeli abrazyon aşınma testleri tüm plakalar için aynı koşullarda ve eş zamanlı gerçekleştirilebilmektedir.

Darbeli abrazyon aşınması testi öncesinde tüm plakaların ağırlıkları, Dikomsan marka ±0,01 gr hassasiyetli hassas terazi ile ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri üç kere tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Aşınma testlerinin gerçekleştirildiği aşınma tamburu test cihazının genel görünümü

Çizelge 2. TAP.01 – TAP.4 Aşınma plakalarının test öncesi ağırlık ölçümleri

Numune kodu	Ortalama ağırlık (gr)
TAP.01	3495,72
TAP.02	2945,28
TAP.03	1841,86
TAP.04	1855,16

Darbeli aşınma testinde aşındırıcı karışım olarak kullanılmak üzere Etibakır Siirt/Madenköy İşletmesinden temin edilen tüvenan bakır cevherleri ve Yıldız Beton firmasından temin edilen agrega farklı boyut ve kilogramlarda sınıflandırılmıştır. Tüvenan bakır cevherleri ile 3 farklı koşulda aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlere ait parametreler Çizelge 3'te verilmiştir. Numune tüvenan bakır cevherinin testler sırasında öğünmesinden ve taneciklerin yuvarlak forma dönüşmesinden dolayı kısa sürede aşındırıcı etkisinin azalacağı düşünülmüştür. Şekil 3'te 45-150 mm boyutlarında tüvenan bakır cevherinin bir saatlik test sonucu boyutsal değişimi gösterilmektedir.

Çizelge 3. Tüvenan bakır cevheri ile gerçekleştirilen test parametreleri

Test Süresi (h)	Aşındırıcı boyutu (mm)	Aşındırıcı miktarı (kg)
2	16-25	10
2	25-45	10
2	45-150	30



(a) (b)

Şekil 3. Tüvenan bakır cevherinin 1 saatlik darbeli aşınma testi öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüsü

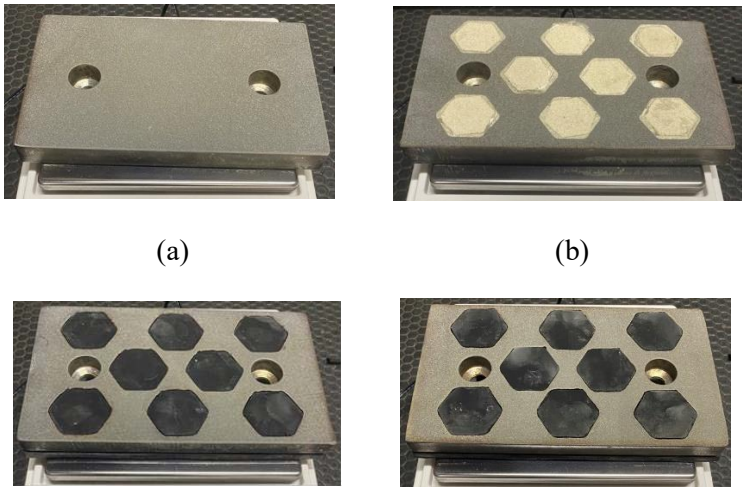
Agrega ile gerçekleştirilen test parametreleri ise Çizelge 4'te verilmektedir. Agrega ile yapılan testlerde tüvenan bakır cevherine nispeten daha uzun süre boyutsal kararlılık sağlamıştır. Darbeli aşınma testlerin daha uzun süre gerçekleştirilebilmesi için bu malzeme ile testlere devam edilmiştir. Tüm testler toplamda 192 saat sürmüştür. Kütle değişimi incelemesi için 48 ve 192 saatin sonunda ağırlık ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 4. Agrega ile gerçekleştirilen test parametreleri

Test Süresi (h)	Aşındırıcı boyutu (mm)	Aşındırıcı miktarı (Kg)
2	16-25	25
2	16-25	5
2	16-25	5
2	16-25	5
2	16-25	5
2	16-25	5
15	16-25	5
15	16-25	5
24	16-25	5
24	16-25	5
24	16-25	5
24	16-25	5
24	16-25	5
24	16-25	5

BULGULAR

Monolitik ve hibrit aşınma plakaları ile yapılan 192 saatlik darbeli aşınma testleri sonrasında aşınma plakaları test cihazından çıkarılmıştır. Çıkarılan bu plakalar ilk olarak fırça ile kaba olarak temizlenmiştir. Daha sonra test numuneleri basınçlı su ile temizlenmiş ve son olarak basınçlı hava ile hem temizleme işlemi hem de kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Test işlemlerinden sonra numune plakaların son halleri Şekil 4'te verilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4. Numune test plakalarının 192 saat test sonucu genel görünümleri:
(a) TAP.01, (b) TAP.02, (c) TAP.03, (d) TAP.04

Darbeli aşınma testi sonrasında tüm plakaların ağırlıkları, Dikomsan marka ±0,01 gr hassasiyetli hassas terazi ile ölçülmüştür. Darbeli abrazyon testlerinin 48. Ve 192. saat sonrasında plakaların ağırlıkları üç kere ölçülmüş ve ortalama ağırlıklar sırasıyla Çizelge 5 ve 6'da verilmiştir.

Çizelge 5. TAP.01 – TAP.4 Aşınma plakalarının 48 saat test sonrası ağırlık ölçümleri

Numune kodu	Ortalama ağırlık (gr)
TAP.01	3494,15
TAP.02	2943,13
TAP.03	1842,42
TAP.04	1855,14

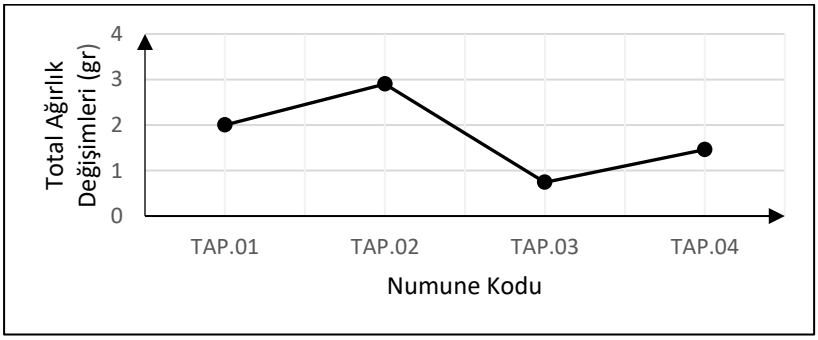
Çizelge 6. TAP.01 – TAP.4 Aşınma plakalarının 192 saat test sonrası ağırlık ölçümleri

Numune kodu	Ortalama ağırlık (gr)
TAP.01	3493,72
TAP.02	2942,38
TAP.03	1841,12
TAP.04	1853,7

Monolitik ve hibrit aşınma plakalarının test sonrası alınan ağırlık ölçümleri ile test öncesindeki ağırlıklar ve karşılaştırmalı ağırlık farkları Çizelge 7'de ve Şekil 5'te verilmiştir.

Çizelge 7. TAP.01 – TAP.4 Aşınma plakalarının test sonrası ağırlıkları ve total ağırlık değişimleri

	Numune kodu			
Test Süresi (h)	TAP.01	TAP.02	TAP.03	TAP.04
	Numune Ağırlıkları (gr)			
0	3495,72	2945,28	1841,86	1855,16
48	3494,15	2943,13	1842,42	1855,14
192	3493,72	2942,38	1841,12	1853,70
	Total Ağırlık Farkı (gr)			
	2	2,9	0,74	1,46



Şekil 5. 192 saatlik darbeli abrazyon aşınması testleri sonrasında monolitik ve hibrit aşınma plakalarının ağırlık değişimleri

192 saatlik darbeli abrazyon aşınma testi sonucunda TAP.01 (Hardox500) aşınma plakası 2 gr, TAP.02 (Hardox500 + Al_2O_3) aşınma plakalarında 2,9 gr kütle kaybına uğramıştır. Hardox500 + Al_2O_3 aşınma plakalarındaki aşınma yüzeysel olarak daha çok alümina parçaların plaka üzerine sabitlenmesi için kullanılan yapıştırıcı üzerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Hardox500 ve Al_2O_3 parça yüzeylerindeki aşınmanın monolitik plakalar üzerindeki aşınma ile benzer olduğu görülmüştür (Şekil 6).

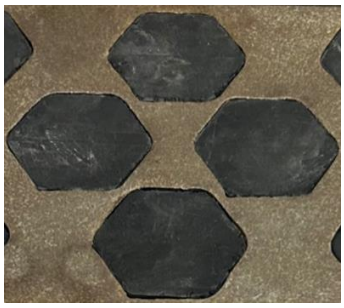


(a) (b)

Şekil 6. Hardox500 + Al_2O_3 kombinasyonundaki (a): Al_2O_3, (b): Hardox500 bölgesindeki aşınmanın görüntüsü

48 saatlik darbeli abrazyon aşınması testi sonucunda TAP.03 (Hardox500 + Al_2O_3 Katkılı Neopren Kauçuk) aşınma plakasındaki kütle artışının nedeni olarak aşındırıcı numune cevher ve dökme malzemenin kauçuk yüzeyine yapışması ve kauçuk içerisine nüfuz etmesi olarak düşünülmektedir (Şekil 7).

192 saatlik darbeli abrazyon aşınması testi sonucunda ise TAP.03 (Hardox500 + Al_2O_3 Katkılı Neopren Kauçuk) aşınma plakası 0,74 gr ve TAP.04 (Hardox500 + Neopren Kauçuk) aşınma plakası 1,46 gr kütle kaybına uğramıştır. Hardox500 + Neopren Kauçuk aşınma plakalarındaki aşınma seviyesinin diğer hibrit plakalara göre yüzeysel olarak benzer bir aşınma karakteristiği gerçekleştirdiği ancak kütle kaybı açısından bakıldığında daha iyi bir performans sergilediği ilk çalışmalar sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 7. Hardox500 + Al_2O_3 Katkılı Neopren Kauçuk aşınma plakasının test sonrası görüntüsü

Son olarak yapılan bu testlerin plakalar arasındaki kıyaslamanın daha belirgin gözlemlenebilmesi için daha uzun süreli gerçekleştirilmesi gerektiği ve kütle kaybının yanında hacimsel değişiminin de incelenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapıştırıcı üzerinde gerçekleşen aşınma problemi için, Hardox500 + Al_2O_3 kombinasyonu geometrik birleştirme şeklinde gerçekleştirilip bu problemin önüne geçilmesi üzerine çalışılması sağlanabilir. İlerleyen çalışmalarda plakalar yüzeyindeki aşınmanın mikroskop altında incelenmesinin de faydalı olabileceği düşünülmektedir.

SONUÇLAR

1. Monolitik aşınma plakaları yüzeylerinde beklenen bir sonuç olarak homojen bir aşınma gözlemlenmiştir.
2. Hardox500 + Al_2O_3 aşınma plakalarındaki aşınmanın alümina parçaların çelik plakaya sabitlenmesi için kullanılan yapıştırıcı yüzeyinde gerçekleştiği görülmüştür.
3. Hardox500 + Al_2O_3 Katkılı Neopren Kauçuk aşınma plakalarının 48 saatlik darbeli abrazyon aşınması testi sonucunda cevher ve dökme malzeme parçacıklarının kauçuk yüzeyine tutunması ve kauçuğa girişim yapması nedeniyle beklenen kütle kaybının aksine plakalarda az da olsa kütle artışı gerçekleşmiştir. Ancak aşınma karakteristiğinin yüzeysel olarak diğer plakalara benzer seyir gösterdiği görülmüştür. Hardox + Neopren Kauçuk aşınma plakasında da benzer şekilde durum söz konusu olmuştur fakat Hardox500 + Al_2O_3 Katkılı Neopren Kauçuk aşınma plakasına kıyasla daha çok aşındığı için pozitif yönde kütle değişimi gözlemlenmemiştir.
4. Yapılan testler sonucunda monolitik ve hibrit aşınma plakalarının aşınma performansları kıyaslandığında en iyi sonucu Hardox500 + Al_2O_3 Katkılı Neopren Kauçuk aşınma plakası vermiştir.
5. Yapılan 192 saatlik bu testlerin sonucunda plakalar üzerindeki aşınma seviyelerinin kütlesel olarak farkının ölçülmesi ve plakalar arasındaki kıyaslamanın daha belirgin gözlemlenebilmesi için çok daha uzun bir süre boyunca devam ettirilmesi gerektiği ve kütle kaybının yanında hacimsel değişiminin de incelenmesinin faydalı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, Proje No: 3220884) tarafından 1501 – TÜBİTAK Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK'a destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Pawlak, K., 2015, A Review of High-Strength Wear-Resistant Steel – Hardox, Students' Science Conference, Polonica Zdroj.

Çıkıt, E., 2015, Kırıcı ve Öğütücülerde Kullanılan Demir Esaslı Malzemelerin Yapı, Mekanik Özellikler ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. İTÜ , Fen Bilimleri Enstitüsü , Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Chandasekaran, C., 2017, Anticorrosive Rubber Lining: A Practical Guide for Plastics Engineers, Edt:William Andrew, 1st. edt., pp: 21-28.

URL-1., 2019, June, St. Ives gold mine slashes maintenance costs with FerroCer® Impact wear panels: https://www.flsmidth.com/en-gb/customer-stories/st-ives-gold-mine-slashes-maintenance-costs-with-ferrocer-impact-wear-panels adresinden alınmıştır.

AKÜLÜ ELEKTRİKLİ LOKOMOTİFLERDE DEĞİŞKEN ANAHTARLAMA FREKANSININ MOTOR ÖMRÜ VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ BİLEŞENLERİNE ETKİSİ

EFFECT OF VARIABLE SWITCHING FREQUENCY ON MOTOR LIFE AND POWER ELECTRONIC COMPONENTS IN BATTERY ELECTRIC LOCOMOTIVES

E. Eren [1, *], S.B. Öztürk [2], H. Kaya [1]

[1] *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü*
[2] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü*
*(*Sorumlu yazar: e.eren.eee@gmail.com)*

ÖZ

Modern madencilik sektöründe, taşımacılık için akülü elektrikli lokmotifler hayati derecede önemlidir. Elektrikli araçlarda son yıllarda her ne kadar PMSM ve AC asenkron motorlar tercih edilse de, elektrikli lokomotiflerde yüksek kalkış momenti, yatırım maliyetleri, ağır çalışma koşulları gibi sebepler nedeniyle halen birçok lokomotifte seri DC motorlar kullanılmaktadır. Programlanabilir ve kontrol edilebilir yapıları ile eviriciler/konvertörler, elektrikli araçların performans verimliliğini ve araçlarda kullanılan malzemelerin/birimlerin ömürlerini arttırmada kilit rol oynamaktadır. Bu yapıların en etkili kısmı, güç elektroniği üretiminin en önemli yarı iletken bileşeni olan izole kapılı bipolar transistörlerdir (Insulated Gate bipolar transistors - IGBT). Elektrikli araçların üretimlerinin artmasına parallel olarak, motor kontrol ünitelerinde güç elektroniğinin vazgeçilmez yarı iletkenlerinden birisi olan IGBT kullanımı da artmıştır.

Akülü elektrikli lokomotiflerin verimliliklerini arttırmak, invertör/konvertörlerde bulunan DC bara kondansatörlerinin ve motor ömrünü arttırmak, bunların yanında arızalanma risklerini azaltmak amacı ile motorun tork dalgalanmasını ve motor kontrol ünitelerinde bulunan yüksek akım taşıyan IGBT üzerindeki kayıpları belirli bir değerde tutmak için değişken anahtarlama frekansını kullanan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde anahtarlama frekansı, pwm doluluk oranı ve hat akımına bağlı olarak adaptif şekilde belirlenmektedir. Ayrıca motor akım dalgalanmasının belirlenen bir eşik değerin altında tutulduğu ve IGBT anahtarlama kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Madencilik, akülü elektrikli lokmotif, DC motor, IGBT

ABSTRACT

In the modern mining industry, battery electric locomotives are vital for the transport. Although PMSM and AC asynchronous motors have been preferred in electric vehicles in recent years, serial DC motors are still used in many locomotives due to reasons such as high starting torque, investment costs and heavy working conditions in electric locomotives. With their programmable and controllable structures, inverters/converters play a key role in increasing the performance efficiency of electric vehicles and the lifetime of the materials/units used in vehicles. The most effective part of these structures is the Insulated Gate bipolar transistors (IGBT), which is the most important semiconductor component of power electronics production. In parallel with the increase in the production of electric vehicles, the use of IGBT, which is one of the indispensable semiconductors of power electronics, has also increased in motor control units.

In order to increase the efficiency of electric locomotives, DC bus capacitors in inverters/converters and motor life, as well as to reduce the risk of failure, a method using variable switching frequency is proposed to keep torque fluctuation of the motor and the losses on the high current carrying IGBT of the motor control

units on set value. In the proposed method, the switching frequency is determined adaptively depending on the duty and line current. Furthermore, it has been observed that the current fluctuation of the motor is kept below a specified threshold and the IGBT switching losses are reduced.

Keywords: Mining, battery electric locomotive, DC motor, IGBT

GİRİŞ

Son yıllarda güç elektroniğinin vazgeçilmez yarı iletkenlerinden birisi olan Yalıtımlı Kapı Bipolar Transistör (insulated gate bipolar transistor - IGBT) ulaşım, endüstri, aydınlatma, tüketici elektroniği, tıbbi cihazlar, savunma sanayi gibi birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle elektrikli araçların üretimlerinin artmasına paralel olarak IGBT kullanımı da artmıştır. Bu nedenle IGBT ve kontrol teknolojileri her geçen gün araştırılarak geliştirilmektedir. Elektrikli araçlardaki sınırlı enerji kaynağı nedeniyle, sistem verimliliğini arttırmak için kontrol ünitelerinde kullanılan IGBT'lerdeki kayıpların azaltılması ile ilgili araştırmaların da artmasına sebep olmuştur. IGBT'lerdeki kayıplar temelde iletim kayıpları ve anahtarlama kayıpları olarak ikiye ayrılmıştır. İletim kayıpları statiktir ve çoğunlukla ürün teknolojisine bağlıdır. Anahtarlama kaybı ise DC bara geriliminin sabit olduğu durumda, doğrudan IGBT'den geçen hat akımının genliğine ve anahtarlama frekansına bağımlı hale gelir (Anas ve Muhamad, 2020). Anahtarlama kaybını azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri anahtarlama frekansının azaltılmasıdır. Fakat bu durumda da akım dalgalanmasının, motor yüklerinde motorların tork dalgalanmasının arttığı ve güç pasif ve aktif elemanlarının olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir (Shiyu ve Dong ve Qiao ve Wei ve Jianan, 2020; Hanwei ve Lie ve Kui ve Zedong ve Yongdong , 2019; Xuan ve Dong ve Jianan ve Qiao, 2020; Wael ve Dahaman ve Khaleel, 2011). Bir motoru çeşitli hız ve yük noktalarında çalıştırmak için Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) sürücüleri kullanılmaktadır. Pratik senaryolarda motor akımındaki dalgalanma, motor ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır (Sunil, 2019). Akım dalgalanması, PWM frekansı artırılarak azaltılabilir. PWM frekansı, motorun zaman sabitinden (L / R) önemli ölçüde yüksekse, dalgalanma daha da azalır. Motorlarda, daha uzun motor ömür için % 10'dan az motor akımı dalgalanması önerilmiştir (Sunil, 2019). DC bara akımda meydana gelen dalgalanmalar, DC bara kondansatörlerinin ömrünü de azaltmaktadır. Akım dalgalanma değerini azaltmak için anahtarlama frekansının artırılması gerekmektedir. Fakat anahtarlama frekansının artması da anahtarlama kayıplarını arttırmaktadır. Hem kayıpları azaltmak hem de akım dalgalanmasını belirli bir seviyede tutarak kondansatörlerin ömürlerini arttırmak amacı ile optimum bir anahtarlama frekansı belirlemek gerekmektedir (Jung-Dae ve Dong-Hwan ve Rae-Young, 2022).

Literatürde yapılan çalışmalar, motor akım dalgalanmalarının, motora ve güç yarı iletkenlerine olumsuz etkilerini azaltmak için anahtarlama frekanslarını arttırmanın donanımsal maliyeti arttırmadan çözebileceğini göstermiştir (Shiyu ve Dong ve Qiao ve Wei ve Jianan, 2020; Hanwei ve Lie ve Kui ve Zedong ve Yongdong , 2019; Xuan ve Dong ve Jianan ve Qiao, 2020; Wael ve Dahaman ve Khaleel, 2011). Bu nedenle literatürde değişken kapı (gate) direnci, değişken anahtarlama frekansı gibi adaptif yöntemler kullanılmaktadır. Anas ve Muhamad (2020) yapmış oldukları çalışmada iki seviyeli 3 fazlı bir inverter de, anahtarlama kayıplarını azaltmak için değişken anahtarlama frekansı önermişler ve akım dalgalanması değerini de karmaşık matematiksel denklem ile tahmin etmişlerdir. Chengming ve Qingbo ve Liyi ve Mingyi ve Tiecheng (2017) yapmış oldukları çalışmada ise motor akımlarının temel ve harmonik bileşenlerini analitik olarak hesaplamak için Fourier analizi kullanılmış ve anahtarlama kayıplarından kaynaklı kayıpları azaltmak için ise anahtarlama frekansını ve motor akımını birlikte optimize etmek için bir kontrol yöntemi uygulanmıştır. Bir başka çalışmada, matematiksel analizler kullanılarak motor akımın dalgalanması ve anahtarlama frekansına bağlı olarak bir anahtarlama frekansı şeması çıkarılmıştır (Yinglai ve Jinia ve Rajapandian 2021). Dong ve Qiao ve Xun ve Ronghai (2017) yapmış oldukları çalışmada, AC motor akım dalgalanma değerine bağlı motor tork dalgalanmasının olumsuz sonuçlarını önlemek için değişken anahtarlama frekansı uygulaması yapmışlardır.

Bu çalışmada, modern madencilik sektöründe taşımacılık ve ulaşım sisteminin hayati derecede önemli bir parçası olan akülü elektrikli lokomotiflerin verimliliklerini, motor ömrünü arttırmak ve arızalanma risklerini azaltmak amacı ile motorun tork dalgalanmasını belirli bir değerde tutmak, DC bara kondansatörlerinin ömürlerini uzatmak ve anahtarlama kayıplarını da azaltmak için değişken anahtarlama frekansını kullanarak yapabilen bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, değişken anahtarlama frekansını, karmaşık matematiksel analiz yöntemleri yerine yapay sinir ağları kullanarak yapabilen bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde ilk olarak, PSIM programında IGBT kayıplarının, motor akımlarının, frekansın ve PWM doluluk oranının (PWM Duty Cycle) ölçülebildiği ve değiştirebildiği bir test ortamı hazırlanmıştır. Motor yükü, frekans ve PWM doluluk oranı değiştirilerek IGBT anahtarlama kayıpları, IGBT iletim kayıpları, toplam IGBT kayıpları, kollektör akımı, motor akım dalgalanma değerleri, motor akımı etkin değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler arasından, IGBT kayıp ve akım dalgalanma değerlerini optimize edecek şekilde belirlenen sınır akım dalgalanma ve minimum IGBT kayıp değerleri doğrultusunda optimum frekans tablosu çıkarılmıştır. Sonrasında, MATLAB yapay sinir ağları (YSA) modülü kullanılarak, değişken motor akımı ve PWM doluluk oranı verileri ile optimum frekans tahmini için eğitim yapılmıştır. Bu eğitim sonucunda optimum frekans tablosunda yer almayan değişken motor akımı ve PWM doluluk oranları değerleri için de optimum frekans tahmini yapılmıştır. Çalışma da, iki farklı yol senaryosu, farklı NN algoritmaları ve farklı nöron sayıları kullanılarak performans sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Son olarak sonuçlar tartışılarak çalışma sonlandırılmıştır.

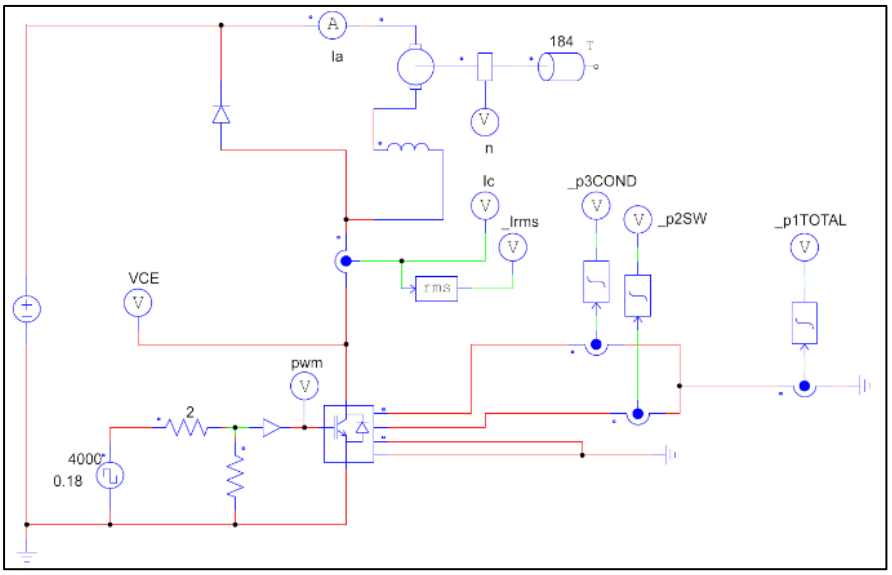
SİSTEM MODELİ

Sistem modelinde, IGBT kayıplarının, motor akımlarının, frekansın ve PWM doluluk oranlarının değiştirilebildiği ve ölçülebildiği bir simülasyon/test ortamı için Şekil 1'de gösterilen PSIM programında tek bölgeli kıyıcı (One-quadrant chopper) devresi kurulmuştur. Bu modelde, 21,5kw gücünde seri DC motor, serbest dönüş (freewheeling) diyotu, Powerex CM1000HA-24H IGBT tekli modülü, mekanik yük ve gerekli akım, gerilim, tork gibi değerleri ölçmek için ölçüm propları kullanılmıştır. Kullanılan DC Motorun Özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan DC motorun özellikleri

Anma Gücü	21,5kW
Anma Voltajı	119VDC
Ia (Armatür Akımı)	223Amper
If (Alan Sargı Akımı)	223Amper
Anma Devri (rpm)	1022 d/d
Ra (Armatür Sargı Direnci)	0,023 ohm.
La (Armatür Sargı indüktansı)	0,000745 H
Rf (Alan Sargı Direnci)	0,06 ohm
Lf (Alan Sargısı indüktansı)	0,000280 H

Çalışmada, anahtarlama frekansları [1:1:11] kHz aralığında, yük %0, %15, %25, %35, %50, %65, %75, %85 ve %100 olarak değiştirilmiştir. Her bir frekans ve yük değerlerinde pwm doluluk oranları ise %15, %25, %40, %50, %65, %75, %85 ve %95 olarak değiştirilmiştir. Bu değerlere göre yapılan 792 adet simülasyonun her biri için IGBT toplam kayıpları (Pqtop), anahtarlama kayıpları (PQsw), iletim kayıpları (Pqcond), kollektor minimum (Ic_min), maksimum (Ic_max) ve rms (Ic_max) akımları ve akım dalgalanma değerleri ile toplamda 5544 değer alınarak, yük-frekans için 99 farklı tablo oluşturulmuştur. Örnek olarak, 1kHz ve 10kHz frekansta ve %15 yük altında pwm doluluk oranlarına bağlı oluşturulan örnek iki tablo Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 1. Seri DC Motor ile One-quadrant chopper devresi

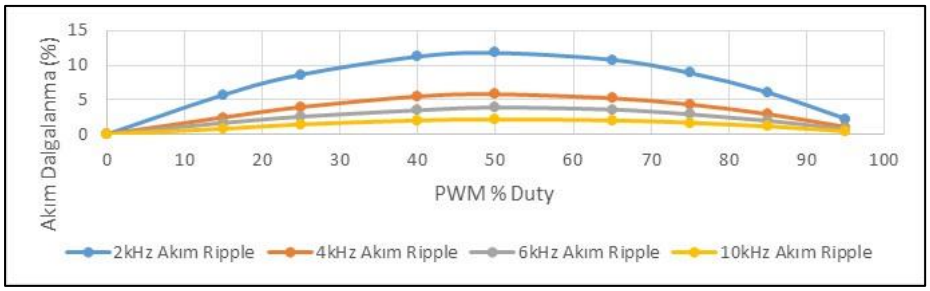
Çizelge 2. 1 kHz frekansta ve %15 yük altında pwm doluluk oranlarına bağlı elde edilen değerler

	1 kHZ							
%15 Yük	PWM Doluluk	15%	25%	40%	50%	65%	75%	85%	95%
	Pqtop(Watt)	23,54	35,50	53,96	66,52	85,72	98,72	111,92	125,40
	PQsw(Watt)	6,18	6,21	6,25	6,27	6,32	6,37	6,45	6,56
	Pqcond(Watt)	17,36	29,30	47,71	60,26	79,40	92,36	105,48	118,80
	Ic_max (Amps)	30,19	39,10	49,99	56,28	64,36	69,09	73,45	77,60
	Ic_max(Amps)	86,70	90,19	92,99	93,24	91,39	88,90	85,64	81,76
	Ic_min(Amps)	72,33	68,82	65,59	64,74	65,57	67,63	71,14	76,31
	Akım dalgalanma (%)	18,07	26,89	34,56	36,08	32,90	27,18	18,50	6,89

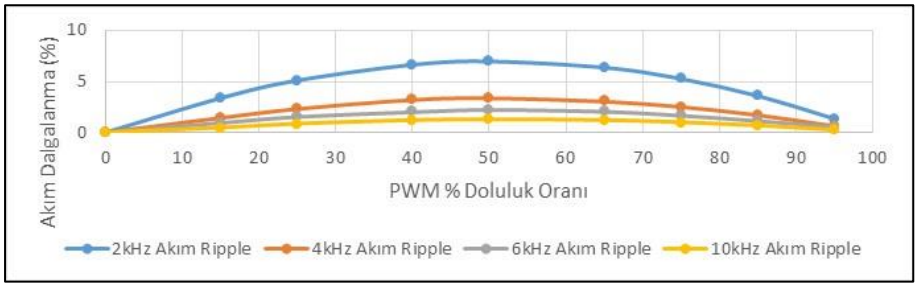
Çizelge 3. 1 kHz frekansta ve %15 yük altında pwm doluluk oranlarına bağlı elde edilen değerler

	10 kHz							
%15 Yük	PWM Doluluk	25%	40%	50%	65%	75%	85%	95%
	Pqtop(Watt)	79,51	91,91	110,87	123,85	143,71	157,24	171,00
	PQsw(Watt)	62,17	62,69	63,43	63,92	64,66	65,16	65,67
	Pqcond(Watt)	17,34	29,22	47,48	59,93	79,05	92,08	105,33
	Ic_rms(Amps)	30,67	39,59	50,11	56,05	63,95	68,75	73,27
	Ic_max(Amps)	79,93	80,29	80,62	80,69	80,61	80,44	80,18
	Ic_min(Amps)	78,95	78,56	78,18	78,08	78,17	78,40	78,78
	Akım ripple(%)	1,23	2,19	3,07	3,30	3,08	2,57	1,76

Şekil 2 ve Şekil 3'te, sırasıyla %35 ve %100 sabit yük altında 2, 4, 6 ve 10 kHz anahtarlama frekanslarında pwm doluluk oranlarına karşılık yüzdesel (%) akım dalgalanma değerindeki değişimin grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere akım dalgalanma değeri frekans arttıkça azalmaktadır ve hangi frekans olursa olsun pwm doluluk oranı %50 olduğu durumda akım dalgalanma değerinin en fazla olduğu görülmektedir.

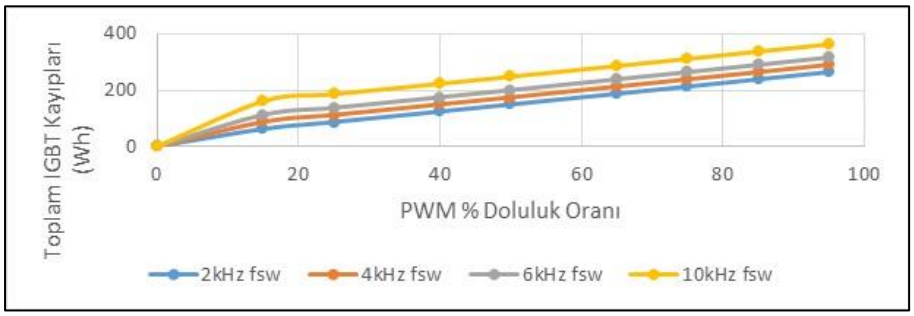


Şekil 2. %35 yük altında Frekansa ve PWM doluluk oranlarına bağlı akım dalgalanma değişimi

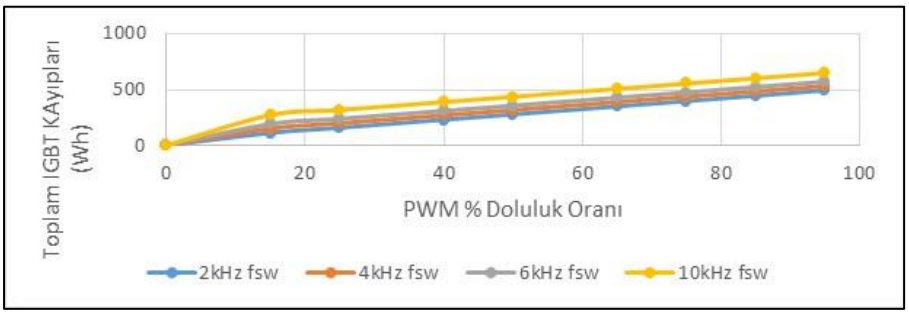


Şekil 3. %100 yük altında Frekansa ve PWM doluluk oranlarına bağlı akım dalgalanma değişimi

Şekil 4 ve Şekil 5'te, sırasıyla %35 ve %100 sabit yük altında 2, 4, 6 ve 10 kHz anahtarlama frekanslarında pwm doluluk oranlarına karşılık yüzdesel (%) toplam IGBT kaybının değişimin grafikleri verilmiştir. Yüksek frekans değerlerinde ve pwm doluluk oranları değeri arttıkça IGBT kayıplarının arttığı görülmektedir.

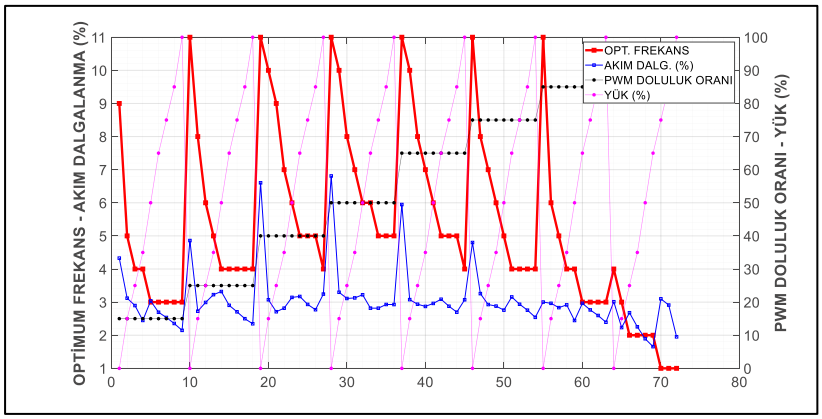


Şekil 4. %35 yük altında Frekansa ve PWM doluluk oranlarına bağlı IGBT kayıp değişimi



Şekil 5. %100 yük altında Frekansa ve pwm doluluk oranlarına bağlı IGBT kayıp değişimi

Tüm frekanslarda %50 PWM doluluk oranı değerlerinin ortalamaları göz önünde bulundurularak, IGBT kayıp ve akım dalgalanma değerlerini optimize etmek için maksimum akım dalgalanma tepe değeri %3.3 alınarak minimum IGBT kayıp değerleri veren optimum frekans tablosu farklı her pwm doluluk oranı-yük değerleri için oluşturulmuştur. Burada, motorun yüksüz (%0 yük) olduğu durumlarda akım dalgalanma değeri bazı pwm doluluk oranı-yük durumunda akım dalgalanma tepe değeri %3.3'ün altına inmediğinden, optimum frekans değeri 11 kHz seçilmiştir. Elde edilen 72 farklı yük-pwm doluluk oranı değerleri için akım dalgalanma, optimum frekans değerlerinin değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Elde edilen 72 farklı yük-pwm doluluk oranı değerleri için akım dalgalanma, optimum frekans değerlerinin değişimi.

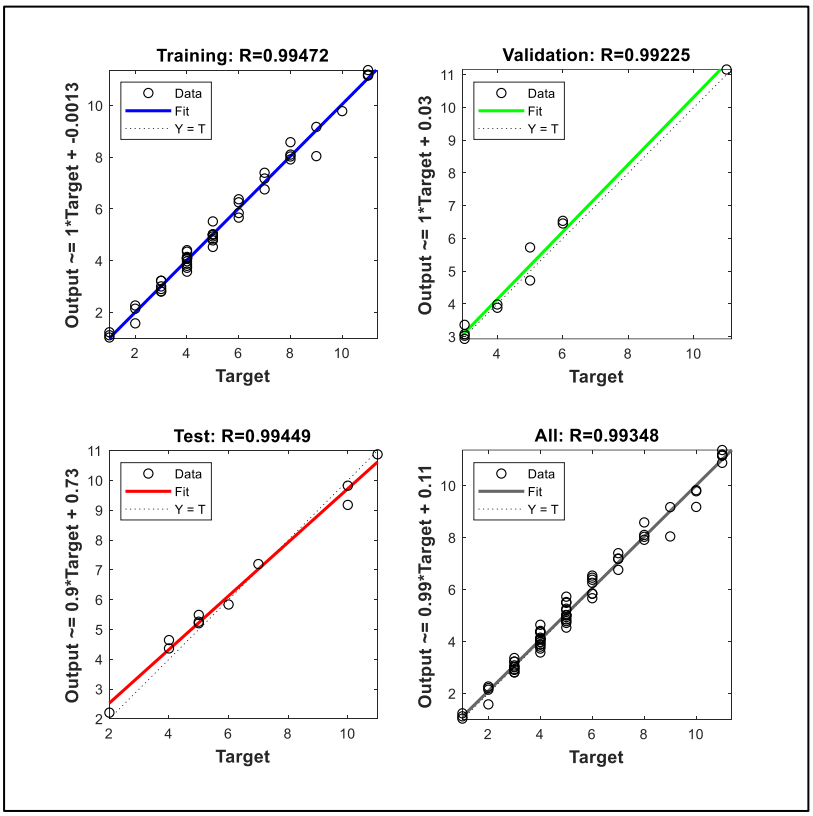
Yükün %0, %15, %25, %35, %50, %65, %75, %85 ve %100 değerleri ve %15, %25, %40, %50, %65, %75, %85 ve %95 pwm doluluk oranı değerleri için elde edilen 72 farklı yük- pwm doluluk oranı değerleri için belirlenen yük ve pwm doluluk oranı değerleri dışındaki değerler için de en az IGBT kaybı ve maksimum akım dalgalanma tepe değeri %3.3 elde etmek amacıyla optimum frekans kestirimi YSA ile yapılmıştır. Çalışmalar, Matlab nftool modülü kullanılarak yapılmıştır.

Giriş verisi olarak IGBT kollektor nominal akım değeri ve pwm doluluk oranı değerleri, çıkış verisi olarak da optimum frekans bilgileri kullanılmıştır. Veri setinin %70'i eğitim için %15'i doğrulama ve %15'i de test için kullanılmıştır. Öğrenme algoritması olarak, Levenberg-Marquardt ve Scaled Conjugate Gradient algoritmaları kullanılmıştır. Her iki öğrenme algoritmasında da 5, 10, 15 ve 20 adet gizli neuron kullanılarak eğitimler yaptırılmıştır ve eğitim sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgeye göre en iyi test performansı gösteren öğrenme algoritması, 10 nöron kullanılan Levenberg-Marquardt algoritmasıdır. Bu nedenle, bu çalışmada optimum frekans kestirimi için Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma için öğreneme ve test grafikleri Şekil 7'de verilmiştir.

Çizelge 4. Yapay sinir tahmin ağının sonuçları

Sinir Ağı Algortiması	Nöron Sayısı	Eğitim Performansı	Doğrulama Performansı	Test Performansı	Tüm Performanslar
Levenberg-Marquardt	5	0,9827	0,98153	0,97502	0,98149
Scaled Conjugate Gradient	5	0,96329	0,99058	0,95788	0,96451
Levenberg-Marquardt	10	0,99472	0,99225	0,99449	0,99348
Scaled Conjugate Gradient	10	0,98034	0,98263	0,96184	0,97818
Levenberg-Marquardt	15	0,97268	0,97967	0,97847	0,97449
Scaled Conjugate Gradient	15	0,96295	0,98853	0,98068	0,96795
Levenberg-Marquardt	20	0,9983	0,99099	0,9887	0,99471
Scaled Conjugate Gradient	20	0,94551	0,94933	0,95477	0,93919

72 farklı yük- pwm doluluk oranı değerleri için belirlenen yük ve pwm doluluk oranı değerleri dışındaki değerler için de optimum frekans kestirim algoritmasının test edilmesi amacıyla, eğitimde kullanılmayan farklı yük- pwm doluluk oranı değerleri için maksimum akım dalgalanma tepe değeri %3.3'ü sağlayan ve minimum IGBT kayıp değerleri veren optimum frekans tablosu Çizelge 5'te verilmiştir. YSA ağını test için sisteme Çizelge 5'teki IGBT kollektör nominal akımı (Ic_nom) ve pwm doluluk oranı değerleri giriş olarak verilmiştir. Sistem çıkışında kestirilen optimum frekans değerleri ile yine çizelgede verilen optimum frekans değerleri Çizelge 5'de verilmiştir. Gerçek değerler ile kestirilen değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



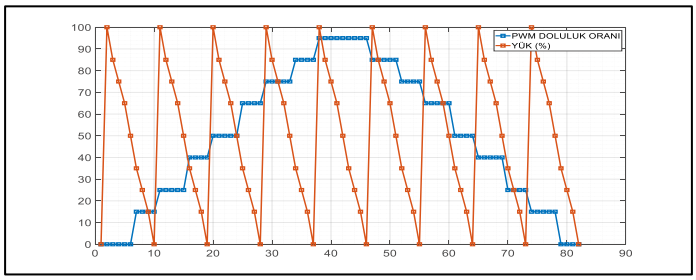
Şekil 7. Levenberg-Marquardt ile frekans tahmin ağının analizi

Çizelge 5. Optimum Frekans Kestirim Sonuçları

Test Verisi	PWM Doluluk (%)	Yük (%)	Akım Dalg. (%)	Ic_nom (Amps)	Opt. Frekans (kHz)	YSA Optimum Frekans (kHz)
1	9	13	2.61	73.6	4	4.5
2	56	13	3.11	74.2	11	9.9
3	92	22	2.91	96.0	3	3.5
4	28	36	2.74	122.8	6	5.4
5	32	43	2.96	134.3	6	5.7
6	43	48	3.05	141.8	6	6.6
7	68	68	2.87	168.8	5	4.7
8	72	71	3.31	172.4	4	4.4
9	82	92	2.88	196.3	3	3.2
10	18	92	2.67	196.4	3	3.3

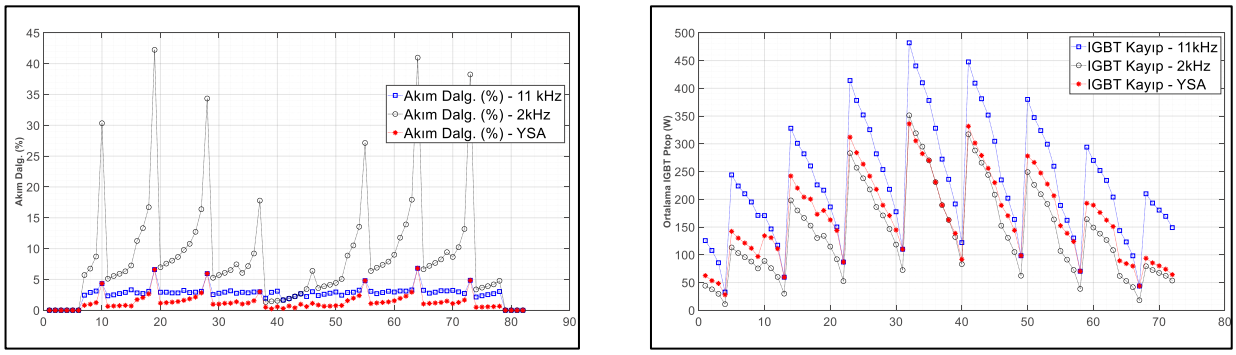
SİMÜLASYON SONUÇLARI

Çalışmada kullanılan seri DC motorun farklı hız (Pwm doluluk oranına bağlı olarak) ve yüklerdeki çalışma koşullarının dikkate alındığı iki farklı senaryo için Ortalama Akım Dalgalanması (%), Ortalama IGBT Anahtarlama kaybı - Psw (W), Ortalama IGBT Toplam Kaybı - Ptop (W) değerleri bulunmuştur. Tüm senaryolar toplam 80 sn süreyle gerçekleştirilmiştir. Her iki senaryoda da, YSA ile elde edilen değişken frekans değerlerini ve sabit frekans değerlerini (2, 4, 6, 7, 8, 10 ve 11 kHz) kullanarak gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryoda, pwm doluluk oranı %0-%95 aralığında ve yük %0-%100 değerleri aralığında değiştirilmiştir. Senaryo 1'in zamana göre pwm doluluk oranı-yük değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. PWM doluluk oranına bağlı yük senaryosu (Senaryo 1)

Şekil 9'de akım dalgalanma değerleri ve IGBT kayıpları 2kHz, 11 kHz ve YSA ile elde edilen değişken frekans değerleri Senaryo 1 için verilmiştir. Senaryo 1 için YSA ile elde edilen değişken frekans değerlerinin ve sabit frekans değerlerinin kullanılması durumunda elde edilen ortalama IGBT kayıpları ve ortalama akım dalgalanma değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.



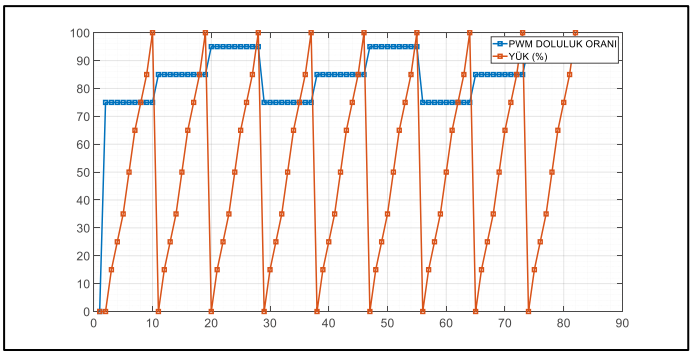
(a) (b)

Şekil 9. Senaryo 1 (a) Akım dalgalanma değerleri (b) IGBT kayıpları

Çizelge 6. Senaryo 1 için elde edilen ortalama değerler

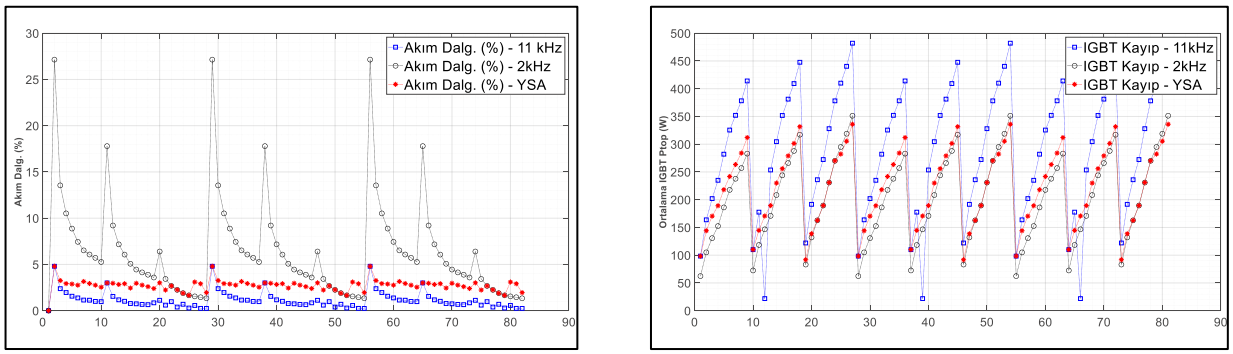
	Ort. Akım Dalg. (%)	Ort. Psw (W)	Ort. Ptop (W)
YSA	2,67	41,28	147,09
2 kHz	8,63	17,54	123,38
4 kHz	4,10	35,35	141,35
6 kHz	2,74	52,57	158,25
7 kHz	2,27	61,60	167,40
8 kHz	1,95	70,44	176,38
10 kHz	1,54	88,03	193,82
11 kHz	1,38	96,83	200,27

İkinci senaryoda ise pwm doluluk oranı %75-%95 aralığında ve yük %0-%100 değerleri aralığında değiştirilmiştir. Senaryo 2'nin zamana göre pwm doluluk oranı-yük değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. PWM doluluk oranına bağlı yük senaryosu (Senaryo 2)

Şekil 11'de akım dalgalanma değerleri ve IGBT kayıpları 2kHz, 11 kHz ve YSA ile elde edilen değişken frekans değerleri Senaryo 2 için verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 11. Senaryo 2 (a) Akım dalgalanma değerleri (b) IGBT kayıpları

Senaryo 2 için YSA ile elde edilen değişken frekans değerlerinin ve sabit frekans değerlerinin kullanılması durumunda elde edilen ortalama IGBT kayıpları ve ortalama akım dalgalanma değerleri Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Senaryo 2 için elde edilen ortalama değerler

	Ort. Akım Dalg. (%)	Ort. Psw (W)	Ort. Ptop (W)
YSA	2,72	36,24	217,36
2 kHz	6,40	19,98	201,14
4 kHz	3,08	40,04	221,28
6 kHz	2,08	60,09	241,23
7 kHz	1,80	70,10	251,27
8 kHz	1,50	80,15	261,36
10 kHz	1,22	100,19	281,32
11 kHz	1,16	110,21	284,21

SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, hem yükün yani motor tarafında çekilen akımın değiştiği hem de pwm doluluk oranının değiştiği elektrikli araç gibi uygulamalarda IGBT kayıplarını azaltmak ve akım dalgalanma değerinin istenen aralıkta tutulması için optimum anahtarlama frekansları belirlenmiştir. Anahtarlama kayıplarını, yük akımını, dc bara akımını ölçmek ve bu değerleri kullanarak karmaşık bir denklem çözmek yerine sadece dc bara akımı ve pwm doluluk oranı bilgisini kullanan YSA tabanlı optimum anahtarlama frekansı belirleyebilen sistem tasarlanmıştır. Yapılan simülasyonlarda (Senaryo 1 ve Senaryo 2), YSA ile adaptif anahtarlama frekans uygulamasının 10kHz sabit anahtarlama frekansına göre yaklaşık %20 kadar daha az kayıpla çalıştığı ve motor akım dalgalanma değerinin %3'ün altında olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Anas, I., Muhamad Z. S. (2020). Variable switching frequency hybrid PWM technique for switching loss reduction in a three-phase two-level voltage source inverter. *Measurement,* 107192.

Chengming, Z., Qingbo, G., Liyi, L., Mingyi, W., Tiecheng, W. (2017). System efficiency improvement for electric vehicles adopting a permanent magnet synchronous motor direct drive system. *Energies*, 10(12), 2030.

Dong, J., Qiao, L., Xun, H., Ronghai, Q. (2017). Variable switching frequency PWM for torque ripple control of AC motors. IEEE Electronic ISBN: 978-4-88686-098-9.

Hanwei, X., Lie, X., Kui, W., Zedong, Z., Yongdong, L. (2019). Switching losses reduction of grid-tied inverters with variable switching frequency discontinuous PWM. IEEE Electronic ISBN: 978-1-7281-0395-2.

Jung-Dae, L., Dong-Hwan, P., Rae-Young, K. (2022). Novel variable switching frequency PWM strategy for a SiC-MOSFET-based electric vehicle inverter to increase battery usage time. IEEE Electronic ISSN: 2169-3536.

Shiyu, X., Dong, J., Qiao, L., Wei, S., Jianan, C. (2020). A variable switching frequency PWM control method for single-phase MMC. IEEE Electronic ISBN:978-1-7281-5704-7.

Sunil, K. (2019). Controlling brushed Dc motors using PWM – optimal frequency, current ripple, and life considerations. [White Paper]. Lit code: TN0007_V12022019.

Xuan, Z., Dong, J., Jianan, C., Qiao, L. (2020). Variable switching frequency PWM for three-level NPC ınverter with neutral point voltage control. IEEE Electronic ISBN:978-1-7281-5301-8.

Wael A. S., Dahaman, I., Khaleel, J. H. (2011). PWM switching strategy for torque ripple minimization in BLDC motor. *Journal of Electrical Engineering*, Volume 62, No. 3, 141–146.

www.portescap.com.

Yinglai, X., Jinia, R., Rajapandian, A. (2021). Optimal variable switching frequency scheme to reduce loss of single-phase grid-connected inverter with unipolar and bipolar PWM. IEEE Electronic ISSN: 2168-6785.

YERDEN KUMANDALI HAVA ARAÇLARININ (DRONE) PATLATMA VERİMLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE KULLANIMI

APPLICATIONS OF DRONES IN EVALUATION OF BLASTING EFFICIENCY

T. Hüdaverdi, Y. Ağan *

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
*(*Sorumlu yazar: agany@itu.edu.tr)*

ÖZ

Bu çalışmada drone'ların patlatma verimliliği ölçümlerinde kullanımı araştırılmıştır. Arazi incelemesi İstanbul Kemerburgaz Bölgesinde bulunan bir kumtaşı ocağında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılan cihaz azami 50 km hıza ve 50 metre irtifaya ulaşabilmektedir. 1480 mAh kapasiteli bir pil kullanmakta ve ortalama 30 dakika havada kalabilmektedir. Drone görüntülerinin kullanımı atım bölgesinin detaylı bir şekilde izlenmesini sağlamıştır. Patlatma deliklerinin konumu ve delikler arası mesafe gözlenebilmektedir. Patlatma sonrası yığının genel görünümü bütüncül olarak ölçülebilmektedir. Yığının yayıldığı alanı belirlemek mümkündür. Ayna arkasında oluşan çatlaklar izlenebilmektedir. Atım sonrası parçalanmayı analiz etmek için yüksek çözünürlüklü fotoğraflar alınmıştır. Drone fotoğraflarını analiz etmek için geliştirilen özel bir yazılım ile yığının boyut dağılımı incelenmiştir. Drone kullanılmadığı zaman yığının faklı yerlerinden fotoğraflar alınması ve bunların birleştirilmesi gerekmektedir. Drone ile tüm yığını fotoğraflamak mümkündür. Analiz yoluyla yığının ortalama parça boyutu 44,29 santim olarak belirlenmiştir. Karakteristik boyut 55,54 cm ve yığının üniformite indeksi 2,37'dir. Havadan görüntüleme yapıldığı için yığında patar adı verilen büyük bloklar kolaylıkla tespit edilebilmiştir. Araştırmada en önemli parametrenin drone'un kamera çözünürlüğü olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak cihazın batarya ömrü de arazi kullanımında verimliliği etkilemektedir.

Anahtar Sözcükler: Drone, agrega ocağı, patlatma, hava fotoğrafı, görüntü işleme

ABSTRACT

This study describes use of drones for evaluation of blasting efficiency. Site investigation was performed in an Istanbul region sandstone quarry. The drone has a maximum speed of 50 km/hour and can reach 50 meters altitude. The battery capacity is 1480 mAh and the total flight duration is 30 minutes. Drone makes it possible to examine blast area in detail. Blasthole positions and spacing between holes were determined precisely. Muckpile displacement and backbreak after blasting were investigated. High resolution images were taken by drone to evaluate blast fragmentation. A special software was used to analyze drone images. Without drone, muckpiles are divided into sections and each section is photographed separately. Drone makes is possible to photograph the whole muckpile. The measured mean particle size is 44.29 centimeters. The characteristic size is 55.54 cm and uniformity index is 2.37. The boulders in muckpile were identified easily using drone photos. It is concluded that resolution of drone camera is an influential factor for success of site investigation. In addition, battery power and flight duration highly affect efficiency of drone measurements.

Keywords: Drone, aggregate quarry, blasting, aerial photography, image analysis

GİRİŞ

Drone'lar günümüzde açık ocaklarda madencilik operasyonlarının takibinde, üç boyutlu haritalamalar amacıyla, şev stabilitesi analizi için, ocak sınırlarının belirlenmesinde ve yığın hacimlerinin ölçümlerinde kullanılabilmektedir. Yeraltı madenlerinde jeoteknik karakterizasyon amacıyla, maden açıklıklarının gözlenmesinde, gaz tespitinde ve maden kurtarma operasyonlarında kullanılabilirler. Madencilik faaliyetleri sonrası yüzey oturmalarının gözlenmesi, reklamasyon alanlarının incelenmesi, asit maden drenajının gözlenmesi amacıyla kullanılabilirler (Lee ve Choi, 2016). Özel olarak agrega ocaklarına odaklanılırsa; drone'lardan her türlü arazi ölçümleri ve arazinin haritalanması için faydalanılabilir. Hava fotoğrafları yoluyla nakliyat yollarının gözlenmesi mümkündür. Yolların genişlikleri, kavisler incelenebilir. Yolların yönetmeliklere uygunluğu denetlenebilir. Gaz sensörü yerleştirilmiş dronelar azot oksit, sülfür oksit ve karbondioksit gazlarının ölçümlerinde kullanılabilir. McCray (2016) gaz sensörü yerleştirilmiş drone'lar ile patlama sonrası açığa çıkan azot gazlarını ölçmüştür. Yüksek çözünürlüklü drone görüntüleri ile basamak aynalarındaki süreksizlikler haritalanabilir.

Madenlerde kullanılan drone'lar genellikle sabit kanatlı (fixed-wings) ve çoklu pervaneli (multi-rotor) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sabit kanatlı drone'ların uçak kanatlarına benzer kanatları bulunur. Bu araçlar pervaneli drone'lara oranla daha yüksek irtifaya çıkabilir ve daha yüksek hızlara ulaşabilirler. Uzun süre havada kalabilirler. Bununla beraber bulundukları yerden kalkış yapamadıkları için, zeminde bir kalkış mesafesine ihtiyaç duyarlar. Yüksek ağırlıkta yük ve sensör taşıyamazlar ve kalkış-iniş sırasında rüzgârdan etkilenebilirler. Çoklu pervaneli drone'lar helikopterlere benzerler ve pervanelerin hareket etmesiyle dikey olarak kalkış yaparlar. Uçuş hızları farklılık gösterir ve dar alanlarda kullanıma uygundurlar. Farklı açılardan fotoğraf alabilirler. Bu cihazların havada kalış süreleri nispeten kısadır. Uzun süreli görevlerde kullanılamazlar.

Drone'lar faklı kameralar ve sensörler taşıyabilirler. Yüksek çözünürlüklü dijital kameralar uzun süreli video kaydına izin verir ve farklı açılardan görüntüler alınabilir. Kameralar özellikle yüzey ve alan ölçümlerinde son derece faydalıdır. LİDAR adı verilen lazer ölüm cihazları drone'lara takılabilir. Yerdeki bir objeye gönderilen lazer buradan yansıyarak drone üzerinde bulunan sensöre gelir. Objenin mesafesi hassas bir şekilde belirlenir. Termal kameralar ziraat ile ilgili araştırmalarda ve jeolojik ölçümlerde kullanılabilir. Kömür ocaklarında kendiliğinden yanmadan kaynaklanan ısı izlenebilir. Mini gaz sensörleri ile ocaklarda hava kirliliği ölçümleri yapılabilir (Ren vd., 2019).

Bu çalışma özellikle açık ocaklarda patlatma verimliliğinin değerlendirilmesinde drone kullanımına odaklanmaktadır. Arazi ölçümleri İstanbul Kemerburgaz bölgesinde bulunan bir agrega ocağında gerçekleştirilmiştir. Bildiride öncelikle ocak hakkında kısa bilgi verilmekte ve kullanılan drone'un teknik özellikleri açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde drone'un patlama ölçümlerinde kullanımı anlatılmaktadır. Dördüncü bölüm cihazın parçalanma verimliliği ölçümünde kullanımını ve boyut dağılım eğrisinin oluşturulmasını tartışmaktadır. Son bölüm araştırma sonuçlarının genel bir değerlendirmesini içermektedir.

ARAZİ ÖLÇÜMLERİ

Patlatma verimliliği ölçümleri İstanbul Cendere bölgesindeki Akdağlar ocağında gerçekleştirilmiştir. Bölgede birbirine komşu beş adet taş ocağı mevcuttur. Akdağlar ocağında kayaç yapısı Trakya formasyonu olarak adlandırılır. Temel olarak üretilen kayaç kumtaşıdır ve asfalt ve beton agregası olarak kullanılmaktadır. Patlayıcı olarak kuru deliklerde ANFO, sulu deliklerde ise kartuş emülsiyon patlayıcı şarj edilmektedir. Ateşleme sistemi olarak elektriksiz kapsüller kullanılmaktadır. Delikler arası gecikme genellikle 25 milisaniye, sıralar arası gecikme ise 25 veya 42 milisaniye olarak uygulanmaktadır. Basamak yükseklikleri ortalama 10 metre olmakla birlikte ocağın farklı yerlerinde değişkenlik göstermektedir. Ocakların yakınında yerleşim yerleri olduğu için verimli bir patlatmanın yanı sıra çevresel etkilerin de minimum seviyede tutulması gerekliliği vardır.

Bu çalışmada DJI marka bir drone kullanılmıştır. Pervaneli (multirotor) yapıdaki drone'un görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Ölçüm yapılan cihaz azami 50 km hıza ve 50 metre irtifaya ulaşabilmektedir. 1480 mAh kapasiteli bir pil kullanmakta ve ortalama 30 dakika havada kalabilmektedir. Yüksek çözünürlüklü video kayıt edebilmekte, 3968x2976 piksel çözünürlüğe kadar resim alabilmektedir. Cihaz Android ve IOS cep telefonlarına entegredir ve özel bir kumanda ile kontrol edilmektedir. Kullanılan drone'a ait teknik özellikler Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Dört pervaneli drone'un görünümü

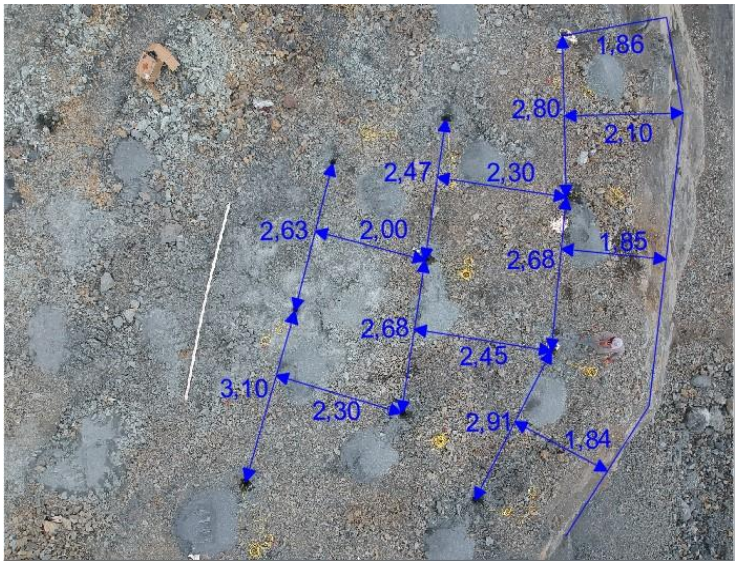
Çizelge 1. Kullanılan drone'a ait teknik özellikler

Kamera sensörü	12 Megapixel
Maksimum imaj boyutu	3968x2976
Video kayıt modu	Full HD 1920x1080
Wifi operasyon frekansı	2.4 G/5.8 G
Maksimum kontrol mesafesi	100 metre yatay
Operasyon frekansı	2400-2483 GHz
Batarya tipi	LiPo 3S
GPS doğruluk	±0,1 m-0,5 m dikey, 0,3 m-1,5 m yatay

CİHAZIN PATLATMA ÖLÇÜMLERİNDE KULLANIMI

Patlatma Bölgesinin İncelenmesi

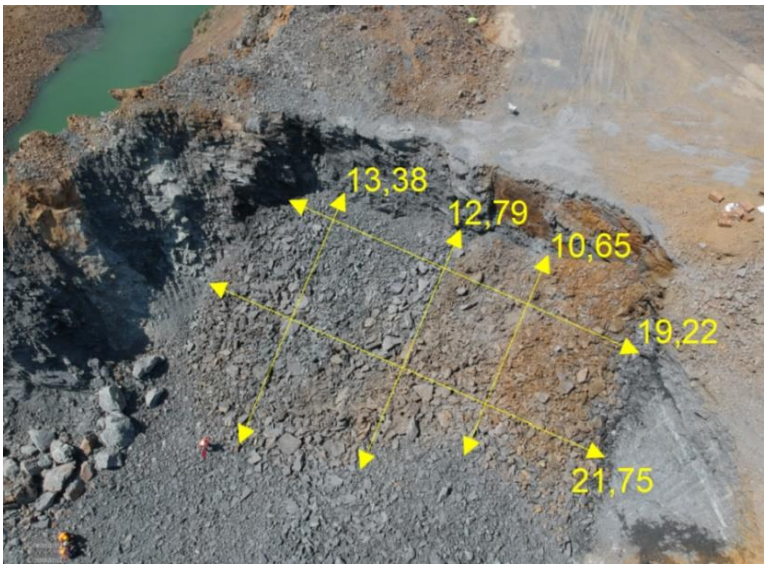
Şekil 2'de drone fotoğrafları ile patlatma tasarımının değerlendirilmesi görülmektedir. Yüksek bir aynada delikler arası mesafe ve dilim kalınlığı ölçümleri yapılmıştır. Ateşleyicilerin kullandığı uzun ebonit çubuk ölçek olarak kullanılmıştır. Ölçekli fotoğrafların analizi için Autocad yazılımından yararlanılmıştır. Drone, deliklerin pozisyonunu havadan bütüncül olarak görmek için faydalıdır. Delikler arası mesafe ve dilim kalınlığı değerleri mavi oklar ile metre cinsinden gösterilmiştir. Ortalama dilim kalınlığı 2,09 metredir. Ortalama delikler arası mesafe 2,75 metredir. Dilim kalınlığı en ön sırada ortalama 1,91 metre olarak gerçekleşmiştir. Delik yerleşiminin ön sırada aynayı takip eder şekilde kavisli olduğunu görmek mümkündür (Şekil 2).



Şekil 2. Drone görüntüsü ile delikler arası mesafe ve dilim kalınlığı ölçümü

Atım Sonrası Yığın Yayılımının İncelenmesi

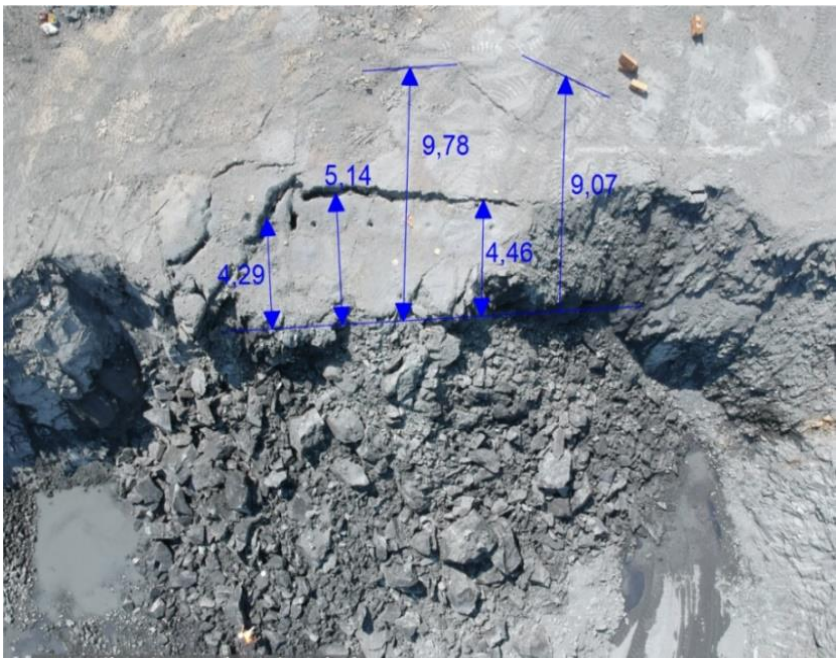
Aşağıda Şekil 3'de havadan drone ile alınan yığın fotoğrafı görülmektedir. Drone sayesinde yığının şeklini ve yayılımını bütüncül olarak izlemek mümkündür. Ölçülen maksimum yığın genişliği 21,75 metredir. Maksimum yığın boyu 13,38 metredir. Yığının yayılımı kazı ve yükleme verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Yığın çok geniş bir alana yayılırsa, bu alanın temizlenmesi ve toparlanıp kamyona yüklenmesi zaman alacaktır. Yayılan parçaları toparlamak için genellikle madenlerde dozerler kullanılır. Yığın dar bir alanda kalır ve çok yüksek olursa çalışma sırasında tehlike oluşturabilir. Ek olarak yükleme ekipmanının yığının yüksek kısımlarına ulaşması güç olacaktır. Bu nedenle optimumum bir yığın yayılımı tercih edilmektedir (Jimeno vd., 1995). Havadan alınan fotoğraflar ile kaya fırlama mesafesinin gözlenmesi de mümkündür. Yeterince yüksekten fotoğraf alınırsa, patlatma bölgesinin dışına savrulmuş olan kayaları görmek mümkün olacaktır.



Şekil 3. Drone görüntüsü ile yığın yayılımının incelenmesi

Patlatma Sonrası Arka Kırmanın İncelenmesi

Şekil 4'de drone fotoğraflarının arka kesmenin (backbreak) incelenmesi için kullanımı görülmektedir. Uzunluklar metre birimiyle verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bu örnek atımın arkasında tam olarak parçalanmayan bir kısım mevcuttur. Aynanın gerisinde 4,29 ve 5,14 metre mesafede askıda kalan bir blok görülmektedir. Aynanın yaklaşık 9 metre gerisinde patlatma çatlakları oluşmuştur. Patlamada amaç mümkün olduğunca düzgün bir basamak yüzeyi elde etmektir. Arka kesmenin başarısız olmasında farklı faktörler etkili olabilir. Yanlış patlatma tasarımı ve dilim kalınlığının aşırı olması bir faktördür. Sıralar arası gecikmenin yeterli olmaması atımın rahat hareket edememesine ve sıkışmasına neden olabilir. Özellikle son sıradaki deliklerde şarj miktarının azaltılması daha düzgün bir ayna elde edilmesini sağlayabilir. Basamak patlatmasında ön kesme ve son kesme atım teknikleri aşırı kırmanın engellenmesi için sıklıkla kullanılmaktadır (ISEE, 2011).



Şekil 4. Patlatma sonrası arka kırmanın incelenmesi

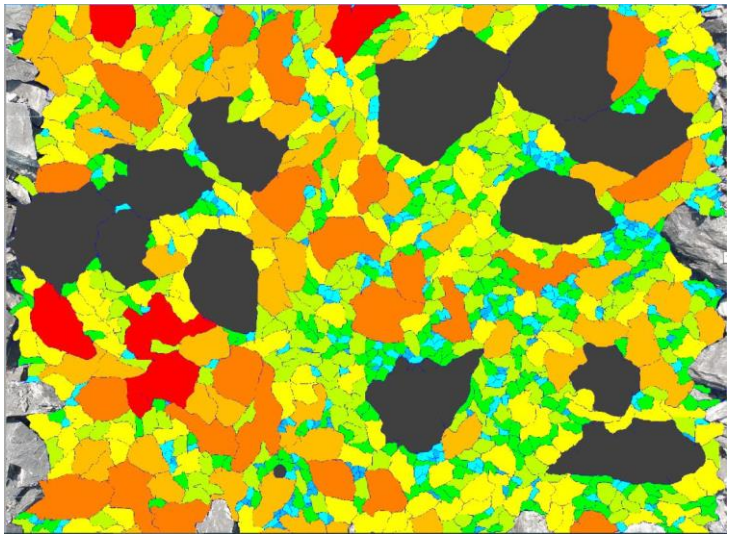
PARÇALANMANIN DEĞERLENDİRİLMESİNDE DRONE KULLANIMI

Yığının boyut dağılımının değerlendirmesinde klasik yöntem yığının farklı noktalarından fotoğraflar alınması ve bu fotoğrafların görüntü işleme yazılımında analiz edilmesidir. Patlatma yığınlarının elek analizinden geçirilmesi pratik olarak mümkün olmadığı için görüntü işleme yazılımları son 20 yılda ön plana çıkmıştır. Yığının farklı bölgelerinde parçalanma farklı olabileceği için mümkün olduğunca çok sayıda fotoğraf alınması, bu fotoğrafların analiz sonuçlarının birleştirilmesi gerekmektedir. Böylece tüm yığını karakterize eden bir boyut dağılım eğrisi ortaya çıkarılır. Havadan drone fotoğraflarının alınması yığının çok daha büyük bir kısmının tek karede fotoğraflanmasına imkân sağlamaktadır. Son dönemde görüntü işleme yazılımlarına drone fotoğraflarının incelenmesi için özel modüller eklenmektedir. Şekil 5'de görüntü işleme amacıyla alınan yığın fotoğrafı görülmektedir. 21 cm çaplı dairesel bir tabak ölçek olarak yığının içine yerleştirilmiştir.



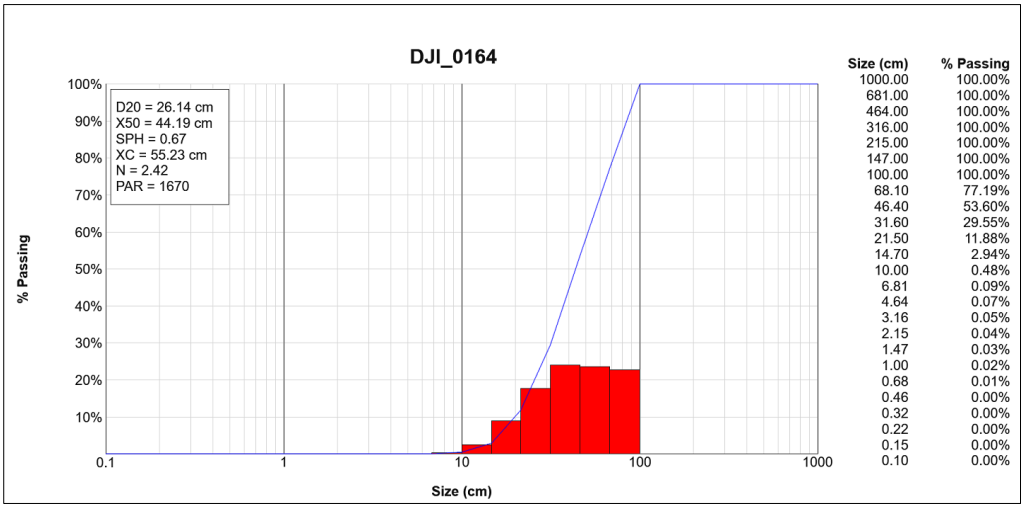
Şekil 5. Ölçekli yığın fotoğrafı

Yazılım tanımlanan ölçek boyutunu esas alarak parçaların boyutunu tespit etmektedir. Öncelikle bir parça boyut ağı oluşturmaktadır. Bu işlemi yaparken şeklin boyutunu bir küreye benzetmekte ve parçanın çapını eşdeğer kürenin çapı olarak vermektedir (Hudaverdi 2022). Kullanıcı istediği zaman yazılım tarafından oluşturulan parça boyut ağına müdahale edebilmekte ve düzeltmeler yapabilmektedir. Yazılım tarafından tespit edilen bloklar Şekil 6'da görülmektedir. Şekilde koyu renk ile gösterilen bloklar patar adı verilen 1 metreden büyük olan parçalardır. Bu parçalar analize dahil edilmemişlerdir.



Şekil 6. Yazılım tarafından tespit edilen bloklar

Şekil 7'de yığının parça boyut dağılım eğrisini vermektedir. Malzemenin %50'sinin geçtiği elek açıklığı (D50) 44,19 cm'dir. Malzemenin %80'inin boyutu 72,87 cm'nin atındadır. Yığının boyut dağılımının homojenliğini gösteren üniformite indeksi (N) 2,47 seviyesindedir. Toplam 1670 adet parça ölçülmüştür. Grafiğin sağ tarafında belirli elek boyutlarına göre elek altına geçen malzeme miktarını görmek mümkündür. Bu atımda toplam 12 adet 1 metreden büyük blok tespit edilmiştir.



Şekil 7. Yığının parça boyut dağılım eğrisi

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Patlama verimliği ölçümlerinde drone kullanımının önemli faydaları mevcuttur. Drone görüntüleri ile atım bölgesinin tamamını gözlemlemek mümkündür. Özellikle çok sıralı büyük atımlarda drone geniş alanların incelenmesini sağlayacaktır. Dilim kalınlığı ve delikler arası mesafe değerlerindeki düzensizlikler incelenebilir. Yığının yayılımını incelemek mümkündür. Bütün bu ölçümlerde mesafe tahmini için atım bölgesine ve yığının olduğu bölgeye bir ölçek bırakmakta fayda vardır. Patlatma kaynaklı çatlaklar ve kayaca verilen hasar aynanın gerisinde geniş bir alan yayılabilir. Özellikle arka kesmenin izlenmesinde drone fotoğrafları faydalıdır.

Parçalanmanın değerlendirilmesinde drone fotoğraflarının kullanımı yığının bütüncül olarak görülmesini sağlamıştır. Yığın içindeki patar adı verilen büyük bloklar kolaylıkla tespit edilebilir. Parçalanma analizinde özellikle fotoğrafların çekildiği yükseklik önemli olmaktadır. Çok yüksekten alınan fotoğraflarda ince boyutlu küçük parçaların tespiti zorlaşabilir. Özellikle büyük yığınlarda alçaktan çekilen görüntüler yığının tamamının fotoğraflanmasını güçleştirebilir. Bu çalışmada drone fotoğrafı başarıyla kullanılmıştır ve yığının ortalama parça boyutu 44,19 cm olarak tespit edilmiştir.

Araştırmada en önemli parametrenin drone'un kamera çözünürlüğü olduğu tespit edilmiştir. Özellik yığının boyut dağılımının detaylı analizi için kamera çözünürlüğü yüksek olmalıdır. Ek olarak cihazın batarya ömrü de arazi kullanımında verimliliği etkilemektedir. Gerektiğinde araştırmacının yanında yedek bir batarya bulundurması önerilir. Ardışık olarak patlatma öncesi atım bölgesi, patlatma tasarımı ve patlatma sonrası yığın ölçümleri gerçekleştirilecekse; drone'un havada kalma süresi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada kullanılan çoklu pervaneli (multi-rotor) drone son derece verimli bulunmuştur. Özellikle taş ocakları için pervaneli drone'lar son derece yeterlidir. Gelecekte drone teknolojisinde özellikle uçuş süreleri, uçuş menzilleri ve kamera çözünürlüğü konusunda ilerlemeler olacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Hudaverdi, T. (2022). Prediction of flyrock throw distance in quarries by variable selection procedures and ANFIS modelling technique. *Environmental Earth Science, 81,* 281.

ISEE (2011). The Blasters' handbook (18th ed). Cleveland, Ohio: International Society of Explosive Engineering,

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L. and Carcedo, F. J. A. (1995). Drilling and blasting of rocks. Rotterdam: A. A. Balkema, Brookfield Publication.

Lee, S., and Choi, Y. (2016). Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry. *Geosystem Engineering*, *19*, 197–204.

McCray, R. B. (2016). Utilization of a small unmanned aircraft system for direct sampling of nitrogen oxides produced by full-scale surface mine blasting, Dissertation. Lexington, KY: University of Kentucky

Ren, H., Zhao, Y., Xiao W., and Hu Z. (2019) A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology, 6,* 320–333.

BİLGİSAYARLI GÖRÜ TEKNOLOJİSİ İLE OCAK İÇİ YOL VE TRAFİK YÖNETİMİ

IN-PIT ROAD AND TRAFFIC MANAGEMENT WITH COMPUTER VISION TECHNOLOGY

E.F. Tünay, M.A. Tanyer, M.M. Kahraman*

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü
*((*Sorumlu yazar: kahramanmm@itu.edu.tr*)

ÖZ

İş dünyasında, ölçülen şeyin yönetildiği varsayımı yaygındır. Başarılı yönetim için dikkatli planlama ve sürekli izleme gerekmektedir. Madencilikte etkin yönetim, verilerin toplanması, uygun şekilde değerlendirilmesi ve karar alma süreçlerine dahil edilmesiyle sağlanabilir. Yeni cihazların işlem gücü ve yapay zekâ alanındaki gelişmeler, çeşitli veri toplama teknolojilerinin kullanılmaya başlanmasıyla sonuçlanmıştır. Dijital kamera görüntü sistemlerinin azalmakta olan maliyetleri, bu teknolojilerin madencilik operasyonlarında sıklıkla tercih edilen izleme sistemi haline getirmiştir. Ancak yaygın bir biçimde bu teknolojiler anlık durum tespiti için kumanda merkezlerinde veya güvenlik birimlerinde gözlem amacıyla kullanılmaktadırlar.

Ancak bunların dışında, maden işletmesinin farklı noktalarında kameralar tarafından toplanan görüntüler yollardan geçen ekipmanlar ve yolların durumu gibi önemli bilgiler sunmak için bilgisayarla görü algoritmaları kullanılarak analiz edilebilir. Maden işletmesinde yer alan bir yolu çeken kameradan elde edilecek verilerle bu yoldan geçen araçların hızı, konumu ve faaliyeti ile ilgili bilgilerin bir harita üzerinde toplanması ve gösterilmesi mümkün hale gelmektedir. Böylelikle ocak içi trafik yoğunluğu, geçiş noktalarına göre ortalama hız, yol durumu, hız limitlerine uymayan araçların tespiti ve görüş mesafesi gibi bilgiler otomatik olarak kayıt altına alınmış olunacaktır. Bu yeni yaklaşım maden ocaklarının veri odaklı kararlar almalarında yardımcı olacak, yol ve trafik durumunu görünür hale getirerek yakıt tasarrufu konusunda fırsatlar yaratacaktır. Bu çalışma maden içi kamera görüntülerini bilgisayarlı görü teknolojisi yardımıyla geliştirilen maden işletmelerinin yol ve trafik yönetim sistemini konu almaktadır.

Anahtar Sözcükler: Büyük veri, maden yönetimi, bilgisayarlı görü, hız, trafik yönetimi

ABSTRACT

It is often regarded in the business community that what gets measured gets managed. Management is achieved by thorough planning and monitoring. Effective mine management can be achieved by collecting data, assessing it effectively, and incorporating it into decision-making processes. Recent advancements in processing power and artificial intelligence technologies have resulted in the introduction of several data collection technologies. The decreasing cost of digital camera systems has made them the monitoring system of choice in mining operations. However, they are commonly used for surveillance purposes in command centers or security units for instantaneous situation detection.

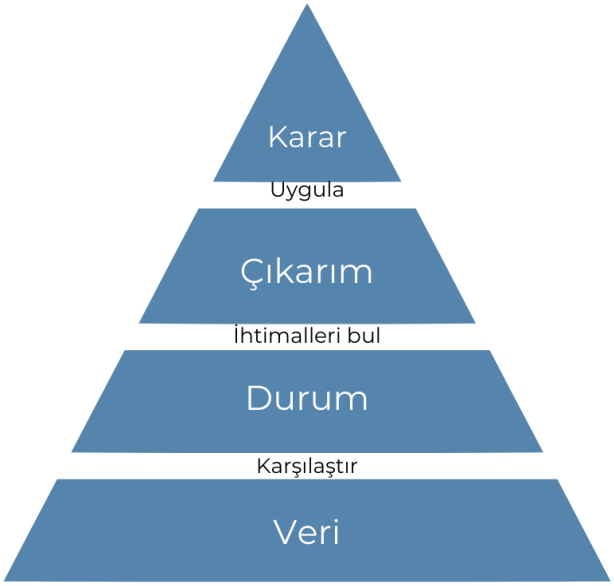
Apart from these, however, images collected by cameras at different points in the mining operation can be analyzed using computer vision algorithms to provide important information such as passing equipment and the condition of roads. With the data obtained from a camera capturing a road in a mining operation, it becomes possible to collect and display information about the speed, location, and activity of vehicles passing on this road on a map. In this way, information such as traffic density inside the mine, average speed according to the crossing points, road condition, detection of vehicles that do not comply with speed limits and visibility distance will be automatically recorded. This new approach will help mines make data-driven decisions and create

opportunities for fuel savings by making road and traffic conditions visible. This study focuses on the road and traffic management system of mining companies developed by using in-mine camera images with the help of computer vision technology.

Keywords: Big data, mine management, computer vision, speed, traffic management

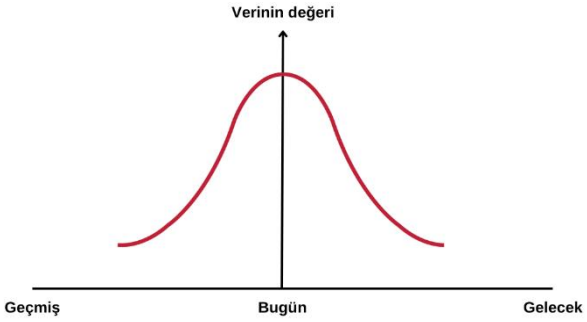
GİRİŞ

Veriler, işletmelerin temel göstergelerinin izlenmesini, darboğazların belirlemesini ve genel performans durumunu görebilmeyi mümkün kılar. Ölçülemeyen süreç yönetilemez. Veri, üretim proseslerinin mevcut durumunu anlamak ve iyileştirmeler yapabilmek için gereklidir. Veri miktarı, kalitesi ve verinin güncele olan yakınlığı arttıkça, yöneticiler daha kolay ve doğru kararlar alabilmektedir. DIKW (Data-Information-Knowledge-Wisdom) veriden karar alma sürecini ifade eden kabul görmüş bir yaklaşımdır. Bu grafiğe göre ham verilerin kararlara etki edebilmesi için anlamlı hale getirilmesi gerekir. DIKW Piramidi (Şekil 1), diğer birçok sektörde olduğu gibi madencilik faaliyetlerinde durumu anlayabilme ve bilinçli kararlar alabilmenin temelinde doğru veriye ulaşmanın gerekliliğini vurgular. Bunun sebebi etkili kararların inşa edildiği temelin veri olması gerekliliğidir. İşletme içerisindeki veri akışının hızlanması için teknoloji kullanımı büyük önem taşımaktadır.



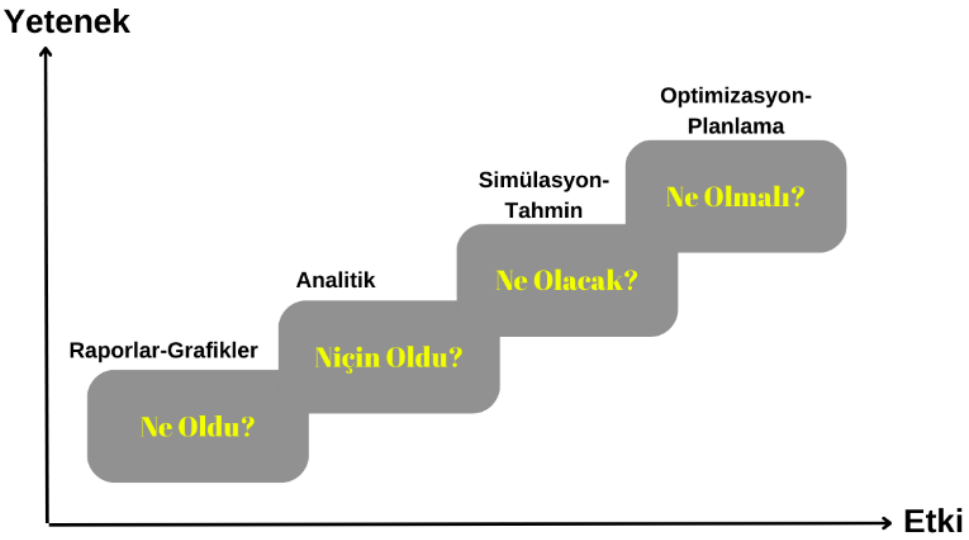
Şekil 1. DIKW piramidi

Veriler de birçok diğer değerli ürün gibi kullanım ömrü olan değerlerdir. Çok geçmişte kalmış bir veri bugüne pek fayda sağlayamayabileceği gibi, çok uzak geleceğe ait bir verinin bugünkü kararlara etkisi oldukça sınırlı olacaktır, bu sebeple en değerli veri şu anki veridir. Motoru aşırı ısınan bir kamyonun motorundaki sıcaklık sensörünün motor sıcaklığını ölçmesi, eğer sıcaklık arttığında bu veriyi kullanıp motorun yanmasını engelliyorsa, bu veri çok kıymetlidir. Aksi halde bu veriye motor yandıktan sonra bakılması pek bir anlam ifade etmeyecektir. Verinin değerinin zaman içindeki değişimini vurgulayan grafik Şekil 2'te gösterilmiştir, verinin değerinin, toplandığı andan uzaklaştıkça azaldığını ifade etmektedir. Bu çalışmanın konusu olan uygulama, olayları olduktan sonra değil, olurken fark edip önlem alınabilmesini, bu sayede en değerli veriyi kullanabilmeyi hedeflemektedir.



Şekil 2. Verinin değerinin zamana göre değişimi

Veri analitiği günümüz karar destek sistemleri ve operasyonel mükemmellik çalışmalarında son yıllarda çok büyük ilgi gören bir alandır. Buna göre operasyonel anahtar göstergelerle ilgili sorulacak temel sorular yapılan işe etki ve gerekli yetenek arasında bir hiyerarşi bulunmaktadır. Bugün için maden sektörü veri kullanımı konusunda çoğunlukla veri analitiğinin ilk basamağı olan (ne oldu) soruya cevap aramaktadır. Şekil 3'te veri analitiğinin basamakları verilmektedir (Maoz, 2013). Buna göre geçmişte olup bitenlerin raporlanması veri analitiği açısından yapılan işe en az katkıda bulunan basamaktır.

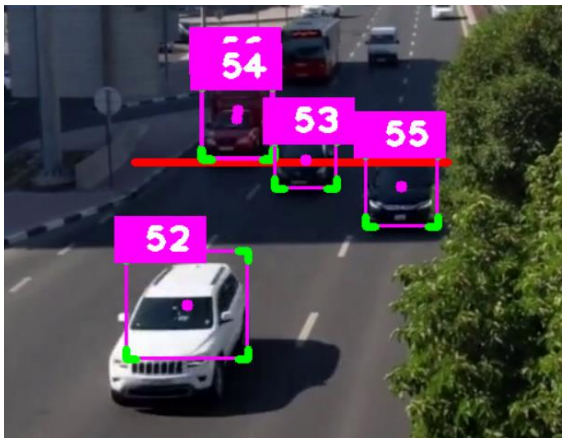


Şekil 3. Veri analitiğin aşamaları (Maoz, 2013)

İşletmelerde kullanılan farklı teknolojilerden pek çok veri toplanır, kimisi anlamlandırılır, çoğu sadece bir değer olarak gelip geçer. Yaygın bir şekilde bu veriler karar aşamalarında kullanılmazlar. Fakat bu veri üreten sistemlerden, belki de her madende olup oldukça yüksek miktarda veri üretmesine rağmen, karar aşamalarında kullanılmayan teknolojilerden biri işletme içerisindeki CCTV (Closed Circuit Television - Kapalı Devre Televizyon) kameralardır. Son dönemde CCTV kamera teknolojisinin ucuzlaması; akabinde yaygınlaşmaları, çoğu maden ocağının CCTV kamera sistemini satın almaları ile sonuçlanmıştır. Ancak bu teknoloji çoğunlukla güvenlik veya anlık gözlemlemeler amacıyla kullanılmakta; işletme karalarına pasif etkide bulunmaktadır.

Trafikte yapay zekâ tekniklerinin kullanımı, trafik yönetimi, kontrolü ve optimizasyonu için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu teknikler arasında uzman sistemler, bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar ve esnek programlama bulunmaktadır. Uzman sistemler, trafikte katılım denetimi, kavşak

optimizasyonu ve sinyal optimizasyonu gibi alanlarda kullanılır. Bulanık mantık, araç yönlendirme, kavşak kontrolü, kent içi ekspres yollar, trafik akışı ve kontrol simülasyonu gibi trafik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yapay sinir ağları, trafik sıkışıklığı tahmini, otoyol trafik veri tahmini, trafik kontrolü ve yol durum tahmini gibi alanlarda etkili bir şekilde kullanılabilir. Genetik algoritmalar, çevrim süresi optimizasyonu, ulaşım hızının optimizasyonu, katılım denetimi ve araç rotalama gibi trafik problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Esnek programlama, birden fazla teknik içeren ve trafikte iyi sonuçlar veren bir yaklaşımdır ve katılım denetimi, ulaşım zamanı tahmini, trafik ışığı kontrolü gibi farklı alanlarda kullanılabilir. (Tektaş, Akbaş, & Topuz, 2002). Şekil 4.'te bilgisayarlı görü yardımıyla bir yoldan geçen araç sayma işlemine ait bir görsel paylaşılmıştır.



Şekil 4. Araç sayma teknolojisine ait bir görüntü

Bu çalışma maden içerisindeki CCTV kameralardan üretilen görüntülerin bilgisayarlı görü teknolojisi ile işlenip anlamlı hale getirilmesi için geliştirilen bir uygulamayı konu almaktadır. Bilgisayarlı görü teknolojisi sayesinde otonom olarak toplanan veriler anlamlandırılarak, bir arayüz sayesinde gerekli kişilere karar destek amacıyla iletilmesini sağlamaktadır. Örneğin yolların belli bir segmentini çekmekte olan CCTV kameradan elde edilen görüntülerden geçen araçların kimliği, hızı gibi bilgiler toplanarak yol ve trafik durumu, geçen araçların hız limitlerine uyumu ve araç yoğunluk durumu gibi kamera görüntülerini izleyenler tarafından tespit edilmesi pek mümkün olmayan bilgiler çıkarılmaktadır.

Uygulamanın geliştirildiği maden işletmesine yönelik temel bilgiler çizelge 1'de verilmiştir. Çalışma orta-küçük ölçekli bir maden işletmesine göre tasarlanmıştır. Yapılan anlaşma ve madenin talebi üzerine işletme ile ilgili detaylı bilgiler paylaşılamamaktadır. Uygulamanın teknik detayları ve üretilen çıktılar yöntem ve sonuç bölümlerinde tartışılmıştır.

Çizelge 1. İşletmeye ait temel bilgiler

Grup	**Miktar (adet)**
Delici ekipman	4
Loader	4
Excavator	3
Kamyon	30
Üretim Arını	4

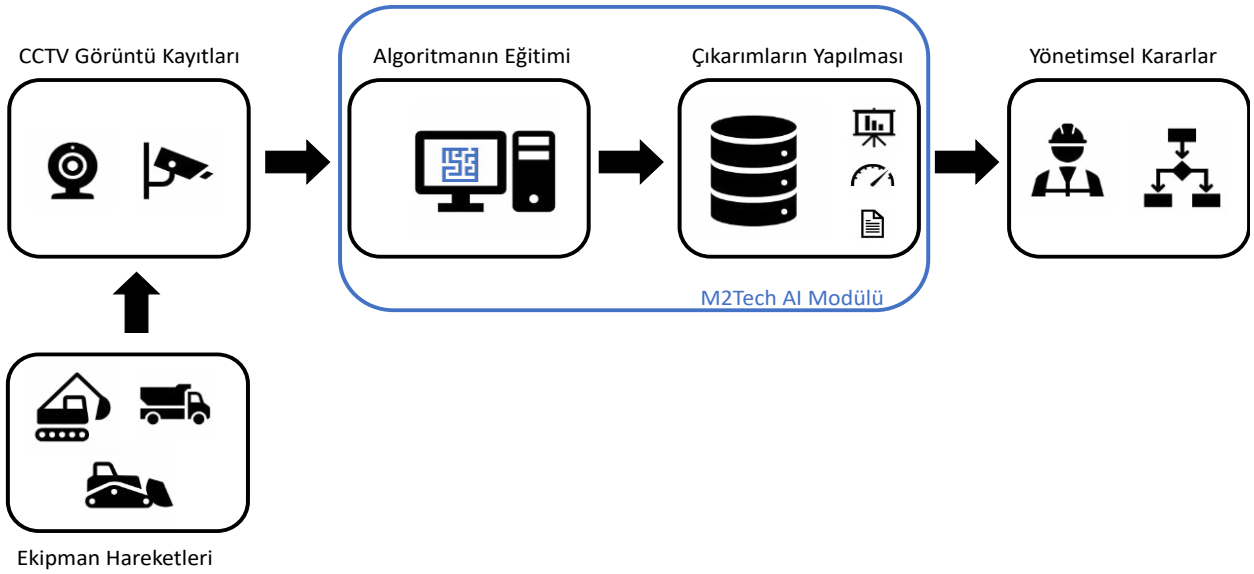
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Görsel nesne tespiti, bilgisayarlı görü ve makine öğrenmesi alanları içerisinde yer alan bir çalışma konusudur (Kang vd., 2016; Song vd., 2018). Nesne tespiti algoritmaları nesnelerin sahip olduğu karakteristik geometrilerinin tespit edilmesi ile gerçekleştirilen manuel yöntemler ve derin öğrenmeye dayalı yöntemler olarak iki başlık altında incelenebilir (Liu vd., 2016; Ren vd., 2017). Felzenszwalb ve Ramanan (2005) tarafından önerilen deformable part based model (DPM), en iyi geometrik özellik tespit algoritmasıdır. Derin öğrenmeye dayalı nesne tespiti algoritması, Girshick ve diğerlerinin (2014) önerdiği R-CNN (bölge tabanlı CNN özellikleri) ile hızlı bir şekilde gelişmeye başlamıştır. En son ve en iyi kapsamlı derin öğrenme algoritması, Radmon ve Farhadi (2018) tarafından önerilen YOLOv3 modelidir. Diğer algoritmalara kıyasla, bu algoritma nesne tespit doğruluğunu ve işleme hızını önemli ölçüde artırmıştır (Dai vd., 2020). 2014 yılında R-CNN teknolojisinin geliştirilmesi ve 2018 yılında YOLO modelinin oluşturulması bilgisayarlı görü alanını, endüstrinin kullanabileceği bir yapıya yükseltmiştir. İntel şirketinde kurucu ortak olan Gordon Earle Moore, 1965 yılında, Moore yasası olarak bilinen, bilgisayarların işlem hızlarının her yıl 2 katına çıkacağını ifade etmiş ve devamında 1975 yılında bu tahminini yenileyerek işlem hızlarının her 2 yılda bir 2 katına çıkacağını ifade etmiştir. Bu yasa günümüzde halen geçerliliğini sürdürmektedir (Hutcheson, 2005). Bilgisayarların işlem hızlarının artışı ve R-CNN teknolojisindeki gelişmeler, bilgisayarlı görü teknolojisinin madenlerde kullanımı mümkün hale getirmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada kayıtlı CCTV kamera görüntüleri kullanılarak M2Tech ocak yol takip algoritması geliştirilmiştir. Kamera kayıtları uzun süreler kesilip algoritmaya girdi olarak kullanılmıştır, algoritmanın nesneleri tanıması ve hareketlerinin anlamlandırılması sonucunda yeterli düzeyde eğitilmesi sağlanmıştır. Bunun sonucunda karar vericiler için faydalı olacak bilgilerin çıkarılması sağlanmıştır. Bu bilgi akışı şeması Şekil 5 de yer almaktadır.

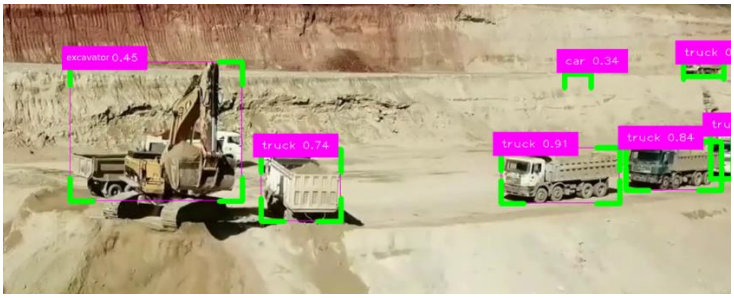
Uygulamanın geliştirilmesi Python programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme uygulamalarında Open CV kütüphanesinden, bilgisayarlı görü uygulamalarında YOLO derin öğrenme algoritmasından faydalanılmıştır. Temel olarak uygulama bu iki kütüphane üzerinde inşa edilmiş olsa da bu kütüphanelere yardımcı pek çok farklı kütüphaneden de yararlanılmıştır.



Şekil 5. M2Tech yol durum modülü veri akışı şeması

SONUÇLAR

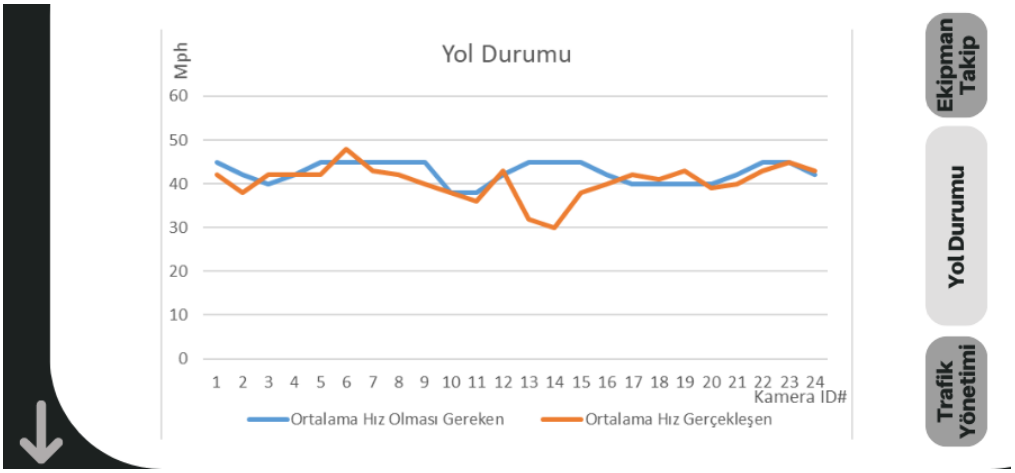
CCTV güvenlik kameralarının gördüğü yollar önceden hazırlanmış maden krokisi üzerinde işaretlenir, bu noktalara dair CCTV kamera görüntüleri bilgisayarlı görü algoritmalarıyla işlenerek, o noktadaki araç yoğunluğu, araçların ortalama hız, ivme, yapılan trafik kuralı ihlali bilgileri harita üzerine işlenerek, maden planlama ofisinin daha esnek ve veriye dayalı planlamalar yapabilmesi adına görselleştirilerek sunulur. Uygulama, kroki üzerinde manuel bilgi girişine izin vererek bilgisayarlı görü algoritmalarıyla çıkartılamayan verilerin de sisteme girilmesini ve tek bir harita üzerinde trafik yönetimine dair olan tüm verilerin görselleştirerek maden planlama ofisine destek olur. Uygulamanın ortak çalışmaya uygun yapısıyla, birimler arası veri alışverişinin kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Maden planlama ofisi uygulama içerisindeki verileri kolaylıkla sunum tablosu haline getirerek ilgili kişilere uygulama üzerinden paylaşabilir. İşletme içerisindeki denetlenebilirliğin sağlanması ve iletişimin güçlendirilmesi sayesinde verim kayıpları ve iş kazaları minimuma indirilebilir. Denetlenebilirliği ve güçlü iletişim ortamını sağlamak M2Tech'in temel amacıdır. M2Tech yol durumu uygulamasının ekipman tanıma teknolojisine ait bir görüntü Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. M2Tech ekipman tanıma uygulamasına ait bir görüntü

Bu teknoloji yardımıyla kırıcı önünde bulunan kamera vasıtası ile kuyruktaki araç sayısı bulunur ve eş zamanlı olarak uygulamada bulunan maden krokisi üzerinde, kuyruktaki araç sayısı görüntülenmektedir. Bu sayede işletme içerisinde üretimi yöneten personel kuyrukta bekleyen araç olması durumunu fark edebilecek ve sonraki seferleri başka bir kırıcıya, pasaya, stoğa gönderebilecek ya da üretimde kullanılan ekipman sayısını azaltmayı tercih edebilecektir. Benzer şekilde ekskavatör önlerinde oluşan kuyrukların da sadece akıllı telefon aracılığı ile oldukça kolay bir biçimde yönetilmesi mümkündür. İlerleyen çalışmalarda lineer programlama yöntemleri kullanılarak kırıcı trafiğinin bir algoritma tarafından optimize edilmesinin sağlanması gerçekleştirilebilir.

Bir ocağın verimini ve araçların sağlığını etkileyen faktörlerden birisi de yol durumudur. Maden içerisinde yollar, graderler veya dozerler sayesinde sıklıkla düzeltilmektedir. Fakat hangi yolun bozuk olduğunu fark edebilmek ve bozulduğu an müdahale edebilmek, lüzumsuz ekipman kullanımını önleyeceği gibi, anında müdahale ile birlikte kamyonların lastik ömrünü ve sefer sürelerini olumlu yönde etkileyecektir. Bozuk bir yol, kamyonların daha temkinli hareket etmesini ve dolayısı ile hız kesmelerini beraberinde getirmektedir. CCTV kameralardan bilgisayarlı görü teknolojisi sayesinde elde ettiğimiz, taşıma yolundaki bir noktanın ortalama hız bilgisindeki düşüş, o noktadaki bir arızaya işaret etmektedir. Şekil 7'de M2Tech uygulamasının içerisindeki yol durumu grafiği gözükmektedir. Yatay eksen farklı kamera numaralarını temsil ederken, dikey eksen ise ortalama günlük hızı ifade etmektedir. Bozukluk, bu yöntem ile birlikte kritik minimum ortalama hız noktasına gelmeden fark edilebilir ve öncesinden bir planlama yapılarak tamiratı gerçekleştirilebilir. Bu durum maden içerisindeki koordinasyonu arttıracağı gibi gereksiz ekipman kullanımının da önüne geçecektir.



Şekil 7. Ortalama hız grafiği

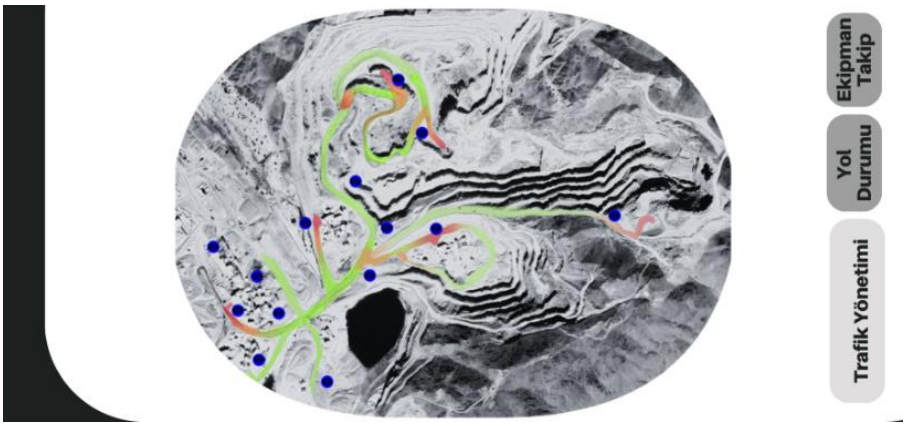
Saha içi yolların planlanmasında olduğu gibi üretim sırasındaki en önemli unsurların başında da iş sağlığı ve güvenliği gelmektedir. Ocak içi CCTV kameraların işlenmesi ile üretim yollarındaki kamyonların takip mesafesi, araçların şeve olan yakınlıkları bulunabilir ve kamyonların şevlere çok yaklaştığı noktalarda önlemler alınabileceği gibi, kamyonların birbirlerine çok yaklaştığı noktalarda da hız düzenlemesine gidilebilir. Kameralar ile toplanan görüntülerden elde edilen çıkarımların yer aldığı bilgiler Şekil 8'de yer almaktadır. Uygulama sayesinde prosesin şu anki durumunu ölçmenin yanı sıra grafikler sayesinde bugün geçmişle kıyaslanabilir, hedefler konulabilir ya da geleceğe yönelik tahminler oluşturulabilir.



Şekil 8. Spesifik bir bölgeye ait kameralar ile toplanan görüntülerden yapılan çıkarımlar

Toz, yağmur ve çeşitli diğer sebeplerden dolayı maden içi görüş mesafesi düşebilir ve işçilerin akciğer sağlığını olumsuz etkileyecek durumlara sebep olabilir. Görüş mesafesini CCTV Kameralar ile tespit edilip görüş mesafesinin belli bir limit altına düştüğü noktalarda gerekli uyarılar yapılır ve önlemlerin alınması sağlanır. Toz sebebi ile görüş mesafesinin düştüğü durumlarda önlem olarak gerekli bölgeye arazöz yönlendirilebilir. Ocak içerisinde en sık kaza yaşanan yerlerden bir tanesi de ekipman tamir atölyeleri ve araç parklarıdır. Bu gibi çok sık kaza yaşanan noktalardaki CCTV kameralar yardımı ile park halinden harekete geçen araçların birbirlerine yaklaştıklarında uyarı vermeleri sağlanabilir, bunlara ek olarak bu kritik noktalarda yaya tespiti yapılarak, harekete geçen ekipmanın çevresinde bir yaya bulunması durumunda uyarı sistemi devreye girerek gerekli operatöre ve süpervizöre akıllı telefonu üzerinden uyarı mesajları gönderir.

Eliyahu Goldratt 1984 yılında yazdığı The Goal isimli kitabında, darboğazı, "Kapasitesi talebi karşılayamayan herhangi bir kaynak" olarak tanımlanmıştır (Kahraman, 2015). Örneğin maden işletmelerinde darboğazların en sık yaşandığı noktalardan birisi kırıcı önüdür. Kırıcılarda yaşanan beklemeyi canlı olarak takip edebilmek, üretimi optimize edebilmek dolayısı ile oldukça yüksek önem arz etmektedir. Mühendislerin karşı karşıya kaldıkları, karar alması güç durumlarda karar vermelerine yardımcı olacak anlık ve doğru bilginin görsel olarak ve anlamlı biçimde sunulması darboğazların üstesinden en doğru şekilde gelinebilmesi için kritik öneme sahiptir. M2Tech'in uygulaması üzerinde araç yoğunluğunun heatmap şeklinde, ocağın uydu görüntüsü üzerinde gösterilmesi Şekil 9'de sunulmuştur. Mavi noktalar ocak içerisindeki kameraların konumlarını temsil etmektedir.



Şekil 9. M2Tech trafik yoğunluk haritası

TARTIŞMA

Madencilik endüstrisi, toplumların gelişimi için kritik ve stratejik öneme sahip ve yönetimi de oldukça zor bir alandır. Yönetimi çok zor olan bu alanda veri toplamak ve bu verilere göre karar almak doğru yönetim için oldukça önemlidir. Bir maden şirketinde otomasyon sistemlerine uyum sağlayabilecek birçok alan mevcuttur ve bunlarla ilgili geçmiş verileri kullanarak günümüz ve gelecek planlaması, süreç yönetimi ve karar mekanizmalarının üretilmesi sektörde insan gücüne olan ihtiyacı düşürmesi, dolayısıyla maliyet tasarrufu ve tüketim ihtiyacına karşılık yapılacak üretimi de arttırabileceğinden oldukça önemlidir. CCTV kamera teknolojisinin ucuzlaması ile birlikte güvenlik amaçlı olarak madenlerde kullanılmaya başlamıştır. CCTV kameralar yüksek miktarda veri üretir fakat CCTV kameralar tarafından üretilen bu verilerin maden yönetiminde kullanılmasına dair bir çalışma bulunmamaktadır. CCTV kameraların ürettiği veriyi, yapay zeka ve görüntü işleme algoritmaları ile anlamlandırarak, maden yönetimine yardımcı olacak bilgileri sunmak, M2Tech uygulamasının teknoloji ve madenciliği birleştirerek ortaya koyduğu inovatif yaklaşımdır. Gelişen dünyada rekabetçi ortama adapte olmak ancak sürdürülebilir ve teknolojiye ayak uyduran bir iş ortamı ile mümkündür. Sürdürülebilir madencilik, dijitalleşme ile daha mümkün bir hal almıştır ve ilkel kaldığı düşünülen

sektörlerden biri olan madencilikte otomasyona yönelmek geleceğin madenciliği açısından oldukça önemli bir noktadadır (Koç, Taksuk, & Toraman, 2021).

Daha iyi trafik yönetimi yapılması ve bunların düzenli takip edilmesi, yakıt tüketimini azaltarak hem çevresel zararı azaltır hem de maliyet tasarrufu sağlar. İnsan gücüne olan ihtiyacı azaltır ve kararların daha etkin olmasına yol açar. Verilerin geçmiş, günümüz ve gelecek olarak anlamlı bir şekilde kullanılabilirliği, yol takibi ve trafik yönetimi açısından optimize süreçler oluşturmak konusunda kolaylık sağlar ve değişken koşullarda etkili karar vermeye yardımcı olur.

Bu uygulamanın işletmelere sağlayacağı katkıları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Araçların ortalama hız-konum grafiklerinden yolun hangi bölümlerinin tamire ihtiyacı olduğunun kolayca tespit edilmesi.
- Ocak içi trafik yoğunluklarının olduğu bölgelerin tespit edilerek gerekli düzenlemelerin yapılmasına olanak vermesi.
- Toz, yağmur ve benzeri sebepler ile görüş mesafesinin düştüğü noktalar tespit edilerek gereken önlemlerin alınması.
- Tesis, döküm ve ekskavatör önlerindeki kuyruk yoğunluğunun ölçülmesi, seferdeki araçların daha az yoğun noktalara yönlenmesinin sağlanması.
- Maden içerisinde trafik yönetimine dair parametrelerin gerçek zamanlı olarak planlama ofisine aktarılması.
- Maden içi iletişimin arttırılması ve geçmişe yönelik bilgilerin kayıt altına alınması
- Manuel olarak tutulan verilerin, teknoloji yardımı ile otomatik bir şekilde toplanmasının sağlanması.

Bu ürün, madencilik sektöründe verimliliği artırmak, iş sağlığı ve güvenliğini sağlamak ve bakım-onarım işlerini optimize etmek için önemli bir araç olarak değerlendirilebilir.

Tüm teknolojilerde ve girişimlerde olduğu gibi maden içerisindeki CCTV kameralardan üretilen görüntülerin bilgisayarlı görü teknolojisi ile işlenip anlamlı hale getirilmesi fikrinin de karşılaşabileceği birtakım zorluklar mevcuttur. Bu zorluklardan öne çıkanları; maden içerisindeki CCTV kameraların sayısının yetersiz olması nedeniyle madenin genelini temsil eden bir veri seti oluşturulamaması, kamera çözünürlüklerinin düşük olması durumunda yeterli ve anlamlı verinin üretilememesi, kamera lenslerinin tozlanması sebebi ile çözünürlük ve görüş mesafesinin düşmesi gibi faktörler sayılabilir. Fakat bu problemler günümüzde kamera sensör teknolojilerinin çok gelişmesi ve ucuzlaması sebebi ile, üstesinden gelinebilecek sorunlardır. Bu sorunları çözebilmek için işletmenin üstleneceği maliyet, bu teknolojinin işletmeye sağlayacağı faydalar ile karşılaştırıldığında çok düşük kalmaktadır. Bilgisayarlı görü teknolojisinin madenlere uygulanması, her işletmenin veriye dayalı kararlar alabilmesine olanak tanıması sayesinde sektörde sürdürülebilir bir dönüşüm ve dijitalleşme için önemli bir adım olacaktır.

KAYNAKÇA

Dai, Z., Song, H., Liang, H.,Liang, H., Wu, F., Wang, X., Jia, J., and Fang, Y. (2020). Traffic parameter estimation and control system based on machine vision. J Ambient Intell Human Comput. DOI: 10.1007/s12652-020-02052-5.

Felzenszwalb, P., Ramanan, D. (2005). A discriminatively trained, multiscale, deformable part model. Comput Vis Pattern Recognit, (pp. 1–8).

Girshick, R., Donahue, J., and Malik, J. (2014). Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, (pp. 580–587).

Hutcheson, G.D. (2005). Moore's Law: The History and Economics of an Observation that Changed the World, 17--21.

Kahraman, M.M. (2015). Holistic Mine Management By Identification Of Real-Time And Historical Production Bottlenecks. The University of Arizona. Retrieved from http://hdl.handle.net/10150/566211.

Kang, K., Ouyang, W., Li, H. Wang, X. (2016). Object detection from video tubelets with convolutional neural networks, Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Conference on (pp. 817-825), DOI: 10.48550/arXiv.1604.04053.

Koç, Ö., Taksuk, M. and Toraman, S. (2021). Madencilikte yeni eğilim dijitalleşme. Journal of Scientific Reports-B , (004) , 1-7 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/jsrb/issue/70887/1138384.

Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.Y., and Berg, A.C., (2016). SSD: Single Shot MultiBox Detector. In: Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M. (eds) Computer Vision – ECCV 2016. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9905. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.

Maoz, M. (2013). How IT should deepen big data analysis to support customer-centricity, Gartner .

Redmon, J. and Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement.

Ren, S., He, K., Girshick, R. and Sun, J. (2017). Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39, 1137-1149. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.

Song, H., Wang, X., Hua, C., Zhang, Z., Wang, W., & Qi, G. (2018). Vehicle trajectory clustering based on 3D information via a coarse-to-fine strategy. *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 22, 1433-1444 DOI: 10.1007/s00500-017-2831-0.

Tektaş, M., Akbaş, A., Topuz, V., (2002). Yapay zekâ tekniklerinin trafik kontrolünde kullanılması üzerinde bir inceleme, Uluslararası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi ve Fuarı.

HİDROELEKTRİK SANTRALI TÜNEL İNŞAATI İŞ GÜVENLİĞİ RİSK DEĞERLENDİRMESİ: HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ UYGULAMASI

OCCUPATIONAL SAFETY RISK ASSESSMENT IN HYDROELECTRIC POWER PLANT TUNNEL CONSTRUCTION: AN APPLICATION OF FAULT MODE AND EFFECTS ANALYSIS

A.K. Eyüboğlu [1, *], M.K. Özfırat [2]

[1] Maltepe Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü
[2] Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü
*(*Sorumlu yazar: alikemaleyuboglu@maltepe.edu.tr)*

ÖZ

İlerleyen teknolojiyle birlikte alt yapı çalışmalarında artış gözlenmekte ve buna bağlı olarak da ulaşım ve enerji sektöründe tünel açma faaliyetleri başarılı ve verimli bir şekilde devam etmektedir. Madencilik ve yapı faaliyetleri bilindiği üzere en riskli iş kollarından biri olarak kabul edilmektedir. Tünel işleri ise inşaat ve madencilik sektörlerinin birleştiği noktada yer alır ve iş sağlığı ve güvenliği açısından büyük riskler içermektedir. Bu çalışmada, yapımı İç Anadolu Bölgesi'nde gerçekleştirilen bir Hidroelektrik Santrali Tünel inşaatı projesi için İSG açısından risk değerlendirmesi yapılmıştır. Risk değerlendirme metodolojisi olarak sadece olasılık ve şiddet faktörlerini değil, aynı zamanda fark edilebilirlik parametresini de dikkate alan Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) risk analiz yöntemi kullanılmıştır. Yapılan risk analizi sonucunda toplam 174 adet risk faktörü saptanmış ve risklerin yönetilmesine dair önlemler belirlenmiştir. Hidroelektrik santrali tünel inşaatı faaliyetlerinde çalışanların sağlık ve güvenlikleri için gerçekleştirilen bu çalışma, HTEA yöntemiyle mevcut ve potansiyel tehlikelerin değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Sözcükler: Risk değerlendirmesi, HTEA, tünel açma, hidroelektrik enerjisi

ABSTRACT

With the advancement of technology, there's a noticeable uptick in infrastructure development, notably impacting the fields of transportation and energy through effective and efficient tunneling operations. Occupations in the mining and construction sectors are widely recognized as some of the riskiest. Tunneling activities, in particular, sit at the intersection of these two industries and pose substantial occupational health and safety challenges. This study carries out a risk assessment for a Hydroelectric Power Plant Tunnel construction project located in the Central Anatolia Region. The methodology employed in assessing risks isn't limited to just the likelihood and severity factors but also incorporates 'detectability,' using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) risk assessment method. As a result of this comprehensive assessment, a total of 174 risk factors were identified, and corresponding safety measures have been established. This work emphasizes the significance of evaluating both existing and potential hazards for the health and safety of workers involved in the hydroelectric tunnel construction, using the FMEA method

Keywords: Risk assessment, FMEA, tunneling, hydroelectric power

GİRİŞ

Çalışma alanlarında, risk değerlendirmesi, iş sağlığı ve güvenliği için temel bir öneme sahiptir (Health and Safety Executive, 2013). Bu süreç, iş yerlerinde mevcut güvenlik protokollerinin eksiksiz bir analizini sağlar, böylece mevcut güvenlik açıkları belirlenir ve iyileştirme stratejileri oluşturulur (Huang & Hinze, 2006). Risk değerlendirme, iş yerlerinde sağlığın ve güvenliğin mevcut durumunu kapsamlı bir şekilde incelemek için kritik bir adımdır (Occupational Safety and Health Administration, 2000). Çeşitli parametreler kullanılarak, bir iş yerinin veya projenin risk profilini oluşturur ve böylece çalışanların güvenli bir ortamda çalışabilmesi için gerekli düzenlemeleri sağlar (Zou et al., 2007).

Yapı projeleri, özellikle tünel inşaatları, doğası gereği risklidir. Farklı kazı yöntemleri ve teknolojileri, iş süreçlerini hem daha etkin hem de güvenli hale getirmekte yardımcı olur (Levin, 2011). Bu tür projelerde risk değerlendirmesi, olası tehlikeleri saptamak ve önlem almak için merkezi bir role sahiptir (Zou et al., 2007). İyi bir risk değerlendirme süreci, sadece iş güvenliği uzmanlarını değil, aynı zamanda teknik ve idari personeli de içerir, böylece daha geniş kapsamlı ve etkin bir risk yönetimi stratejisi oluşturulabilir (Huang & Hinze, 2006).

MATERYAL

Bu araştırmada, Hata Türü Etkileri ve Analizi (HTEA) risk değerlendirme metodolojisinin uygulandığı bir çalışma ele alınmıştır. Çalışma alanı olarak, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan bir hidroelektrik santral projesine ait tünel inşaatı pilot bölge olarak belirlenmiştir. Söz konusu tünelin toplam uzunluğu 12 kilometre olarak ölçülmüştür. Tünel inşaatında, manuel kazma yöntemlerinin aksine, daha hızlı, güvenli ve verimli olması sebebiyle Tünel Açma Makinesi (TBM) teknolojisi tercih edilmiştir. Tünelin 4 kilometrelik bölümü, geleneksel delme ve patlatma yöntemleriyle, kalan 8 kilometrelik kısmı ise TBM ile kazılmıştır. Coğrafi olarak tünelin konumu, Avrasya plakasını ayıran ve 1. derece deprem kuşağına dahil olan Kuzey Anadolu fay hattı üzerindedir. Bu, tünelin yapısının ve işlevselliğinin yanı sıra bölgedeki sismik aktivite açısından da önemli bir faktördür.

METOT

HTEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) ile gerçekleştirilen risk değerlendirme süreçleri, işleyiş gereksinimlerini ve olası sorunları iş güvenliği uzmanlarına özgün bir bakış açısı sunar. Bu özel yaklaşım, uzman görüşlerini dikkate alır ve belirli tehlikeli alanları saptayarak, bu risklerin ele alınması için spesifik çözümler önerir. HTEA metodolojisi, iş kazası olasılığını, olası etkileri ve algılanabilirlik değişkenlerini kullanarak tehlike unsurlarını derinlemesine incelemeye dayalıdır (Özfırat, 2013). Risk değerlendirme süreci, tehlikelerin tanımlanması, muhtemel hataların ve mevcut güvenlik önlemlerinin saptanması, olasılık, yoğunluk, algılanabilirlik ve risk öncelik numarasının belirlenmesi aşamalarıyla yürütülür (Özkılıç, 2005).

Uzmanlar, riskin ortaya çıkış olasılığı, meydana gelirse ne kadar şiddetli olacağı ve bu risklerin ne kadar kolay fark edilebileceği gibi faktörleri 1 ile 10 arasında nesnel bir değerle sınıflandırır. Sonuç olarak, belirlenen risklerin risk öncelik sayıları eşitlik 1'deki gibi (RÖS) hesaplanır (Çizelge 1, 2, 3, 4). Risk öncelik sayıları, belirlenen değerlerin matematiksel birleştirilmesi ile oluşturulur ve sınıflandırılmış riskler spesifik bir düzenlemeye tabi tutulur, örneğin Çizelge 4'te olduğu gibi. Bu düzenleme, tehlike unsurlarının önceliklendirilmesini, böylece uygun koruyucu önlemlerin alınmasını ve risklerin yeniden değerlendirilip hesaplanmasını sağlar. Bu, iş güvenliği alanında kritik bir rol oynayan karmaşık ve çok aşamalı bir süreçtir, ancak etkin bir şekilde yürütüldüğünde iş kazalarının önlenmesine büyük katkı sağlar.

RÖS = O x Ş x F (1)

RÖS: Risk öncelik sayısı

O: Riskin meydana gelme olasılığı

Ş: Meydana gelen hasarın şiddeti

F: İş kazasının önceden fark edilebilmesinin zorluk derecesi

Çizelge 1. Risklerin ortaya çıkma olasılığı ve derecesi (Özkılıç, 2005)

Hatanın Oluşma Olasılığı	Hatanın Olasılığı	Derece
Çok yüksek: Kaçınılmaz hata	1/2 'den fazla	10
	1/3	9
Yüksek: Tekrar tekrar hata	1/8	8
	1/20	7
Orta: Ara sıra olan hata	1/80	6
	1/400	5
Düşük: Nispeten az olan hata	1/2000	4
	1/15000	3
Pek az: Olası olmayan hata	1/150000	2
	1/150000'den düşük	1

Çizelge 2. Şiddetin sınıflandırılması (Özkılıç, 2005)

Etki	Şiddetin Etkisi	Derece
Uyarısız Gelen Yüksek Tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	10
Uyarısız Gelen Tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	9
Çok Yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3. derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata türü	8
Yüksek	Ekipmanın tamamen hasar görmesine neden olan ve ölüme, zehirlenme, 3. derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata türü	7
Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata	6
Düşük	Kırık, kalıcı küçük is görmezlik, 2. derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip olan hata	5
Çok Düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata	4
Küçük	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata	3
Çok Küçük	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata	2
Yok	Etki yok	1

Çizelge 3. Fark edilebilirlik ve dereceleri (Özkılıç, 2005)

Fark Edilebilirlik	Fark Edilebilirlik Olasılığı	Derece
Fark edilmez	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği mümkün değil	10
Çok az	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok uzak	9
Az	Potansiyel hatanın nedeninin saptanabilirliği uzak	8
Çok Düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok düşük	7
Düşük	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği düşük	6
Orta	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği orta	5
Yüksek Ortalama	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek ortalama	4
Yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek	3
Çok Yüksek	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok yüksek	2
Hemen hemen kesin	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği hemen hemen kesin	1

Çizelge 4. Risk öncelik sayısı (RÖS) değerlendirmesi (Özkılıç, 2005)

RÖS Değeri	ÖNLEM
RÖS<40	Önlem almaya gerek yok
40≤RÖS≤100	Önlem alınabilir
RÖS>100	Önlem alınması gereklidir

TÜNEL AÇMA FAALİYETLERİNDEKİ BAŞLICA TEHLİKELER

Tünel inşaatları hem çevreye az zarar vermesi hem de yoğun nüfuslu bölgelerdeki altyapı ihtiyacını karşılaması açısından günümüz dünyasında önemini giderek artırır hale gelmiştir. Hem yumuşak zeminlerde hem de sert kaya yapılarında ortak tehlikeler bulunmaktadır. Mekanize tünelcilik yöntemi sayesinde, iş gücüyle ilişkilendirilen riskler büyük ölçüde minimize edilmiştir. Çökme tehlikeleri ve kesici kafa bakımı sırasında karşılaşılan riskler dışında, diğer tehlikeler büyük oranda bertaraf edilmiştir.

Tüneller, maddi ve ulusal açıdan iki katmandan oluşan yüksek değerli varlıklar olarak kabul edilmektedir. Olası yıkımlar ve onarımlar gibi maliyetli durumlar, tünel yapılarında büyük problemlere yol açabilmektedir. Tünel projeleri, diğer inşaat projelerinden farklı olarak, belirsizliklerin ortaya çıkmasına yatkındır. Bu belirsizlikler, tünelin bütünlüğünü etkileyebilir ve tasarım, yapım, işletme aşamalarında genel belirsizlikler ile planlanmamış olağanüstü durumlar olarak iki ana gruba ayrılabilir. Bu iki belirsizlik tipi, işveren, müteahhit ve taşeronların maliyet, zaman, kalite gibi performans hedeflerini doğrudan etkileyebilir.

Geleneksel inşaat alanlarında karşılaşılan iş sağlığı ve güvenliği tehlikelerine ek olarak tünel açma faaliyetleri; zeminin belirsizlik derecesi, kapalı tünel atmosferi, çalışanlarda güvenlik kültürünün eksikliği, işveren tarafından iş sağlığı ve güvenliğinin uygulamalarının yerine getirilememesi ve basınçlı ortamda çalışma gibi özgün riskler taşımaktadır.

BULGULAR

Bu çalışma, tünel inşaatının sürdürüldüğü dönemde risk kontrol yöntemlerinin derinlemesine incelenmesi ve potansiyel risklerin ortadan kaldırılması amacıyla yapılmıştır. Tünel çalışmaları bağlamında oluşabilecek tehlikeler tanımlanmış, alınması gereken tedbirlerle ilgili kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Alınması gereken önlemlerin saha şartlarındaki uygulanabilirliği de değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, tünel inşaatında ne tür tehlikelerin dikkate alındığı ve hangi konulara vurgu yapıldığı ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Tünel inşaatının, hidroelektrik santral inşaatının önemli bir parçası olduğu da belirtilmektedir. Ayrıca santral inşaatı sırasında yapılan risk değerlendirmelerinin tünel inşaatına yönelik kısımları özellikle incelenmiştir.

Çalışmada, kapsamlı ve ayrıca risk değerlendirme ekibi tarafından kolaylıkla anlaşılıp çalışanlara verimli bir şekilde aktarılabilecek olan HTEA risk analiz yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan risk değerlendirmesi, çeşitli boyutlarıyla farklı başlıklar altında incelenmiştir. Bu başlıklardan ilki çalışanların isg eğitimleri, işverenin sorumlulukları, proje planlama, çalışma alanları ve acil eylem planlaması gibi unsurları içermektedir. Çalışma ortamı başlığı altında, ortamdaki gürültü, toz ve tehlikeli gazların değerleri, aydınlatma, ikaz levhaları, makine durdurma butonları, çalışanlar için yürüme yolları ve yolların düzeni gibi konular ele alınmıştır. Ofis çalışmalarında, otururak çalışan bireylerin karşılaşabileceği riskler incelenmiştir. Yüksekte çalışan işçiler için; yüksek platformlar, iskelede güvenli çalışma, iskelelerin periyodik kontrolü gibi konuları içermektedir. Alev ve taş motoru kullanarak yapılan malzeme kesme, kaynak yapma ve basınçlı tüpler sıcak çalışmalar kapsamında ele alınmıştır. Tünel inşasında kullanılan vinç vb. kaldırma ekipmanların kullanıldığı işler en tehlikeli unsur olarak saptanmıştır. Elektrik başlığında seyyar olarak kullanılan elektrik kabloları, elektrik dağıtım panoları ve bunların kontrol sistemleri gibi tehlikeler üzerinde durulmuştur. Tünel içerisinde yapılan nakliyat çalışmalarının tünelcilik faaliyetlerinde birçok tehlike unsurunu bünyesinde barındırdığı görülmüştür. Tünel çalışmaları kısmında da başlıca tünel tehlike ve riskleri değerlendirilmiştir. Son olarak patlayıcı maddelerin nakliyesi, taşıma ve depolanması, kullanıcıların ehliyeti ve bu maddelerin güvenli kullanımı üzerine odaklanılmıştır. Bu tehlike unsurlarına dair yapılmış olan değerlendirmeler neticesinde inşaat sahasında toplam 174 farklı risk ve tehlike unsurları tanımlanmış ve bunlar dört farklı kategoride sınıflandırılmıştır:

Katlanılamaz Riskler (%22)	Önemli Riskler (%60)
Orta Düzey Riskler (%15)	Katlanılabilir Riskler (%3)

Analiz sonuçları, "katlanılamaz riskler" düzeyinde en yaygın risklerin tünel çalışmaları olduğunu ve bunu kaldırma işlerinin takip ettiğini göstermektedir. Bu bağlamda, tünel ve kaldırma işlerine öncelik verilmesi gerekmektedir. Bu risk analizi, yüksek risk taşıyan işlerin riskler azaltılana kadar başlatılmaması veya derhal durdurulması gerektiği sonucuna ulaşmıştır. Tehlikelerin ortadan kaldırılması için gerekli önlemler de bu çalışma kapsamında belirlenmiştir. Risk değerlendirmesi sonrasında, alınması gereken önlemler ve uygulamalar kapsamında, katlanılamaz ve önemli risklerin kabul edilebilir sınırlara getirilmesi planlanmıştır.

Hidroelektrik santrali tünel inşaatının risk değerlendirilmesine yönelik bu araştırmada, belirli tehlikeler detaylı bir şekilde tanımlanmış ve risklerin yönetimi için stratejik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Risk faktörlerinin büyüklüğü ve önemi dikkate alınarak, etkin kontrol metotları tasarlanmıştır (Çizelge 5 ve 6). Tünel inşaat sahasında, iş güvenliği ve işçi sağlığına olası etkileri bulunan belirli faktörler incelenmiş ve bu konudaki çözüm önerileri sunulmuştur. Uygulanan düzeltme ve önleme tedbirleri sonucunda, yüksek riskli faktörler orta ve kabul edilebilir seviyelere indirgenmiş, projenin kontrollü bir şekilde devam etmesi planlanmıştır.

Araştırmada, risklerin çoğunlukla sıcak çalışmalar ve tünel içi faaliyetlerle ilgili olduğu belirlenmiştir. Bu alandaki risk değerlendirmesinin, iş güvenliği ve sağlığı bakımından kaza önleme stratejilerinde kritik bir rol oynadığı, iş kazalarını azaltmada etkin bir mekanizma olarak işlev gördüğü tespit edilmiştir. Risk değerlendirme pratiğinin esas amacı, ortaya çıkan risk değerlendirmesinin çalışanlara etkin bir şekilde

aktarılmasıdır. Çalışanların çoğunlukla yöre halkından istihdam edildiği ve genel eğitim düzeylerinin nispeten düşük olduğu gözlemlenmiştir. İnşaat gibi geçici ve yüksek iş baskısına sahip sektörlerde iş güvenliği kültürünün geliştirilmesi için yeterli zamanın bulunmadığı da ortaya konmuştur. Eğitim sürecinin, iş sağlığı ve güvenliği ile sınırlı olmadığı; mesleki eğitimlerle beraber, çalışanların geçmiş tecrübelerinin de eğitim olarak değerlendirildiği anlaşılmıştır. Çalışanlar arasında farkındalık oluşturmanın, iş sağlığı ve güvenliği açısından olumlu etkiler yarattığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, üretim endişesiyle eğitim ve tatbikat gibi konulara yeterli önem verilmediği ve yasal gereklilikler dışında bu uygulamaların genellikle teorik düzeyde kaldığı birçok işletmeyle karşılaşılmıştır. Çalışanlar arasında farkındalık oluşturarak güvensiz hareketlerin önlenmesi gerektiği vurgulanmış, bu da etkili eğitimle mümkün olabileceği belirtilmiştir. Bu sürecin başarılı olması için yönetimin teşvik edici olması, gerekli eğitim materyallerinin temin edilmesi, iş başı konuşmalarının düzenli yapılması ve teknik kadronun liderlik alması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 5. Tünel inşaatında saptanmış riskler ve kontrol tedbirleri

Tehlike	Saptanmış Risk Sayısı	Kontrol Tedbirleri
Patlayıcı Madde Kullanımı	13	Patlayıcılar, sertifikalı personel tarafından işlenmeli. Hassas bölgeler, işaretleme ve bariyerlerle izole edilmeli. İlgili protokoller ve İş İzin Belgesi düzenlenmeli. Uygun araçlar ve anti-statik önlemler kullanılmalı. Acil durum planları ve ekipmanları hazır bulundurulmalı. Patlayıcı kullanımı sonrası güvenlik denetimi yapılmalı.
Vinç vb. Ekipmanlarla Çalışmalar	33	Vinç operatörleri için uygun eğitim ve sertifikasyon sağlanmalıdır. Kaldırma ekipmanları düzenli olarak kontrol edilmeli ve bakımı yapılmalıdır. Yükler doğru şekilde sabitlenmeli ve taşınmalıdır. İş yeri kaldırma ve indirme prosedürleri oluşturulmalı ve uygulanmalıdır. Kaldırma alanı işaretlenmeli ve yeterli güvenlik mesafesi sağlanmalıdır. Acil durum planları yerinde olmalı ve tüm personel tarafından bilinmelidir.
Yüksekte Çalışma	16	Yüksekte çalışma için uygun eğitim ve sertifikasyon sağlanmalıdır. Güvenlik kemerleri ve düşmeyi önleyici sistemler kullanılmalıdır. Çalışma platformları stabil ve güvenli olmalıdır. Yüksekte çalışma alanlarında düzenli denetim ve bakım yapılmalıdır. Araçlar ve ekipmanlar, yükseklik çalışmalarına uygun olmalıdır. Acil durum prosedürleri belirlenmeli ve uygulanabilir olmalıdır.
Nakliyat	11	Nakliyat güzergahları açık ve işaretlenmiş olmalıdır. Araçlar düzenli bakımdan geçirilmeli ve sertifikalandırılmalıdır. Yükler düzgün bir şekilde sabitlenmeli ve taşınmalıdır. Sürücüler, tünel içi nakliyat eğitimi almış olmalıdır. Hız limitleri ve trafik kuralları net bir şekilde belirlenmeli ve uygulanmalıdır. Acil durum prosedürleri yerinde olmalı ve çalışanlarla paylaşılmalıdır.
Alevle Kesme, Kaynak Yapma	23	Risk değerlendirmesi ve kontrol listesi şarttır. Çalışanlar için sertifikalı eğitim gerekir. Standartlara uygun PPE kullanılmalıdır. İş İzin Belgesi (Hot Work Permit) düzenlenmelidir. Uygun yangın söndürme ekipmanı erişilebilir olmalıdır. Sürekli izleme ve denetim yapılmalıdır.
Elektrik	16	Elektrik ekipmanlarının düzenli bakımı yapılmalıdır. Tüm elektrikli aletler yalıtımlı ve uygun standartlarda olmalıdır. Elektrik panoları ve anahtarları suya ve nemden korunmalıdır. Çalışanlar, elektrik güvenliği konusunda eğitilmelidir. Acil durum durdurma düğmeleri kolay erişilebilir olmalıdır. Kablo yolları ve elektrik hatları belirgin bir şekilde işaretlenmelidir.

Çizelge 6. Tünel inşaatındaki riskler ve kontrol tedbirleri

Tehlike	Saptanmış Risk Sayısı	Kontrol Tedbirleri
Kapalı Ortamda Çalışma	46	Havalandırma sistemleri sürekli izlenmeli ve etkin şekilde çalıştırılmalı. Yapısal destekler düzenli olarak kontrol edilmeli ve güçlendirilmeli. Elektrik sistemleri izole edilmeli ve düzenli bakımı yapılmalı. Çalışanlar için acil durum tahliye planları oluşturulmalı ve tatbikatlar yapılmalı. İlk yardım ve yangın söndürme ekipmanları her zaman erişilebilir olmalı. Kullanılan makine ve ekipmanlar belirlenmiş standartlara uygun olmalı.
Yönetimde Aksaklıklar	8	Risk değerlendirmeleri belirli aralıklarla yenilenmeli ve uygulanmalı. Yönetim, çalışanların sürekli eğitim ve sertifikasyonunu sağlamalı. Acil durum planları düzenli olarak güncellenmeli ve tatbik edilmeli. Yönetim, güvenlik standartlarına uygun ekipman kullanımını garanti etmeli. Çalışma alanının düzenli denetimlerle güvenli olduğundan emin olunmalı. Yönetim, yasal düzenlemelerin sürekli takip edilmesi ve uyulmasını sağlamalı.
Ofis Çalışmaları	7	Ergonomik mobilya ve düzenlemeler kullanılarak fiziksel rahatsızlıklar önlenmeli. Elektrik kabloları ve bağlantıları düzenli kontrol edilip, düzenli olmalı. Yangın güvenliği için algılama ve söndürme sistemleri bulunmalı ve düzenli denetlenmeli. Veri güvenliği ve yedekleme prosedürleri etkin bir şekilde uygulanmalı.

Çizelge 7. Tünel inşaatı HTEA risk analizi

Hata Türü	Olası Etkileri	Olası Sebep	Olasılık	Şiddet	Fark Edilebilirlik	Önlem	RÖS
Hatalı Delme Ekipmanı Kullanımı	Yapısal Hasar, Yaralanma	Ekipman Arızası	5	8	7	Düzenli Ekipman Kontrolü	280
Zayıf Havalandırma	Oksijensizlik, Gaz Zehirlenmesi	Sistem Başarısızlığı	4	9	5	Havalandırma Sistemleri	180
Yetersiz Destek Yapısı	Çökme, Yaralanma	Tasarım Hatası	3	10	6	Yapısal Kontrol	180
Yanlış Patlayıcı Kullanımı	Patlamalar, Yaralanma	İnsan Hatası	4	9	4	Eğitim ve Prosedürler	144
Elektrikli Ekipman Arızaları	Elektrik Çarpması, Yangın	Ekipman Yıpranması	5	8	6	Elektrik Sistem Kontrolü	240
Su Sızıntısı	Sel, Ekipman Arızası	İzolasyon Başarısızlığı	6	7	5	Su İzolasyon Kontrolleri	210

SONUÇ

Bu çalışma, hidroelektrik enerji üretim santrali tünel inşaatında potansiyel olarak tehlikeli 174 farklı risk faktörünü tanımlamıştır. Bu faktörler, kazı süreçlerinden çalışma ortamının genel düzenine kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Çalışma, bu risklerin kapsamlı bir şekilde yönetilmesi ve minimize edilmesi için stratejiler oluşturulmasını sağlamıştır.

Bu risk faktörlerinin büyük bir kısmı, çalışanların yetersiz bilgisi ve tehlikeli davranışları sonucu meydana gelmektedir. Eğitim ve farkındalık yaratma programları, bu davranışların önlenmesine büyük katkı sağlayabilir. Özellikle tünel inşaatları gibi karmaşık ve kapalı ortamlarda, acil müdahale ve kurtarma planlarının oluşturulması, bu çalışma ile daha da önem kazanmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen risk değerlendirmesi, bir süreç olarak değerlendirilmelidir. Çalışanların aktif katılımı ve sürekli eğitimi, bu sürecin dinamik ve evrimsel bir yapıya sahip olmasını sağlayacaktır. Bu yaklaşım, iş güvenliğinin ve sağlığının sürekli iyileştirilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

Health and Safety Executive. (2013). Risk assessment: A brief guide to controlling risks in the workplace. HSE.

Huang, X., & Hinze, J. (2006). Owner's role in construction safety. *Journal of Construction Engineering and Management,* 132(2), 164-173.

Levin, P. (2011). Excellent Dissertations!. McGraw-Hill Education (UK).

Occupational Safety and Health Administration. (2000). Safety and health program management guidelines. *Federal Register*, 54, 3908–3916.

Özfırat, M.K. (2013). Yeraltı madeninde nakliyatta oluşan risklerin hata türü etki analizi (htea) yöntemiyle sınıflanması. Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu (s. 291-294). Adana, Türkiye: Maden Mühendisleri Odası Yayınları

Özkılıç, Ö. (2005). İş sağlığı ve yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri. TİSK Yayınları, Yayın no: 338, (s. 140-142). Ankara.

Zou, P. X., Zhang, G., & Wang, J. (2007). Understanding the key risks in construction projects in China. *International Journal of Project Management*, 25(6), 601-614.

YER ALTI METRO İSTASYONLARINDA KARŞILAŞILAN RİSKLER ve DEĞERLENDİRİLMESİ

RISKS FACED IN UNDERGROUND METRO STATIONS AND THEIR ASSESSMENT

A. Özırmak [1, *], M. Kun [2]

[1] *Dokuz Eylül Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı*
[2] *Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü*
*(*Sorumlu yazar: anil.ozirmak@deu.edu.tr)*

ÖZ

Gelişen dünyada gözlenen hızlı nüfus artışı beraberinde insanların; enerji, ulaşım, toplu taşımacılık, içme suyu gibi ihtiyaçlarını da hızla artmaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanma zorunluluğu, hızlı yapılaşma ve hızlı nüfus artışının getirdiği planlama zorlukları, kentin görünen yüzü kadar görünmeyen yer altının da, aktif olarak kullanılması zorunluluğunu getirmiştir. Bu zorlukların aşımı ancak tünellerin ve yer altı açıklıklarının etkin kullanılması ile mümkündür.

Metro hatlarında, kazı aşamasının özelikle istasyon bölgelerinde, yerüstü istasyonlarına ve dar kesitli tünellere göre geniş kesitli olması nedenli ile, risk çeşitliği fazladır. Tünellerin kazı aşamasında karşılaşılan risklerden bazıları, istasyonların işletme aşamasında da devam etmekte hatta yeni risk etmenleri bu aşamada artarak ortaya çıkmaktadır.

Hazırlanan bu çalışmada kazı aşamasındaki risklerden bağımsız olarak, özellikle yer altı metro istasyonlarında işletme aşamasında karşılaşılan düşme, çarpma, sıkışma, çarpılma gibi riskler belirlenmiştir. Çalışma kapsamında İzmir Metro hattı ele alınarak, belirlenen yer altı istasyonlarında en çok karşılaşılan kazalara sebep olan ortak riskler değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Yer altı metro istasyonları, risk değerlendirmesi, iş güvenliği

ABSTRACT

Along with rapid population growth, people; needs such as energy, transportation, mass transit, drinking water are also increasing rapidly. The necessity of meeting these needs, the planning difficulties, rapid urbanization and rapid population growth, required the active use of the invisible underground as well as the visible face of the city. Overcoming these difficulties is only possbile with the effective use of underground spaces and tunnels.

Excavation phase in metro lines has high variety of risks due to wider sections than above-ground stations and narrow-sectioned tunnels, especially in the station areas. Some of the risks encountered during the excavation phase of the tunnels continue during the operation phase of the stations and even new risk factors emerge increasingly at this stage.

In this study, regardless of the excavation phase, risks such as falling, crashing, jamming, and crashing were determined during the operation phase especially in underground metro stations. The common risks that cause the most common accidents in the determined underground stations were evaluated by considering the Izmir Metro line.

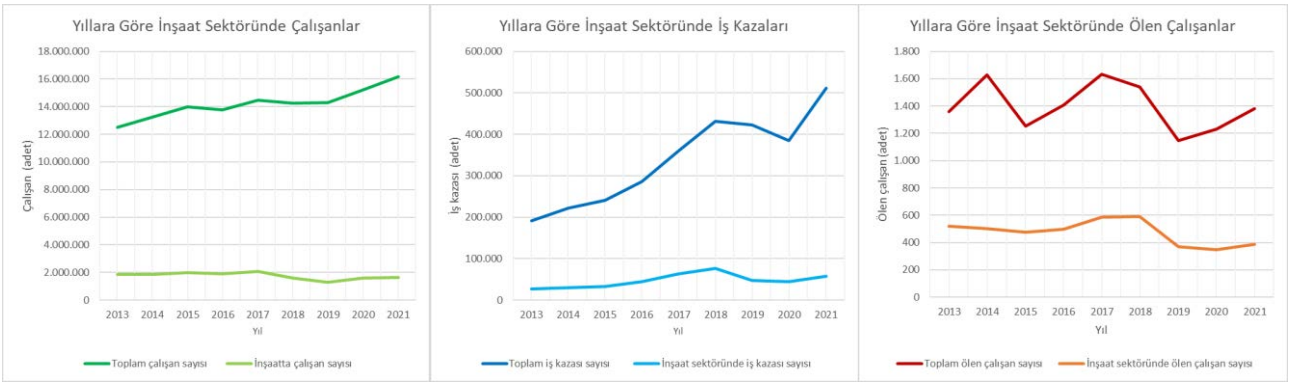
Keywords: Fine grinding, energy efficiency, rock mechanics, mineral processing, mine valuation

GİRİŞ

Toplu taşıma; TDK (t.y.) tarafından "Bir şehir halkının ulaşım gereksiniminin, çok sayıda insan taşımaya elverişli büyük taşıma araçlarıyla karşılanmasını sağlayan ulaşım sistemi" olarak tanımlanmaktadır. Şehirlerin nüfuslarının artması, kentlilerin kişisel çaba ve araçları ile seyahat etmelerini zorlaştırmaya başlamıştır. Bu sebepten, toplu taşıma ihtiyacı doğmuş ve toplu taşıma araçlarının alternatifleri çok sayıda olduğundan, burada yolcuların tercihleri ön plana çıkmıştır. Günümüzde, özellikle büyük şehirlerde yaşayanların tercihlerinin en kısa yolculuk süresi üzerinde yoğunlaştığı söylenebilir. Bu sebepten diğer ulaşım araçları ile hemzemin bir yol veya geçit kullanmayan bir toplu taşıma aracı olan metrolar tercih edilmektedir. Kent içi diğer toplu taşıma sistemlerinin hatları ile kesişmemesi için, diğer raylı sistemlerin aksine metrolar; genellikle kendi hatlarına sahiptir ve bu hatların büyük bir kısmı yer altından ilerlemektedir.

Metro istasyonları, metropollerdeki insanların günlük hayatlarının kaçınılmaz bir parçası olmuş durumdadır. Seyahat ne amaçlı olursa olsun, şehir içerisinde ekonomik ve güvenli şekilde istenen noktaya gitmek için kullanılabilecek en akılcı seçeneklerden bir tanesi metro hatlarıdır. Hızlı, konforlu ve çevreci olması metro araçlarını diğer toplu ulaşım araçları arasında öne çıkarmaktadır (Kukreja, 2020). Tüm bunlar; sürdürülebilir bir kent içi ulaşım politikasına ulaşmak için metro sistemlerinin büyük rol oynadığını göstermektedir. Yüksek maliyetlerine karşın; yolcu başına enerji tüketimi, sera gazı emisyonu, işletme maliyeti konularında da en avantajlı toplu ulaşım araçları yine metrolardır (Cirit, 2014).

Tabii ki metrolar; raylı sistemlerin bir parçası olduğu için, bu projelerde karşılaşılabilen risklerin çoğu, diğer raylı sistem çeşitlerinde de mevcut olabilmektedir. Bu sebeple diğer raylı sistem araçları ile ortak risklere sahip olsa da hattın geçtiği tüneller ve yer altı istasyonlarının inşası kendine has risklerle birlikte gelmektedir. Hemen her yapı işinde yer alan kazı işleri, bu tür yapılarda daha da büyük hacimlerde ve daha hassas bir şekilde yürütülmektedir. Çünkü kullanılan iş makinelerinde veya kazma, patlatma gibi uygulamalarda yapılacak olan bir hata ile, tünelin bir kısmının veya tamamının göçmesine sebep olarak; toplu ölümler meydana gelebilmektedir. Şekil 1'deki grafikler; her yıl "SGK İstatistik Yıllıkları" adıyla bir önceki yıl için bir dosya halinde sunulan verilerle oluşturulmuştur.

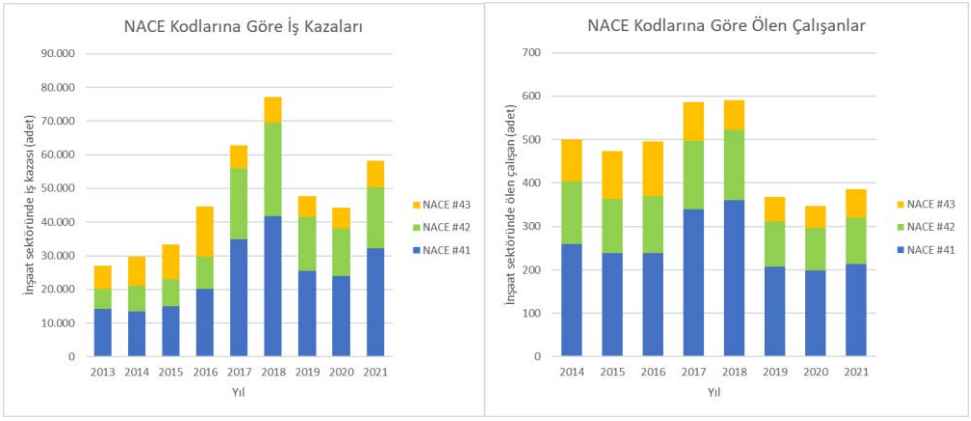


Şekil 1. Yıllara göre inşaat sektöründe çalışanlar sayısı, yaşanan iş kazaları ve ölümler (SGK, 2021)

Ancak ne yazık ki bu istatistiklerde iş kazalarının yaşandığı yapı işleri, Şekil 2'de gösterildiği gibi sadece NACE kodlarına göre:

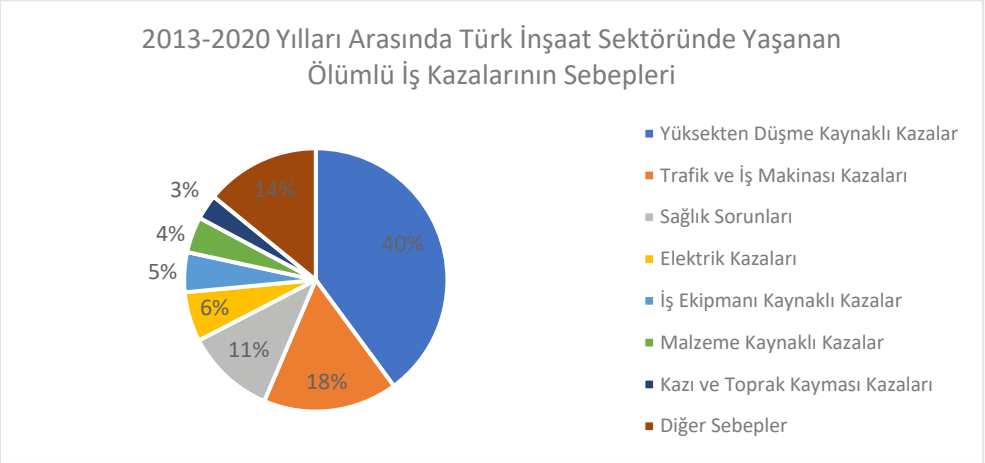
41. Bina inşaatı
42. Bina dışı yapıların inşaatı ve
43. Özel inşaat faaliyetleri olarak ayrılmıştır.

Metro inşaatları bu kodlardan "42- Bina dışı yapıların inşaatı" altında, "42.12.01- Demir yolları ve metroların inşaatı (bakım ve onarımı dahil)" olarak yer almaktadır (TOBB, 2023).



Şekil 2. NACE kodlarına göre inşaat sektöründe yaşanan iş kazaları ve ölümler ((TOBB, 2023)

İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İSGGM (2023)'nin "Güvenli İnşaat" internet sitesinde yer alan istatistiklere göre; 2013-2020 yılları arasında inşaat sektöründe yaşanan ölümlü iş kazalarının sebepleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 2013-2020 Yılları Arasında Türk İnşaat Sektöründe Yaşanan Ölümlü İş Kazalarının Sebepleri (İSGGM, 2023)

Akboğa ve Baradan (2015)'ın 2007-2011 yılları arası İzmir'de inşaat sektöründe yaşanan ölümlü iş kazalarını incelediği çalışmaya göre yaşanan 93 ölümlü iş kazasının yaklaşık %68'i yüksekten düşme, %6,5'i malzeme çarpması ve taşıt kazaları sonucu meydana gelmiştir. Kanal, tünel kazıları gibi işlerde karşılaşılabilen zemin göçüğü altında kalma ve patlama/yangın kaza tipleri ise sırasıyla %4,3 ve %3,2'dir. Ölümlerin yaşandığı bu iş kazalarının %14'ünün alt yapı projelerinde gerçekleştiği de Tablo 1'de görülmektedir. Ayrıca yüksekten düşme riskinin; kalıp, demir ve çatı işçileri için önem faktörünün %100 olduğu ve göçük altında kalma riskinin de alt yapı işçileri için önem faktörünün %100 olduğu ortaya konmuştur.

Tablo 1. Ölümlü iş kazalarının kaza karakteristikleri (Akboğa & Baradan, 2015)

Kaza Tipi	Ölüm sayısı	% Ölüm
Yüksekten düşme	63	67,7
Cisim çarpması	6	6,5
Taşıt kazası	6	6,5
Elektrik çarpması	5	5,4
Zemin göçüğü altında kalma	4	4,3
Patlama/Yangın	3	3,2
Bina göçmesi	2	2,2
Cisimler arası sıkışma	1	1,1
Düşme (aynı düzeyde)	1	1,1
Cisim batması	1	1,1
Diğer	1	1,1
TOPLAM	93	100

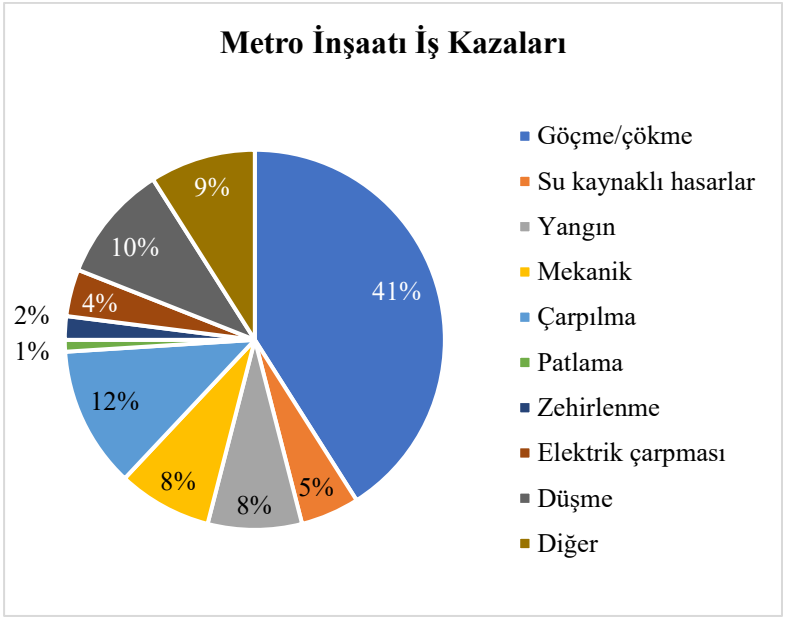
Proje Son Kullanımı	Ölüm sayısı	% Ölüm
Konut	47	51
Kurumsal ve Ticari Yapılar	24	26
Alt Yapı/ Ağır İnşaat	13	14
Yapı Gereci	7	7
Endüstriyel İnşaat	2	2
TOPLAM	93	100

Müngen (2011)'in 2005-2009 yılları arasında inşaat sektöründe meydana gelen 5239 iş kazasının raporunu incelemiş ve bunların kaza tiplerine göre dağıtmış ve bu kazaları alt gruplara indirgemiştir. Buna göre inşaat sektöründe gerçekleşen ölümlü iş kazalarından en yüksek 3 yüzdeye sahip olan kaza tipleri; %42,9 ile "İnsan Düşmesi", %12,2 ile "Elektrik Çarpması" ve %10,5 ile "Malzeme Düşmesi"dir. Malzemelerin %12'sinin ise tünel tavanlarından düştüğü belirtilmiştir. Tünel inşaatlarında meydana gelen ölümlü iş kazalarında, malzeme düşmelerinin %62,5 gibi çok yüksek bir yüzdeye sahip olduğu ve patlayıcı madde kazalarının 3 katı kadar çalışanın ölümüne sebep olması Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Tünel İnşaatı Şantiyelerindeki Kaza Tipleri (Müngen, 2011)

No.	Tünel İnşaatı Şantiyeleri	Ölüm		Yaralanma		Toplam	
	Kaza Tipi	Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
1	İnsan Düşmesi	0	0,0	5	17,9	5	9,6
2	Malzeme Düşmesi	15	62,5	7	25,0	22	42,3
3	Malzeme Sıçraması	0	0,0	0	0,0	0	0,0
4	Kazı Kenarının Göçmesi	1	4,2	0	0,0	1	1,9
5	Yapı Kısmının Çökmesi	0	0,0	0	0,0	0	0,0
6	Elektrik Çarpması	0	0,0	0	0,0	0	0,0
7	Patlayıcı Madde Kazaları	5	20,8	3	10,7	8	15,4
8	Yapı Makinası Kazaları	2	8,3	2	7,1	4	7,7
9	Uzuv Kaptırma	0	0,0	3	10,7	3	5,8
10	Uzuv Sıkışması	0	0,0	3	10,7	3	5,8
11	El Aleti İle Ele Vurma	0	0,0	2	7,1	2	3,8
12	Sivri Uçlu Keskin Ken Cis. Yara.	0	0,0	1	3,6	1	1,9
13	Şantiye içi Trafik Kazaları	1	4,2	2	7,1	3	5,8
14	Diğer Tip kazalar	0	0,0	0	0,0	0	0,0
	Toplam	**24**	**100,0**	**28**	**100,0**	**52**	**100,0**

Zhou vd. (2014) oluşturmuş oldukları veritabanı (SCID) yardımıyla 2011 yılından beri yetkili kurumlar, medya ve literatürden topladıkları 241 iş kazasını incelemiş ve değerlendirmiştir. Bu kazalar ağırlıklı olarak Çin'de gerçekleşmiş olsa da bunun yanında Fransa, Japonya, Kanada, Amerika Birleşik Devletleri, Kore, Brezilya, Rusya, Türkiye ve Singapur'dan da örnekler mevcuttur. Metro inşaatlarında gerçekleşen bu kazalar toplamda 10 ana tipe ayrılmıştır ve bunların yüzdeleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Çeşitli metro iş kazası tiplerinin yüzdelik dilimleri (Zhou, Irizarry, & Li, 2014).

TOPLU TAŞIMADA METRONUN YERİ

Toplu taşımanın ilk kentsel örneği olarak kabul edilen araçlar, omnibüs adıyla 1828 yılında Fransa'nın Nantes şehrinde hizmet vermeye başlanmıştır. Bu araç 25 ila 50 insanın, kentin sokaklarındaki çamurlara bulanmadan seyahat etmesini sağlamaktaydı (Schofer, 2023). Ancak bu sokakların Arnavut kaldırımı şeklinde döşeli olması sebebiyle, omnibüslerin ahşap tekerlekleri üzerinde yol almak konforlu değildi. Bu yüzden 1830'larda kendilerine özel raylar üzerinde giden atlı tramvaylar toplu taşıma amacıyla kullanılmıştır (Parks, 2020). Ardından San Francisco'nun dik yokuşları güvenli bir şekilde çıkıp inebilmek amacıyla 1873 yılında çelik halatlar yardımıyla çekilen hayvan kullanılmayan tramvaylar icat edilmiştir. Bunları elektrikli tramvaylar izlemiştir (Schofer, 2023).

20. yüzyılın başlarından itibaren Londra, New York, Boston, Paris, Budapeşte gibi büyük şehirlerde yolların araç ve insan trafiğiyle kalabalıklaşmasıyla birlikte, Mass Rapid Transit (MRT) olarak da tabir edilen raylı sistemler kullanılmaya başlandı. "Underground", "subway" gibi terimlerin kullanıldığı bu yer altı ulaşım sistemi, dilimizde "metro" olarak anılmaktadır. İlk örneği 1863 yılında Londra'da hayata geçirilen metro; sonrasında sırasıyla İstanbul, Budapeşte, Boston, Paris, Berlin, New York, Madrid, Tokyo ve Moskova gibi dünyanın büyük kentlerinde de tamamlandı (The Columbia Electronic Encyclopedia, 2023). Metro sistemlerinin dünya genelinde hızla yayılmasının temel sebeplerinden en önemlisi diğer toplu ulaşım sistemi araçlarından tamamen ayrı hatlara sahip olması ve bu sayede mevcut altyapıları meşgul etmeden inşa ve işletme süreçlerinin gerçekleşebilmesidir.

Ülkemizde 12 kentte metro, hafif raylı sistem, tramvay, füniküler ve banliyö sistemlerinden en az biri kullanılıyor (Rail Turkey TR, 2022). Ankara, İstanbul, İzmir, Adana'da metro hatları bulunuyorken, Bursa, Konya ve Mersin'de yapımı devam etmektedir. Üç Büyükşehir'in ortak olarak yayımladığı güncel veriler olan Mart 2023 ayına bakıldığında kentlerde gerçekleşen ulaşım hareketliliğinde her 100 yolcudan; İstanbul'da 40'ı, Ankara'da 22'si ve İzmir'de yaklaşık 20'si metroyu kullanmayı tercih etmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

METRO PROJELERİNDE İŞ SAĞLIĞI ve GÜVENLİĞİ

İnşaat Aşaması

Günümüzde NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi), DECO-RS (Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi), del-patlat, aç-kapa, mekanik kazı, TBM (Tünel açma makinesi) gibi tünel açma ve kazı yöntemleri metro projelerinde yaygın kullanılmaktadır (Satıcı & Topal, 2015). Bu yöntemlerden bir veya birkaçı aynı anda kullanılabilmektedir. Metro projelerinde genellikle aç-kapa yöntemi; istasyonların giriş-çıkış yapıları, bilet holleri gibi bölümlerinde kullanılmaktayken; hat tünelleri yapımında TBM yöntemi, daha geniş kesitli makas, bağlantı ve kuyruk tünellerinde veya peronlarda NATM yöntemi kullanılmaktadır (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2020).

Metro projelerinin inşa sürecinde alınması gereken iş sağlığı ve güvenliği tedbirleri, bu çalışmaların gerçekleştiği şantiyelerdeki tehlikelerin ve bu tehlikelerin doğurduğu risklere bağlı olarak değişmektedir. Buna göre; güzergâh boyunca yapılacak olan demir yolları, istasyonlar, tüneller, viyadükler, aktarma merkezleri gibi yapılar bir metro hattının inşaatında karşılaşılabilecek olan risklerin türlerini ve sayısını artırmaktadır.

Kazı işleri birçok inşaat projesinin ilk adımı olarak karşımıza çıkmaktadır (Akboğa Kale & Eskişar, 2018). İlgili yönetmeliğin Ek-1 Yapı İşleri Listesi'ne göre göre, kazı; yarma ve doldurma işleriyle birlikte 15 adet yapı işinden ilki olarak sayılmaktadır. Yine aynı listede Metro çalışmaları, "İnşa" başlığı altında yer almaktadır (Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete: 28786 sayılı, 05 Ekim 2013).

Metro projesi inşaatlarındaki kazı süreçlerinde en çok göçme / çökme riskine bağlı olarak meydana gelen kazalar gerçekleşmektedir. Daha çok gevşek zeminlerde görülen bu riskler; tünelde çalışan iş makinesi operatörünün hatasından veya -eğer mevcutsa- hatalı patlatmalardan kaynaklanabilir. Göçüğün etkisiyle; su sızıntısı veya basması, gaz sızıntıları, patlamalar da meydana gelebilmektedir. Bu tehlikeler, çalışmaların gerçekleştiği tünellerin kapalı alanlar olmasından dolayı daha da fazla riskler oluşturabilmektedir .

Ancak tünel çalışmalarındaki riskler sadece kazı süreçlerinde mevcut değildir. Yüksekte yapılan çalışmalar yapı işlerinin geneli düşünüldüğünde hem SGK İstatistik Yıllıkları'na hem de ILO Eurostat gibi uluslararası istatistiklere göre en çok yaralanmalı ve ölümlü iş kazalarına sebep olan tehlikelerdir. Yüksekte çalışma dendiğinde akıllara zeminin veya sıfır kotunun üzerinde yapılan çalışmalar gelse de aslında kazı çalışmalarının her biri yüksekte çalışma içermektedir. Çünkü ilgili yönetmeliğin Ek-4 Yüksekte Çalışma başlığına göre; "seviye farkı bulunan ve düşme sonucu yaralanma ihtimalinin oluşabileceği her türlü alanda yapışan çalışmalar yüksekte çalışma olarak kabul edilir" (Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete: 28786 sayılı, 05 Ekim 2013).

Elektrik, aydınlatma, havalandırma, iletişim, elektrikli el aletleri ve iş makinelerinin ihtiyacı olduğu gücü sağlaması için, ev ve birçok iş yerlerinde kullanılan geleneksel 220 V elektriğe göre çok daha yüksek voltajlıdır. Yüksek gerilimle çalışan cihazlar için özel olarak tasarlanmış olan kablolar kullanılmalıdır. Bu kablolar aynı zamanda su, nem gibi çevre ve yağmur, kar, çamur gibi iklim koşullarına karşı da dayanıklı olmak zorundadır. Uzun kablolar da takılma, düşme, koparak çarpma gibi riskler doğurabileceğinden dağınık bırakılmamalıdır. Kısa devre, yangın, ark parlaması gibi risklerin gerçekleşmemesi içinse tesisatın topraklanmış olması ve panoda kaçak akım rölelerinin kullanılmış olması gerekmektedir (Elektrik Mühendisleri Odası, 2020).

Tünellerde yapılan çalışmaların ortaya çıkardığı tehlikelerden biri de gürültüdür. Kapalı ortamlarda maruz kalınan iş makinesi gürültüleri, çalışanların kulağına bu makinelerin açık bir ortamda yaydığı aynı düzeydeki gürültüden daha fazla zarar vermektedir. Fiziksel bir risk etmeni olarak sayılsa da; sinirlilik, halsizlik, uykusuzluk gibi psikososyal bir çok soruna sebep olmaktadır.

Aydınlatma da yine de çalışmaların kapalı ortamlarda gerçekleşmesinden dolayı son derece önemli bir hale gelmektedir. Doğal aydınlatmadan yararlanılamayan tünellerde, aydınlatmanın yeterli düzeyde ve tekdüze olması çalışan sağlığı ve işin güvenliği için büyük önem arz etmektedir.

Bir diğer tehlike ise titreşimdir. Özellikle çalışmaların gerçekleştiği zemin formasyonunun titreşimde büyük bir etkisi vardır. Sert kayaçların olduğu zeminlerde makinelerin titreşimleri çalışanlar tarafından daha çok hissedilecek ve başta uygun Kişisel Koruyucu Donanım (KKD) kullanmamış operatörler olmak üzere çalışanlarda fiziksel etkiler bırakacaktır. Bu titreşimler tünellerin veya yan duvarların göçmesine de sebebiyet verebilmektedir. Aynı şekilde bu titreşimler, tünel ve istasyon içerisinde tozun havalanmasına da sebebiyet vereceğinden, sadece nefes almak için değil, hava ve tozun sirkülasyonu için de havalandırma sistemlerine başvurulmaktadır.

Çok tehlikeli sınıfta yer alan ve ağır işlerin gerçekleştirildiği yapı işlerinde fazla mesai yaptırılması işin güvenliğini ve işçinin sağlığını tehlikeye atacağından, mesai saatleri içerisinde çalışanlardan maksimum verim alınması gerekmektedir. Bu diğer sektörlerde öncelikle çalışanların termal konforunun sağlanması yoluyla gerçekleştirilmektedir. Ancak özellikle yaz aylarında açık alanlarda yapılan çalışmalarda bu durumun sağlanması güçtür. İnce kıyafetler, gölgelikler, su ve dinlenme molaları sağlanmadıkça aşırı sıvı kaybı, odaklanamama, sıcak çarpması ve sıcak bitkinliği yaşanabilir. Aynı şekilde soğuk havalarda gerekli önlemler alınmadığı takdirde odaklanamama, soğuk ısırığı veya hipotermi yaşanabilmektedir. Kapalı alanlarda ise termal konforu sağlamak nispeten daha kolaydır çünkü temin edilecek kıyafetlerle veya sağlanacak olan havalandırmayla çalışanların soğuk ve sıcak ortamlarda verimli çalışması sağlanabilmektedir.

İşletme

Ulusal literatürümüzde, yer altı metro istasyonlarının işletimi sırasındaki İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uygulamalarına özelleştirilmiş çalışmalar bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalarda metro istasyonlarının yapımı sırasındaki İSG önlemlerine veya istasyonların tipinden bağımsız olarak işletme sırasındaki İSG önlemlerine yer verilmiştir. Oysaki yer altı metro istasyonları, sadece inşaat sürecinde değil, işletim sürecinde de diğer istasyon türlerinden daha farklı risk etmenleri ile karşı karşıya kalmaktadır.

Metro istasyonlarında yaşanan kazalar genel olarak; yürüyen merdivene uzuv yada elbise sıkışması, asansör kapısına sıkışma yada mahsur kalma, araç kapısına sıkışma, insan-insana temas çarpışma, insan-tren teması, ray hattına düşme, kayma sonucu düşme, vb. riskler yanında tren çarpışması, ekipman hasarı, trenin hat sonu duvarına çarpması, vb. riskler bulunmaktadır (Damat & Utlu, 2018). Ancak bu kazalara sebep olan risk etmenlerine karşı alınması gereken önlemler istasyondan istasyona değişiklik gösterebilir. Bu yüzden bu bölümde sadece diğer metro istasyonlarından farklı olarak yer altı metro istasyonlarından birinde ele alınması gereken risklerden bahsedilecektir.

Metro istasyonları işletilirken karşılaşılan kazaların büyük bir çoğunluğu yüksek insan trafiğinden kaynaklanmaktadır. Çünkü metro gibi hafif raylı sistemler diğer toplu taşıma araçlarına göre kendi yollarını kullandığı için daha yüksek maliyetlerle kurulmaktadır ve bu sebeple genelde sadece metropollerde tercih edilmektedir. Metropollerin nüfus artışlarının yanında, metro ağlarının da gelişmesi nedeniyle kullanıcı sayıları artan metro hatlarının, günden güne sahiplendikleri sorumluluklar da artmaktadır. Bu sorumluluk, yolcuların istasyonlara ulaşmak için kullandıkları ilk merdiven basamağından başlayıp, istasyon çıkışındaki son merdivene kadar devam etmektedir. Ancak istasyon tipine ve yolculuk planına bağlı olarak bazı yolcular için bu süre diğerlerinden daha uzun olabilmektedir. Metro girişlerinden gişelere ulaşmak, gişelerden sonra perona inmek yatay dolaşım alanlarını (yolcu koridorları, yürüyen bantlar) ve düşey dolaşım elemanlarını (asansörler, yürüyen ve sabit merdivenler, rampalar) kullanmayı gerektirir (Aktop Maden & Avlar, 2017). Bu karmaşık yolcu güzergahları sadece fiziksel değil, psikososyal risk etmenleri de içermektedir.

Türkiye'de yer altı metro istasyonlarının tasarımında Türk Standartları Enstitüsü (TSE)'nde yer alan tasarım kuralları kullanılmaktadır. Bunlar; TS 12127 (1997), TS 12460 (1998), TS 12461 (1998), TS 12511 (1998), TS 12527 (1999), TS 12574 (1999), TS 12575 (1999), TS 12692 (2001) ve TS EN 13101 (2004) 'dir.

Yangın riski konusunda yer altı istasyonlarının dezavantajı açık hava ile temasının kısıtlı olması veya hiç olmamasıdır. Yolcuların tahliyesi amacıyla dumanın kontrol edilebilmesi için 250°C ortam sıcaklığında en az 1 saat kesintisiz çalışabilecek bir acil durum havalandırma sistemine ihtiyaç vardır (Sertel, 2010). Bu havalandırma sistemi yine elektrik kesintilerinde jeneratör veya farklı bir elektrik hattıyla desteklenerek çalışabilir durumda olmalıdır (Koç & Ceylan, 2015). Cebri havalandırmanın yanında mümkün olduğunda doğal havalandırmadan da faydalanabilmek gerekmektedir. Metro istasyonlarının tasarımında kullanılan mevzuatlar arasında Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik ve burada yer almayan hükümler için sıkça kullanılan NFPA 101 ve 130 yönetmeliği mevcuttur. Ayrıca yangın için özelleştirilmiş TSE standartları da vardır; TS 12525 (1999) ve TS EN 50206-2 (2010).

Yer altı istasyonlarında jeolojik özellikler ve sıcak iklimden kaynaklı olarak sadece havalandırma ile termal konfor sağlanamayabilir ve bu durumda iklimlendirme sistemlerine başvurulur. Bu sayede İklimlendirme sistemleri nem kontrolü, hava akım hızı, hava kalitesi gibi termal konfor ögelerini sağlıklı bir yolculuk istenen düzeye getirebilmektedir. Hava akım hızının peronlarda 5 m/sn'yi geçmemesi gerekmektedir (Sertel, 2010).

Gürültü ile ilgili mevzuatlarımızdaki tek hüküm raylı ulaşım sistemlerinden çevreye yayılan gürültünün gündüz, akşam ve gece sırasıyla 65, 60 ve 55 dBA sınır değerlerini aşamayacağıdır (Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete: 32029 sayılı, 30 Kasım 2022). Ancak yer altı metro istasyonlarında bu değerler yolcuları daha fazla rahatsız edeceğinden dolayı, sesin emilimine yardımcı olan akustik asma tavan plakaları ve peron ayırıcı kapılar kullanılabilir (Maden Aktop & Avlar, 2019). Tüm bu önlemler alınırken anonsların sağlıklı bir şekilde duyulabildiğinden emin olunmalıdır.

Yatay dolaşım alanlarının, merdiven, yürüyen merdiven, rampa, asansör gibi düşey dolaşım elemanlarına bağlanması nedeniyle takılma, kayma ve düşme kazaları diğer istasyon tiplerine göre daha fazla gerçekleşmektedir. Bunun için uyarı levhaları, ara korkuluklar, merdiven uçlarına uygulanan kaydırmaz tabakalar uygulanan yaygın önlemlerdir. Yer üstü istasyonlar kadar çok ışık almayan yer altı istasyonlarında yolcular peron kenarlarına uygulanan kabartmalı kaydırmaz kaplamaları yeterince hızlı bir şekilde fark edemeyebilir. Yolcuların peron kenarına çok yaklaştıklarını uyaran ancak onları raylara düşmemek için korumayan bu önlem yerine peron ayırıcı korkuluklar veya kapılar kullanılmalıdır.

Yolcuların aynı anda ve aynı hızla, aynı çıkışa hareket ediyor olmaları yığılma olarak adlandırılabilir (Özdamar, 2020). Yer altı istasyonlarında acil durumlarda yolcuların tahliye edilebilmesi için merdiven kullanmaları şarttır. Bu sebepten dolayı genelde ezilmeler yatay dolaşım alanlarından çok düşey dolaşım elemanlarında meydana gelmektedir. Yığılma ve ezilme ihtimallerini daha da azaltmak adına yönlendirme tabelalarına azami önem verilmelidir.

Zemin seviyesi altında olduğundan dolayı; su taşkın kotu yüksek bölgeler için istasyon girişleri, havalandırma bacaları ve asansörler taşkın kotundan daha üst kotta düzenlenmeli istasyon girişlerinin drenajının sağlıklı bir şekilde sağlanmış olması gerekmektedir (Aktop Maden & Avlar, 2017). İstasyon içine sızan yeraltı sularının yapı bütünlüğüne zarar vermeyecek olduğundan emin olunmalıdır.

Yer altı istasyonlarının çalıştığı her zaman kullanılması gereken yapay aydınlatmalar; özellikle merdiven gibi düşey dolaşım elemanları kullanan yolcuların takılıp düşme risklerine karşı yeterli ve tekdüze olmalıdır. Yine aynı zamanda bu aydınlatmaların uzun saatler güvenle kullanılabilecek cinste olması da gerekmektedir. Peron kenarından 1 m'lik bölge içerisindeki aydınlatmanın en az 2 lüks olması gerekmektedir. Aynı zamanda vatmanların trenin arka taraflarındaki kapıları kullanan yolcuları görmesi için özellikle

konumlandırılmış olan kameraların ve monitörlerin, sinyalizasyonun kullanılan aydınlatmalardan dolayı parlamıyor olması gerekmektedir. Bunların yanında olası bir durumda yolcuların tünelin içerisinden tahliyesini gerektirecek olası bir durumda, güvenli bir şekilde istasyona yürüyebilmeleri için en az 2 lükslük bir düzeyin sağlanması gerekmektedir (Tuna & Kılıç, 2009).

İZMİR METRO PROJESİ ÖRNEĞİ

İzmir Metro Güzergahı

İzmir Metro hattı; İzmir Banliyö Sistemi (İZBAN) ve tramvayla birlikte İzmir'de toplu taşıma amaçlı kullanılan bu üç raylı sistemden en önce hizmete alınanıdır. İzmir Metro hattında 11 yer altı istasyonu (Evka-3, Ege Üniversitesi, Basmane, Çankaya, Konak, Üçyol, İzmirspor, Hatay, Göztepe, Poligon ve Fahrettin Altay) ve 6 yer üstü istasyonu (Hilal, Halkapınar, Stadyum, Sanayi, Bölge ve Bornova) bulunmaktadır. Yer altı istasyonları, arazi koşullarına bağlı olarak, yer seviyesinin 20 m. ila 36 m. aşağısında kurulmuştur (İzmir Metro A.Ş., 2021). 2018 verilerine göre yılda toplamda 205 milyon yolcu taşıyan İzmir raylı sistemlerinden İzmir Metro aynı yıl 120 milyon yolcu sayısıyla en yüksek rakamlarına ulaşmıştır (İzmir Büyükşehir Belediyesi, 2019). 2019 yılında yaklaşık 100 milyon yolcu taşıyan metro, mevcut haliyle Evka-3 ve Fahrettin Altay istasyonları arasında bulunan, yaklaşık 20 km'lik bir güzergaha sahiptir (İzmir Metro A.Ş., 2020). 2021 yılı verilerine göre; 182 vagon, 20 kilometrelik raylı sistem ağı ve 17 istasyonuyla günde 240.000 yolcu taşımıştır. Bu rakamlara bakıldığında ise metronun, İzmir'in toplu taşıma amaçlı kullanılan raylı sistemlerinin yükünün çoğunu sırtladığı anlaşılmaktadır. Şekil 5'te göründüğü üzere; kırmızı renk ile gösterilen İzmir Metro hattı üzerinde yolcu trafiğinin en yoğun olabileceği noktalar metro hattının, doğrudan Türkiye'nin en kalabalık üniversitelerinden birinin yerleşkesine açılan Ege Üniversitesi istasyonu, İZBAN, otobüs, tramvay, vapur gibi araçlara yapılacak olan aktarmaların merkezleri olarak kullanılan Evka-3, Bornova, Halkapınar, Hilal, Konak, Üçyol, Fahrettin Altay istasyonları olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. İzmir ili raylı sistem ağı haritası (İzmir Metro A.Ş., 2020)

Yüksek yolcu sayısı, ne şekilde önlemler alınırsa alınsın beraberinde iş kazalarını da getirmektedir. Kaza, yaralanma ve ramak kala olayların sıklıkla yaşanabileceği istasyonlar, çoğu zaman yolcu trafiğinin en yüksek olduğu istasyonlar anlamına da gelmektedir. Ancak yolcu sayısı, yaşanan bu olayların tek sebebi değildir. İstasyonda aynı anda bulunan vagon sayısı, yürüyen merdivenler, engelli rampaları, merdivenler, asansörler, yangın söndürme sistemleri, idari alanlar, sinyalizasyon sistemleri, ışıklandırma, tahliye planları, havalandırma sistemleri, istasyonların mimarisi, dükkanlar, peronlar, raylar, temizlik ve bakım ekipmanları gibi birçok etmen de iş güvenliğini etkileyecek olaylara sebebiyet verebilir (Avcı & Özbulut, 2018).

Bu nedenle bu çalışmada, uygun istasyonların işletmenin ihtiyaçlarına göre belirlenmesi aşamasında, hat üzerinden istasyonlar içerisinde Ege Üniversitesi istasyonu örnek olarak seçilmiştir. Bu istasyon, Bornova – Üçyol arasında yer alan, ilk etaba göre çok daha yeni olmasına rağmen, sahip olduğu yüksek yıllık yolcu sayılarıyla dikkat çekmektedir. Bu tür istasyonlarda mevcut olabilecek tehlikelere bakıldığında, bunlara bağlı olan riskler ve dolayısı ile bu risklere karşı alınabilecek olan önlemler hakkında da bir öngörüye sahip olunabilir.

EGE ÜNİVERSİTESİ İSTASYONU RİSK ANALİZİ

Risk Analizi

Risk analizi yöntemleri en belirgin şekilde nitel ve nicel olarak 2 grupta incelenebilir. Nitel risk analiz yöntemlerinde riskler genellikle yüksek, orta veya düşük gibi sözel terimlerle tanımlanmaktadır. En yaygın olarak kullanılan nitel risk analiz yöntemleri:

- PHA (Ön Tehlike Analizi)
- HAZOP (Tehlike ve İşletilebilme Yöntemi)
- What if (Olursa Ne Olur)
- Neden Sonuç Analizi
- FTA (Hata Ağacı Analizi)
- HTA (Hiyerarşik Görev Analizi)

Nicel risk analiz yöntemlerinde ise riskler sayısal büyüklüklerle ifade edilir. Olasılık, matematiksel ve mantıksal metotlar takip edilerek hesaplanır. En yaygın olarak kullanılan nicel risk analiz yöntemleri:

- Fine - Kinney Risk Analizi
- FMEA (Olası Hata Türleri ve Etkileri Analizi)
- John - Ridley Analizi
- L Tipi Risk Matrisi
- X Tipi Risk Matrisi

L Tipi Risk Matrisi

Bu risk analizi gerçekleştirilirken L Tipi Risk Matrisi olarak adlandırılan 5x5 Matris Yöntemi kullanılmıştır. Çünkü bu risk analizi sadece temel değişkenleri kullanarak analizlerin en hızlı şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu sayede işletmelerde zaman kaybetmeden gerekli risklere önlemler alınabilmektedir. Bu sayede bu risk analiz yöntemi sayısız işletmede kullanılmaktadır. İzmir Metro A.Ş. de bunlardan biridir. Bu yöntemin sahip olduğu değişkenler ve bu değişkenlerin alabileceği değerler, Tablo 3'te gösterilmiştir. Buna göre:

- $1 \leq RP \leq 6$: Kabul Edilebilir Risk,
- $8 \leq RP \leq 15$: Bazı Önlemler Alınmalı,
- $16 \leq RP \leq 20$: Risk Azaltılmadan Başlatılmamalı,
- $RP = 25$: Tolere Edilemez anlamına gelmektedir.

Tablo 3. 5x5 Matris Yöntemi değişken değer tablosu

RİSK PUANI (RP)			ŞİDDET (Ş)				
			5	4	3	2	1
			Çok ciddi	Ciddi	Orta	Hafif	Çok hafif
OLASILIK (O)	5	Çok yüksek	25	20	15	10	5
	4	Yüksek	20	16	12	8	4
	3	Orta derece	15	12	9	6	3
	2	Küçük	10	8	6	4	2
	1	Çok küçük	5	4	3	2	1

İstasyon incelemeleri sonucunda tespit edilen bu risklerden bazıları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Ege Üniversitesi İstasyonu için özelleştirilmiş risklerden bazıları

Faaliyet/Nesne/Yerleşim	Tehlike	Risk	Mevcut Önlem	O	Ş	RP
Tek hat işletimde sinyalizasyon şartlarının sağlanması	Tek hat üzerinden çift yönlü tren İşletimi yapmak.	Hat üzerindeki çalışma sırasında tren - insan teması / Kaza.	Enerji kesilmeden hatta girmemesi	1	3	**3**
İstasyon Havalandırma Bakımı	Çalışma sırasında yayılan tozlar.	Aşırı tozun ağız / buruna girmesi.	Toz maskesi / KKD kullanımı.	2	3	**6**
İstasyon Havalandırma Bakımı	Yüksekte çalışma.	Yüksekten düşme.	KKD kullanımı, yüksekte emniyetli çalışma izin formu kullanımı.	2	4	**8**
Trende yangın	Tünel veya İstasyonda yangın söndürme tesislerinin elektrik beslemeli olması. Yangın pompalarının jeneratörlerin besleyememesi.	Enerji kesilmesi durumunda su ile söndürme yapılamaması, yangın hasarlarının büyümesi.	Tünel içi hidrant sistemi en yakın İstasyondan su beslemesi imkânı tanımaktadır. Bunun dışında İtfaiye tarafından sistemin beslenebileceği siyam ikizleri de mevcuttur.	1	5	**5**
Deprem	Sarsıntının büyüklüğü.	Binalar ve tünellerde çökme, yıkılma, yapısal hasar.	Depremin şiddetine göre yapılacak kontroller talimatlar ile yayınlanmıştır (Deprem Acil Durum Talimatı). Yapılacak ön ve teknik kontroller ile oluşan hasar tespit edilip muhtemel riskleri belirlenir. İşletme şartları bu durumlara göre düzenlenir.	1	5	**5**

O: olasılık ; Ş: şiddet; RP: risk puanı

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Hazırlanan çalışmada, özelikle yer altı metro sistemleri ve raylı sistemler için aşama aşama karşılaşılabilecek riskler kısaca ele alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, kazı aşamasındaki risklerden bağımsız olarak, özellikle yer altı metro istasyonlarında işletme aşamasında karşılaşılan düşme, çarpma, sıkışma, çarpılma gibi riskler belirlenmiştir. Yine çalışma kapsamında İzmir Metro hattı ele alınarak, yıllık yolcu kapasitesinin fazlalığına bağlı olarak seçilen bir istasyonda en çok karşılaşılan kazalara sebep olan ortak riskler değerlendirilmiştir.

Yurtiçinde ve yurtdışında yapılmış çalışmalara ve SGK İstatistik Yıllıkları verilerine bakılarak metro inşaatlarında gerçekleşen iş kazalarına dair ortak bir sonuca varılabilmektedir. Bu çalışmalara göre; metro inşaatlarında en sık yaşanan kaza; göçme/çökme olarak tabir edilen ve zeminin kendi formasyonu veya insan/makine hatası sebebiyle çalışanların aynanın, yan duvarların veya tavan malzemesinin altında kalmasıdır. En çok karşılaşılan kaza olmasına rağmen bu ülkemiz genelinde en çok ölüme sebebiyet vermemiştir.

Bununla beraber, metroların işletilmesi sırasındaki risklerin çok daha fazla insanı aynı anda etkileyebileceği unutulmamalıdır. Bu denli fazla yolcu ağırlayan bir toplu taşıma sistemi düşünüldüğünde, her istasyon için düzenlenmiş ortak bir risk analizi yerine, yer altı istasyonları ve bu istasyonların her biri için özelleştirilmiş riskleri ortaya koymak ve yine o istasyona özel önlemler almak daha sağlıklı ve güvenli bir yolculuk vaat edecektir. İstasyonlar için tespit edilen bu risklerin bazıları, yukarıda Tablo 4'te gösterilmiştir. Tablo' da belirtilen risklerin olasılık, şiddet ve risk puanları, fiili durumlar göz önüne alınarak birbirine farklı uzmanlar tarafından değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmeler ışığında, metro tünel güzergahları yapım ve işletme aşamalarında karşılaşılabilecek riskli durumlar göz önüne serilerek, en çok insan trafiği ile karşılaşılan istasyon örneği üzerinden; tehlike, risk ve mevcut önlemler belirlenerek olasılık, şiddet ve risk puanı hesaplaması yapılmıştır. Buna göre, Tablo 5 incelendiğinde, istasyon havalandırma bakımı sırasında, yüksekte çalışma kaynaklı, yüksekten düşme riskinin risk puanının en yüksek olduğu ve yine bakım sırasında toz oluşumundan kaynaklı risklerin ikinci sırayı aldıkları görülmektedir. Benzer değerlendirme ve çalışmalar ele alınan İzmir Metrosu hattında devam etmekte olup sonuçlar ileriki aşamalarda toplu olarak genişletilerek verilecektir.

Sadece dünyada değil ülkemizde de her geçen gün daha çok önem kazanan toplu taşıma sistemlerinden metrolar, yolcularına sağladığı konforlu yolculuğun büyük bir kısmını arka planda yürüttüğü iş sağlığı ve güvenliği önlemlerine borçludur. Diğer hiçbir toplu ulaşım aracında bu denli bir günlük insan trafiği bulunmamaktadır. Yolcuların istasyona girdikleri andan, başka bir istasyonda yolculuklarını bitirene dek sağlıklı ve güvenli bir şekilde yolculuk yapabilmesi, diğer raylı sistemlerden bile daha farklı ve hatta istasyon bazında özelleşmiş risklerin kontrol altında tutulmuş olmasıyla mümkündür.

KAYNAKÇA

Akboğa Kale, Ö., ve Eskişar, T. (2018). İnşaat sektöründe kazı işleri sebepli iş kazaları. *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 20*(1), s. 265-277.

Akboğa, Ö., ve Baradan, S. (2015). İnşaat sektöründeki ölümlü iş kazalarının karakteristiklerinin incelenmesi: İzmir alan çalışması. *5. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu* (s. 215-224). İzmir: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.

Aktop Maden, D., ve Avlar, E. (2017). Yer altı metro istasyonlarında mekan tasarımı üzerine bir araştırma. *Trakya University Journal of Engineering Sciences, 18*(1), s. 1-16.

Avcı, O., ve Özbulut, O. (2018). Threat and vulnerability risk assessment for existing subway stations: A simplified approach. *4*(6), s. 663-673.

Cirit, F. (2014). Sürdürülebilir kentiçi ulaşım politikarları ve toplu taşıma sistemlerinin karşılaştırılması. *Uzmanlık tezi*. Ankara: İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Ulusal Akıllı Şehir Açık Veri Platformu. Ankara.

Damat, A., ve Utlu, Z. (2018). İstanbul metro ıstasyonlarında iş güvenliği uygulamaları. *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*(8), s. 52-89.

Elektrik Mühendisleri Odası. (2020). *İnşaat İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği (Elektrik).* Elektrik Mühendisleri Odası: https://www.emo.org.tr/ekler/0690675c422146c_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=14 adresinden alındı

İSGGM. (2023, Temmuz 17). *İnşaat Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği*. Güvenli İnşaat: https://guvenliinsaat.csgb.gov.tr/#about-us adresinden alındı

İzmir Büyükşehir Belediyesi. (2019). *Toplu ulaşımda "rekorlar yılı"*. Ocak 12, 2022 tarihinde İzmir Büyükşehir Belediyesi. adresinden alındı

İzmir Büyükşehir Belediyesi. (2020). *İzmir Metro*. İzmir Büyükşehir Belediyesi Narlıdere Metrosu: http://www.izmirmetroinsaati.com/TR/yapim-1-67.html adresinden alındı

İzmir Metro A.Ş. (2020). *Haberler*. Ocak 22, 2022 tarihinde İzmir Metro A.Ş. adresinden alındı

İzmir Metro A.Ş. (2020). *Tarihçe*. Ocak 22, 2021 tarihinde İzmir Metro A.Ş.: https://www.izmirmetro.com.tr/Sayfa/13/1/tarihce adresinden alındı

İzmir Metro A.Ş. (2021). *Buca Metro Hattı Projesi Teknik Olmayan Özet.* Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası.

Koç, G., ve Ceylan, Ö. (2015). Metro istasyon ve tünellerinin acil durum havalandırmasında yeni yaklaşımlar ve uygulama esasları. *Tesisat Mühendisliği*(145), s. 24-34.

Kukreja, R. (2020, Eylül 8). *What is Public Transportation: Modes and Benefits*. Conserve Energy Future: https://www.conserve-energy-future.com/Benefits_of_Public_Transportation.php adresinden alındı

Maden Aktop, D., & Avlar, E. (2019). İstanbul örneği üzerinden yer altı metro istasyonlarında kullanıcı konforunun değerlendirilmesi. *Artium, 7*(2), s. 91-102.

Müngen, M. U. (2011). İnşaat sektörümüzdeki başlıca iş kazası tipleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 469*, s. 32-39.

Özdamar, E. D. (2020). Yeraltı metro istasyonlarında pasif yangın güvenlik önlemleri: tahliye sürecinin incelenmesi ve bir örneklem. *Yüksek Lisans Tezi*. Ankara: Gazi Üniversitesi.

Parks, M. (2020, Eylül 9). *History of Buses in Public Transportation*. GOGO charters: https://gogocharters.com/blog/history-of-public-bus-transportation/ adresinden alındı

Rail Turkey TR. (2022). *Türkiye'de kentiçi raylı sistemler*. Rail Turkey TR: https://tr.railturkey.org/kentici-rayli-sistemler/ adresinden alındı

Satıcı, Ö., ve Topal, T. (2015). Tünel açma yöntemlerinin mühendislik jeolojisi ve kaya sınıflama sistemleri ile değerlendirilmesi. *Journal of Geological Engineering, 39*(1), s. 45-57.

Schofer, J. L. (2023, Haziran 26). *Mass transit*. Encyclopedia Brittanica: https://www.britannica.com/topic/mass-transit adresinden alındı

Sertel, S. (2010). Metro tünellerinde ve istasyonlarında havalandırma sistemleri ve Marmaray örneği. *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

SGK. (2021). SGK İstatistik Yıllıkları. Ankara.

The Columbia Electronic Encyclopedia. (2023). Rapid transit. New York, ABD.

TOBB. (2023, Ağustos 3). *NACE Faaliyer Kodu Ara*. TOBB - Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği: http://uygulama.tobb.net/uye/naceFaaliyetKoduBul.do adresinden alındı

Tuna, S., ve Kılıç, B. (2009). Yer altı metro sistemlerinin aydınlatılmasında güvenlik kriterleri ve enerji etkinliği. *3.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, (s. 71-75). Kocaeli.

Türk Dil Kurumu. (tarih yok). Metro içinde Güncel Türkçe Sözlük. Türk Dil Kurumu. Temmuz 20, 2023 tarihinde https://sozluk.tdk.gov.tr/ adresinden alındı

Zhou, Z., Irizarry, J., and Li, Q. (2014). Using network theory to explore the complexity of subway construction. *Safety Science, 64*, s. 127-136.

BATARYALI ELEKTRİKLİ TRANSMİKSER KULLANIMI İLE DİZEL TÜKETİMİNİN, KARBON SALIMININ VE BİRİM MALİYETİN AZALTILMASI

REDUCING DIESEL CONSUMPTION, CARBON EMISSION AND UNIT COST WITH THE USAGE OF BATTERY-ELECTRIC TRANSMIXER

T. Kibar, E. Üçok, M. Bilgiç

Tüprag Metal Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. Efemçukuru Altın Madeni, İzmir

ÖZ

Sahamızda kullanılan mevcut dizel transmikserin kullanım ömrünün yakın zamanda tamamlanacak olması neticesinde, yeni ekipman olarak bataryalı elektrikli transmikser kullanımına geçilmesi kararlaştırılmıştır. Bataryalı elektrikli transmikser satın alma maliyeti yüksek olmasına rağmen kullanımında bir çok avantaj bulunmaktadır. Örneğin; rampa aşağı sürüşlerde ekipmanın bataryalarını doldurabilmesi enerji verimliliği sağlar, dizel yakıt tüketimine karşılık kWh elektrik tüketiminin maliyeti düşüktür, planlı bakımlarda bakım gerektiren parçaları azdır.

Bataryalı elektrikli transmikser ile yapılan çalışmalarda, çalışma lokasyonundaki hava kalitesi artar, gürültü seviyesi azalır ve lokasyon çalışma sıcaklığı düşer. Bunun neticesinde daha kaliteli çalışma ortamı sağlanmış olur.

ABSTRACT

Utimac MF500 Transmixer equipment economic life will be completed in a near future, afterward it has been decided to purchase a battery-powered electrical transmixer as a new equipment.

Although the equipment purchase cost is higher than the diesel powered one, it has a lot of advantages for running costs of the equipment and Health & Safety of operators which should be considered, such as, being able to charge the batteries of the equipment while driving down the ramp provides an advantage in terms of energy efficiency. Planned maintenance cost is lower than diesel one because, less parts are needed to be maintained. Unit cost of electricity usage is very low from unit cost of diesel usage. The better air quality and working environment is provided by zero emissions, the noise level decreasing and the operating temperature of the location decreasing.

BATARYALI ELEKTRİKLİ EKİPMANLAR

Artan araç sayısı ve buna bağlı olarak fosil kaynaklı yakıtların giderek tükeniyor olması alternatif yakıt arayışına sebep olmaktadır. Bu nedenle teknolojik gelişmelerden biri olarak elektrikli araçlar çözüm olarak görülmektedir. Günümüzde elektrikli ekipmanların sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Bataryalı elektrikli araçlar, tüm tahrik gücünü elektrik motorundan alan “tam elektrikli araçlardır.” Bu araçlarda, fosil yakıtlı motor bulunmamaktadır. Enerjisini yeni nesil Lityum-İon bataryalar ile depolayan ekipman, enerji verimliliği konusunda daha verimli bir çalışma sistemine sahiptir. İşletme maliyetleri olarak yakıt ve servis konusunda çok daha avantajlı olan iş makinesi, bakım maliyetleri olarak dizel iş makinelerine göre çok daha ekonomiktir.

Efemçukuru Altın Madeninde Bataryalı Elektrikli Transmikserin Kullanım Alanı

Bataryalı elektrikli transmikser, yeraltında birincil tahkimat olarak kullanılan belirli oranlarda agrega, çimento, su ve katkı malzemeleri ile hazırlanan ve püskürtme beton makinası tarafından püskürtülerek uygulananan karışım betonu yeraltına nakletmek için kullanılmaktadır.

Tercih Edilme Sebepleri

Bataryalı elektrikli transmikserin Efemçukuru Altın Madeni'nde tercih edilmesinin sebepleri; düşük işletme maliyetleri, düşük yakıt tüketimi, yüksek verimlilik, sıfır emisyon, düşük gürültü seviyeleri, yokuş aşağı sürüşte enerji geri kazanımı, hızlı şarj özelliği, operatörün çalışma ergonomisini ve rahatını arttıracak kapalı kabin olması, ön hidrolik ayaklar, tambur uzaktan kumandası, kabin kliması, 3 açılı geri görüş kamerası, mesafe sensörü olarak sıralanabilir.

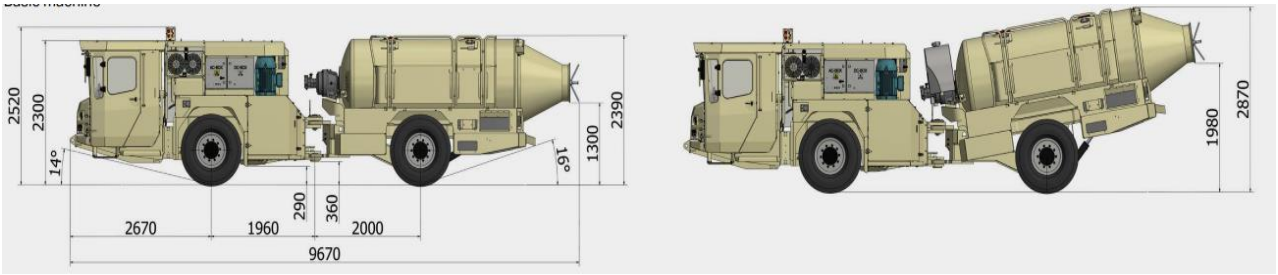


Şekil 1. Utimac MF500 Transmixer SD kabin içi ve dış görünüm

Utimac MF500 Transmixer SD Hakkında Genel Bilgiler

Normet MF500 SmartDrive, yeraltı madenlerinde hızlı ve güvenli beton nakliyesi için tasarlanmıştır.

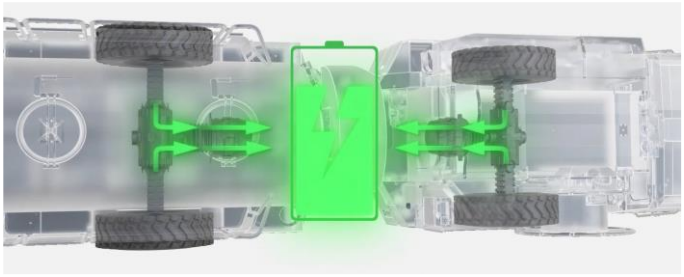
- MF 500 Transmikser SD 4,5 m^3 beton taşıma kapasitesine sahiptir.
- Beton tamburunun dönüşü elektrikle kontrol edilir ve hızı 0 - 13 rpm arasında değişir.
- Ekipman 9,67 m uzunluğa ve 2,52 m yüksekliğe sahiptir. Tambur kaldırma özelliği sayesinde beton boşaltma yüksekliği 1,98 m'ye kadar yükseltilebilmektedir.



Şekil 2. Utimac MF500 Transmixer SD ölçüler

- Ekipmanda toplam 6 adet batarya bulunmakta ve bataryaların toplam ağırlığı 2,5 tondur.

- Ekipman herhangi bir lokal emisyon olmadan anında tork ve verimli çalışma sağlayan iki adet yüksek torklu doğrudan tahrikli elektrik motoru içermektedir. Elektrik motorları doğrudan akslara montelidir. Ekipmanda 2 adet her biri 100kW olan elektrik motorları vardır.



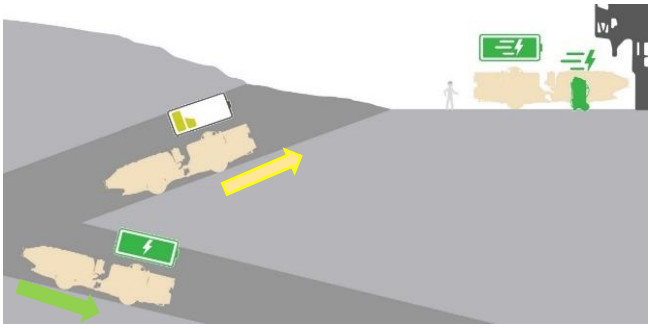
Şekil 3. Ekipman üzerinde yer alan elektrik motorların konumu

- Tambur hareketleri kabin için kontrol panelinden, yan gövde kontrol panelinden ve uzaktan kumanda üzerinden yapılabilmektedir.



Şekil 4. Kabin içi ve yan gövde tambur kontrol paneli, uzaktan kumanda

- Bataryalar, rampa aşağı sürüş ve yavaşlama esnasında şarj edilir, bu da operasyonun toplam verimliliğini artırır.



Şekil 5. Ekipman rampa aşağı ve yukarı sürüşlerde şarj durumları

- Ekipman hızlı şarj ünitesinden saatte maksimum 160 kW güç ile şarj edilebilmektedir.

Güvenlik

Ekipman üzerinde kurulu olarak bulunan güvenlik sistemleri vardır. Ekipman çalıştırılmadan önce güvenlik sistemeri kontrol edilir ve bu sistemlerde bir problem tespit edilmesi durumunda ekipman servis dışı bırakılır.

- Ekipman FOPS ve ROPS onaylı güvenlik kabinine sahiptir.
- Tüm elektrikli bileşenler en az IP65 sınıfına sahiptir.
- Ekipman üzerinde Ansul chekfire 110 yangın algılama ve söndürme sistemi bulunmaktadır. Kabin içerisindeki kontrol panelinden otomatik yangın söndürme sistemi testi yapılabilmektedir.
- Ekipman üzerinde; kabin içinde, yan gövde tambur kontrol panelinde ve uzaktan kumanda olmak üzere 3 adet acil durdurma bulunmaktadır. Acil durdurma aktifleştirildiğinde elektrik motorları durur ve hidrolik hareketler kesilir.
- Ekipmanın ön kısmında hidrolik ayaklar mevcuttur. Ekipmandan ayrılma durumunda veya operasyon sırasında kabin içi kontrol paneli üzerinden ayaklar basılmaktadır. Ayaklar tam toplanmadan park freni serbet bırakılamaz.
- Emniyet kemeri takılmadığında kontrol paneli üzerinde uyarı bildirimi çıkmaktadır.
- Kabin kapısı üzerinde emniyet anahtarı bulunmaktadır. Kabin kapısı kapatılmadan park freni serbest bırakılamaz.
- Sürüşe başlamadan önce kabin için kontrol panelinde bulunan fren test düğmesi kullanılarak emniyet/park fren testi, servis fren testi yapılmaktadır. Ayrıca sürüşten önce elektrik motorları çalışmaz iken aracın durmasını sağlayan basınç akümülatörleri testi de yapılmaktadır. Bu testler tamamlandığında operatöre bilgi ekranından olumlu ya da olumsuz duruma yönelik bildirim düşmektedir.
- Kabin içerisinde yer alan bilgi ekranının kullanımı kolay ve basittir. Bilgi ekranı, operatör için hız, çalışma saatleri, sıcaklıklar, güvenlik alarmları ve uyarıları, bataryanın şarj durumu, elektrik motoru gücü/rejenerasyonu vb. gibi gerekli tüm bilgileri sağlar. Tüm bilgiler kaydedilir ve uzaktan erişilebilir.

Ekipman ile Sürüş

Ekipman kapalı kabine sahip olması sayesinde operatör, toza ve gürültüye en az seviyede maruz kalmaktadır. Yine kapalı kabin ve kabin klimasının sağladığı termal konfor sayesinde, çalışma aynasından çıkan operatörün ana rampada üşümesinin önüne geçilebilmektedir. Ekipmanın motorlarının çok sessiz olması, sürüş esnasında herhangi bir problem oluştuğunda veya trafik karşılaşmalarında operatörün kolaylıkla fark etmesini sağlamaktadır. Ekipmanın üzerinde bulunan yüksek çözünürlüklü kameralar, arka ve yan görüş için 3 farklı noktaya yerleştirilmiştir. Ayrıca ekipmanın arka tamponunda mesafe sensörü bulunduğu için işitsel uyarı da kabine ulaşabilmektedir. Bilindiği üzere yeraltı madenciliğinde ekipmanların kabileyetleri baz alınarak en ekonomik yoldan sürülen galeriler ile cevhere ulaşım sağlanmaktadır. Tasarım olarak Transmikser'in Spraymec ekipmana yanaşırken, operatörün çevresini kontrol etmesi kolaylaştığı gibi, Spraymec pompa kazanına son yanaşma esnasında Spraymec operatörü ile Transmikser operatörünün kaliteli görsel iletişim kurabilmesi iş güvenliğini olumlu anlamda iyileştirmektedir.



Şekil 6. Ekipman sürüş kameraları

Ekipman, sürüş güvenliğini ve konforunu artıran ön aks süspansiyon sistemine sahiptir. Süspansiyon sistemi, tekerleklerden kabine giden titreşimi azaltır ve aracın yol tutuşunu iyileştirir. Süspansiyon sistemi, kullanıcı için güvenlik ve konfor ile birlikte araç kullanımına verimlilik ve hız kazandırmaktadır. Ayrıca Spraymec'e yanaşma manevrası yapılırken veya eğim iniş çıkışlarda döküş şutu ile Spraymec kazanının birbirine daha kusursuz yaklaşması yine ön aks yükseklik ayarı ile gerektiğinde mümkün kılınabilmektedir. Ekipmanın maksimum hızı 20 km/s'dir. Ekipman 1.vitesde azami 7 km/s, 2. vitesde azami 16 km/s, 3. viteste ise azami 20 km/s hız yapmaktadır. Piller, rampa aşağı sürüşte rejeneratif fren sistemi sayesinde yavaşlama sırasında şarj edilir ve bu da işlemin toplam verimliliğini artırır. Sürüş esnasında operatör servis freni kullanmadan seferini tamamlayabilmektedir, bu sayede ekipmanın servis fren sistemi de yalnızca gerektiğinde kullanılarak kullanım ömrü önemli ölçüde uzatılabilmektedir.

Bataryaların Şarj Edilmesi

Ekipman, hızlı şarj ünitesinden maksimum 160 kW güç ile ve yeraltında enerji panosundan azami 30kW güç ile olmak üzere iki farklı yöntem ile şarj edilebilmektedir. Yeraltında enerji panosundan şarj alma işlemi, ekipmanın şarj seviyesinin %20'nin altına düşmesi ve yerüstünde bulunan şarj noktasına ulaşamama durumunda kullanılmaktadır. Ekipman üzerinde bulunan kablo ve enerji fişi enerji panosuna bağlanarak işlem gerçekleştirilir.



Şekil 7. Ekipman şarjı

Hızlı şarj ünitesi yerüstünde beton santrali bölgesinde bulunmakta ve ekipman ile her beton alımı sırasında şarj işlemi yapılmaktadır. Hızlı şarj ünitesinde bulunan kablo ve enerji fişi ekipman üzerinde bulunan dolum noktasına bağlanarak şarj işlemi gerçekleştirilmektedir. Mikser ile 4,5 m^3 beton alımı ortalama 20 dakika sürmekte, bu 20 dakikalık zaman içerisinde ekipman pillerinin %60'lık kapasitesi doldurabilmektedir. Ancak; yapılan testler sonucunda ekipmanın maksimum pil doluluk oranı %65 olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni ekipman madende rampa aşağı hareket etmeye başladığında pillerin doluluk oranı %80 seviyesine geldiğinde, ekipman pillere zarar vermemek için yavaşlamaktadır ve bu durum ulaşım süresini olumsuz etkilemektedir. Zaten ekipmanın daha az elektrik tüketimi sağlayarak kendi elektriğini üretebilmesi verimi arttırarak işletme maliyetini düşürmektedir.

BATARYALI ELEKTRİKLİ TRANSMİKSER KULLANIMININ AVANTAJLARI

Çevreye Duyarlılık

Bataryalı elektrikli araçların çalışma prensibi doğrultusunda debriyaj, şanzıman ya da egzoz borusunun bulunmaması dizel ekipmanlar ile arasındaki en büyük farkını oluşturuyor. Bu yönüyle bakıldığında elektrikli

araçlar, egzoz gazı emisyonu yapmadığı için tamamıyla çevreye duyarlı bir özellik kazanıyor. Ekipmanın emisyonsuz olması, yeraltı madeni işletmemizde genel havalandırma ihtiyacı 250 m^3/sn iken %2 iyileştirme sonucu 245 m^3/s' ye düşmüştür. Havalandırma ihtiyacındaki %2 iyileştirme yıllık yaklaşık 25.000 kWh kazanç ile 10 ton CO_2 salınımının azalmasını sağlamaktadır (Bu veriler rampalardaki dönemsel üretim planları veya yeni bağlanan bağlantı yolları ile değişebilir).

Efemçukuru Altın Madeni uzun dönem planlamasına göre, 1 yılda toplam 14.040 m^3, yani her vardiya için 13,5 m^3 püskürtme beton uygulaması ihtiyacı bulunmaktadır. Bu rakamlar baz alındığında Utimac MF500 Transmixer SD bu üretimi gerçekleştirmek için toplam 78.624 kWh elektrik tüketecektir. Utimac MF500 Transmixer dizel bu üretimi gerçekleştirmek için 50.143lt dizel yakıt tüketecektir. (Tabloda görülen tüketim maliyetleri Ocak 2023 kWh ve mazot litre fiyatı baz alınarak hesaplanmıştır.) İki ekipmanın verimliliği ve enerji tüketimi karşılaştırıldığında elektrikli ekipmanın, doğaya en az 99,5 ton daha az CO_2 salınımı yaptığı kanıtlanabilmektedir.

Çizelge 1. Yıllık üretim için gereken tüketimler ve CO_2 salınımı

Elektrikli ile Dizel Transmikser Karşılaştırma	Utimec MF500 Transmixer SD	Utimec MF500 Transmixer	Fark
14.040 m^3 Başına Tüketim	78.624,00 kWh	50.142,86 lt	
14.040 m^3 Başına Maliyet	$8.963,1	$46.665,0	$37.701,9
14.040 m^3 Başına CO_2 Salınımı	36,50 ton	136,00 ton	99,50 ton

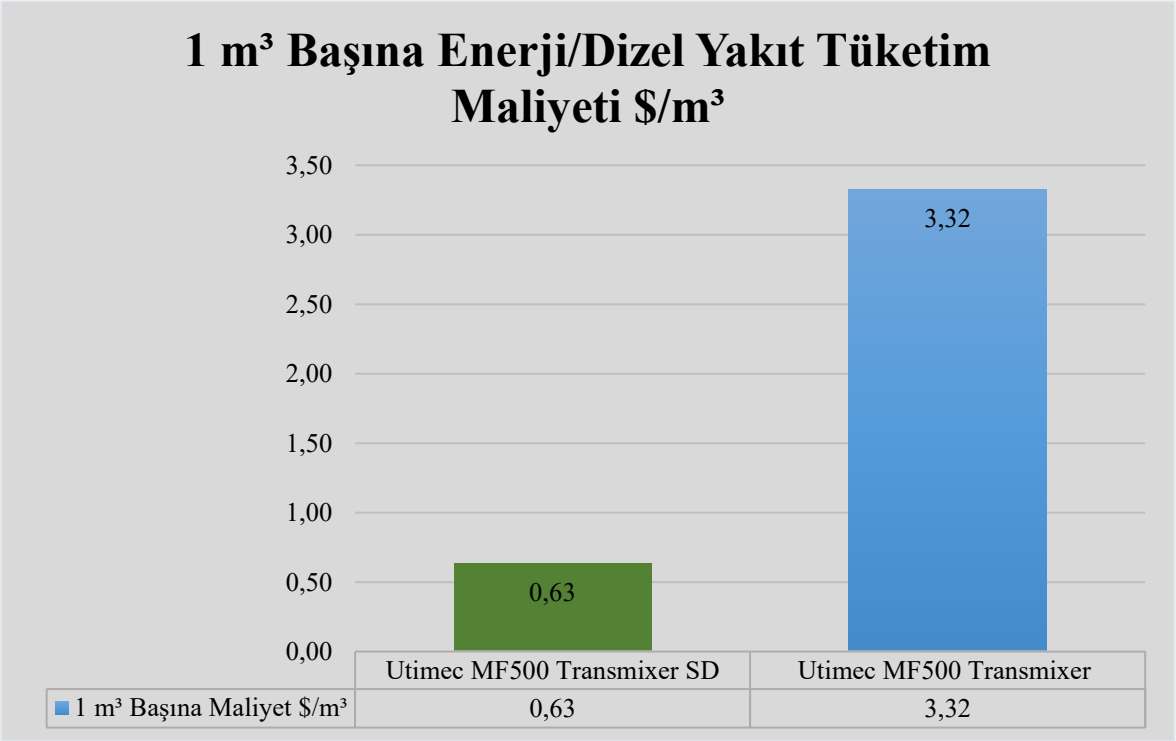
Düşük Enerji Tüketim Maliyeti

Sahamızda püskürtme beton operasyonunda çalışacak Transmikser operatörlerimizin yetkinlikleri tamamlandıktan sonra, hem gerçek zamanlı verimliliği ölçmek hem de enerji tüketim maliyetini en aza indirmek amacıyla testler yapılmıştır. 69 farklı lokasyonda yapılan bu testler, 252 m^3 püskürtme betonu, toplamda 265 km mesafe dolu/boş şeklinde 76,4 saatte Utimac MF500 Transmixer SD ile taşıyarak tamamlanmıştır. Bunun karşılığında bir yıllık geçmişe dönük veriler analiz edilerek Utimec MF500 dizel transmikserin saatlik gerçek yakıt tüketim verisi 10 lt/s olarak bulunmuştur. Utimec MF500 dizel transmikser aynı mesafedeki yolu rampa yukarı çıkarken 8 km/s ortalama ile tamamlayabilirken, elektrikli transmikser 15 km/s ortalama hızı koruyabilmektedir. Bu yüzden 69 aynada yapılan test için dizel mikserin 14.6 saat daha fazla çalışması gerektiği öngörülmüştür.

Çizelge 2. Yeraltı uygulamaları gerçek veriler

Uygulamalar	Utimec MF500 Transmixer SD	Utimec MF500 Transmixer
Püskürtme Beton (m^3)	252	252
Toplam Mesafe (km)	265,5	265,5
Ayna sayısı (adet)	69	69
Toplam süre (s)	76,4	90
Tüketim (kWh)	1.401,8	-
Tüketim (lt)	-	900
kWh/m^3	5,6	-
lt/m^3	-	3,6
Toplam Tüketim Maliyeti ($)	$159,81	$837,58

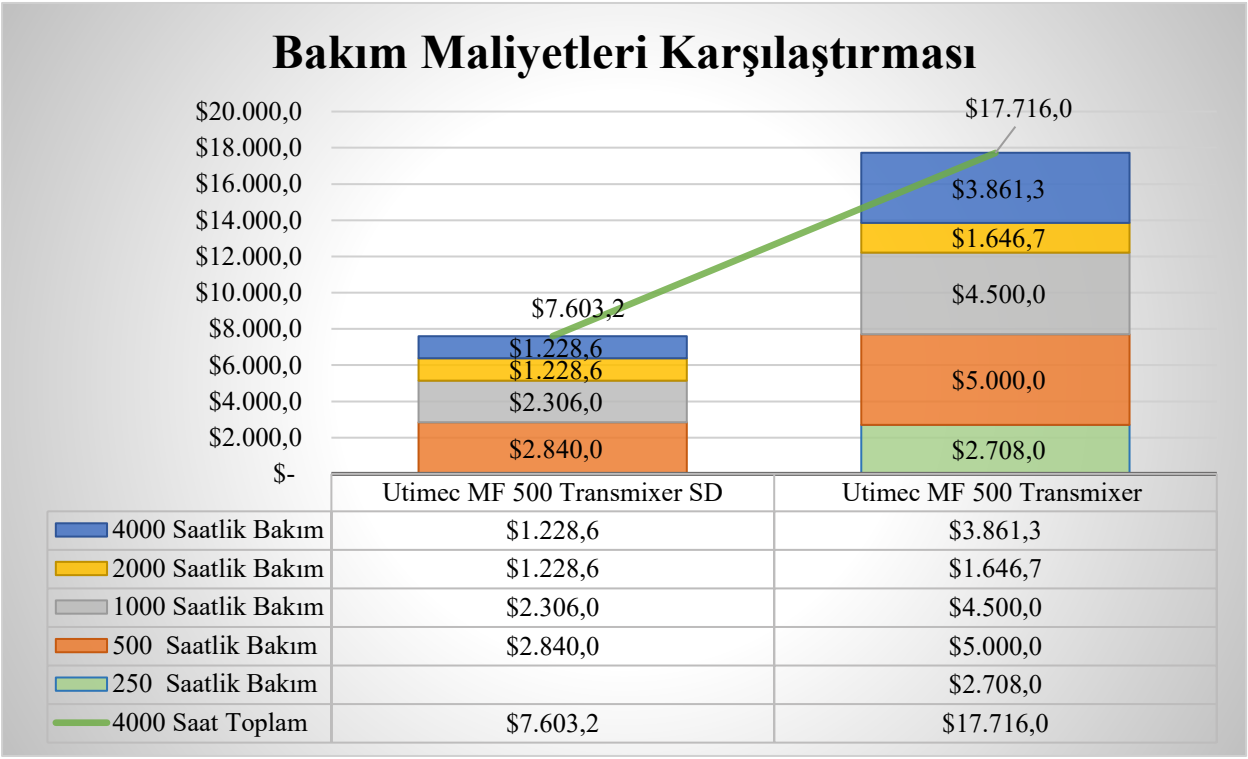
Utimac MF500 Transmixer SD mikser 76,4 saatlik çalışma sonrasında 1.401,8 kWh enerjiyi şarj istasyonundan elde etmiştir ve bunun maliyeti $159,81 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık Utimac MF500 Transmixer SD dizel ekipman ise 90 saatlik çalışma sonrasında 900 lt dizel tüketmiş ve bunun maliyetide $837,6 olarak hesaplanmıştır. Madenimizde 1 haftada yaklaşık 70 atım planlanarak gerçekleştirilmektedir bu sonuç bize doğrudan her hafta en az $677 dolar daha az enerji tüketim maliyeti sonucunu verir. Bu uygulama ve sonuçlar neticesinde m^3 başına maliyet hesaplaması yapıldığında dizel transmikser tüketim maliyeti elektrikli transmikser tüketim maliyetine göre 5,26 kat fazladır.



Şekil 8. 1m^3 Başına enerji/dizel yakıt tüketim maliyeti

Düşük Bakım Maliyeti

Mevcut uzun dönem planına göre yıllık üretim hedefini karşılayacak püskürtme beton uygulama miktarı 14.040 m^3'tür. Bu değer her vardiya için ortalama 13,5m^3 yani 3 tam dolu mikser kapasitesine denk gelmektedir. Bu planın yapılabilmesi için dizel transmikserin 5200 saat çalışmasının bakım maliyeti $17.716, buna karşılık elektrikli transmikserin 4500 saat çalışması gerekmektedir ve maliyeti $7.603'tür.



	Utimec MF 500 Transmixer SD	Utimec MF 500 Transmixer
4000 Saatlik Bakım	$1.228,6	$3.861,3
2000 Saatlik Bakım	$1.228,6	$1.646,7
1000 Saatlik Bakım	$2.306,0	$4.500,0
500 Saatlik Bakım	$2.840,0	$5.000,0
250 Saatlik Bakım		$2.708,0
4000 Saat Toplam	$7.603,2	$17.716,0

Şekil 9. Bakım maliyet karşılaştırması

SONUÇ

Ekipman teknolojik özellikleri sayesinde sürüş güvenliğini arttırabilmekte, operatör sağlığı açısından yüksek ergonomi, termal konfor, düşük gürültü düzeyi, düşük ortam sıcaklığı ve sıfır zehirli gaz salınımı avantajları vardır. Ekipman dizel transmiksere göre yılda 109,50 ton daha az CO_2 salınımı yapılmasını sağlar ve bu sayede küresel karbon ayak izi azaltma hedeflerine cevap verebilmektedir. Bunun yanında, havalandırma ihtiyacını azalttığı için yıllık $2.850 tasarruf sağlamaktadır. Ekipmanın tüketim maliyeti, dizel ekipmana oranla yıllık gereken püstkürtme beton uygulaması için $37.701 daha azdır, yıllık çalışma saati ihtiyacına göre ekipmanın bakım maliyeti $10.000 daha azdır. Tüm maliyetler hesaplandığında elektrikli ekipmanın dizel ekipmana göre yıllık bazda $50.551 daha az maliyetli olduğu görülmektedir. Elektrikli ekipman yaklaşık altı yılda satın alım esnasındaki farkı amorti edebilmektedir.

KAYNAKLAR

Efemçukuru Altın Madeni'nde yapılan gerçek zamanlı test sonuçları.

MF 500 Transmixer SmartDrive Operatör Kullanım ve Bakım Klavuzları.





IMMAT

9. ULUSLARARASI MADEN MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ KONGRESİ

9TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MINING MACHINERY AND TECHNOLOGIES



TMMOB
MADEN
MÜHENDİSLERİ ODASI

ISBN Numarası 978-605-01-1578-9