

# BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ

## SCIENTIFIC MINING JOURNAL

ISSN 2564-7024  
e-ISSN 2587-2613

Cilt / Vol: 61

Sayı / No: 3

Eylül / September

TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını / The Publication of the Chamber of Mining Engineers of Turkey

2022

Song Gun Kang  
Kwang Chol Kim  
Sok Chol Ryom  
Jin Hyok Ri

*Original Research / Orijinal Araştırma*

**Turbulence models and simulation method in the CFD simulation of 75-mm hydrocyclone**

*75 mm hidrosiklonun CFD simülasyonunda türbülans modelleri ve simülasyon yöntemi*

Sedanur Baş  
Taki Güler  
Selçuk Aktürk

*Original Research / Orijinal Araştırma*

**Use of marble dust containing filler mixture in composite slab production: Relationship between roasting conditions and physical properties of the slab**

*Mermer tozu içeren dolgu karışımının kompozit plaka üretiminde kullanımı: Kavurma koşulları ile plaka fiziksel özellikleri arasındaki ilişki*

Ravil Z. Nafikov  
Victor E. Kislyakov  
Aleksandr K. Kirsanov  
Ekaterina V. Shevnina  
Anastasiya O. Ivanchuk  
Pavel V. Katyshev  
Umardzhon R. Tshaev

*Original Research / Orijinal Araştırma*

**Dredging technology of placer deposits in the far north**

*Uzak kuzeydeki plaser tabakalarının tarama teknolojisi*

Esmâ Hacer Evkaya  
Erdoğan Kaymakçı

*Orjinal Araştırma / Orijinal Research*

**TTK'da uygulanan ön gerilmeli ahşap domuzdamı sistemi**

*The system of pneumatic pre-stressed timber crib applied in TTK*

Ebu Bekir Aygar

*Original Research / Orijinal Araştırma*

**Zayıf zeminlerde açılan büyük çaplı çift tüp tünellerin birbirine olan etkisinin 3 boyutlu sayısal analizlerle incelenmesi, Bolu Tüneli örneği**

*An analysis of interaction between large diameter double tube tunnels excavated in weak soils through 3D numerical analysis; An example of Bolu Tunnel*

Ata Akcil  
Ceren Erüst Ünal  
M. Demet Okudan Altındaş

*Derleme / Review*

**Kritik hammaddelerin geri dönüşüm ile döngüsel ekonomiye kazandırılması**

*Gaining of critical raw materials to circular economy by recycling*



**TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI**  
**UCTEA CHAMBER OF MINING ENGINEERS**

**BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ**  
**Scientific Mining Journal**

Cilt / Vol: 61, Sayı / No: 3, Eylül / September, 2022

TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın hakemli dergisidir.  
*A peer-reviewed quarterly journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey*

**Baş Editör / Editor-in-Chief**

Dr. Nejat Tamzok, Türkiye Kömür İşletmeleri / *Turkish Coal Enterprises*

**Editörler / Editors**

Dr. Bülent Toka, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü / *General Directorate of Mineral Research and Exploration*

Dr. İlkay Bengü Can, Hacettepe Üniversitesi / *Hacettepe University*

Dr. Ümit Özer, İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa / *Istanbul University - Cerrahpaşa*

Dr. Mehtap Gülsün Kılıç, Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü / *Rare Earth Elements Research Institute*

**Editör Yardımcıları / Editor Assistants**

Dr. Emre Yılmazkaya, Hacettepe Üniversitesi / *Hacettepe University*

Dr. Ece Kundak, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / *Eskişehir Osmangazi University*

**Dizgi-Tasarım Editörü / Layout-Design Editör**

Sena Naz Gökdemir

## AMAÇ VE KAPSAM

Bilimsel Madencilik Dergisi TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın açık erişimli elektronik ortamda ve basılı olarak yayımlanan süreli bilimsel yayınıdır. Dergi 1960 yılından itibaren yayımlanmaktadır. Derginin ismi 2016 yılı Haziran sayısına kadar "Madencilik" şeklindeyken, benzer isimli popüler dergilerle karıştırılabilmesi nedeniyle 2016 yılı Eylül sayısından itibaren "Bilimsel Madencilik Dergisi" olarak değiştirilmiş ve o tarihe kadar 0024-9416 olan ISSN numarası da 2564-7024 olarak güncellenmiştir.

Yılda 4 kez (Mart-Haziran-Eylül-Aralık) yayımlanan Bilimsel Madencilik Dergisi (ISSN: 2564-7024), maden mühendisliği ve mineral endüstrisi alanında ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan, bilimsel normlara ve yayın etiğine uygun, özgün bilimsel çalışmaları bilim insanlarına, maden mühendislerine ve kamuoyuna duyurmayı ve bu yolla bilimsel bilgiyi toplumla paylaşmayı amaçlamaktadır. Derginin yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir.

Dergi, maden mühendisliği alanında özgün bir araştırmayı bulgu ve sonuçları ile yansıtan kuramsal, deneysel ve uygulamalı araştırma makalelerine; yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bu bulguları karşılaştırarak yorumlayan tarama makalelerine; özgün bir yöntem veya tekniği tarif eden kısa makale olarak tanımlanabilecek teknik notlara; ve gerçek ya da kuramsal bir mesleki uygulamayı temel alan, sistematik veri toplama ve veri analizi içeren vaka çalışmalarına yer vermektedir.

Dergide, yenilenemeyen maden kaynakların sürdürülebilir madencilik ilkeleri doğrultusunda insanlığın hizmetine sunulması için gereken mevcut bilginin geliştirilmesini sağlayacak konularda eserlere öncelik verilmektedir. Bu kapsamda; maden arama, maden yatağı modelleme, topoğrafya, maden ekonomisi, jeostatistik, kaya mekaniği ve jeoteknik, kazılabilirlik etüdü, yer altı ve açık maden işletme, maden tasarımı, madenlerde ve tünellerde tahkimat sistemleri, delme-patlatma tasarımı, madenlerde üretim planlaması ve optimizasyon, madenlerde iş sağlığı ve güvenliği yönetimi, maden havalandırma, yeraltı kömür madenlerinde metan gazı emisyonu ve metan drenajı, cevher hazırlama ve zenginleştirme, proses mineralojisi, analitik teknikler, öğütme, sınıflandırma ve ayırma, flotasyon/flokülasyon, katı/sıvı ayırımı, fiziksel zenginleştirme yöntemleri, hidro ve biyometalürji, üretim metalürjisi, modelleme ve simülasyon, enstrümantasyon ve proses kontrol, geri dönüşüm ve atıkların işlenmesi, maden hukuku, madenlerde çevre sağlığı ve yönetimi, madenlerde nakliyat, makina ve ekipman seçimi ve planlaması, kömür gazlaştırma, mermer teknolojisi, endüstriyel hammaddeler, uzay madenciliği, denizaltı madenciliği ve mekanizasyon ile ilgili konular dergi içeriğinde yer almaktadır.

Gönderilen yazılar editörler kurulu ve konusunda uzman hakemler tarafından bağımsız ve akademik yayıncılıkta en iyi uygulamalarla uyumlu şekilde değerlendirilmekte olup, değerlendirme süreci sonunda yayınlanması uygun görülen yazıların yayın hakları yazarlar tarafından telif sözleşmesi ile TMMOB Maden Mühendisleri Odası'na devredilir.

## AIMS AND SCOPE

*Scientific Mining Journal, which is published in open access electronic environment and in printed, is a periodical scientific journal of Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects Chamber of Mining Engineers. The name of the journal was "Mining" until June 2016 and it has been changed to "Scientific Mining Journal" since September 2016 because it can be confused with popular journals with similar names and the ISSN number has been updated from 0024-9416 to 2564-7024.*

*Scientific Mining Journal, published four times a year (March-June-September-December), aims to disseminate original scientific studies which are conducted according to the scientific norms and publication ethics at national and international scale, to scientists, mining engineers, the public; and thus to share scientific knowledge with society. The journal is in both Turkish and English.*

*The journal covers theoretical, experimental, and applied research articles, which reflects the findings and results of an original research in the field of mining engineering; review articles, which assess, evaluates, and interprets the findings of a comprehensive review of sufficient number of scientific articles and summarize them at present information and technology level; technical notes, which may be defined as a short article that describes a novel methodology or technique; a case studies, which are based on the theoretical or real professional practice and involves systematic data collection and analysis.*

*The journal gives priority to works that will enable the advancement of current available information necessary to serve humanity with nonrenewable mineral resources with the perspective of sustainable mining principles. In this context, mine exploration, mineral resource modeling, surveying, mine economics and feasibility, geostatistics, rock mechanics and geotechnics, diggability studies, underground and surface mining, mine design, support design in underground mines and tunnels, rock penetration and rock fragmentation, mine production planning and pit optimization, mine health and safety management, mine ventilation, methane emission and drainage in underground coal mines, mineral processing and beneficiation, process mineralogy, analytical techniques, mineral comminution, mineral classification and separation, flotation/flocculation, solid/liquid separation, physical enrichment methods, hydro and biometallurgy, production metallurgy, modeling and simulation, instrumentation and process control, recycling and waste processing, mining law, environmental health and management, transportation, machinery and equipment selection and planning, coal gasification, marble technology, industrial minerals, space mining, submarine mining and mechanization are included in the journal content.*

*Submitted manuscripts are evaluated by the editorial board and expert referees independently in accordance with the best practices in academic publishing. The publishing rights of the manuscripts, approved for publication at the end of the evaluation process, are transferred to the Chamber of Mining Engineers by the authors.*

## **BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ**

### ***Scientific Mining Journal***

Bilimsel MADENCİLİK Dergisi makale dizin ve özlerinin yer aldığı veri tabanları:

*Scientific MINING Journal is indexed or abstracted in:*

SCOPUS

Google Scholar

ULAKBİM TR Dizin

GeoRef

OpenAIRE

Makale Yazım Kuralları, Yayın Danışma Kurulu, Hakem Değerlendirme Süreci ve Hakem Listelerine <http://www.mining.org.tr> adresinden erişilebilir.

*Author Instructions, Editorial Advisory Board, the Peer Review Process and Reviewer Lists can be accessed from <http://www.mining.org.tr>*

### **Etik Kurallar / *Publication Ethics***

Dergiye gönderilecek çalışmalarda, araştırma ve yayın etiğine uyulması tartışmasız bir ön koşul olarak kabul edilmektedir. Yayın Etik Kurallarına <http://www.mining.org.tr> adresinden erişilebilir.

*Complying with the research and publication ethics is considered an indisputable precondition to be published. Publication Ethics can be accessed from <http://www.mining.org.tr>*



**BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ**  
***Scientific Mining Journal***

TMMOB Maden Mühendisleri Odası adına sahibi /  
*Owner on behalf of the Chamber of Mining Engineers of Turkey: Ayhan Yüksel*

Sorumlu yazı işleri müdürü / *Responsible editing manager: Mehmet Erşat Akyazılı*

Yönetim yeri ve yazışma adresi / *Correspondence address:*  
Selanik Cad. No: 19/4 06650 Kızılay-Çankaya / ANKARA TURKEY

Tel: +90 312 425 10 80 / +90 312 418 36 57 • Fax: +90 312 417 52 90

e-mail: [smj@maden.org.tr](mailto:smj@maden.org.tr)  
web: <http://www.mining.org.tr>

Yayın türü / *Publication type: Yerel süreli yayın, 3 ayda bir yayımlanır / Local periodical, quarterly*

Tasarım / *Design: Gülendem Gültekin*

Baskı yeri / *Printed at: Ziraat Gurup Matbaacılık Ambalaj San. ve Tic. A.Ş.*

Baskı tarihi ve saati / *Printing date: 01.09.2022 at 09:00*

Basım adedi / *Number of printed copy: 1500*

# BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ SCIENTIFIC MINING JOURNAL

ISSN 2564-7024

e-ISSN 2587-2613

Cilt / Vol: 61

Sayı / No: 3

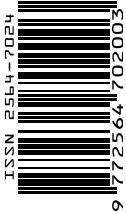
Eylül / September

TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını / The Publication of the Chamber of Mining Engineers of Turkey

2022

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Song Gun Kang  
Kwang Chol Kim  
Sok Chol Ryom  
Jin Hyok Ri
- 127 *Original Research / Orijinal Araştırma*  
**Turbulence models and simulation method in the CFD simulation of 75-mm hydrocyclone**  
*75 mm hidrosiklonun CFD simülasyonunda türbülans modelleri ve simülasyon yöntemi*
- Sedanur Baş  
Taki Güler  
Selçuk Aktürk
- 135 *Original Research / Orijinal Araştırma*  
**Use of marble dust containing filler mixture in composite slab production: Relationship between roasting conditions and physical properties of the slab**  
*Mermer tozu içeren dolgu karışımının kompozit plaka üretiminde kullanımı: Kavurma koşulları ile plaka fiziksel özellikleri arasındaki ilişki*
- Ravil Z. Nafikov  
Victor E. Kislyakov  
Aleksandr K. Kirsanov  
Ekaterina V. Shevnina  
Anastasiya O. Ivanchuk  
Pavel V. Katyshev  
Umardzhon R. Teshaev
- 143 *Original Research / Orijinal Araştırma*  
**Dredging technology of placer deposits in the far north**  
*Uzak kuzeydeki plaser tabakalarının tarama teknolojisi*
- Esma Hacer Evkaya  
Erdoğan Kaymakçı
- 149 *Orjinal Araştırma / Orijinal Research*  
**TTK'da uygulanan ön gerilmeli ahşap domuzdamı sistemi**  
*The system of pneumatic pre-stressed timber crib applied in TTK*
- Ebu Bekir Aygar
- 157 *Original Research / Orijinal Araştırma*  
**Zayıf zeminlerde açılan büyük çaplı çift tüp tünellerin birbirine olan etkisinin 3 boyutlu sayısal analizlerle incelenmesi, Bolu Tüneli örneği**  
*An analysis of interaction between large diameter double tube tunnels excavated in weak soils through 3D numerical analysis; An example of Bolu Tunnel*
- Ata Akcil  
Ceren Erüst Ünal  
M. Demet Okudan Altındaş
- 169 *Derleme / Review*  
**Kritik hammaddelerin geri dönüşüm ile dögüsel ekonomiye kazandırılması**  
*Gaining of critical raw materials to circular economy by recycling*







Original Research / Orijinal Araştırma

## Turbulence models and simulation method in the CFD simulation of 75-mm hydrocyclone

75 mm hidrosiklonun CFD simülasyonunda türbülans modelleri ve simülasyon yöntemi

Song Gun Kang<sup>a,\*</sup>, Kwang Chol Kim<sup>a,\*\*</sup>, Sok Chol Ryom<sup>a,\*\*\*</sup>, Jin Hyok Ri<sup>b,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Mining Engineering, Kim Chaek University of Technology, Pyongyang, DPR Korea

<sup>b</sup> Department of Chemistry, University of Science, Pyongyang, DPR Korea

Geliş-Received: 15 Temmuz - July 2021 \* Kabul - Accepted: 10 Şubat - February 2022

### A B S T R A C T

In this paper, an effective method for the classification process simulation in 75mm hydrocyclone is considered. The simulation results and computational time are compared using Reynolds stress model (RSM) and different large eddy simulation (LES) subgrid-scale models as turbulence models. The Lagrangian discrete phase model (DPM) is used to simulate the classification process of particles. As the experimental result for comparison of simulation results, Hsieh's experimental data are used. When the different LES subgrid-scale models are used, the solution converges stably by various solution convergence methods without increasing the grid numbers or reducing the size of time steps than RSM model. As a result, it is confirmed that when an appropriate simulation method is applied with the LES-WMLES S-Omega model, more accurate axial water flow velocity distribution and particle classification simulation results can be obtained at a computational cost similar to that of using the RSM model. By drawing the partition curve, it is possible to select a hydrocyclone with low bypassing of fine particles and high classification efficiency.

**Keywords:** Hydrocyclone, Turbulence model, Computational cost, Particle classification, CFD simulation

### Introduction

The hydrocyclone for classification has been studied by many researchers historically due to its simple structure, easy installation and manufacturing, and good separation efficiency for fine particles. Here, "good separation efficiency" means that the hydrocyclone has better separation efficiency than the mechanical classifier in classifying fine particles that are usually smaller than 74 microns. However, the bypass of the fine material to the underflow is a significant problem in cyclone classification. Although this phenomenon cannot be completely eliminated in the hydrocyclone, it can be reduced and the separation efficiency can be increased. For this purpose, it is important to accurately determine the operating and geometric factors of the hydrocyclone.

In general, the problem of selecting one hydrocyclone with the highest classification efficiency among hydrocyclones with different structures and geometric dimensions that satisfies the user's requirements can be proceeded in two ways, one is an experiment and the other is a computer simulation. Here, when the simulation result is as realistic as the experiment result, the method of selecting a hydrocyclone by simulation is economically significant.

Today, a study on the simulation of the classification process in the hydrocyclone based on computational fluid dynamics (CFD) is widely conducted, and realistic research results have been published by many researchers. The most widely used research data as verification data for the results of the water-air two-phase simulation and the classification process simulation in the hydrocyclone with dilute slurry is Hsieh's experimental data published in 1988 (Hsieh, 1988).

The simulation stage of the classification process in the hydrocyclone can be divided into two stages. The first step is to proceed with the water-air two-phase simulation to obtain a stable air column and fluid flow field in the hydrocyclone. The second step conducts a multiphase flow simulation to evaluate the classification efficiency, using the flow field in the first step as an initial condition.

The simulation method of the classification process in the hydrocyclone can also be divided into two. One is to proceed with the steady solution first to obtain a flow field, and then combine the unsteady solution to simulate the classification process (Brennan et al., 2007; Ghadirian et al., 2013; Li et al., 2018). This method cannot consider the detailed changes over time for the change

\* Corresponding author / Sorumlu yazar: jiangchenggenstar@163.com <https://orcid.org/0000-0003-1237-3712>

\*\* kwangchok\_kim@163.com <https://orcid.org/0000-0002-6270-0702>

\*\*\* sokchol\_ryom@163.com <https://orcid.org/0000-0003-1838-4148>

\*\*\*\* jinhyok\_ri@163.com <https://orcid.org/0000-0002-4725-8856>

of the flow field, especially the formation of the air column, in the hydrocyclone, but the classification result can be obtained. The other is to solve unsteady conditions over time from the beginning just like in reality (Narasimha et al., 2012; Ghodrat et al., 2016; Vakamalla et al., 2016; Jiang et al., 2019; Ye et al., 2019; Padhi et al., 2020).

The selection of the turbulence model is important in simulation of the hydrocyclone. The turbulence models giving the simulation results similar to the experimental values are RSM-LPS, RSM-QPS (Kuang et al., 2012; Silva et al., 2014; Cui et al., 2017; Zhang et al., 2017; Perez et al., 2018; Mangadoddy et al., 2019) and LES-Smagorinsky-Lilly (Delgadillo and Rajamani, 2007; Delgadillo and Rajamani, 2009; Wang et al., 2015; Padhi et al., 2019; Vakamalla and Mangadoddy, 2019; Padhi et al., 2020) models. The simulation method by the RSM model is the best choice for coarser meshes. It is evaluated that the RSM-VOF model is more accurate in prediction of the pressure drop and the fluid split ratio into the spigot, and that the LES-VOF model is more accurate in prediction of the tangential velocity distribution (Ghodrat et al., 2016). In the tangential velocity distribution prediction, it is consistent with all the literatures that the prediction result by the LES-VOF model is more accurate than the prediction result by the RSM-VOF model. The simulation results predicted by the RSM model and the LES model do not agree numerically, but all fall within the engineering tolerance. The coarser mesh may be used in the simulation using the RSM model, so the computational cost is less than that of the simulation using LES model. The simulation result by the LES model is accurate (Delgadillo and Rajamani, 2005; Delgadillo, 2006), but the computational cost is higher and the solve convergence is poor (Li et al., 2018; Perez et al., 2018; Jiang et al., 2019; Ye et al., 2019).

Since the hydrocyclone is the equipment that is widely used in various fields, it is practical only to obtain simulation results within a certain time by using a personal computer. Therefore, in the simulation of the classification process of the hydrocyclone, both the accuracy of the simulation and the calculation cost are very important. This problem can be solved by using the LES model and applying a simulation method that allows the solution to converge stably and quickly as the RSM model. There are four subgrid-scale models, the Smagorinsky-Lilly model, the WALE model, the WMLES, and the WMLES S-Omega model, in the LES model. In the literature, there is no mention of the comprehensive simulation results for the four subgrid-scale models of the LES model.

Therefore, in this paper, authors try to establish a simulation method with low computational cost and high simulation accuracy by selecting the subgrid-scale models of the LES model well and applying the solution convergence methods that can increase the convergence safety.

## 1. Simulation

The RSM turbulence model, VOF and DPM models, which have been frequently mentioned in the literature, are not described again here.

### 1.1. Mathematical model

The governing equations employed for LES are obtained by filtering the time-dependent Navier-Stokes equations in physical space. The filtered Navier-Stokes equation has the following form: ( $\rho$ : Density, kg/m<sup>3</sup>,  $u$ : Fluid velocity, m/s,  $t$ : Time, s,  $x$ : Cartesian coordinate):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

where is the stress tensor due to molecular viscosity defined by

$$\sigma_{ij} \equiv \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (2)$$

and  $\tau_{ij}$  is the subgrid-scale stress defined by

$$\tau_{ij} \equiv \rho \overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

The subgrid-scale turbulence models in ANSYS Fluent employ the Boussinesq hypothesis, computing subgrid-scale turbulent stresses from

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

where is the subgrid-scale turbulent viscosity.

The isotropic part of the subgrid-scale stresses is not modeled, but added to the filtered static pressure term.

$\bar{S}_{ij}$  is the strain rate tensor for the resolved scale defined by

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

ANSYS Fluent offers the following models for .

#### 1.1.1. Smagorinsky-Lilly Model

In the Smagorinsky-Lilly model, the turbulent viscosity is modeled as follows:

$$\mu_t = \rho L_S^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (6)$$

$$L_S = \min(kd, C_S \Delta) \quad (7)$$

$$\Delta = V^{1/3} \quad (8)$$

where  $L_S$  is the mixing length for subgrid scales,  $k=0.1$  is the von Karman constant,  $d$  is the distance to the closest wall,  $C_S$  is Smagorinsky constant,  $\Delta$  is the grid size and  $V$  is the volume of the computational cell.

#### 1.1.2. Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) Model

In the WALE model, the turbulent viscosity is modeled as follows:

$$\mu_t = \rho L_S^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (9)$$

$$L_S = \min(kd, C_w V^{1/3}) \quad (10)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2 \quad (11)$$

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

where  $C_w$  is the WALE constant. The rest of the notation is the same as for the Smagorinsky-Lilly model.

### 1.1.3. Algebraic Wall-Modeled LES (WMLES) Model

In the WMLES model, the turbulent viscosity is modeled as follows:

$$\mu_t = \min[(kd_w)^2, (C_{Smag} \Delta)^2] \cdot \rho \cdot S \cdot \{1 - \exp[-(y^+/25)^3]\} \quad (13)$$

where  $d_w$  is the wall distance,  $S$  is the strain rate,  $k=0.4187$  and  $C_{Smag}$  are constants,  $y^+$  is the normal to wall inner scaling,  $\rho$  is the fluid density, and  $\Delta$  is the grid size.

$$\Delta = \min(\max(C_w \cdot d_w; C_w \cdot h_{max}, h_{wn}); h_{max}) \quad (14)$$

where  $h_{max}$  is the maximum edge length for a rectilinear hexahedral cell,  $h_{wn}$  is the wall-normal grid spacing, and  $C_w$  is a constant.

### 1.1.4. Algebraic WMLES S-Omega Model

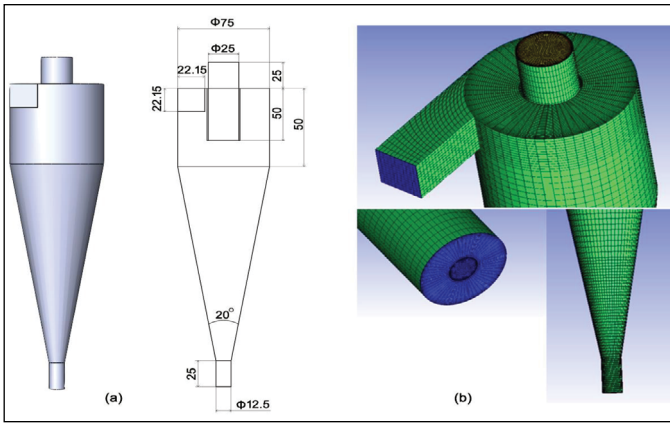
In the WMLES S-Omega model, the turbulent viscosity is modeled as follows:

$$\mu_t = \min \left[ (kd_w)^2, (C_{Smag} \Delta)^2 \right] \cdot \rho \cdot (|S - \Omega|) \cdot \{1 - \exp[-(y^+/25)^3]\} \quad (15)$$

where  $\Omega$  is the vorticity magnitude. The rest of the notation is the same as for the WMLES model.

## 1.2. Simulation condition

Figure 1 shows the geometric shape and mesh model of Hsieh's 75-mm hydrocyclone used in the simulation. A geometric model is created in Solidworks program and grid formation is performed in ICFM CFD program. All dimensions indicated in Figure 1 are in mm. The mesh is made of hexahedral cells, and the grid is made finer in the vicinity of the wall and at the inlet and outlets. In addition, the grid is made fine, as descending from the cone part to the spigot.



**Figure 1.** Geometrical shape and mesh model. (a) geometrical shape. (b) mesh model.

In the simulation, the grid numbers of 162711 cells and 305377 cells are used.

The classification process simulation is conducted in the Fluent program of ANSYS 2020 R1.

Water is set as the primary phase and air is set as the secondary phase.

As the boundary conditions, velocity inlet and pressure outlet conditions are used. Considering Hsieh's No 1 test conditions, the inlet velocity is set to 2.275 m/s. The inlet turbulent intensity is set to 10%. It is assumed that no air enters through the inlet. The air backflow volume fraction is set to 1 in the spigot and the vortex finder.

The residual values for all solution variables are set to  $1 \times 10^{-4}$  -  $1 \times 10^{-5}$ .

The fixed time step size is set by the following calculation. Courant number is calculated as follows:

$$C = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta h} \quad (16)$$

where  $U$  indicates the flow velocity,  $\Delta t$  is a representative time step of the simulation and  $\Delta h$  is the characteristic size of the mesh cell.

The Courant number must be less than 2.5 in the hydrocyclone simulation, so that the linear stability of the numerical calculation can be maintained. If the number of grid cells is 162711 cells, the minimum length of the cell is  $1.9808 \times 10^{-4}$  m. Calculating with the current simulation values,  $=2.1767 \times 10^{-4}$  s. Therefore, the time step size is fixed at  $1 \times 10^{-4}$  s.

For the research purpose of this paper, the time step sizes are fixed to  $1 \times 10^{-4}$  s for both the RSM model and the LES model.

The particles used for the particle classification are determined as shown in Table 1 based on Hsieh's No 7 experiment. All particles are assumed to be spherical and enter the inlet at the same speed as water. The density of limestone particles is 2700 kg/m<sup>3</sup>.

**Table 1.** Particles used for simulation

Particle size, microns	Mass Flow rate, kg/s	Particle size, microns	Mass Flow rate, kg/s
35.5	0.006869	4.43	0.0039055
25.1	0.0102174	3.13	0.0024007
17.74	0.0113373	2.11	0.0017575
12.55	0.0074951	1.31	0.0015909
8.87	0.0052264	0.82	0.001051
6.7	0.0050082	0.53	0.0005743

## 1.3. Simulation method

The unsteady simulation with a fixed time step is carried out to obtain a fluid flow yield in which a stable air column is formed. The VOF model is used as a multiphase model for air column formation. As turbulence models, RSM-LPS, LES-Smagorinsky-Lilly, LES-WALE, LES-WMLES, and LES-WMLES S-Omega models are used, respectively. The parameters of the turbulence model use the default values of the program without change. Implicit formulation is selected in the volume fraction parameters of the multiphase model.

As the solution method, the SIMPLE pressure-velocity coupling algorithm is used. The discretizations of pressure and volume fraction are respectively set as PRESTO, Modified HRIC, and all other items are set as QUICK.

The following solution convergence method is applied to the LES models. The under-relaxation factors are 0.7-0.8 (default 0.3) for pressure, 0.3-0.2 (default 0.7) for momentum and default values for the rest. The residual values of the solution variables are initially set to  $1 \times 10^{-4}$ , and when the solution stays at a certain limit and no longer converges, the solutions are converged by setting



them to  $1 \times 10^{-5}$ . If the solution diverges after a certain period of time, the 1st-order term and the higher-order term are blended to continue the simulation and 1st-order to higher-order blending factor is set to 0.95-0.97. The reason why the relaxation factors are changed for pressure and moment is because the solution does not converge properly with the default values in the simulation using the LES model.

Solution convergence is determined with the following way. After a stable air column is formed, the difference in mass flow rates between the inlet and outlets is calculated. The mass flow rates at the inlet and outlets are time-averaged values over 1s (10000 iteration numbers) for instantaneous values. If this time-averaged mass flow difference value is less than 1% of the inlet value and remains stability for more than 1 s (10000 iteration numbers), the solution is judged to have converged.

After the fluid simulation reaches a steady state, the DPM is used to simulate the particle classification. Since the current simulation is for dilute slurry, the uncoupled DPM and the steady tracking are used to track the movement of particles to the spigot.

## 2. Result and discussion

### 2.1. Choice of mesh

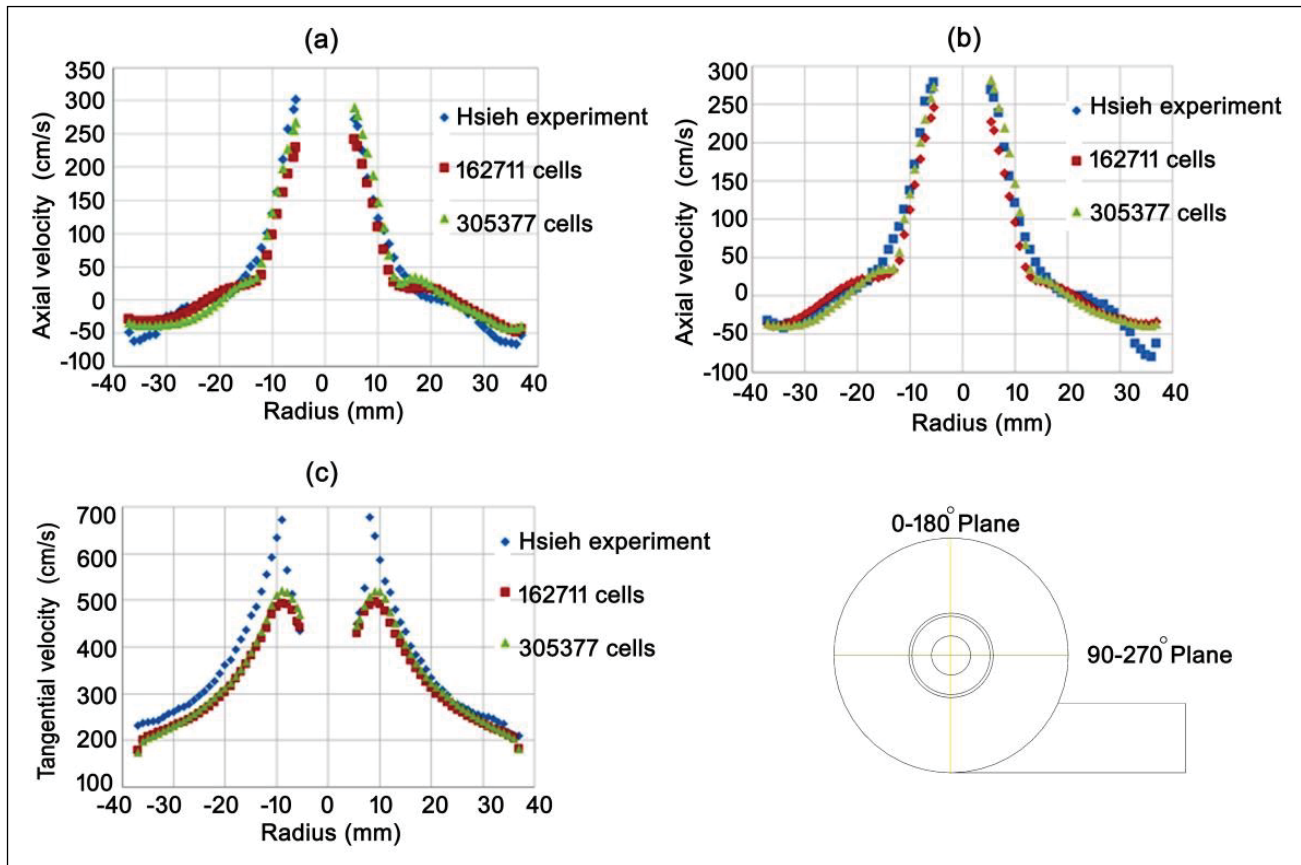
For choice of mesh, two-phase simulation has been performed for 162711 cells and 305377 cells with the RSM-LPS model. Based on previous literature studies, the authors do not feel the need to conduct the choice test for 160000 cells or less.

**Table 2.** Mass balance and water split ratio and the experiment of Hsieh

Ülke	Mass Flow rate , kg/s			Water split Ratio, %	Computational time, hours
	Feed	Overflow	Underflow		
Experiment	1.1165	1.062	0.0545	95.12	-
162711 cells	1.1142	1.0266	0.0876	92.14	102
305377 cells	1.1142	1.0264	0.0878	92.12	125

Table 2 shows the water split ratio to overflow at simulation time 4.2 s, which is similar in coarse and fine meshes. The solution starts to enter a state of complete convergence from 3.2 s. As shown in Table 2, there is no significant difference between the experimental and simulation results for water split to overflow. Also, the simulation results for the water split in the coarse mesh and the fine mesh simulation are similar. Therefore, in terms of water split ratio and computational time, it is more reasonable to select the coarse mesh.

Figure 2 shows the axial and tangential velocities on the 0-180° plane and 90-270° plane at the 60 mm from the top of cyclone as in Hsieh's experimental results. As shown in the velocity distribution in Figure 2, the tendency and number values of the velocity distribution according to the radius are similar in the simulation results of fine and coarse mesh. When the mesh is 305377 cells, the relative error value between the experimental and simulation results in the velocity distribution is less than 10%, so authors do not feel the need to proceed with the simulation for a finer mesh.



**Figure 2.** Axial velocities on (a) 0-180° plane, (b) 90-270° plane, and (c) tangential velocities on 0-180° plane at 60mm from the top of cyclone in mesh choice simulation

Therefore, the mesh of 162711 cells is reasonable in simulation of classification process of 75-mm hydrocyclone with dilute slurry.

2.2. Evaluation on the turbulence models

Two-phase and classification process simulations are conducted using RSM-LPS, LES- Smagorinsky-Lilly, LES-WALE, LES-WMLES, and LES-WMLES S Omega turbulence models, and the simulation results are compared with Hsieh's experimental results. The RSM model and the LES model differ greatly in the convergence stability of simulation. Considering the simulation process, in the simulation by the RSM model, the solution stably enters the convergence state after a certain period of time. However, in the simulation by the LES model, the solution does not easily enter the convergence state even after a certain period of time.

In the simulation using the LES-WALE model and the LES-WMLES model, even though the solution convergence methods are applied, the solution does not converge even after the computational time of 160 hours. Thus, they are excluded from the comparison of simulation results because the purpose of this paper is simulation accuracy and computational cost.

Table 3 shows the water split ratio and computational time after the solution by the water-air two-phase simulation reaches a stable convergence state. These simulation results are results when the simulation times are 4.2 s for RSM-LPS model, 5.5 s for LES-Smagorinsky-Lilly model and 4.5 s for LES-WMLES S Omega model, respectively. Where, the water split ratios to overflow are calculated the mass flow rate values to feed and overflow in experiment and simulations. In the experiment, the water split ratio to overflow is 95.12%, and in the simulation using the RSM-LPS, LES-Smagorinsky-Lilly, and LES-WMLES S Omega models, the water split ratios are 92.14%, 88.26%, and 92.18%, respectively. As can be seen from these results, the simulation result most similar to the experimental value is obtained from simulation using the LES-WMLES S Omega model. The computational time is also the smallest in the simulation using the LES-WMLES S Omega model, 96 hours. Therefore, the simulation by the LES-WMLES S Omega model is the most accurate for predicting water split ratio and the smallest in computational time.

In the simulation results by the different turbulence models, the distribution of the axial and tangential velocities of water at the 60 mm from the top of cyclone is shown in Figure 3.

Table 3. Water split ratio and computational time

Ülke	Mass Flow rate, kg/s			Water split Ratio, %	Computational time, hours
	Feed	Overflow	Underflow		
Experiment	1.1165	1.062	0.0545	95.12	-
RSM-LPS	1.1142	1.0266	0.0876	92.14	102
LES-Smagorinsky-Lilly	1.1078	0.9777	0.1301	88.26	163
LES-WMLES S Omega	1.1142	1.0271	0.0871	92.18	96

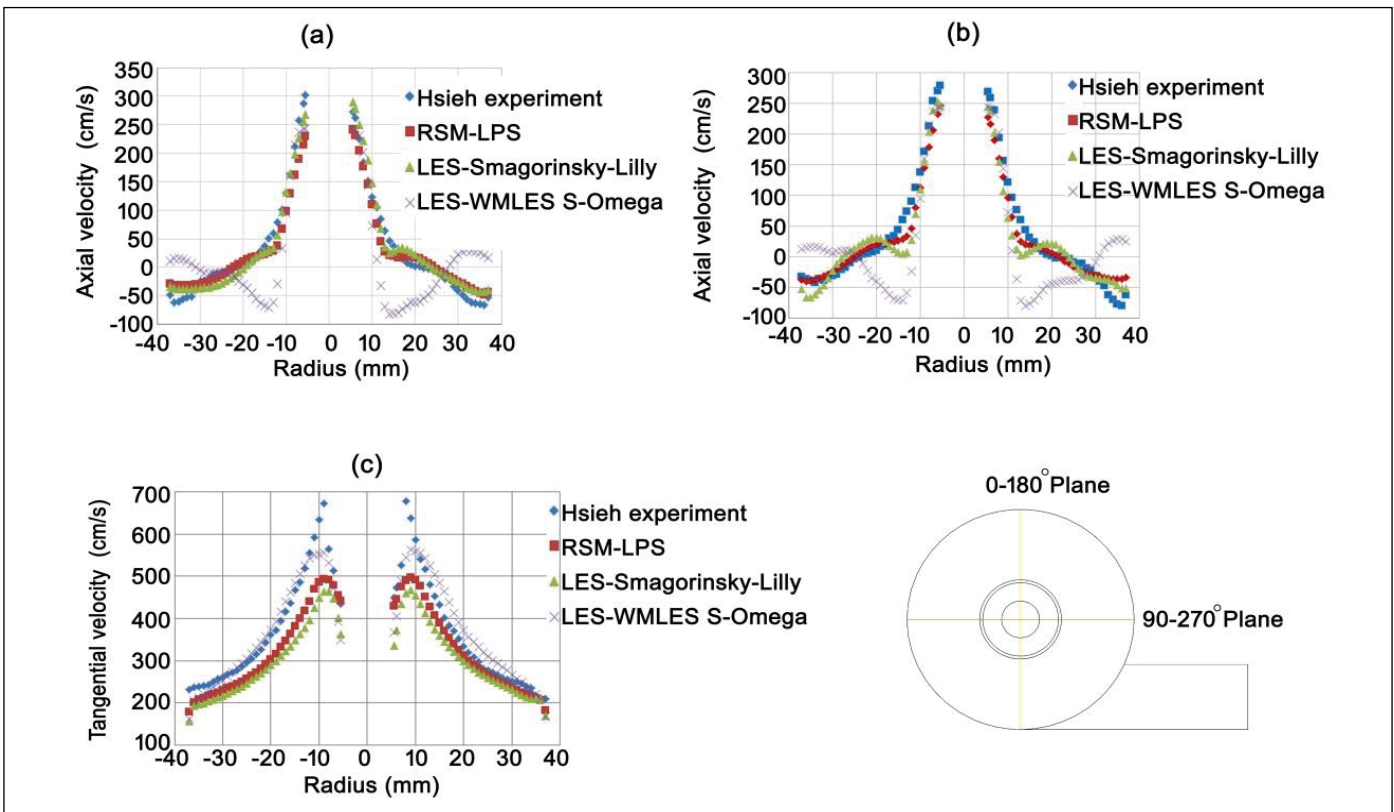


Figure 3. Axial velocities on (a) 0-180° plane; (b) 90-270° plane; (c) tangential velocities on 0-180° plane at 60mm from the top of cyclone in different turbulence model simulation



As shown in Figure 3, the accuracy order for axial velocity distribution prediction is RSM-LPS, LES-Smagorinsky-Lilly, and LES-WMLES S-Omega models. However, the accuracy order for tangential velocity distribution prediction is the LES-WMLES S-Omega, RSM-LPS, and LES-Smagorinsky models. In particular, the relative error between the mathematical average of the predicted values of the tangential velocity distribution by the LES-WMLES S-Omega model and the mathematical average of the experimental values is 0.7%, and the prediction of the tangential velocity distribution by this model is very accurate.

As shown in Figure 4, the shape and size of the air column in a stable state are similar to each other in the simulation using the three models. Considering the formation state of the air column, air enters from the outside through the vortex finder and the spigot at the same time and collides at a certain position. At this time, since the velocity of the air coming in through the spigot is faster than the velocity of the air coming in through the vortex finder, the air goes out to the vortex finder together. This principle is clear by considering the axial velocity vector diagram as shown in Figure 5. The turbulence model order in which this principle is most clearly expressed is the RSM-LPS, LES-Smagorinsky, and LES-WMLES S-Omega models.

The computational time of the two-phase simulation is 96 hours for the LES-WMLES S-Omega model, 102 hours for the RSM-LPS model, and 163 hours for the LES-Smagorinsky-Lilly model.

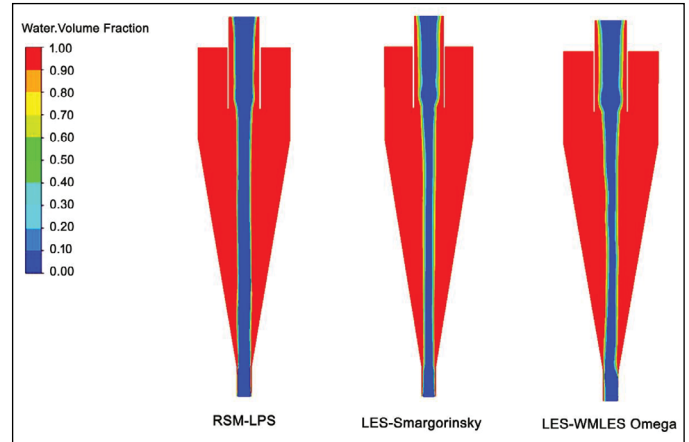


Figure 4. Shape of air column in the stable state

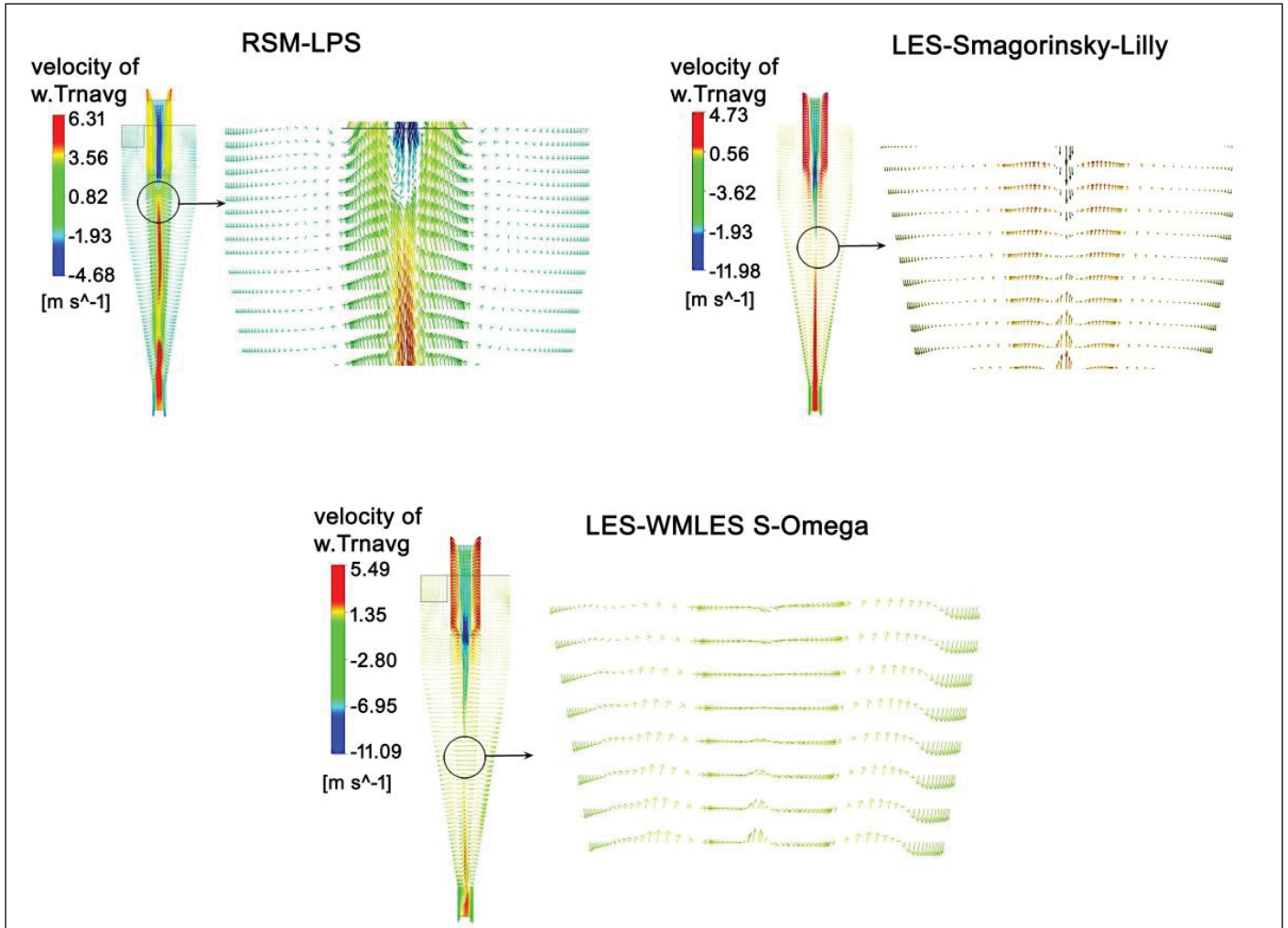


Figure 5. Axial velocity vector diagram.

Based on the results of the two-phase simulation of the different turbulence models, the simulation for the particle classification of Hsieh's No 7 experiment is conducted with the DPM model and compared with the experiment results. The simulation result for the particle classification is shown in Figure 6. Figure 6 is the corrected partition curves. The purpose of research is the establishment of simulation method, the simulation which is the nearest with experiment result is the best correct simulation. The best correct method among the simulation methods is selected by comparing the correlation coefficient and the corrected cut-size between the experimental values and the simulation values. With recovery to underflow for each particle, correlation coefficients of simulation values on experimental values are calculated. The correlation coefficient values are 0.997 for the LES-WMLES S-Omega model, 0.994 for the RSM-LPS model, and 0.977 for the LES-Smagorinsky-Lilly model, respectively. The corrected cut-size is 18.15 microns in Hsieh's experiment, 16.76 microns for the RSM-LPS model, 16.5 microns for the LES-Smagorinsky-Lilly model, and 18.11 microns for the LES-WMLES S-Omega model. As a result, the simulation result by the LES-WMLES S-Omega model is the most accurate in the prediction for the particle classification of the Hsieh's 75-mm hydrocyclone.

The following facts can be found from the simulation results of the water velocity distribution by the water-air two-phase simulation and the classification process simulation results of particles based thereon. Among the axial and tangential velocities of water in the hydrocyclone, the velocity that greatly affects the classification result of the particles is the tangential velocity. This is because the tangential velocity distribution is the most accurate, the result of the axial velocity distribution simulation is relatively inaccurate, and the particle classification simulation result is the most accurate than other models in the simulation results by the LES- WMLES S-Omega turbulence model.

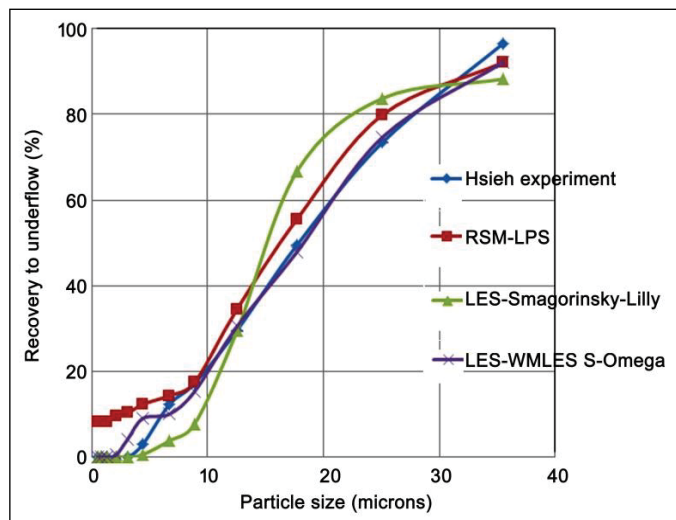


Figure 6. Particle classification using the different turbulence models

The tangential and axial velocities in the hydrocyclone are the velocities that occur under the action of centrifugal and gravitational forces. The tangential velocity is mainly influenced by centrifugal force, and the axial velocity is mainly influenced by gravity. Eventually, under Hsieh's hydrocyclone test conditions, it is found that fine particles of less than 35 microns are mainly classified under the influence of centrifugal forces.

## Conclusions

In the simulation of the classification process of the Hsieh's 75-mm hydrocyclone for dilute slurry with a mass concentration of less than 10%,

LES- WMLES S-Omega model should be used to obtain more accurate tangential velocities and particle classification simulation results. In this case, the computational cost of the simulation is similar with using the RSM model. The set of residual values of the solution variables should be changed from  $10^{-4}$  to  $10^{-5}$  during the solution, the 1st-order term and the higher-order term should be blended for the convergence of solution. The under-relaxation factors are 0.7-0.8 (default 0.3) for pressure, 0.3-0.2 (default 0.7) for momentum in LES model simulation.

It is sufficient to use about 160,000 hexahedral cells to simulate the classification process in the Hsieh's 75-mm hydrocyclone for dilute slurry with a mass concentration of 10% or less.

In the hydrocyclone simulation, the axial velocity distribution of the medium mainly affects the accurate simulation results for the formation of the air column, and the tangential velocity distribution mainly affects the accurate simulation results for the particle classification.

This simulation method can be used to obtain the accurate simulation results within a reasonable time on a personal computer. When an accurate simulation method is established, the simulation can be carried out by changing the operation and geometric parameters of the hydrocyclone based on it. The smaller the partition of fine particles bypassing classification in the hydrocyclone, which proceeds with the classification for the same cut-size, the higher the classification efficiency. By calculating the partitions for each particles to underflow from the simulation results and drawing the partition curve, it is possible to select a hydrocyclone with low bypassing of fine particles and high classification efficiency.

## References

- Brennan, M.S., Narasimha, M., Holtham, P.N. 2007. Multiphase modelling of hydrocyclones - prediction of cut-size. *Minerals Engineering* 20, 395-406. doi:10.1016/j.mineng.2006.10.010.
- Cui, B., Zhang, C., Wei, D., Lu, S., Feng, Y. 2017. Effects of feed size distribution on separation performance of hydrocyclones with different vortex finder diameters. *Powder Technology* 322, 114-123. doi:10.1016/j.powtec.2017.09.010.
- Delgadillo, J.A., Rajamani, R.K. 2005. A comparative study of three turbulence - closure models for the hydrocyclone problem. *International journal of mineral processing* 77(4), 217-230. doi:10.1016/j.minpro.2005.06.007.
- Delgadillo, J.A. 2006. Modelling of 75- and 250-mm hydrocyclones and exploration of novel designs using computational fluid dynamics Ph.D. thesis. Utah: The University of Utah.
- Delgadillo, J.A., Rajamani, R.K. 2007. Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics. *International Journal of Mineral Processing* 84, 252-261. doi:10.1016/j.minpro.2006.07.014.
- Delgadillo, J.A., Rajamani, R.K. 2009. Computational fluid dynamics prediction of the air-core in hydrocyclones. *International Journal of Computational Fluid Dynamics* 23(2), 189-197. doi:10.1080/10618560902724893.
- Ghadirian, M., Hayes, R.E., Mmbaga, J., Afacan, A., Xu, Z. 2013. On the simulation of hydrocyclones using CFD. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 91(5), 950-958. doi:10.1002/cjce.21705.
- Ghodrat, M., Qi, Z., Kuang, S.B., Ji, L., Yu, A.B. 2016. Computational investigation of the effect of particle density on the multiphase flows and performance of hydrocyclone. *Minerals Engineering* 90, 55-69. doi:10.1016/j.mineng.2016.03.017.
- Hsieh, K.T. 1988. Phenomenological model of the hydrocyclone. Ph.D. thesis. Utah: The University of Utah.
- Jiang, L., Liu, P., Zhang, Y., Yang, X., Wang, H., Gui, X. 2019. Design boundary layer structure for improving the particle separation performance of a hydrocyclone. *Powder Technology* 350, 1-14. doi:10.1016/j.powtec.2019.03.026.

- Kuang, S.B., Chu, K.W., Yu, A.B., Vince, A. 2012. Numerical study of liquid-gas-solid flow in classifying hydrocyclones: Effect of feed solids concentration. *Minerals Engineering* 31, 17-31. doi:10.1016/j.mineng.2012.01.003.
- Li, Y., Liu, C., Zhang, T., Li, D., Zheng, L. 2018. Experimental and Numerical Study of a Hydrocyclone with the Modification of Geometrical Structure. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 96, 2638-2649. doi:10.1002/cjce.23206.
- Mangadoddy, N., Vakamalla, T.R., Kumar, M., Mainza, A. 2019. Computational modelling of particle-fluid dynamics in comminution and classification: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 129(2), 145-156. doi:10.1080/25726641.2019.1708657.
- Narasimha, M., Brennan, M., Holtham, P.N. 2012. CFD modeling of hydrocyclones: Prediction of particle size segregation. *Minerals Engineering* 39, 173-183.
- Padhi, M., Mangadoddy, N., Sreenivas, T., Vakamalla, T.R., Mainza, A.N. 2019. Study on multi-component particle behaviour in a hydrocyclone classifier using experimental and computational fluid dynamics techniques. *Separation and Purification Technology* 229, 115698. doi:10.1016/j.seppur.2019.115698.
- Padhi, M., Kumar, M., Mangadoddy, N. 2020. Understanding the bicomponent particle separation mechanism in a hydrocyclone using a computational fluid dynamics model. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59(25), 11621- 11644. doi:10.1021/acs.iecr.9b06747.
- Perez, D., Cornejo, P., Rodriguez, C., Concha, F. 2018. Transition from spray to roping in hydrocyclones. *Minerals Engineering* 123, 71-84. doi:10.1016/j.mineng.2018.04.008.
- Silva, D.O., Vieira, L.G.M., Barrozo, M.A.S. 2014. Optimization of design and performance of solid-liquid separators: A thickener hydrocyclone. *Chemical Engineering & Technology* 38(2), 319-326. doi:10.1002/ceat.201300464.
- Vakamalla, T.R., Koruprolu, V.B., Arugonda, R., Mangadoddy, N. 2016. Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification Using multiphase CFD model. *Separation and Purification Technology* 175, 481-497. doi:10.1016/j.seppur.2016.10.026.
- Vakamalla, T.R., Mangadoddy, N. 2019. The dynamic behaviour of a large-scale 250-mm hydrocyclone: A CFD study. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 14(2), e2287. doi: 10.1002/apj.2287.
- Wang, C., Ji, C., Zou, J. 2015. Simulation and experiment on transitional behaviours of multiphase flow in a hydrocyclone. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 93, 1802-1811. doi:10.1002/cjce.22274.
- Ye, J., Xu, Y., Song, X., Yu, J. 2019. Novel conical section design for ultra-fine particles classification by a hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design* 144, 135-149. doi:10.1016/j.cherd.2019.02.006.
- Zhang, Y., Cai, P., Jiang, F., Dong, K., Jiang, Y., Wang, B. 2017. Understanding the separation of particles in a hydrocyclone by force analysis. *Powder Technology* 322, 471-489. doi:10.1016/j.powtec.2017.09.031.



Original Research / Orijinal Araştırma

### Use of marble dust containing filler mixture in composite slab production: Relationship between roasting conditions and physical properties of the slab

*Mermer tozu içeren dolgu karışımının kompozit plaka üretiminde kullanımı: Kavurma koşulları ile plaka fiziksel özellikleri arasındaki ilişki*

Sedanur Baş<sup>a,\*</sup>, Taki Güler<sup>b,\*\*</sup>, Selçuk Aktürk<sup>c,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Coante Quartz Surfaces, Muğla, TURKEY

<sup>b</sup> Dept. of Mining Engineering, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, TURKEY

<sup>c</sup> Dept. of Physics, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, TURKEY

Geliş-Received: 1 Kasım - November 2021 \* Kabul - Accepted: 24 Ocak - January 2022

#### A B S T R A C T

Marble dust generated during slab cutting as reject causes significant environmental problems due to increased reactive surface area. It has closer size distribution with micronized quartz, which is used as filler in composite slab production. Owing to its high hardness, micronized quartz production is an energy intensive process. This study was conducted to investigate the applicability of marble dust in composite slab production together with micronized quartz as filler. The filler mixture was roasted to mitigate drawback arising from low hardness of marble dust. XRD results revealed that phases in roasted filler were wollastonite, larnite, calcio-olivine, quicklime and free quartz depending on the roasting temperature and time. Physical tests were applied to clarify the effect of sinter phases on slab properties. Physical properties were determined to retrogress as the roasting temperature increased to 1100°C possibly due to rate of free lime in roasted filler, and then improved again reaching peak point at 1200°C. Physical properties ameliorated by increasing roasting time at 1200°C. Larnite and quartz were found to be effective on improved physical properties than wollastonite and calcio-olivine.

**Keywords:** Composite slab, Micronized quartz, Marble dust, Roasting

#### Introduction

Advances in civilization, and in turn, development in building industry have led to considerable increase in the consumption of natural stones, like marble and granite. Marble is generally consumed as countertops, floor tiles, wall tiles, steps and table tops in the form of slab (Albalak, 2012). Marble cutting process into slab form generates finely sized marble dust (MD) (Gazi et al., 2012; Güler and Polat 2018). The rate of MD generated during slab cutting varies volumetrically from 15% to 40% of marble block depending on the morphology, mineralogical composition and crystalline structure of the rock, type of slab cutting machine (gang saw or disc sawing) and slab thickness (Erdem and Öztürk, 2012; Liguori et al., 2008).

Slab cutting is performed in wet condition. Therefore, the generated MD is taken in the form of sludge containing approximately 35-45% water. The marble sludge is subjected to solid-liquid separation by thickening, and then by filtration. Dewatered MD is stored in waste disposal areas in the form of filter cake (Kocabağ, 2018). MD exposes significant environmental risks due to reasonably reactive high surface area. It may give rise to aridity around disposed land, reduce soil fertility, adversely affect the breathable air quality due to pollination, and affect negatively the eco-system (Kocabağ, 2018; Rana et al., 2016).

Research on high strength composite slab production has taken great interest owing to its high flexural strength and impact resistance in addition to low water absorption rate compared to marble slabs (Borsellino et al., 2009; Lam dos Santos et al., 2011;

\* sedanur.bas@coante.com • <https://orcid.org/0000-0003-2791-1798>

\*\* Corresponding author: takiguler@mu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-9688-6894>

\*\*\* selcukakturk@mu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-9146-5142>



Santos et al., 2019; Tunç, 2021). Use of quartz both in aggregate (~66%) and micronized (~27%) forms induce the physical properties of composite slabs. Quartz particles are locked to each other by the aid of organic binders under vibration and vacuum pressure (Arıcı et al., 2019; Lam dos Santos et al., 2011; Peng and Qin, 2018). Quartz is a hard silicate mineral with the hardness value of 7 in Mohs scale. Therefore, preparation of micronized quartz as a filler component is an energy intensive process (de Bakker, 2014). Health threats (e.g., silicosis) of micronized quartz, and occupational concerns during production are other issues to be regarded.

The underlying idea in defining the aim of this research work was the possibility of MD usage as filler instead of micronized quartz in composite slab production from economic and environmental point of concern. MD is composed mainly of calcite, which is soft mineral with the hardness value of 3 in Mohs scale (Güler and Polat 2018; Velázquez et al., 2008). Borsellino et al. (2009) reported that MD adversely affected the mechanical behavior and porosity of the produced slabs referring to the physical characteristics of matrix forming calcite mineral. This problem was thought to be overcome by roasting the mixture of soft MD and hard micronized quartz. Sintering roasting of the mixture produces harder complex Ca-silicates ( $x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2$ ) as compared to MD (Booncharoen et al., 2011; Klosek-Wawrzyn et al., 2013; Liu et al., 2002; Nettleship et al., 1993). Main complex phases are mono-calcium silicate -  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (wollastonite) and di-calcium silicates -  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (larnite and calcio-olivine) depending on the rate of roasting time, roasting temperature and  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  molar ratio. Wollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ ) forms at lower molar ratios while metastable larnite ( $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ) and stable calcio-olivine ( $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ) phases were the dominating reaction products at higher rates after extended roasting process (Akaogi et al., 2004; Gobechiya et al., 2008; Göktaş and Erdemoğlu, 2012; Lakshmi et al., 2013; Rashid et al., 2014; Zadov et al., 2008). Larnite is the heaviest dicalcium silicate phase among them with the density of about  $3.30\text{ g/cm}^3$  while this value is  $2.99\text{ g/cm}^3$  for calcio-olivine, and around  $2.90\text{ g/cm}^3$  for wollastonite. Hardness of wollastonite is between 4.5-5.0 in Mohs scale while it is 6 and 4.5 for larnite and calcio-olivine, respectively (Jøesten, 1977; Liu et al., 2002; Nettleship et al., 1993). Variation in the shape of sintered particles is another advantageous property of thermal process. Roasted particles tend to shape into globe as a result of cohesive forces by partial softening of particle surfaces. So, roasting releases rounded sinter particles, which improves the mechanical properties of produced material (Miyake et al., 2018; Tunç, 2021).

Sintering roasting of filler mixture (MD + micronized quartz) was investigated to clarify the impact of sinter phases on the physical properties of composite slab. Variation in the rate of sinter phases in the roasted filler with respect to the temperature and duration of roasting process was demonstrated. Role of MD percentage of the filler on phase distribution in the roasted filler, and in turn mechanical properties and compactness of produced slabs were also studied.

## 1. Materials and methods

MD was supplied from Yatağan Marble Processing Plant of Ermaş Mining Company in the form of marble sludge while micronized quartz filler was taken from Coante Quartz Surfaces Plant of the same company. Characterization of filler materials was performed by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and size analysis. Chemical analysis held by XRF (PANalytical Axios Max) showed that CaO grade of MD was 55.92% assigning to a calcite

content higher than 99% while micronized quartz filler contains 98.05%  $\text{SiO}_2$ . The XRD analysis was performed using SmartLab Rigaku XRD equipment by  $\text{Cu-K}\alpha$  radiation with a step size of  $0.02^\circ$  to determine mineralogical composition of fillers. Mineralogical characterization showed that fillers were highly pure: detected crystalline phase in MD was calcite, and that was quartz mineral in micronized quartz filler (Figure 1). Main identifying XRD peaks of quartz were at  $2\theta$  of  $20.7^\circ$  and  $26.5^\circ$ , and that was  $2\theta$   $29.5^\circ$  for calcite (Booncharoen et al., 2011; Rohmawati et al., 2019). Size analysis of fillers was performed by Malvern Mastersizer. Fillers were measured to have closer size distributions: 90% of MD was at  $-46.5\text{ }\mu\text{m}$  while that was  $-42.2\text{ }\mu\text{m}$  for micronized quartz.

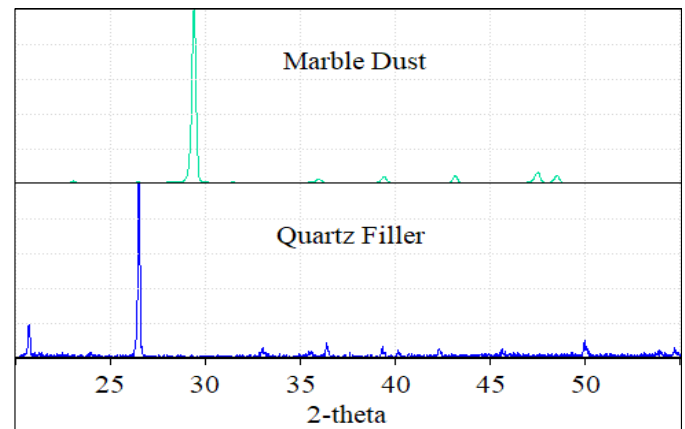


Figure 1. XRD patterns of marble dust and micronized quartz filler samples

MD substitution in slab production was investigated at different MD percentages as filler component, rest of which was micronized quartz. Filler mixture was prepared to satisfy even distribution of phases using a stainless-steel rod mill. Mixing was applied for 4 minutes with reduced rod charge (5%) to minimize comminution. Prepared filler mixtures were roasted in a muffle furnace (Ankatest). Roasting was applied at  $900^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$  and  $1100^\circ\text{C}$  for 3 h, and at  $1200^\circ\text{C}$  for 1 h, 3 h, 5 h and 10 h to investigate the role of sinter phases on the physical properties of prepared slabs. Effect of roasting temperature was investigated only at 75% MD addition while roasting duration tests were performed on 25%, 50% and 75% MD containing filler mixtures.

As sintering roasting proceeds, adjacent sinter particles coalesce due to partial softening of particle surfaces, and consequently the total surface area decreases (Abenojar et al., 2003; Cardenas et al., 2016; Klosek-Wawrzyn et al., 2013; Rodriguez-Navarro et al., 2009). Therefore, rod milling was also applied on roasted filler with reduced rod charge (15%) for 4 minutes to break down weak physical bonds between particles, and to provide all particles pass through  $45\text{ }\mu\text{m}$  sieve avoiding overgrinding. Rate of rod charge and milling time were determined by preliminary tests.

Composite slabs were produced using roasted mixture ( $-45\text{ }\mu\text{m}$ ) as filler, coarse quartz ( $100\text{-}300\text{ }\mu\text{m}$ ) as aggregate, and organic binders. Physical characteristics of produced slabs were investigated by applying flexural strength, impact resistance and water absorption tests. Details of the test procedure have been shared elsewhere (Arıcı et al., 2019; Callister and Rethwisch, 2018; Saruşık et al., 2016; Tunç, 2021). Test results were compared with those of reference slabs (Table 1). Quartz composite slab (Product Code: STYL100320-1) of Coante Quartz Surfaces and marble slab (Muğla White) from Yatağan Marble Processing Plant of Ermaş Mining Co. were evaluated as reference slabs.

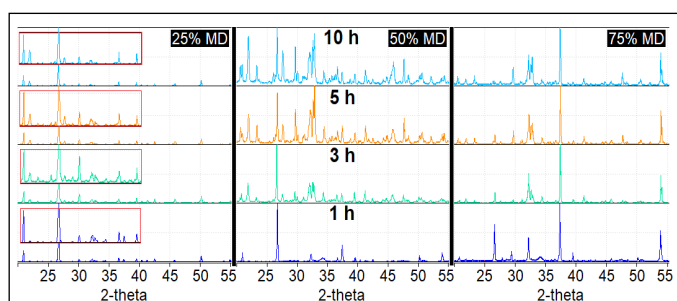
## 2. Results and discussions

### 2.1. Phase characterization of the filler roasted at 1200°C

Filler mixtures were roasted at 1200°C for different durations prior to usage in slab production. Phase identification of roasted fillers was made by XRD method. Figure 2 shows the X-ray reflections of roasted fillers in the  $2\theta$  range of 20-55° where pronounced peaks of new phases were observed. Roasting of MD containing filler mixture releases lime (CaO), which is also defined as quicklime. The CaO phase reacts further with quartz component of filler to form complex Ca-silicates. Resolution of XRD patterns showed that the lime phase drew major intense peaks at  $2\theta$  of 32.3°, 37.4° and 54.3° in the presence of high rate of MD while those for quartz were around  $2\theta$  21° and 26.7° at lower MD percentages (Kostova et al., 2021; Mäkelä et al., 2011; Rohmawati et al., 2019; Witoon, 2011). XRD peaks on the pattern of 25% MD containing roasted filler mixture for 1 h overlaps almost with those on the pattern of micronized quartz given in Figure 1. The magnified view of peak structure of XRD pattern for 25% MD in the range  $2\theta$  20°-40° was given on the figure since main identifying peaks of sinter phases could hardly be discriminated in the present form due to intense quartz peaks. New peaks appeared on this pattern especially between  $2\theta$  of 30°-35° when roasting time was increased to 3 h. Of which, the most intense one at 30.1° was assigned to wollastonite (Kostova et al., 2021; Tuttle and Harker, 1957). Wollastonite reflection decreased slightly at higher roasting times while identifying XRD peak of larnite phase at  $2\theta$  22° became more apparent by extending the roasting process up to 10 h (Booncharoen et al., 2011; Kostova et al., 2021; Rashid et al., 2014; Tunç, 2021). Akaogi et al. (2004) proposed the phase transition as wollastonite  $\rightarrow$  walstromite  $\rightarrow$  larnite during complex calcium silicate formation from the mixture of CaO+SiO<sub>2</sub>. Stable dicalcium silicate (calcio-olivine) phase formed by increasing MD percentage. The most intense calcio-olivine peak was obtained at  $2\theta$  of 29.6° (Booncharoen et al., 2011). Reflections drawn at about 23° and 28° were also explained with the formation of calcio-olivine. XRD peaks of lime and di-calcium silicates overlap around  $2\theta$  of 33° (Kostova et al., 2021; Mäkelä et al., 2011; Witoon, 2011).

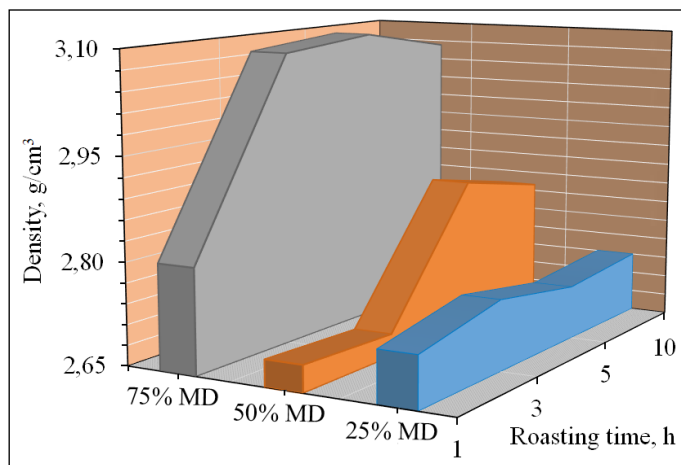
**Table 1.** Mechanical properties and water absorption rate of reference slabs

	Flexural Strength MPa	Impact Resistance J/cm	Water Absorption %
Quartz Composite Slab (Coante Quartz Surfaces, Product Code: STYL100320-1)	77.21	3.96	0.0035
Marble Slab (Ermaş Mining Co., Muğla White)	10.14	1.42	0.1287



**Figure 2.** XRD patterns of roasted filler mixtures (roasting temperature: 1200°C)

Densities of roasted fillers were measured to determine the change in filler density with respect to the roasting time and the rate of MD (Figure 3). Minerals contained in the raw filler have closer densities, which one is 2.65 g/cm<sup>3</sup> for quartz, and 2.71 g/cm<sup>3</sup> for calcite (Moropoulou et al., 2001; Rashid et al., 2014). However, densities of detected new sinter phases vary in a slightly wide range: those are 3.34 g/cm<sup>3</sup>, ~3.30 g/cm<sup>3</sup>, 2.99 g/cm<sup>3</sup> and ~2.90 g/cm<sup>3</sup> for lime, larnite, calcio-olivine and wollastonite, respectively (Joesten, 1977; Liu et al., 2002; Nettleship et al., 1993). Roasting of 25% MD containing fillers gave rise to negligible increase in the density for all the roasting times tested as compared with the raw form of filler. Dominating phase detected was quartz while wollastonite and larnite were the new sinter phases for 25% MD. The roasted filler density was observed to be closer to quartz, which delimited the effect of calcium silicates owing to volumetric distribution of phases. However, roasting time became more effective at higher MD percentages. Comparative evaluation of XRD patterns revealed that the rate of high density larnite and calcio-olivine increased at extended roasting whereas that of quartz decreased. High density larnite forms as a metastable phase during roasting. Extending the roasting causes the transformation of larnite to stable calcio-olivine phase having slightly lower density. Therefore, decrease in the roasted filler after 10 h roasting became apparent as seen in Figure 3 (Booncharoen et al., 2011; Gobechiya et al., 2008; Rashid et al., 2014; Zadov et al., 2008). Filler density shifted up considerably at 75% MD owing to the generation of high density free lime together with Ca-silicates when roasting was applied for 3 h or more. The filler density was low in case of incomplete roasting (1 h) of 75% MD containing mixture due to the presence of raw calcite and quartz phases as seen from XRD patterns.



**Figure 3.** Variation in the density of roasted filler mixture with respect to roasting time (roasting temperature: 1200°C)

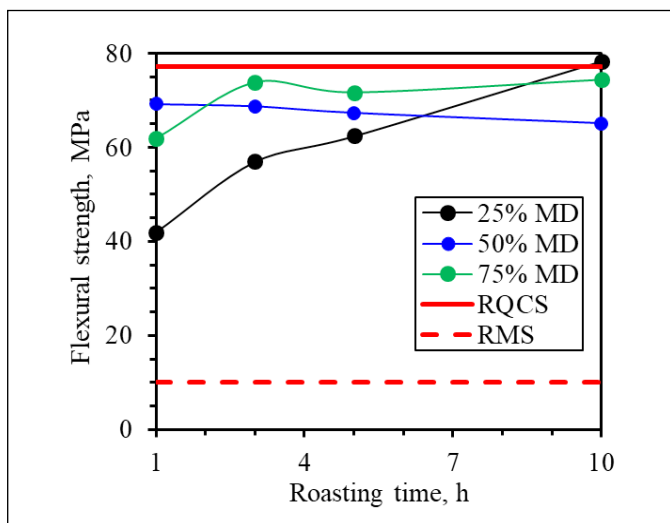
### 2.2. Effect of roasting the filler at 1200°C on the physical properties of slabs

Figures 4-5 show the effect of roasting time on the mechanical properties of the composite slab. As roasting time increased to 10 h, flexural strength (78.35 MPa) drove up for 25% MD, even over the reference point which was 77.21 MPa (Table 1) whereas slight decrease was observed for 50% MD (Figure 4). Similar trend curves were obtained for impact resistance of the slabs (Figure 5). It is worth noting that the impact resistance for 25% MD is conspicuously higher than that of reference quartz composite slab, but only for 10 h of roasting (4.34 J/cm). Mechanical data did almost not change for 75% MD except roasting for 1 h: these values were about 73 MPa and 3.50 J/cm for flexural strength and impact re-

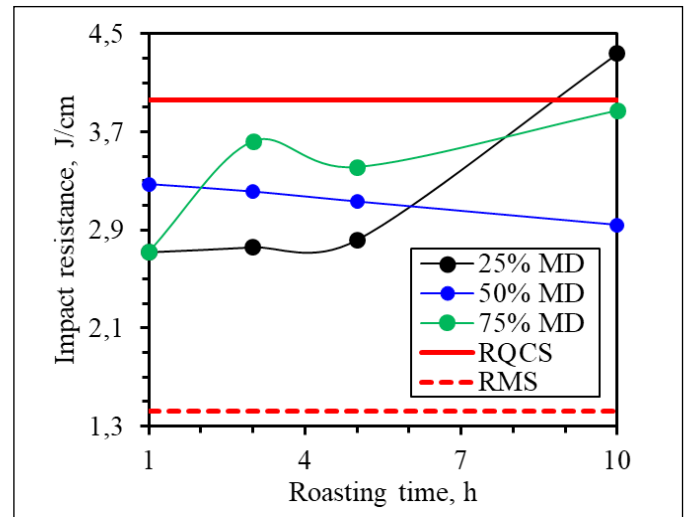
sistance, respectively. Average values of mechanical data for all the three tested MD rates were measured to be closer to each other with a slight increase at higher MD percentages. Prepared slab with MD containing roasted filler demonstrated remarkably improved mechanical properties reaching from 10.14 MPa and 1.42 J/cm to about 70 MPa and 3.2 J/cm for flexural strength and impact resistance, respectively.

Water absorption rate drew an inverse relation with respect to the mechanical properties of composite slab: it decreased by increasing the roasting time, where mechanical properties also improved simultaneously. However, proportional improvement in compactness could not be observed (Figure 6) Water absorption rate was appreciably low for 25% MD possibly due to the presence of quartz as the dominating phase. On the other hand, these curves were almost coinciding at higher MD rates although slight amelioration in the mechanical properties was observed by increasing MD rate. This finding was explained with the variation in phase distribution: the leading filler forming sinter phases were calcio-olivine and larnite together with lime for 50-75% MD containing roasted filler.

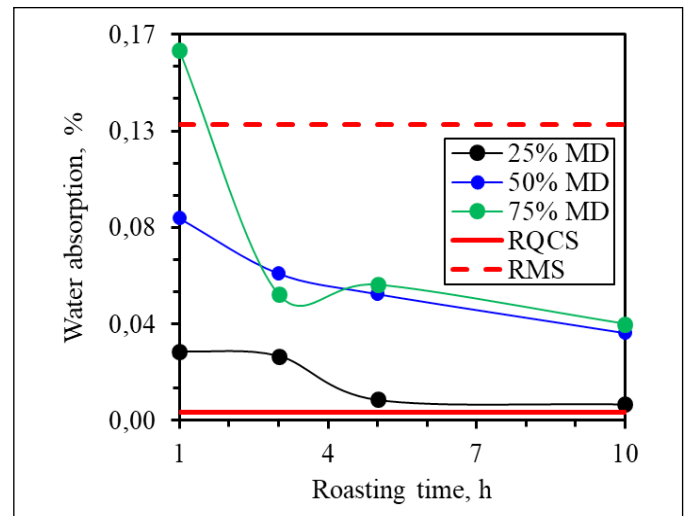
Mono calcium silicate (wollastonite -  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) started to form in the initial stages of roasting of 25% MD containing filler mixture at 1200°C due to lower  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  molecular ratio. Extended roasting of this filler caused the formation of metastable dicalcium silicate (larnite,  $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ) (Akaogi et al., 2004; Kostova et al., 2021; Lakshmi et al., 2013). XRD peaks of stable calcio-olivine ( $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ) phase was not observed at lower  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  rates (Figure 2) (Booncharoen et al., 2011; Tunç, 2021). Therefore, compactness of the slab for 25% MD was explained with the presence of quartz as the major filler phase in addition to the formation of wollastonite and larnite. Composite slab prepared by roasted filler for 10 h demonstrated appreciably better physical properties, even improved than reference quartz composite slab in which condition larnite was the sole defined Ca-silicate phase. Larnite is harder (around 6 in Mohs scale) than MD, but its hardness value was lower than quartz. So, improved mechanical properties of the slab was explained with the synergic effect of the rounded shape of particles, and hardness of sinter phase (Abenojar et al., 2003; Booncharoen et al., 2011; Cardenas et al., 2016; Klosek-Wawrzyn et al., 2013; Miyake et al., 2018; Rodriguez-Navarro et al., 2009). Sintering roasting cause partial softening of the surfaces of filler particles. These particles tend to coalesce during roasting due to cohesive forces.



**Figure 4.** Effect of roasting time on the flexural strength of composite slab prepared by roasted filler mixture (roasting temperature: 1200°C; RQCS: reference quartz composite slab; RMS: reference marble slab)



**Figure 5.** Effect of roasting time on the impact resistance of composite slab prepared by roasted filler mixture (roasting temperature: 1200°C; RQCS: reference quartz composite slab; RMS: reference marble slab)

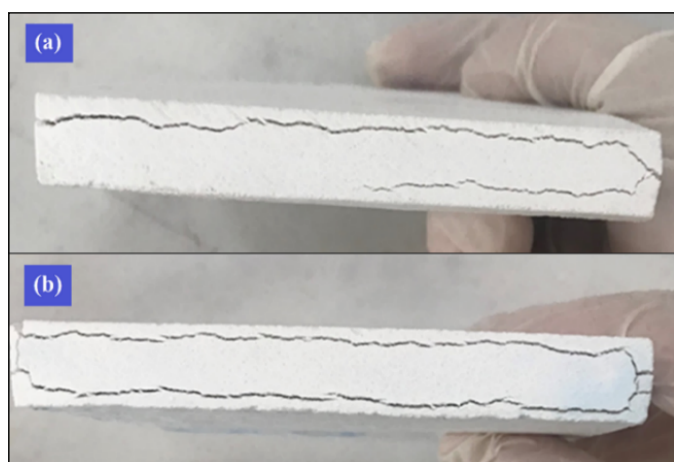


**Figure 6.** Effect of roasting time on the water absorption rate of composite slab prepared by roasted filler mixture (roasting temperature: 1200°C; RQCS: reference quartz composite slab; RMS: reference marble slab)

As a whole, closer mechanical values were obtained for all the tested MD percentages. The combined effect of sinter phases were thought to manipulate physical properties of slabs at different rates. The resolution of XRD patterns revealed that the rate of hard quartz phase decreased sharply for extended roasting periods in the presence of 50-75% MD in the filler mixture whereas percentage of stable calcio-olivine phase increased moderately (Tunç, 2021). Gradual decrease in the ratio of larnite phase was also observed from peak intensity evaluation. Sintering roasting produced quicklime together with the formation of complex dicalcium silicates at higher  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  molecular ratios (Moropoulou et al., 2001). The quicklime (CaO) phase could not completely be converted into complex calcium silicates due to scarcity of  $\text{SiO}_2$  in the roasted filler. Therefore, improved mechanical and water absorption properties of composite slab were attributed to the combined effect of CaO and considerably hard complex sinter Ca-silicate phases. However, deformation propagation in the slab produced by 75% MD containing roasted filler was observed 5 days later than



slab production (Figure 7). Quantitative evaluation of the related XRD patterns revealed that the sinter products contain about 54% CaO and 28% CaO for roasting the filler mixture for 1 h and 10 h, respectively (Tunç, 2021). The deformation was thought to occur owing to the presence of CaO, and its conversion to slaked lime ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) under atmospheric condition according to following reaction (Kılıç and Anıl, 2005; Manzano et al., 2012; Moropoulou et al., 2001). Slaking was proposed to occur since CaO particles could not completely be isolated from atmosphere by polymers during slab production. Used polymer phase could not wet all the free reactive surfaces of particles due to its inadequacy in amount, which caused defectivity in the slabs.



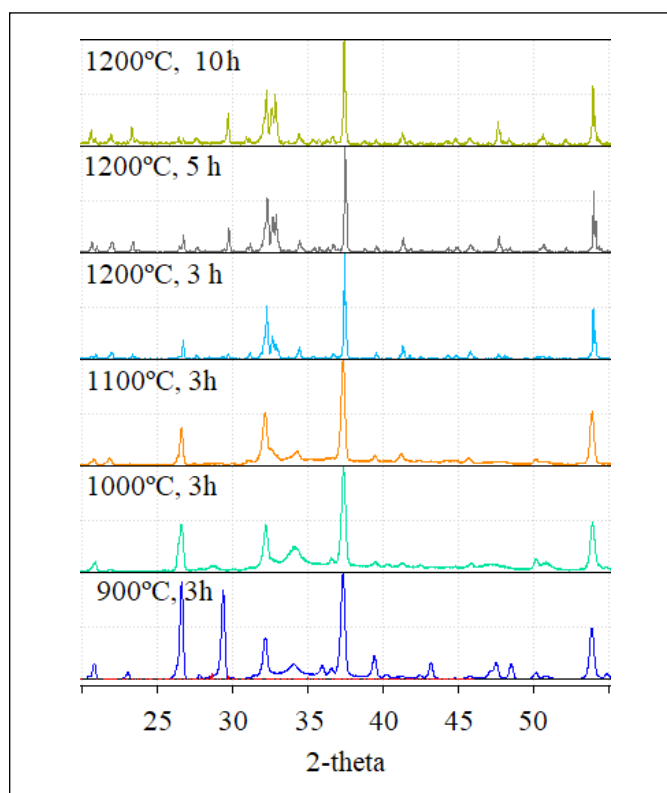
**Figure 7.** Deformation of composite slab, 5 days after production for a) 1 h roasting and b) 10 h roasting (marble dust: 75%; roasting temperature: 1200°C)

### 2.3. Effect of roasting temperature on phase distribution and the physical properties of slabs

Physical properties of the slabs, prepared by 75% MD containing roasted fillers, approach to those of reference quartz composite slab in spite of deformation. Therefore, the effect of roasting temperature on the phase distribution was investigated by the mixtures containing 75% MD. Figure 8 shows the XRD patterns of fillers roasted at different temperatures and durations. Main calcite reflection ( $29.4^\circ$ ) was observed only on the XRD pattern for 900°C indicating its presence in the roasted filler at a rate of about 36% according to quantitative resolution of XRD pattern by using Match software. In spite of incomplete calcination, appearance of sharp lime peaks at  $2\theta$   $37.4^\circ$  and  $54.3^\circ$  was assumed as the reason for remarkably high density ( $2.87 \text{ g/cm}^3$ ) of the roasted filler (Kılıç and Anıl, 2005; Moropoulou et al., 2001; Rodriguez-Navarro et al., 2009). Above this temperature, calcite peak disappeared, and the carbonate phase was converted into oxide form.

The most pronounced peaks on the patterns show the presence of CaO as one of the major phases constituting the sinter product for all the tested roasting temperatures (Kostova et al., 2021; Mäkelä et al., 2011; Rohmawati et al., 2019; Witoon, 2011). The CaO percentage increases from about 28% to 60% by increasing the temperature to 1000°C, above which the rate of lime starts to decrease down to about 32% at 1200°C. Meanwhile, intensity of quartz peak at  $2\theta$   $26.7^\circ$  decreased by increasing the temperature from 900°C to 1200°C showing the rate of change of quartz in the

roasted filler from about 36% down to 9%. Increasing the roasting temperature resulted in a proportional increase in the intensities of dicalcium silicate peaks, especially those of larnite. But, all the CaO species could not be converted into dicalcium silicates due to scarcity of  $\text{SiO}_2$  in the mixture (Booncharoen et al., 2011; Tunç, 2021). Proportional reflection of phase distribution on the densities of roasted filler was observed. It increased to  $3.04 \text{ g/cm}^3$  at 1000°C by the contribution of CaO. Maximum density ( $3.12 \text{ g/cm}^3$ ) was reached at 1100°C due to the presence of lime at considerably high rate and absence of calcio-olivine. Generation of dicalcium silicates resulted in a slight decrease in density down to  $3.08 \text{ g/cm}^3$  at 1200°C. The XRD reflections especially around  $2\theta$   $33^\circ$  became sharpen at 1200°C by increasing the roasting time. The conversion of metastable dicalcium silicates (larnite) to stable one (calcio-olivine) caused this increase in the related XRD reflections (Akaogi et al., 2004; Booncharoen et al., 2011; Kostova et al., 2021; Lakshmi et al., 2013; Tunç, 2021). Calcio-olivine formation was also discriminated from the change in filler density. As seen from Figure 3, it decreased slightly from  $3.08 \text{ g/cm}^3$  to  $3.06 \text{ g/cm}^3$  by phase change in consequence of the increase in the roasting time to 10 h at 1200°C.

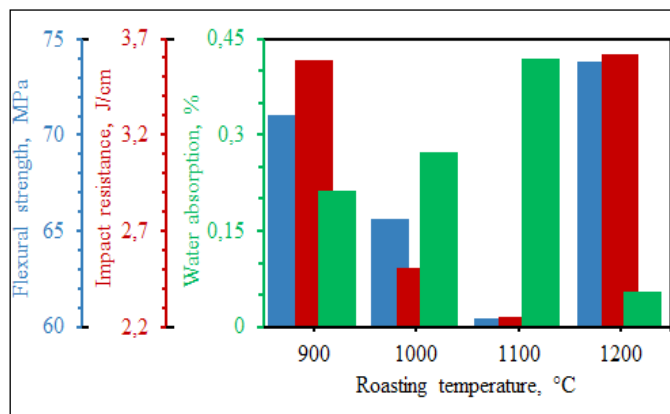


**Figure 8.** XRD patterns of roasted filler mixtures (75% MD) at different temperatures and roasting times

Figure 9 shows the variation in the physical properties of composite slab prepared by 75% MD containing roasted filler for 3 h. Both impact resistance and flexural strength decreased down by increasing roasting temperature from 900°C up to 1100°C. Mechanical properties improved again at the highest tested temperature by the formation of dicalcium silicates. Water absorption data drew similar proportional curve but in inverse direction. Change in the rate of free lime in the roasted filler explains the shoulder like trend curves of physical properties. Decrease in the rate of quartz was also thought to make contribution on drawing such curves. At lower temperatures, compactness of slab could not be



improved due to the absence of calcium silicate sinter phases, incomplete calcination, and the presence of CaO phase at high rate (Gobechiya et al., 2008; Göktaş and Erdemoğlu, 2012; Kartal and Akpınar, 2004; Zadov et al., 2008).



**Figure 9.** Effect of roasting temperature on the mechanical and water absorption properties of composite slab prepared by roasted filler mixture containing 75% marble dust (roasting time: 3 h)

## Conclusions

Effect of marble dust (MD) containing roasted filler mixture on the physical properties of composite slab was investigated as economic and environmentally friendly approach. Experimental findings demonstrated promising results. MD was determined to have closer size distribution with micronized quartz filler. Resolution of XRD patterns exhibited that the roasted fillers contained wollastonite, larnite and calcio-olivine as Ca-silicate sinter phases in addition to free quartz and lime at changing ratios depending on the MD percentages, and roasting temperature and time. Mechanical properties of the slab prepared by filler mixture roasted at 900°C was measured to be closer to those of the reference quartz composite slab. As the roasting temperature was increased to 1100°C, physical properties retrogressed due mainly to the generation of free lime (CaO) at high rate. Conversely, improved physical properties were observed when the filler mixture was roasted at 1200°C. Better physical properties than those of reference quartz composite slab were obtained by roasting the 25% MD containing filler mixture for 10 h. Improved physical properties approaching to those of reference slab were also obtained at higher MD percentages when roasting was applied at least for 3 h. Comparative evaluation of phase distribution and physical properties demonstrated that larnite and calcio-olivine ameliorated the physical properties whereas free lime reduced product quality. High quality slab, even better than reference one, was produced by using 25% MD containing filler mixture roasted for 10 h. This result was attributed to the synergic effect of hard metastable larnite phase and quartz.

## Acknowledgements

The authors would like to express their sincere thanks and appreciation to Coante Quartz Surfaces and Yatağan Marble Plant of Ermaş Mining Company for kindly providing marble dust sample and characterization tests.

## References

Abenojar, J., Velasco, F., Bautista, A., Campos, M., Bas, J.A., Torralba, J.M. 2003. Atmosphere influence in sintering process of stainless

steels matrix composites reinforced with hard particles. *Composite Science and Technology*. 63(1), 69-79. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00179-3

Akaogi, M., Yano, M., Tejima, Y., Uijima, M., Kojitani, H. 2004. High-pressure transitions of diopside and wollastonite: Phase equilibria and thermochemistry of CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, CaSiO<sub>3</sub> and CaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-CaTiSiO<sub>5</sub> system. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 143-144, 145-156. DOI: 10.1016/j.pepi.2003.08.008

Albalak, R. 2012. Engineered Stone and Methods of Manufacturing Same. U.S. Patent No. 2012/0196087 A1.

Arıcı, E., Ölmez, D., Özkan, M., Topçu, N., Çapraz, F., Deniz, G., Altınyay, A. 2019. The improvement of mechanical strength and surface properties on quartz surfaces. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*. 19, 326-332.

Booncharoen, W., Jaroenworuluck, A., Stevens, R. 2011. A synthesis route to nanoparticle dicalcium silicate for biomaterials research. *Journal of Biomedical Materials Research Part B*. 99B, 230-238.

Borsellino, C., Calabrese, L., Bella, G.D. 2009. Effects of powder concentration and type of resin on the performance of marble composite structures. *Construction and Building Materials*. 23(5), 1915-1921. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.005

Callister, W.D., Rethwisch, D.G. 2018. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley. ISBN: 978-1-119-40549-8

Cardenas, A., Pineda, Y., Santos, A.S., Vera, E. 2016. Effect of glow discharge sintering in the properties of a composite material fabricated by powder metallurgy. *Journal of Physics: Conference Series*. 687, 1-4. DOI:10.1088/1742-6596/687/1/012025

de Bakker, J. 2014. Energy use of fine grinding in mineral processing. *Metallurgical and Materials Transactions E*. 1, 8-19. DOI: 10.1007/s40553-013-0001-6

Erdem, R.T., Öztürk, A.U. 2012. Effect of marble powder additive on freezing-thawing properties of cement mortar: *BEU Journal of Science*. 1(2), 85-91.

Gazi, A., Skevis, G., Founti, M.A. 2012. Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant. *Journal of Cleaner Production*. 32, 10-21. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.007

Gobechiya, E.R., Yamnova, N.A., Zadov, A.E., Gazeev, V.M. 2008. Calcio-olivine  $\gamma$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>: I. Rietveld refinement of the crystal structure. *Crystallography Report*. 53(3), 404-408. DOI: 10.1134/S1063774508030073

Göktaş, M., Erdemoğlu, M. 2012. Mechanical activation of synthetic wollastonite (CaSiO<sub>3</sub>) production. *Proceedings of XIII International Mineral Processing Symposium*. pp.1-7.

Güler, T., Polat, E. 2018. Characterization of marble sludge and potential usage areas (in Turkish). Güler, T., Polat, E. (Eds.). *Environmental Approaches in Marble Mining*, Muğla Metropolitan Municipality Publications. 205-218. ISBN: 978-605-4839-14-8

Joesten R. 1977. Evolution of mineral assemblage zoning in diffusion metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 41(5), 649-670. DOI: 10.1016/0016-7037(77)90303-9

Kartal, A., Akpınar, S. 2004. Synthesis of wollastonite by using various raw materials. *Key Engineering Materials*. 264-268, 2469-2472. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.2469

Kılıç, Ö., Anıl, M. 2005. Investigating effects of different calcination kilns on lime production. *Scientific Mining Journal*. 44(4), 19-28.

Klosek-Wawrzyn, E., Malolepszy, J., Murzyn, P. 2013. Sintering behavior of kaolin with calcite. *Procedia Engineering*. 57, 572-582. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.073

Kocabağ, D. 2018. Evaluation of marble industry and marble wastes in the context of sustainable mining (in Turkish). Güler, T., Polat, E. (Eds.). *Environmental Approaches in Marble Mining*, Muğla Metropolitan Municipality Publications. 51-92. ISBN: 978-605-4839-14-8

- Kostova, B., Petkova, V., Kostov-Kytin, V.I., Tzvetanova, Y., Avdeev, G. 2021. TG/DTG/-DSC and high temperature in-situ XRD analysis of natural thaumasite. *Thermochimica Acta*. 697, 178863. DOI: 10.1016/j.tca.2021.178863
- Lakshmi, R., Velmurugan, V., Sasikumar, S. 2013. Preparation and phase evolution of wollastonite by sol-gel combustion method using sucrose as the fuel. *Combustion Science and Technology*. 185(12), 1777-1785. DOI: 10.1080/00102202.2013.835308
- Lam dos Santos, J.P., Rosa, L.G. and Amaral, P.M. 2011. Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones. *Construction and Building Material*. 25(1), 171-174. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.042
- Liguori, V., Rizzo, G., Traverso, M. 2008. Marble quarrying: An energy and waste intensive activity in the production of building materials. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 208, 197-207. DOI: 10.2495/EEIA080201
- Liu, J., Duan, C.G., Mei, W.N., Smith, R.W., Hardy, J.R. 2002. Polymorphous transformations in alkaline-earth silicates. *The Journal of Chemical Physics*. 116(9), 3864-3869. DOI: 10.1063/1.1446043
- Mäkelä, M., Paananen, T., Kokkonen, T., Makkonen, H., Heino, J., Dahl, O. 2011. Preliminary evaluation of fly ash and lime for use as supplementary cementing materials in cold-agglomerated blast furnace briquetting. *ISIJ International*. 51(5), 776-781. DOI: 10.2355/isijinternational.51.776
- Manzano, H., Pellenq, R.J.M., Ulm, F.J., Buehler, M.J., van Duin, A.C.T. 2012. Hydration of calcium oxide surface predicted by reactive force field molecular dynamics. *Langmuir*. 28, 4187-4197. DOI: 10.1021/la204338m
- Miyake, K., Hirata, Y., Shimonosono, T., Sameshima, S. 2018. The effect of particle shape on sintering behavior and compressive strength of porous alumina. *Materials*. 11, 1137. DOI: 10.3390/ma11071137
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E. 2001. The Effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. *Cement and Concrete Research*. 31, 633-639. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00490-7
- Nattleship, I., Shull Jr., J.L., Kriven, W.M. 1993. Chemical preparation and phase stability of Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> and Sr<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> powders. *Journal of the European Ceramic Society*. 11(4), 291-298. DOI: 10.1016/0955-2219(93)90028-P
- Peng, L., Qin, S. 2018. Mechanical behaviour and microstructure of an artificial stone slab prepared using a SiO<sub>2</sub> waste crucible and quartz sand. *Construction and Building Materials*. 171, 273-280. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.141
- Rana, A., Kalla, P., Verma, H.K., Mohnot, J.K. 2016. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*. 135, 312-331. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.126
- Rashid, R.A., Shamsudin, R., Hamid, M.A.A., Jalar, A. 2014. Low temperature production of wollastonite from limestone and silica sand through solid-state reaction. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2, 77-81. DOI: 10.1016/j.jascer.2014.01.010
- Rodriguez-Navarro, C., Ruiz-Agudo, E., Luque, A., Rodriguez-Navarro, A.B. 2009. Thermal decomposition of calcite: Mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystals. *American Mineralogist*. 94, 578-593. DOI: 10.2138/am.2009.3021
- Rohmawati, L., Sholicha, S.P., Holisa, S., Setyarsih, W. 2019. Identification of phase CaCO<sub>3</sub>/MgO in Bangkalan dolomite sand as an antibacterial substance. *Journal of Physics: Conference Series*. 1417, 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1417/1/012001
- Santos, G.G., Crovace, M.C., Zanotto, E.D. 2019. New engineered stones: Development and characterization of mineral-glass composites. *Composite Part B*. 167, 556-565. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.010
- Sarıışık, G., Özkan, E., Kundak, E., Akdaş, H. 2016. Classification of parameters affecting impact resistance of natural stones. *Journal of Testing and Evaluation*. 44(4): 1650-1660. DOI: 10.1520/JTE20140276
- Tunç, S. 2021. The investigation of the use of marble plant wastes in composite slab production. M.Sc. Thesis. Muğla Sıtkı Koçman University.
- Tuttle, O.F., Harker, R.I. 1957. Synthesis of spurrite and the reaction wollastonite+calcite  $\rightleftharpoons$  spurrite+carbon dioxide. *American Journal of Science*. 255(3), 226-234. DOI: 10.2475/ajs.255.3.226
- Velázquez, A.L.C., Menéndez-Aguado, J.M., Brown, R.L. 2008. Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. *Powder Technology*, 182(1), 113-115. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.05.027
- Witoon, T. 2011. Characterization of calcium oxide derived from waste eggshell and its application as CO<sub>2</sub> sorbent. *Ceramics International*. 37(8), 3291-3298. DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.05.125
- Zadov, A.E., Gazeev, V.M., Pertsev, N.N., Gurbanov, A.G., Yamnova, N.A., Gobechiya, E.R., Chukanov, N.V. 2008. Discovery and investigation of a natural analog of calcio-olivine ( $\gamma$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>). *Doklady Earth Science*. 423A(9), 1431-1434. DOI: 10.1134/S1028334X08090237





Original Research / Orijinal Araştırma

## Dredging technology of placer deposits in the far north

*Uzak kuzeydeki plaser tabakalarının tarama teknolojisi*

Ravil Z. Nafikov<sup>a\*</sup>, Victor E. Kislyakov<sup>a,\*\*</sup>, Aleksandr K. Kirsanov<sup>a,\*\*\*</sup>,  
Ekaterina V. Shevnina<sup>a,\*\*\*\*</sup>, Anastasiya O. Ivanchuk<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>, Pavel V. Katyshev<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>, Umardzhon R. Teshayev<sup>b,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Siberian Federal University, 95 Krasnoyarskiy Rabochiy Avenue, Krasnoyarsk, RUSSIA

<sup>b</sup> Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, TAJIKISTAN

Geliş-Received: 18 Kasım - November 2021 \* Kabul - Accepted: 18 Şubat - February 2022

### A B S T R A C T

The authors consider the problem of reducing the dredge performance when operating at subzero air temperatures. This problem is particularly relevant for deposits located in the Far North, where the dredging season is limited by climatic conditions. During the period of subzero air temperatures dredge performance decreases significantly due to the icing of dredge structure. In consequence, dredging operations are terminated until the occurrence of favorable conditions for work. In this regard, the authors propose a method for isolating the open-pit mine with a hangar made of contemporary construction materials. Cellular polycarbonate, which has several advantages, was chosen as the most promising material for insulating dredging works. The article offers the technical and technological solutions for the proposed method of extending the dredging season. The costs of a dredge hangar for dredges of different sizes and the annual cost of its movement are calculated. A method has been developed for determining the optimal maneuvering angle of the dredge and the width of the single face, whose values depend on the type of dredge and the gold content in the sand. The areas of dredge hangars are determined by the graphical-analytic method. The article presents an example of the air temperature dynamics in a dredge hangar during the year, as well as determines the duration of the mining season.

**Keywords:** Placer deposit, Placer gold, Dredge, Mining season, Dredging hangar, Winter season, Far North, Productivity

### Introduction

Currently, one of the most promising areas in the mining industry of most countries is the extraction of gold, whose significant reserves are contained in placer deposits. The occurrence conditions of such deposits make it possible to effectively apply relatively simple technologies. The dredging method has the highest technical and economic indicators in the development of placer mineral deposits, which has several advantages, such as high productivity, minimum cost, and the possibility of implementing in complex hydrogeological conditions (Zhuravlev, 2018; Yershov, 2010; Belov, 2011; Talgamer and Chemezov, 2012; Garnett, 2015; Zhang et al., 2019; Ryzhov, 2020; Kashirtseva, 2019; Rafkatovich and Mironova, 2018).

A significant part of the world's placer reserves is located in northern latitudes with severe climatic conditions. At that, the ambient air temperature is one of the main factors affecting the duration of the mining season during the dredge development of deposits. At subzero air temperatures water freezes in the section, as well as the rock freezes on the scoops and the dredge scooping frame, which leads to a decrease in daily productivity (Rafkatovich and Mironova, 2018; Kostromin, Yurgenson and Pozlutko, 2007; Nurok, 1970; Shorokhov, 1973). It is possible to increase the dredging productivity in the Far North conditions by using floating foams, ice-cutting machines, using the heat of deep waters of reservoirs, water circulation in the bottom water area, changing the chemical composition of water, and others. But

\* Corresponding author: ravil.z.nafikov@yandex.ru • <https://orcid.org/0000-0003-3969-5332>

\*\* ve.kislyakov@mail.ru • <https://orcid.org/0000-0003-3263-1256>

\*\*\* Kirsanov.A.K@yandex.ru • <https://orcid.org/0000-0002-0365-3379>

\*\*\*\* Shevnina.E.V@yandex.ru • <https://orcid.org/0000-0002-7374-9341>

\*\*\*\*\* Ivanchuk.A.O@yandex.ru • <https://orcid.org/0000-0003-4267-8568>

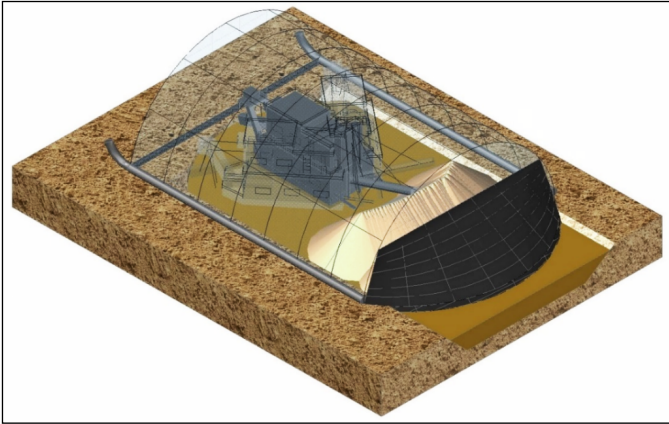
\*\*\*\*\* Katyshev.P.V@yandex.ru • <https://orcid.org/0000-0002-2417-7658>

\*\*\*\*\* Teshayev.U.R@yandex.ru • <https://orcid.org/0000-0001-9318-6147>

practice shows that all of the above methods are not widely used due to high economic and energy costs, labor intensity, and environmental damage.

The most promising method of extending the dredging season is a proposed method of isolating the dredge section against the effects of subzero temperatures with a hangar made of contemporary construction materials (Shorokhov, 1973; Kislyakov and Nafikov, 2016; Kislyakov et al., 2017; 2018) (Figure 1). One of these materials is cellular polycarbonate having several advantages. At that, the frame of the hangar should be designed using metal structures to strengthen its structure.

The hangar surface should be sprayed with transparent hydrophobic compositions that have the cryophobic property, i.e. the ability to prevent ice and snow from freezing to them.



**Figure 1.** Schematic diagram of isolating the dredge section by the hangar during the field development throughout subzero temperatures

The hangar is mounted on a metal sled to allow it to be transported using mining equipment, such as a bulldozer. The lower part of the hangar on the side of the dredge stacker must be made in the form of folding rubber sheets. In the course of moving the canvas affected by the weight will lean on the dumps and move along them, excluding heat losses from the hangar. The height of the canvases attachment is determined based on the maximum height of the dumps under certain conditions and is adjusted during the entire period using the hangar. The front part of the hangar is also equipped with rubber sheets, whose height should be equal to the height of the sled. Thus, the safe operation of the hangar during its transportation is provided.

To allow workers to enter the hangar, as well as for the delivery of goods to the dredge, the hangar is equipped with a door, which is located in its front part at the location of the dredge ramp. All the necessary materials (especially large-sized and heavy enough) are brought to the dredge whenever appropriate before the installation of the hangar structure. After isolation, the passage of transport inside the hangar is excluded, while the delivery of materials should be carried out manually. At that, the distance to the dredge will be only 5-10 meters depending on particular conditions. One can use a crane mounted on the front mast of the dredge.

The air temperature inside the hangar allows maintaining the section in a non-freezing state. If it is necessary to clean the section from ice and sludge, one can use winches installed on the dredge with a loading device in the form of a grid. One can also use a crane with a loop as an ice grab, located on the front mast. The ice can be removed with the dredge itself, namely, using scoops. The ice is removed through the barrel and stacker into the dumps. For small volumes of ice and sludge, one can use manual cleaning.

The turns of the pile dredgers are carried out using side ropes that are passed through the shore rollers, which reduces their wear when moving on the placer surface, and also reduces the load on the winch engine. In turn, the rollers are attached to the shore through the drawbar. According to the proposed technology, shore rollers should be installed behind the hangar perimeter close to it, then the exposed areas in the hangar structure are minimized. It is necessary to fix the roller on two or three braces, which allows preventing its movement when turning the dredge.

The excavating of rocks in the vertical plane can be done either layer-by-layer or working of the face from the bottom or the intermediate horizon by sub-working the ledge and then excavating the collapsed rock. In the latter case, the rock slide can affect the stability of the hangar, so it is necessary to use only a layer-by-layer excavation. At that, it provides the best conditions and performance of the dredge.

The proposed technology provides that in the summer season, mining operations are carried out according to any development system. At the same time, the landfills intended for winter mining are opened. Next, the prepared area is protected from freezing. To date, there are many ways of such protecting, for example, laying thermal-insulating coverings, flooding of prepared sites, and others. The most economical type is autumn loosening of the soil.

Also during this period, a sump tank should be prepared next to the site intended for winter mining. The sump serves as an additional source of water supply to the dredge section during the period of stable subzero ambient air temperatures. When calculating the sump volume, one should be guided by the necessary inflow of water into the dredge section, which is about 50-200 l/s for different dredge models. It is also recommended to take into account the thickness of the ice cover in winter.

By the time of the onset of late autumn, the dredge should be approached the prepared area. During this period, the installation of the hangar is carried out. For the rational use of working time, it is recommended to combine repair works on the dredge with the installation of the hangar. The average duration of major repairs on dredges is 30-60 days. To reduce it, it is recommended to carry out work in three shifts, which will allow completing the repair in 10 days. After the completion of the auxiliary work, the prepared area is worked out while mining and processing operations, as well as dump formation in the winter period are carried out inside the hangar.

When applying the proposed technology, it is recommended to plan the works so that one excavation site provides production throughout the winter, which will eliminate the reversals of the dredge and hangar. In this case, the scheme of operation is simplified, while the cost of dredging and preparatory work will be significantly reduced. Therefore, with the proposed technology, it is not advisable to use longitudinal and adjacent development systems. In cases where a turn of the dredge and the hangar is intended for working out the face in mutually opposite directions, it is recommended that the dump formation be carried out on the outer side of the section, which facilitates the installation of the hangar after the turn of the dredge.

## 1. Research methods

To determine the parameters of the hangar, it is necessary to determine the maneuvering angle and the width of the single dredge face. Consider the possibility of calculating these parameters using the following known formulas:

$$\beta = 18,7 \cdot \sqrt[3]{10^6 \cdot \frac{v_{lm}}{k_c \cdot R} \cdot (t_1 + k_c \cdot t_2)}, \text{ degrees} \quad (1)$$



$$B = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\beta}{2}, m \tag{2}$$

where is the lateral movement speed of the dredge along the face, m/s;  $k_c$  is the number of removed rock layers during the layer-by-layer mining of one face; R is the radius of dredge scooping, m;  $t_1$  is the time required for one step, h;  $t_2$  is the downtime of the dredge in the corners of the face when moving to the excavation of the underlying rock layer, h (Leshkov, 1985).

However, when using the proposed technology, the above formulas do not consider the cost of the hangar, its change at different angles of maneuvering of the dredge, and the gold content in the sand. Therefore, the optimal width of a single dredge face will be carried out using the method presented below.

Let's consider how the dredge performance will change when using the proposed technology:

$$Q_q = \frac{60 \cdot n \cdot E}{K_p} \cdot K_s, m^3/h \tag{3}$$

where n is the speed of the scooping chain, scoops/min;  $K_p$  is the swell factor of rocks;  $K_s$  is the average fill factor of scoops with rock.

The fill factor of scoops with rock depends more on the angle of the dredge maneuvering. Thus, at an angle of 60 degrees, the fill factor is 0.95, while at an angle of 140 degrees, it decreases to 0.77.

The average annual dredge performance is determined by the equation:

$$Q_{year} = 24 \cdot Q_s \cdot K_u \cdot T, m^3/year \tag{4}$$

where  $K_u$  is the labor utilization rate.

Using the formulas presented above, one can calculate the performance of dredges of different standard sizes at the traditional technology of field development and the proposed one.

Knowing the annual performance, it is possible to determine the profit of the enterprise (part of the results is shown graphically below). The calculations will require knowing the gold content in the sands and the cost of mining operations.

When applying the proposed technology, it is also necessary to take into account the cost of the hangar and the annual cost of its movement (Figures 2, 3). The cost of the hangar includes the cost of polycarbonate, metal pipes, sleds, and installation of the structure.

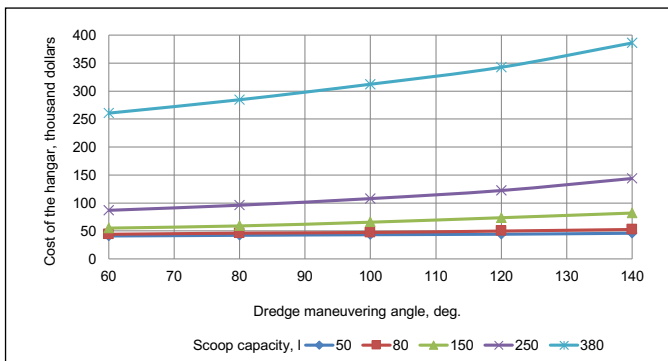


Figure 2. Cost of the hangar depending on the type of dredge and maneuvering angle

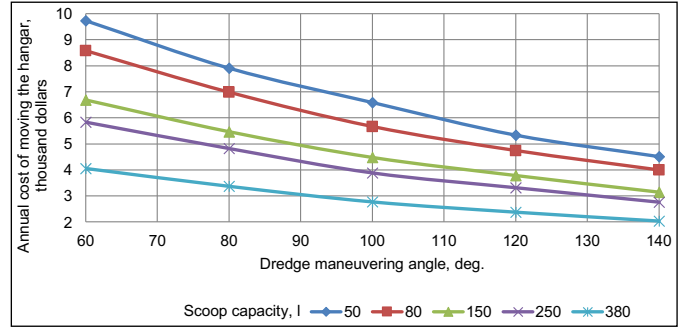


Figure 3. Annual costs for moving the hangar for different dredge maneuvering angles

2. Results

Next, the difference in net profit at traditional and proposed technology is determined for different size dredges, different maneuvering angles, and gold content in the sand. As an example, Figure 4 shows the increase in profit when operating a 250-liter dredge employing the proposed technology. Here horizontal lines show the cost of the hangar. The presented results are obtained at a gold content in the sand equal to 0.1 g/m<sup>3</sup>.

While plotting the graphs, equations of the form C=m·T were obtained, where C is the profit in million rubles obtained when using the proposed technology, m is the coefficient depending on the type of dredge, and the maneuvering angle; T is the payback period in years.

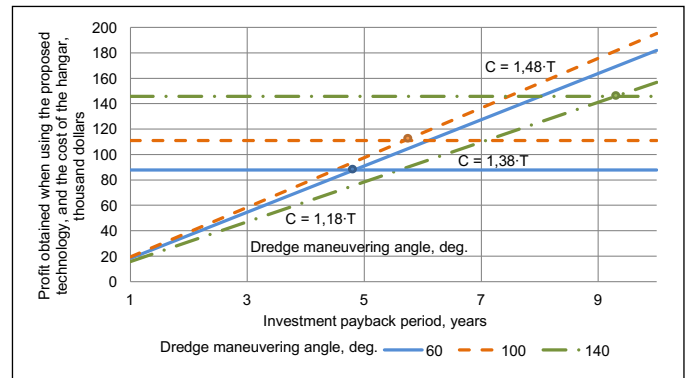


Figure 4. Profit and cost of a hangar for a 250-liter dredge at gold content in the sand equal to 0.1 g/m<sup>3</sup>

Knowing the profit and the coefficient m, the payback period of the investment was found for different dredge maneuvering angles. Based on the obtained values, a curve is constructed whose equation most accurately describes the location of the values on the graph (Figure 5). The point corresponding to the shortest payback period is the most advantageous, and the corresponding dredge maneuvering angle is the most optimal.

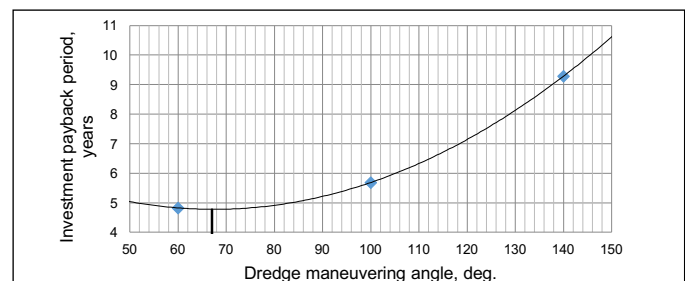


Figure 5. Dependence of the payback period for a 250-liter dredge on the maneuvering angle at a gold content in the sand of 0.1 g/m<sup>3</sup>

Thus, when using the proposed technology with a 250-liter dredge at a gold content of 0.1 g/m<sup>3</sup>, the optimal dredging angle is 67 degrees. The optimal dredging angles for other mining conditions are shown graphically in Figure 6.

Next, the optimal width of a single front bank is determined according to the known dependence (2). The calculated data, as well as the resulting equations, are presented in Figure 7.

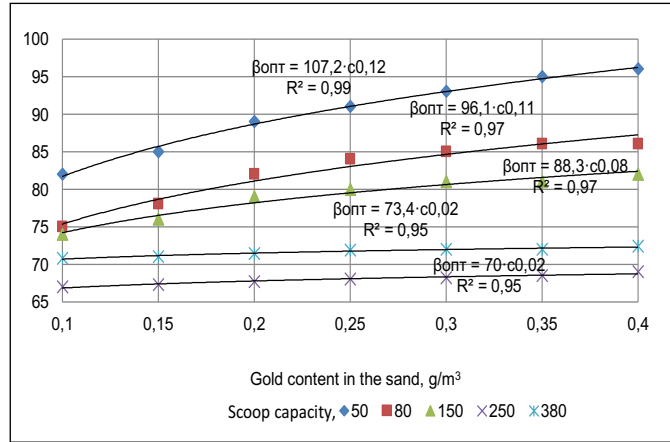


Figure 6. Optimal maneuvering angles depending on the dredge type and the gold content in the sand

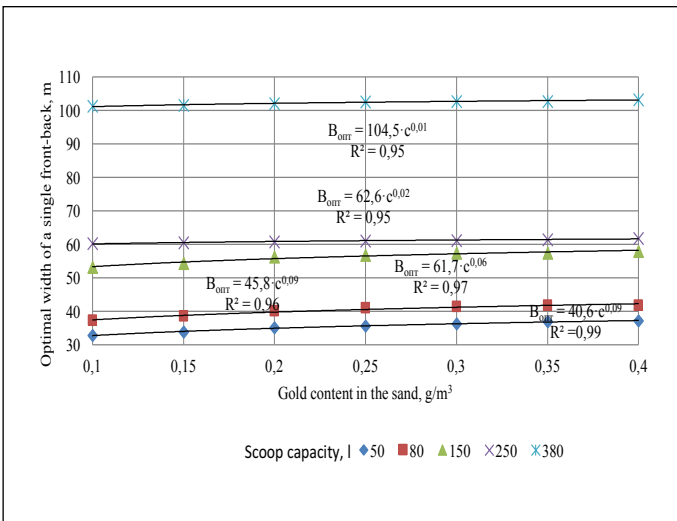


Figure 7. Optimal width of a single front bank depending on the dredge type and the gold content in the sand

When using the technology to isolate the dredge section from the effects of subzero temperatures, it is necessary to solve the following problem. On the one hand, it is necessary to ensure the safe maneuvering of the dredge in the hangar, while on the other hand, to create a hangar with the minimum possible size to reduce the capital costs of its construction.

The hangar area can be determined based on the graph analytic method and using the known optimal width of a single front bank. According to the calculated values of the face width, one can build hangars for the dredging of different models employing the AutoCAD software. At that, the safe gap on each side equal to 0.5 m should be taken into account, assuming a one-step movement of the dredge within the hangar, which is an economically feasible option.

The results are shown in Figure 8.

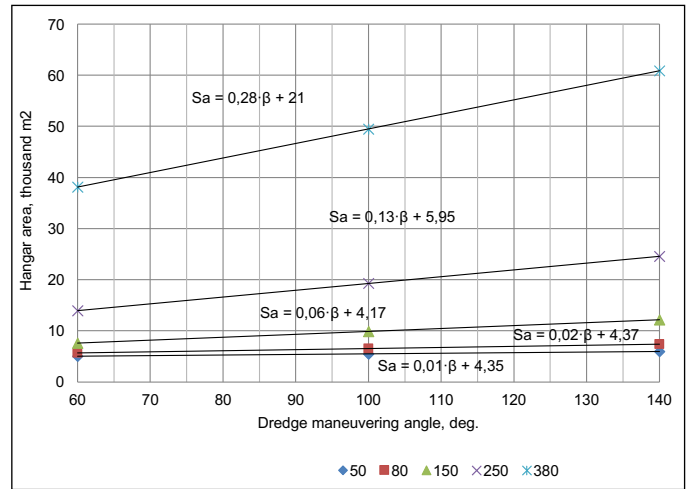


Figure 8. Hangar area for different types of dredgers at different maneuvering angles

### 3. Discussion

Below is considered the change in the annual performance of dredging when applying the proposed technology for dredge isolating. As an example, a conditional field located in the Far North is considered whose development is carried out using a 250-liter dredge. The insulating material for the hangar is 10 mm thick polycarbonate with a light transmission coefficient of 0.75.

Figure 9 shows the calculated data of the annual air temperature dynamics in the dredge hangar. At that, it should be noted that the installation of the hangar is recommended in the fall when the ambient air temperature is below the water temperature in the dredge open cast. This allows using the heat released from the open cast water in the dredge hangar with maximum efficiency. Thus, in the area under consideration, the installation of the hangar must be carried out on September 15.

The hangar must be dismantled when a stable above-zero ambient temperature occurs, or when it exceeds the air temperature inside the dredge hangar. In the current case, the date of the dismantling of the hangar is April 24.

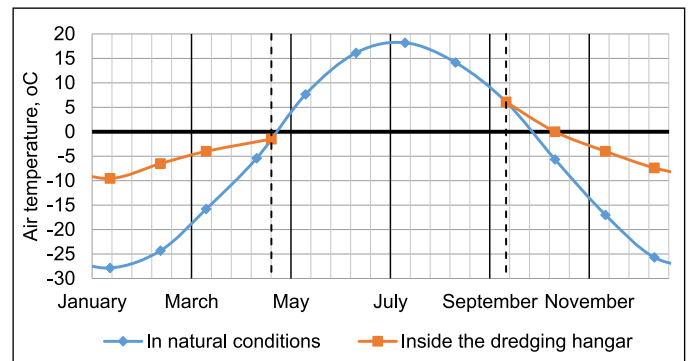
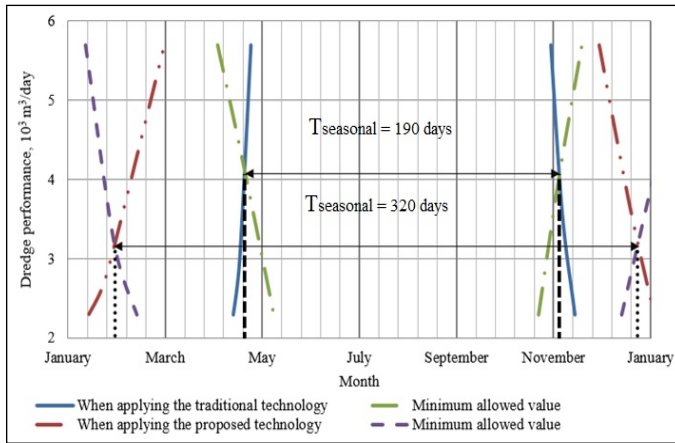


Figure 9. Example of annual air temperature dynamics

Next, the change in the duration of the dredging season when using the proposed technology is estimated. In all cases, the dredging season is limited to the period when the daily performance of the dredge is greater than the minimum allowable performance. The conducted calculations have shown that when the proposed technology is applied at the considered conditional field, the duration of the dredge season increases by 130 days (Figure 10).



**Figure 10.** Example of determining the rational duration of the dredging season

## Conclusion

Similar studies were carried out for dredgers of different models employed for the development of deposits in the region of 50-70 degrees north latitude. The conducted calculations revealed that the duration of the dredging season increased on average by 100-150 days. In all cases, the annual dredge performance was also significantly increased, which allowed recouping the costs of the hangar and other needs of the enterprise.

For example, when implementing the proposed technology in a field located in the region of 60 degrees north latitude and employing a 250-liter dredge, the total annual economic effect was about 130 thousand dollars.

During the survey, it was also revealed that this method of extending the dredging season in comparison with others has several advantages, such as the possibility of uninterrupted operation at stable subzero temperatures, as well as low cost, and no need for annual capital investments to extend the dredging season, as well as ease of operation.

It should be noted that the isolation of mine workings against the effects of subzero temperatures is possible not only by employing the dredging method of mining but also by using other methods of developing placer deposits characterized by a high degree of the water content of the deposit. Thus, today, the presented technology is one of the most promising areas in the mining industry.

## Acknowledgments

The work in this area is supported by the Krasnoyarsk Regional Science Foundation for projects of applied scientific research and experimental developments carried out by undergraduates and postgraduates to ensure the sustainable development of the Arctic and the Far North.

## References

- Belov, S. V. 2011. Technogenic gold deposits: state and development prospects. *Gold Mining Industry*. 4, 14-21.
- Garnett, R. H. T. 2015. Graphical representation of production results versus estimates in placer mining. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy Section B: Applied Earth Science*. 124(3), 175-190.
- Kashirtseva, A. P. 2019. Evaluation of capital expenditures at different stages of implementation of investment projects of gold mining enterprises. *Modern Economy Success (International Scientific Research Journal)*. 2, 79-82.
- Kislyakov, V. E. and Nafikov, R. Z. 2016. Parameters of the insulating structure at dredging at subzero temperatures. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*. 2, 95-101.
- Kislyakov, V. E., Nafikov, R. Z., Vokin, V. N. and Bakhtiguzin, A. A. 2017. Investigation of heat transfer in the isolated space of the dredge section. *Achievements of Modern Natural Science*. 8, 89-93.
- Kislyakov, V. E., Nafikov, R. Z., Vokin, V. N., Veretenova, T. A. and Bakhtiguzin, A. A. 2018. Temperature regime of water in the dredge cross-section during the development of frozen soils. *Achievements of Modern Natural Science*. 12-2, 353-357.
- Kostromin, M. V., Yurgenson, G. A. and Pozlutko, S. G. 2007. *Problems of dredge development of continental placers*. Novosibirsk: Nauka, 180 p.
- Leshkov, V. G. 1985. *Development of placer deposits*. Moscow: Nedra, 568 p.
- Nurok, G. A. 1970. *Hydro-mechanization of open-pit developments*. Moscow: Nedra, 584 p.
- Rafkatovich, A. K. and Mironova, K. V. 2018. Methods for the reduction of loss and optimization processes of open-pit mining operations when mining man-made deposits formed by sections. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 13(7), 1624-1631.
- Ryzhov, S. V. 2020. Substantiation of the production capacity structure of a gold mining enterprise at various stages of the open-pit mining development of operations. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*. 1, 458-470.
- Shorokhov, S. M. 1973. *Technology and complex mechanization of the placer deposits development*. Moscow: Nedra, 766 p.
- Talgamer, B. L. and Chemezov, V. V. 2012. Assessment of technogenic placers and methods for determining their stocks. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University (IrGTU)*. 12(71), 126-130.
- Yershov, V. A. 2010. Purposeful transformation of placer deposits in dredging. *Mining Industry*. 5, 70-72.
- Zhang, T., Dong, Y., Yang, C., Guan, Q. and Gao, J. 2019. Bedrock samples from the Chukchi borderland, arctic ocean-first Chinese dredge in the polar regions. *Acta Oceanologica Sinica*. 38(11), 162-164.
- Zhuravlev, V. V. 2018. Improving the strategic management model of gold-mining enterprises in Russia in the context of unstable economic development. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and Management*. 2, 145-154.







Orjinal Araştırma / Original Research

### TTK'da uygulanan ön gerilmeli ahşap domuzdamı sistemi

*The system of pneumatic pre-stressed timber crib applied in TTK*

Esma Hacer Evkaya<sup>a,\*</sup>, Erdoğan Kaymakçı<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> Türkiye Taşkömürü Kurumu, Zonguldak TÜRKİYE

<sup>b</sup> Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği, Zonguldak, TÜRKİYE

Geliş-Received: 1 September/Eylül 2021 \* Kabul - Accepted: 1 December/Aralık 2021

ÖZ

Bu çalışmada Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK)'da ahşap domuzdamı sistemine alternatif olarak geliştirilen ve 2007 yılında kullanılmaya başlanan Ön Gerilmeli Ahşap Domuzdamı (ÖGADD) sistemi incelenmiştir. Yeni bir tasarım ve ayak içi tahkimatı olan bu sistem 2007 yılında "Mehmet Kemal Dedeman Araştırma ve Geliştirme Proje Yarışması"nda ödül almıştır. Sistemin irdelenmesi amacıyla yapılan kişisel görüşmeler ve yerinde yapılan inceleme ve gözlemler ışığında; domuzdamlarının sökümlerinin ahşap tahkimat sistemine göre daha kısa sürede gerçekleştirildiği, tavan ve taban taşlarının sağlam olması ve ayrıca ayak ilerleme hızının yüksek olması koşuluyla sistemin istenilen performansı sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Sistemin en önemli parçası olan hava yastıklarında meydana gelen sorunlar ve yeraltında bir ayakta domuzdamlarına gelen yükler incelenmiştir. Ayrıca sistemin bir diğer elemanı olan hazır ahşap domuzdamı malzemeleri hakkında incelemeler yapılmıştır.

**Ahatar Sözcükler:** Domuzdamı, Hava yastığı, Uzunayak madenciliği, Tahkimat, Ön gerilme

ABSTRACT

In this paper, Pre-Stressed Timber Crib Project developed as an alternative to classical timber crib and started to be applied in 2007 in TTK (Turkish Hard Coal Enterprise) was examined. This system, which has a new design and in-face supporting, was awarded in the "Mehmet Kemal Dedeman Research and Development Project Competition in 2007. In the light of on-site examinations and observations and the interviews with relevant workers in TTK for the purpose of the investigate of PPTC (Pneumatic Pre-Stressed Timber Crib) system in TTK; it was concluded that dismantling stages of timber cribs were performed in a shorter time compared to the timer crib system and also, the system would provide the desired performance providing that the roof and floor rock were solid and the digging speed was speed. Problems occurred in the lifting bag, most important part of the system, and the loads on the timber cribs on a coal production face were examined. In additionally, analyzes were made about timber crib materials which are another element of the PPTC system.

**Keywords:** Timber crib, Lifting bag, Longwall mining, Roof support, Pre stress

### Giriş

Yeraltı kömür madenciliğinde geniş bir uygulama alanı olan uzunayak üretim yöntemi, Türkiye Taşkömürü Kurumunda hemen hemen bütün panolarda uygulanmaktadır. Kurumda uzunayak üretim yöntemi genellikle dönümlü, ancak bazen de ilerletimli olarak da gerçekleştirilmektedir. Tahkimat sistemi olarak genelde ahşap kullanılmaktadır. Ama hidrolik direk-çelik sarma tahkimat sistemi de uygulama alanına sahiptir.

Son dönemlerde gerek üretim miktarını artırmak gerekse işçi eksikliğinden kaynaklanan sorunları çözmek amacıyla mekanizasyona geçiş çalışmaları hız kazanmıştır. Buna bağlı olarak yürüyen tahkimat ünitelerinin kullanıldığı, kazı işleminin ise klasik yöntemlerle yapıldığı yarı veya esnek mekanize olarak adlandırılan sistem uygulanmaya başlamıştır. Amasra ve Karadon Taşkömürü İşletme Müesseselerinde tam mekanize kazı sistemi de uygulama alanı bulmuştur.

\* Corresponding author / Sorumlu yazar: eevkaya@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-9752-5924>

\*\* kaymakci@beun.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-3337-141X>

Çalışmanın ana konusu olan “domuzdamları” yeraltında uzun ayak tahkimat sistemlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Genellikle ayak arkasını göçertmek için kullanılmakla birlikte yeraltında çeşitli açıklıkların tahkimi sırasında yüksek yük taşıma kapasiteleri nedeniyle domuzdamları önemli rol oynamaktadır. TTK’da yaygın bir şekilde uzun ayak üretim sistemi, arına paralel ahşap tahkimat şeklinde uygulanmakta olup bu sistemde; ayak arkasını göçertmek için arına paralel domuzdamları, sıkırtma takozları ile tavana iyice sıkıştırılarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; TTK’da ahşap domuzdamı sistemine alternatif olarak geliştirilen ve yaklaşık 12 yıldır kullanılan Ön Gerilmeli Ahşap Domuzdamı sisteminin uygulanabilirliği hakkında araştırmalar yapılmasıdır. Araştırma sonucunda elde edilen veriler ışığında sistemin avantaj ve dezavantajlarını tespit edip madencilik sektörüne sağlayacağı katkılar sunulmuştur.

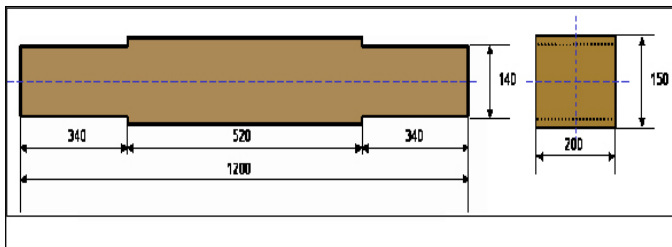
## 1. Ön gerilmeli ahşap domuzdamı tahkimat sistemi

ÖGADD sisteminin AR-GE çalışmalarına 2004 yılında başlanmıştır; yaklaşık iki buçuk yıl sonra sistem son halini almıştır. AR-GE çalışmaları esnasında ön gerilme elemanının (hava yastığı) teknik özelliklerine, sistem ile birlikte kullanılacak ahşap domuzdamı malzemesinin boyutlarına ve mekanik özelliklerine karar verilmiştir. Sistem TTK’da 2007 yılında uygulanmaya başlanmıştır.

ÖGADD sistemi; mukavemeti yüksek ve standart boyutlara sahip ahşap domuzdamı, hava yastığı ve manometreden oluşmaktadır. ÖGADD sistemini oluşturan birimler aşağıda sırasıyla anlatılmıştır.

### 1.1. Hazır ahşap domuzdamı (HDD) malzemesinin boyutları ve mekanik özellikleri

Havzada uzun yıllar boyunca domuzdamı malzemesi olarak kayın ve meşe cinsi ağaçlar kullanılmaktadır. ÖGADD sisteminde kullanılan HDD malzemesi de kesme (makaslama) ve eğilme direnci yüksek kayın ve meşe cinsi ağaçlardan temin edilmektedir. HDD malzemesinin dizim kolaylığı ve meyilli ayaklarda kaymayı önlemek amacıyla çintili olmasına karar verilmiştir. Çintiler malzemenin iki ucundan 340 mm içeriye doğru ve kalınlığı 5 mm olacak şekilde hazırlanmaktadır. Sistemde kullanılan HDD malzemesinin boyutları Şekil 1’de verilmiştir.

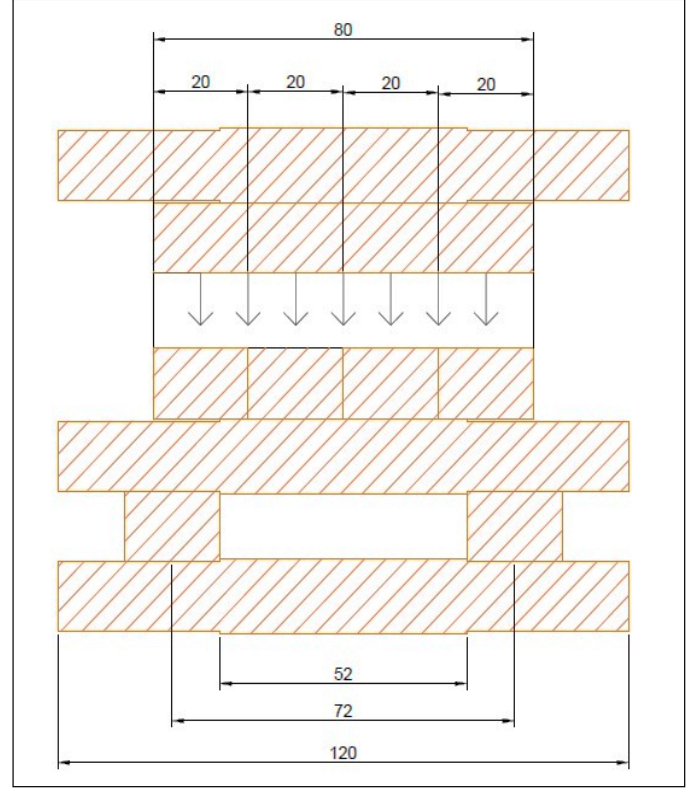


Şekil 1. HDD boyutları (mm) (Dağdelen vd. 2007a)

### Çizelge 1. Vetter marka hava yastıklarının modellerine göre teknik özellikler (Dağdelen vd. 2007b)

	V 10	V 12	V 18	V 20	V 24	V 31	V 40	V 54	V 68
Kal. Kuv. (kN)	94	118	174	190	235	308	388	533	664
Mak. Kal. Yüksekliği (cm)	20,3	20	27	28	30,6	37	40,2	47,8	52
EnxBoy (cm <sup>2</sup> )	37 X 37	32 X 52	47 X 52	48 X 58	52X62	65 X 69	78 X 69	86 X 86	95 X 95

Bunun dışında TTK, özel ocak koşulları ve Müessese talepleri doğrultusunda 1,20 m çintisiz, 1,00 m çintili, 1,15 m çintisiz ahşap domuzdamı malzemesi de tedarik etmektedir. Şekil 2’de ise HDD’leri kullanarak kurulan hava yastıklı domuzdamı sistemi gösterilmiştir.

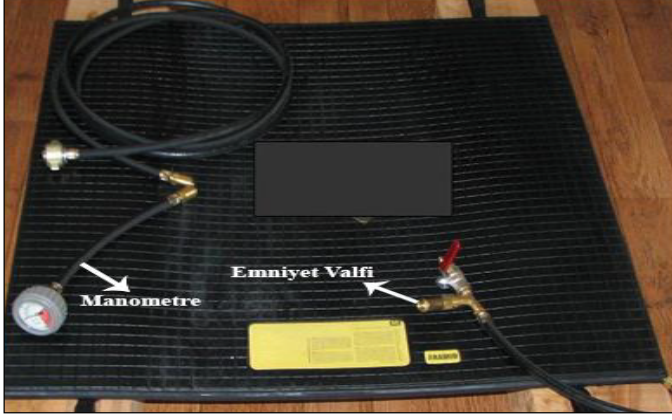


Şekil 2. ÖGADD sistemi ve boyutları (mm)

### 1.2. Hava yastığı

Hava yastıkları yer üstünde otomobilden büyük yük araçlarına kadar, devrilen araçların düzeltilmesi veya kaldırılması, ağır taş blokların kaldırılması, mermer bloklarının devrilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Hava yastıkları; yer altı koşullarına uyum sağlayabilecek esneklikte ve hafif olmalarının yanı sıra yük taşıma kapasitelerinin yüksek olmasından dolayı yeni tahkimat sistemine dâhil edilmiştir.

Sistemin en önemli parçası olan hava yastıklarının tespitinde farklı tip ve boyutlarda yastıklar denenmiş olup yeraltı koşullarına ve tavan basıncına uygun ayrıca sistemin bir bütün olarak çalışabilmesine imkan sağlayacak bir model seçilmiştir. TTK’ya ilk alınan Vetter marka hava yastıklarına ait teknik bilgiler Çizelge 1’de verilmiş olup bunlar içerisinde “Aramid” katkı doku ile kuvvetlendirilmiş V68 tipi seçilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Vetter marka V 68 tipi hava yastığının görünümü (Dağdelen vd. 2007a)

TTK'da 2007 yılından itibaren üç farklı tipte hava yastığı kullanılmıştır. Kullanılan hava yastıklarının marka ve modelleri ile teknik özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. TTK'da kullanılan hava yastıklarının teknik özellikleri (TTK 2019-4)

Marka	Vetter	Sava	Çağ-Tek
Ürün Kodu	V 68	SLK64/51	LB 8620
Boyut (cmxcm)	95x95	91x91	95x95
Maksimum Kaldırma Kuvveti (kN)	664	646	845
Maksimum Kaldırma Yüksekliği (cm)	52	51	53
Maksimum Çalışma Basıncı (bar)	8	8	10
Deney Basıncı (bar)	12		15
Minimum patlama basıncı (bar)	32	>32,5	>40
Kalınlık (cm)	2,5	3	2,4
Normal İç Hacim (lt)	161,9	161,9	174,5
Ağırlık (kg)	21,9	25,3	27

### 1.3. Manometre

ÖGADD sisteminde hava yastıklarına bağlanabilen manometre (Şekil 4) yardımıyla domuzdamlarına gelen basınç değeri ölçülebilmektedir. Manometreden okunan basınç değerleri ile domuzdamının zorlanma değerleri hesaplanabilmektedir. Ayrıca ayak içerisindeki ortalama yük yoğunluğunun hesaplanmasına da katkı sağlamaktadır.



Şekil 4. Basınç ölçümünde kullanılan manometre (Dağdelen vd. 2009)

## 2. TTK Karadon TİM (Taşkömürü İşletme Müessesesi) ÖGADD sisteminin incelenmesi

Bu bölümde TTK Karadon Müessesesi Gelik İşletme Müdürlüğü 1. Ocak tarafından üretim faaliyetlerinin sürdürüldüğü -260/-360 kotları arasında bulunan Acılık Doğu Ayakta kullanılan ÖGADD sisteminde yapılan incelemelere yer verilmiştir.

### 2.1. Gelik işletme müdürlüğünde uygulanan mevcut ayak içi tahkimat üniteleri

Ayakta uygulanan ahşap tahkimat, arına paralel sarmalar ve bu sarmaları tavanda tutan çatal direkler, domuzdamları ve kama gibi tahkimat elemanlarından oluşmaktadır.

Ayak tahkimatında kullanılan sarmalar çam cinsi ağaçlardan meydana gelmektedir. Uzunlukları 400 cm, çapları 18-22 cm arasında olmaktadır.

Tavandan gelebilecek herhangi bir tavan taşı vb. malzemenin engellenmesi için ayrıca bir önceki sarmadan arın sarmasına doğru kamalar yerleştirilmektedir. Tavana sürülen kama boylan 120-150 cm arasındadır ve her sarmada tavan koşullarına göre 8-10 adet kama bulunmaktadır. Tavanın aşırı akıcı olması durumunda kama sayısı artırılmaktadır.

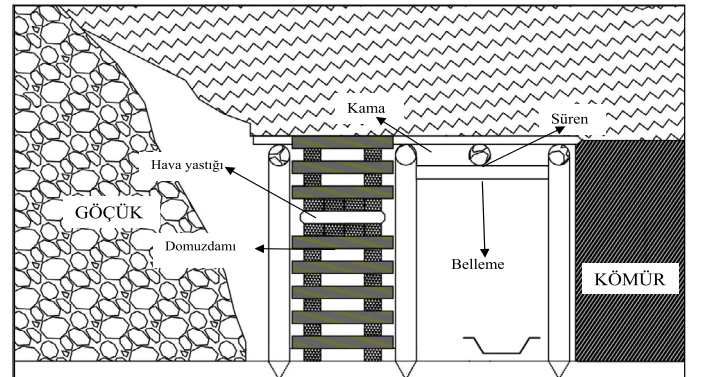
Arın havasının gerisindeki havada ahşap domuzdamı bulunmaktadır. Ahşap domuzdamları kazı işleminden sonra ayağın ilerletilmesiyle birlikte ön haveye ötelenmektedir.

Domuzdamı malzemesi kayın ve meşe cinsi ağaçlardan oluşmaktadır. Bu ağaçlar 12-20 cm arasında çaplara sahip olup direk harmanında boyları 100-120 cm uzunlukta kesilerek hazırlanmakta ve ayrıca birbirine paralel olacak şekilde iki yüzeyi hizarda kesilmektedir. Ayrıca İşletme Müdürlüğünde hava yastıklarında kullanılan, 20x20 cm kesitli ve 100-120 cm arasında uzunluğa sahip HDD malzemesi kullanılmaktadır. Ayak tahkimatının kesit görünümü Şekil 5'te verilmiştir.

### 2.1.1. Acılık doğu ayakta hava yastıklarına gelen yüklerin ölçülmesi

Karadon TİM Gelik İşletme Müdürlüğünde -260/-360 kotları arasında yer alan Acılık Doğu Panosunda kömür üretimi için hazırlanan ana başyukarı ile üst ve alt taban yolları birbirine irtibatlandırılmış ve ilerletimli uzun ayak yöntemi ile üretim yapılmaktadır.

Ayak başında, baştabandan aşağıya doğru yaklaşık ilk iki sarmada kömür üstte kaldığı için ve taban yoluna bağlantı sağlamak amacıyla tavan taşı kazılarak ilerleme yapıldığı gözlemlenmiştir. Ayakta arından kömürün boşalması nedeniyle arına kapak yapılmaktadır. Ayrıca tavanın akıcı olmasından dolayı tavanda kullanılan kama sayısı maksimum düzeyde tutulmuştur.



Şekil 5. Ayak tahkimatının kesit görünümü



İşletme Müdürlüğünde ikisi üretim biri de tahkimat vardiyası olmak üzere günde üç vardiya çalıştırılmaktadır. Tahkimat işlemleri genellikle gündüz vardiyasında yapılmakta olup ayakta domuzdamlarına gelen yüklerin ölçümü işlemi üç gün boyunca gündüz vardiyalarında gerçekleştirilmiştir. Bu üç gün içerisinde toplam altı sarmalık (24 m) kısımda üretim yapılmıştır.

Domuzdamlarına gelen yükleri belirlemek amacıyla hava yastıklarında oluşan basınç manometre yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm işlemi kalibrasyonu yapılmış basınç ölçerinin hava yastıklarının hortumuna bağlanması ile gerçekleşmiştir. Hava yastığının içerisinde oluşan basınç değeri manometreden okunarak kaydedilmiştir.

Ölçüm işlemlerine başlamadan önce ayakta bulunan sarma ve domuzdamları numaralandırılmıştır. Domuzdamlarının ayakta kesit ve plan görünümü Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Acılık Doğu ayakta ahşap tahkimat kullanılmakta olup arına paralel 55 sarma bulunmaktadır. Hava yastıklarının baştabandan aşağıya doğru ilk 25 sarmadaki domuzdamlarında kullanıldığı gözlemlenmiştir. 26. sarmaya kadar toplam 39 adet domuzdamı bulunmaktadır. İlk yedi ve 26, 27, 29 ve 30 numaralı domuzdamlarında hava yastığı kullanılmamıştır. 15, 18, 23, 28, 32, 35, 37 numaralı domuzdamlarında kullanılan hava yastıklarının havası inmiş durumdadır.

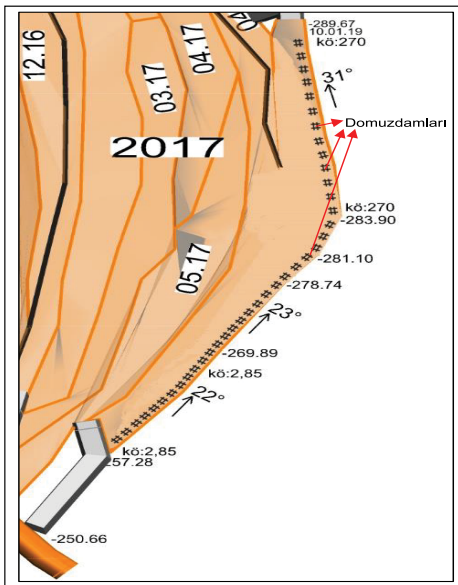
Ölçme işlemi, ayakta havası inmemiş hava yastıklarının hortum kısmına manometrenin bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Hava yastığı ile manometrenin bağlantısının yapılmasının ardından yastığın vanası açılarak yastık içerisinde oluşan basınç değeri bar cinsinden yastığa bağlı manometreden okunmuştur. Ölçüm işleminin ardından hava yastığının vanası kapatılarak bağlı haldeki manometre çözülmüştür.

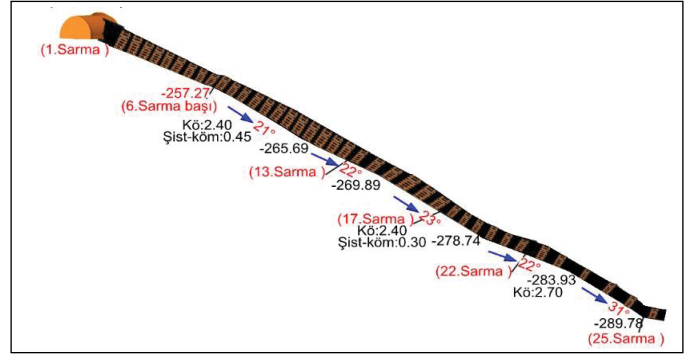
Üç gün boyunca kaydedilen değerlere göre, 0,2 bar (1,7 ton) 3,3 bar (28 ton) hava yastıklarından ölçülen minimum değer 0,2 bar (2 ton) maksimum değer ise 3 bar (28 ton) olduğu görülmüştür. Domuzdamlarına gelen maksimum, minimum ve ortalama yükler Şekil 8'de gösterilmiştir.

Ayakta domuzdamlarına gelen ortalama basınç değeri ise yaklaşık 1,3 bar (12 ton) olmuştur. Ölçüm sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

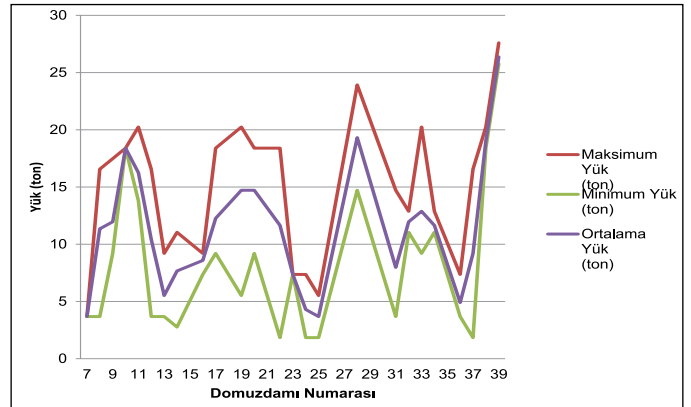
Acılık Doğu Ayakta uzun süre üretimin yapılmaması ve ayak arkasının oturmuş olmasından dolayı domuzdamlarına gelen basınçta herhangi bir artış gözlemlenmemiştir.



Şekil 6. Acılık Doğu Ayak'ta ölçüm yapılan domuzdamlarının plan görünüşü



Şekil 7. Acılık Doğu Ayak'taki ölçüm yapılan domuzdamlarının ayak kesitinde gösterimi



Şekil 8. Karadon TİM Gelik İşletme Müdürlüğü 1. Ocak Acılık Doğu Ayak; maksimum, minimum ve ortalama yük grafiği

### 3. Ön gerilme yastıklarının arıza ve kullanım dışı kalma nedenleri

Çeşitli yeraltı koşulları ve kullanım hataları nedeniyle arızalanan hava yastıkları, göçük altında kalmadığı müddetçe yerüstüne çıkarılmakta ve müesseseler bünyesinde bulunan atölyelere gönderilmektedir. Atölyelerde arızalar tespit edilip tamir edilmekte eğer tamiri mümkün değilse yastıklar kullanım dışı kalmaktadır. Hava yastıklarının yüzeyinde meydana gelen yırtıklar, yastığın hortuma bağlantı noktasının yastık tarafından kopması gibi arızalar tamir edilemediği için kullanım dışı kalmaktadır. Bunun dışında hortumlarda veya hortum bağlantı elemanlarında meydana gelen arızalar tamir edilebilecek durumdaysa tamir edilmekte veya hortum kısmı tamamen değiştirilmektedir. Hava yastıklarında yaşanan belli başlı sorunlar aşağıda verilmektedir.

#### 3.1 Hava yastıklarının sönmesi sorunu

Hava yastıklarının sönme problemi ayak ilerleme hızının düşük olmasından dolayı domuzdamlarının uzun süre ötelenememesi ve bu arada ana tavanın kırılması ve domuzdamlarına gelen yüklerin aşırı artması sonucunda meydana gelmektedir.

Sönme olayının asıl sebebi ise; hava yastıklarının patlama basıncına ulaşmasına izin verilmeden içerisinde bulunan havanın boşaltılmasını sağlayan mekanizmanın devreye girmesidir. Emniyet valfi olarak adlandırılan bu mekanizma, hava yastığının içerisindeki basınç değerinin 10 bar'a ulaşması halinde içerideki havayı boşaltmaktadır. Emniyet valfi, hava yastığının aşırı yük altında zarar görmemesi, patlayarak iş güvenliği açısından herhangi bir sorun oluşturmaması için kullanılmaktadır. Hava yastığının hortum kısmı ve emniyet valfi Şekil 9'da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Karadon T.İ.M. Gelik İşletme Müdürlüğü 1. Ocak Acılık Doğu Ayakta domuzdamlarında ölçülen yükler (ton)

Domuzdamı Numarası	1. Gün ölçülen yük (ton)	2. Gün ölçülen yük (ton)	3. Gün ölçülen yük (ton)	Domuzdamı Numarası	1. Gün ölçülen yük (ton)	2. Gün ölçülen yük (ton)	3. Gün ölçülen yük (ton)
1	-	-	-	21	*	-	*
2	-	-	-	22	2	18	15
3	-	-	-	23	*	7	*
4	-	-	-	24	2	7	4
5	-	-	-	25	6	2	*
6	-	-	-	26	-	-	-
7	-	-	4	27	-	-	-
8	4	17	14	28	*	24	15
9	17	9	9	29	-	-	-
10	18	18	18	30	-	-	-
11	14	20	15	31	4	15	6
12	4	17	11	32	*	13	11
13	4	4	9	33	20	9	9
14	9	11	3	34	13	11	11
15	*	*	*	35	*	*	-
16	9	9	7	36	4	7	4
17	9	18	9	37	*	17	2
18	*	*	*	38	20	18	18
19	6	20	18	39	26	28	26
20	9	18	17				

Çizelgede "-" işaretiyle gösterilen yerlerde hava yastıkları bulunmamakta ve "\*" ile gösterilen yerlerde bulunan hava yastıklarının havaları inmiş haldedir.

**Şekil 9.** Hava yastığı hortum kısmı ve emniyet valfi

Sönme hareketinin bir diğer nedeni hortum bağlantı parçalarının sızdırmazlığı sağlayamamasıdır. 2007 ve 2009 yıllarında alınan tüm yastıklarda en önemli arıza sebebi hortum kısmı olmuştur. Bu sorunlar gerek kullanıcı olan işçilerden gerek ocak içi çalışma şartlarından ve gerekse üretici firmadan kaynaklanmaktadır.

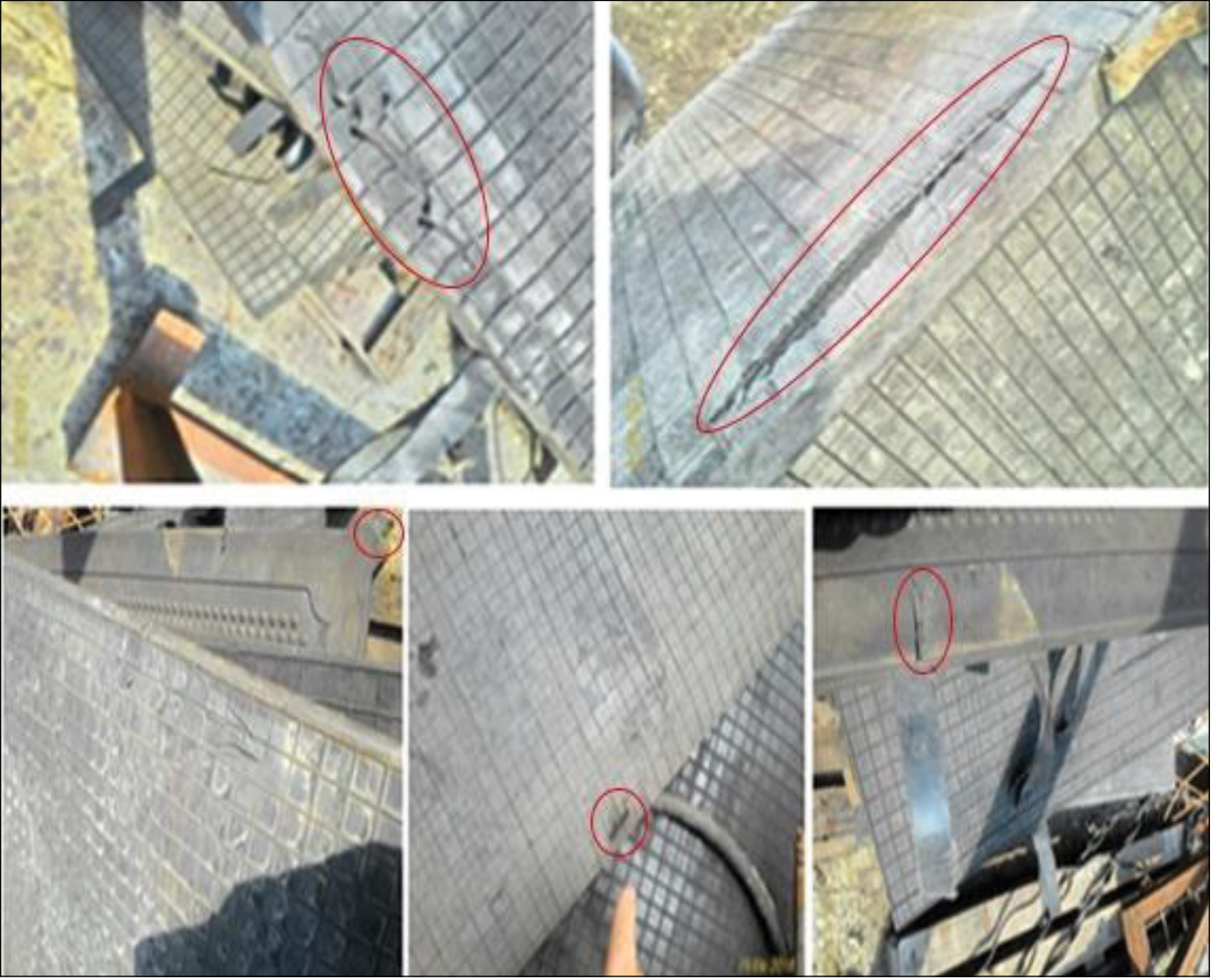
Patlatmalı kazı yapılan ocaklarda, patlama yerinin karşısında bulunan hava yastıklarına taş, kömür parçaları çarpmakta veya patlama sonrasında çıkan tel parçaları saplanmaktadır. Bu nedenlerle hava yastıklarının ve yastığa bağlı hortumların zarar gördüğü tespit edilmiştir. Bu gibi durumlar karşısında, hava yastıklarının fiziki darbelerden korumak amacıyla önlerine hareketli bant perdeler yapılmıştır. Söz konusu bant perdelerin kullanımı ile domuzdamlarında taş kesmesi ve kapsül teli batması nedeniyle arızalar önlenmiştir. Ayrıca yanlış kullanımdan dolayı yastıkların hortumlarında meydana gelen sorunları önlemek amacıyla işçile-

re sistem hakkında eğitimler verilmiştir (TTK 2011). Şekil 10'da Sava marka hava yastığına ait hortumda meydana gelen yarılma görülmektedir.

**Şekil 10.** Sava marka hava yastığına ait hortumda meydana gelen yarılma

Sönme olayının sonucunda, aşırı basıncın da etkisiyle, yastığın bulunduğu domuzdamının sökülmesi imkânsız hale gelebilmektedir. Sıkışan yastığı çıkarmak için birkaç domuzdamı parçası kesilebilmekte ve yastığı yerinden çıkarmak için tutma yerlerinden çekilmekte veya hortum bağlantıları zorlanmaktadır. Bu esnada yastık kenarlarında ezilme ve yarılmalar, bağlantı parçalarında çatlamlar, hortumlarda yırtık veya kesikler ve yastık yüzeyinde hızar ve balta kesikleri oluşmaktadır. Hava yastıklarının yüzeyinde bulunan sızdırmazlığı engelleyecek deformasyonlar (kesikler, yırtıklar) yastığın kullanılmaz hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu durumda olan yastıklar kullanım dışı kalmaktadır. Şekil 11'de hava yastıklarında meydana gelen deformasyonlar görülmektedir.





Şekil 11. Hava yastıklarında meydana gelen deformasyonlar

Yeraltında herhangi bir aşırı yüke maruz kalmadığı halde havası inmiş yastıklar yer üstünde bulunan atölyelerde kontrol edilmektedir. Hava kaçıran bölge bazen gözle görülmeyecek şekilde olabilmektedir. Yastıkta kaçırılan bir bölge olup olmadığını anlamak için hava yastığı şişirilmekte ve yüzeyine su dökülerek hava kaçağının olduğu noktalar tespit edilmektedir.

Şekil 12’de şişirilmiş hava yastığının su ile kontrolü görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere 1. ve 2. bölgelerde hava kaçağı mevcuttur.



Şekil 12. Şişirilmiş hava yastığının su ile kontrolü

### 3.2. Hava Yastıklarında Nipel Bağlantı Sorunu

Hava yastıklarının kullanımında karşılaşılan bir diğer sorun ise nipel bağlantı (metal bağlantı elemanı) kısmında meydana gelmektedir. İlk alınan hava yastıklarında nipel bağlantı kısımlarında, kullanılan malzemenin dayanımının düşük olmasından dolayı çatlama ve kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Hava yastığının nipel kısmının çatlaması



Çatlayan veya kırılan nipel kısmı hava yastığına direkt bağlı olduğu için hava yastıklarının kullanılmaz hale gelmesine neden olmaktadır. Hava yastığı ile nipelin bağlantı noktasının iç dişli (dişi) nipel olması da nipel çatlaklarının bir diğer sebebi olmuştur. 2009'da alınan hava yastıklarında bu hata ile sık karşılaşılmış olup sorumlu yastıklar imalat hatası nedeniyle değiştirilmiştir. Ayrıca yastıkların bağlantı noktasındaki nipelin dış dişli (erkek) olması sağlanmıştır. Bu şekilde iç dişli nipel çatlasa bile hortum kısmında kalacağı için yastığa zarar verilmemiş ve hortumun yenilenmesi ile yastığın tekrar kullanılması sağlanmıştır.

Hava yastıklarının hortum bağlantı yerinden kopmasını önlemek amacıyla bağlantı noktaları sabitlenmiş ve bu şekilde darbelerle dayanıklı hale getirilmiştir. 2014 yılından itibaren alınan hava yastıklarında bağlantı noktası kenarlara sabitlenmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. TTK'ya son alınan hava yastıklarının nipel bağlantısı

### 3.3. Hava yastıklarının balonlaşma yapması sorunu

Yastığın kauçuk üst tabakası ile aramid (Naylon sınıfından bir polimer olup Kevlar adı ile de bilinir ve çeliğe yakın bir sertliği vardır.) tabakanın birbirinden ayrılması sonucu hava yastıklarında balonlaşma meydana gelebilir (Şekil 15).



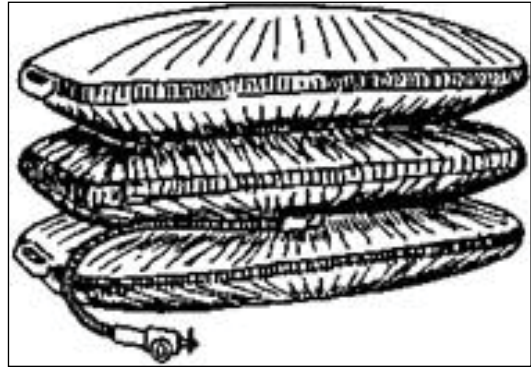
Şekil 15. Hava yastıklarında meydana gelen balonlaşma arızası

Hava yastığına basınç verildikçe bu ayrılan tabaka arasına hava kaçıışı olmakta ve yastık işlevini göremez hale gelmektedir. Sorunun asıl sebebi, yastık ile nipelin bağlantı noktasının iç dişli nipel olması ve hortum bağlantısı yapılırken nipelin küçük bir zorlanmasında nipelin çatlamasıdır. Bu durumda gelen basınçlı havanın çok küçük bir delikten iki tabakayı birbirinden ayırmasına yani balonlaşma yapmasına neden olmaktadır.

Balonlaşmanın diğer sebebi ise kullanımdan kaynaklanmaktadır. Yastığın üzerine gelen yüklerin homojen dağılması gerekmektedir. Ancak hava yastıklarının üst ve altına yerleştirilen dörder adet destek domuzdamı malzemesinin düzenli ve aralarında boşluk kalmayacak bir şekilde yerleştirilmemesi veya kurulunda yapılan diğer hatalardan dolayı hava yastığının yüzeyine farklı noktalardan basınç gelmesine yol açmaktadır. Düzensiz veya eksik dizilimden dolayı oluşan boşluklara hava yastığının sıkışması ile yastığı oluşturan tabakaların birbirinden ayrılması durumu meydana gelmektedir. Bu durum ayrıca yastık direncini de düşürmektedir.

## 4. Hava yastıklarının dünyada madencilik alanındaki uygulamaları

Hava yastıkları Ukrayna-Donbass kömür havzasındaki 0.4-1.2 m kalınlığındaki ince ve 0-90° eğimli kömür damarlarında uygulanmıştır (Ünlü ve Gerçek, 2000). Bu sistemde pasif bir tahkimat türü olan hava yastıkları, artan tavan yüküyle bünyesinde oluşan yüksek basınç sayesinde tavan yükünü taşımaktadır. Donbass kömür havzasında uygulanan sistem TTK'da kullanılan sistemden farklı olarak; hava yastıklarının damar kalınlığına göre üst üste dizilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir (Şekil 16).



Şekil 16. Ukrayna-Donbass kömür havzasında kullanılan hava yastıklarından oluşan domuzdamı (Ünlü ve Gerçek, 2000)

TTK bu sistemi ince kömür damarlarında denemiş ve buradan yola çıkarak aktif bir tahkimat türü olan Ön Gerilmeli Aşşap Domuzdamı (ÖGADD) Tahkimat Sistemini geliştirmiştir.

## 5.Sonuçlar

Son yıllarda mekanizasyona geçiş çalışmalarına hız kazandıran TTK'da arına paralel aşşap tahkimatlı uzunayak yöntemi halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu üretim yönteminde yalancı tavanın göçertilmesi ve ana tavanın kırılması sırasında meydana gelen aşırı yükler tahkimatı zorlamakta ve zaman zaman göçük ve benzeri olumsuzluklarla karşılaşmamak amacıyla ilave tahkimat elemanları kullanılmaktadır.

ÖGADD sisteminin en büyük avantajı tavanda hareket başlamadan hava yastığının şişirilmesi ile ön gerilmenin sağlanarak tavan ve taban arasında domuzdamlarının sıkılanmasıdır. Aşşap



domuzdamı sisteminde bu sıkılama işlemi sıkırtma takozlarıyla insan gücüne dayalı yapılmakta ve uygulanan sıkırtma kuvveti oldukça düşük kalmaktadır. Yeni sistemde, hava yastıklarının şebeke basıncı ile şişirilmesi sayesinde sıkırtma kuvveti yeterli olmaktadır. Hava yastığı ile domuzdamı malzemelerinin yüzeyleri, taban ve tavan taşına tamamen temas edecek şekilde kurulması şartıyla tavan yükleri eşit ve tam olarak karşılanmış olmaktadır. Bu sayede tavanda düzgün bir kırılma hattı oluşturulmakta ve güvenli, sağlam bir çalışma alanı sağlanmaktadır.

Sistemin kullanılması ile domuzdamının sökülme işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmekte ve bu sayede hem hızlı bir şekilde ilerleme yapılmakta ve hem de tavanda oluşabilecek herhangi bir hareket başlamadan domuzdamlarının ötelenmesi sağlanmaktadır.

Eski sistemde basınç altında bekleyen domuzdamlarının sökülme işlemi zor ve hatta bazen imkânsız olmaktadır. Bu nedenle domuzdamlarını bulunduğu yerden sökmek için birkaç domuzdamı kesilmek zorunda kalınmaktadır. Hava yastıklarının kullanıldığı yeni sistemde domuzdamlarının sökülme işlemi, yastık havalarının boşaltılmasıyla birlikte kolay olmuş ve bu sayede HDD sarfiyatı da azalmıştır.

TTK yıllar itibarıyla hava yastıklarının teknik özelliklerinde değişikliklere gitmiştir. Hava yastıklarının kaldırma kuvveti 67,7 ton'dan 86,2 ton'a yükseltilmiştir. Kaldırma kuvvetinin artmasıyla birlikte hava yastıklarının çalışma basınçları 8 bar'dan 10 bar'a yükselmiştir. Bu sayede hava yastıklarının taşıma kapasitesi artırılmış ve basınç alan hava yastıklarının basınç altında sönmeleri önlenmiştir.

ÖGADD sistemi tavan yükünün tam karşılanması amacıyla düşük eğimli damarlarda kullanılmalıdır.

Sistemin kullanılacağı damarın tavan ve taban taşının sağlam olması istenilen performansı sağlayacaktır.

HDD malzemesinde bulunan çintilerin kurulumda kolaylık sağladığı görülmektedir. Çintiler özellikle eğimi yüksek ayaklarda domuzdamlarının düzgün kurulmasını sağlamaktadır. Ancak, aşırı yük altında, domuzdamlarının çintilerinin olduğu kısımlar birbirine geçmekte ve sökülme işlemi zorlaşmaktadır. Sökümü yapılamayan domuzdamlarından bir kaçının kesilmesi gerekmekte ve domuzdamı zayıflığı artmaktadır.

Karadon TİM Gelik İşletme Müdürlüğünde yapılan ölçüm esnasında ve Kozlu TİM 5. Ocak Acılık Doğu Ayakta yapılan incelemelerde arızalı veya havası inmiş hava yastığı sayısının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, hava yastıklarında bulunan emniyet valfinin devreye girerek yastığın havasını indirmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Emniyet valfinin devreye girmesi sonucu yastık havasının inmesi, domuzdamlarının aşırı yük maruz kaldığını göstermektedir. Ayak ilerleme hızının düşük olduğu durumlarda ise ayak içindeki basıncın artması da bilinen bilimsel bir gerçektir. Dolayısıyla bu basınç hava yastıklarının da etkilemekte ve emniyet valfinin devreye girerek yastık havasının boşalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ÖGADD sisteminin kullanılacağı ayakların ilerleme hızının yüksek olması önemlidir.

ÖGADD sisteminin kullanımında yaşanan sıkıntıları gidermek amacıyla eğitimler düzenlenmesi iş güvenliğini sağlayacak ve hava yastığı zayıflıklarının önüne geçecektir.

Hava yastıklarının balonlaşma yapmasının önemli nedenlerinden biri, yastığın üzerine gelen yüklerin eşit bir şekilde dağılmamasıdır. Domuzdamlarının kurulumu esnasında yapılan hatalardan dolayı yastığın yüzeyine gelen yüklerin belli bölgelerde yoğunlaşması ile balonlaşma meydana gelmektedir. Hava yastığının üstünde ve altında bulunan dörder adetlik ahşap domuzdamı malzemesinin aralarında mesafe olmayacak şekilde yerleştirilmesi ve hava yastığının tüm yüzeyini kaplayacak şekilde olması balonlaşmayı önleyecektir.

Patlatma ile üretim yapıldığı durumlarda, ÖGADD sisteminin kullanıldığı ayaklarda patlatma esnasında; tel, kapsül, arından fırlayan taş vb. malzemeler yastığa zarar vermektedir. Hava yastıklarının koruyacak şekilde önlerine hareketli perdeler konulması bu durumun oluşmasını engelleyecektir.

Yük altında sönmüş hava yastıklarının zarar görmeden kurtarılması ve hava yastığının üst ve altında bulunan HDD malzemelerine sıkışmaması için TTK domuzdamı sıkırtma ve sökme yastığı ile çalışma yönergesinde belirtilen yastığın her iki tarafına 10 cm yüksekliğinde 120 cm boyunda özel domuzdamı malzemesinin konulması gerekmektedir.

TTK tarafından satın alınan HDD malzemesi teknik şartnameye göre 100-130 °C arasında ve en az 48 saat süreyle buharlama işleminin yapılması gerektiği belirtilmektedir. Oysaki buharlama işlemi yapılırken ortam sıcaklığının 100 °C'nin üzerine çıkmaması istenmektedir. Literatürde buharlama işlemi ile ilgili aşağıdaki açıklamalar yer almaktadır:

Buharlama işlemi esnasında odundaki tenen ve doğal antiseptik maddeler yıkanmaktadır. Bu sebeple mantar ve böcekler buharlanmış oduna daha fazla zarar vermektedir. Buharlama işlemi odunun işleme özelliğini iyileştirmekte ve işlenmiş yüzeyler de normal odundan daha düzgün ve parlak bir hal almaktadır. Buna karşılık buharlandıktan sonra kurutulan odun gevreklediğinden kolay kırılır (Örs ve Keskin 2001).

Yukarıda yapılan açıklamalar ışığında buharlama işleminden sonra buharlanan ahşap malzemenin direnç değerlerinde düşüş olduğu ve gevreklediği için kolay kırıldığı ve mantar ve böceklerin oduna daha fazla zarar verdiği görülmektedir. HDD malzemesini buharlama işlemine tabi tutmak hem maliyetleri arttırmakta hem de malzemenin dayanımını düşürmektedir. Bu sebeple HDD malzemelerine buharlama işleminin yapılmaması uygun olacaktır.

Kurum yıllar içerisinde sistemde karşılaşılan sorunlardan yola çıkarak yukarıda bahsedilen değişiklikleri gerçekleştirmiş ve bu sayede hava yastığı kayıplarında önemli bir azalma meydana gelmiştir. Diğer taraftan üretim yapılacak ayağın tavan ve taban taşının sağlam, damar eğiminin düşük ve ayak ilerleme hızının yüksek olması ÖGADD sisteminin istenilen performansı sağlayacağını göstermektedir.

## Kaynaklar

- Dağdelen R., Özkan T., Demirler A. H. (2007a.) *Türkiye Taşkömürü Kurumu göçertmeli uzunayaklarda ön gerilmeli ahşap domuzdamı uygulama projesi*, Mehmet Kemal Dedeman Araştırma ve Geliştirme Proje Yarışması.
- Dağdelen R., Özkan T., Demirler H. ve Yamudi C. (2007b.) *Pnömatik ön gerilmeli ahşap domuzdamı ve uygulamaları, pnömatik ön gerilmeli ahşap domuzdamı ve uygulamaları sunumu*.
- Dağdelen R., Özkan T., Demirler H. ve Yamudi C. (2009.) *Pnömatik ön gerilmeli ahşap domuzdamı ve uygulamaları, Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, 6-8 Mayıs 2009, Antalya, Türkiye, Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı, ISBN: 978-9944-89-714-3, Grup Matbaacılık, Ankara, 163-174*.
- Örs Y. ve Keskin H. (2001.) *Ağaç Malzeme Bilgisi, Baskı No:1, ISBN 975-6574-01-1, Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti., İstanbul, 182 sayfa*.
- TTK (2019.) *Satın alınan hava yastıklarının teknik özellikleri, TTK İşletmeler Dairesi Başkanlığı verileri*.
- TTK (2011.) *Ön Gerilmeli Domuzdamı Uygulamaları Raporu, TTK İşletmeler Dairesi Başkanlığı verileri*.
- Ünlü T. ve Gerçek H. (2000.) *Ahşap domuzdamlarının mekanik davranışı ve tasarımı, Türkiye 12 Kömür Kongresi, 23-26 Mayıs 2000, Zonguldak, Türkiye, Türkiye 12. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 41-54*.



Original Research / Orijinal Araştırma

## Zayıf zeminlerde açılan büyük çaplı çift tüp tünellerin birbirine olan etkisinin 3 boyutlu sayısal analizlerle incelenmesi, Bolu Tüneli örneği

*An analysis of interaction between large diameter double tube tunnels excavated in weak soils through 3D numerical analysis; An example of Bolu Tunnel*

Ebu Bekir Aygar<sup>a,\*</sup><sup>a</sup>Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti., Ankara, TÜRKİYE

Geliş-Received: 7 Ocak - January 2022 \* Kabul-Accepted: 9 Mayıs - May 2022

ÖZ

Bolu Tüneli Ankara İstanbul Otoyolu üzerinde yer almaktadır. Bolu Tüneli proje çalışmalarına 1993 yılında başlanmış olup 2007 yılında trafiğe açılmıştır. 3 şeritli çift tünel olarak projelendirilmiştir. Tünel uzunlukları sağ tünel 2788 m sol tünel 2954 m'dir. Bolu Tüneli inşası sırasında 2 kez sel ve depreme maruz kalmış ve Elmalık kesiminde Düzce Depreminde göçük yaşanmıştır. Göçük sonrasında güzergah değiştirilmiştir. Bolu Tüneli Kuzey Anadolu Fay Hattı ile Düzce Fayı arasındaki tektonik bloktan geçmektedir. Tünelin İstanbul tarafı (Asarsuyu) metakristalin temel kayaları içerisinde yer almakta iken Ankara tarafı (Elmalık) sedimanter kayalar içerisinde bulunmaktadır. Tünelde kazı aşamasında kritik sorunların meydana geldiği Elmalık girişinde Elmalık fayı bulunmakta olup, tünelin bu bölümlerinde 1,2 m'ye varan deformasyonlar oluşmuştur. Düzce Depreminde ise Elmalık sol tünel tamamen kapanarak göçük oluşmuştur. Bolu Tünellerinde yaşanan sorunlar ve destek sistemleri tünelcilik açısından çok değerli bilgiler içermektedir. Bu çalışmada, destek sistemleri Flac3d programı ile 3 boyutlu olarak incelenmiş, iki tünelin birbirine olan etkisi, üst yarı, alt yarı ve invert kazılarında meydana gelen değişimler ortaya konmuştur.

**Keywords:** Bolu Tüneli, Göçük, Flac3d, Düzce Depremi, Tünel etkileşimi

ABSTRACT

Bolu Tunnel is located on the Ankara İstanbul Highway which started in 1993 and was made available to traffic in 2007. It was built as 3-lane double tunnel. The tunnel lengths of the right and left tunnel are 2788 m and 2954 m respectively. During the construction, it was undergone 2 earthquakes and flooding, and the Elmalık section collapsed after the Düzce Earthquake. After collapse, the route diverted. The tunnel passes through the tectonic block between the North Anatolian Fault and Düzce Fault. The Istanbul side (Asarsuyu) is located within the metacrystalline basement, the Ankara side (Elmalık) is located within the sedimentary rocks. The biggest problems during the excavation of the tunnel located Elmalık fault where deformations up to 1.2 m and collapsed in the earthquake. The problems and support systems in the tunnels contain very valuable information for tunneling. In this study, the supports are examined in 3D with the Flac3d program, the effect of the two tunnels on each other, the deformation changes in the top heading, bench and invert excavations are studied.

**Keywords:** Bolu Tunnel, Collapse, Flac3d, Düzce earthquake, Tunnel interactions

### Giriş

Zayıf zeminlerde açılan tünellerin destek sistemlerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar günümüzde giderek artmaktadır (Barla 2002, 2016, Hoek 2001, Aygar ve Gökçeoğlu 2020, 2021 a, b, c ve d, Aygar 2000, 2007, 2020, 2021a, 2021b). Zayıf zeminlerde açılan tünellerde yaşanan sorunlara bakıldığında zaman sıkış-

ma ve şişme problemleri ile karşılaşıldığı görülmektedir. Buna ek olarak, tünel ayna ve tavan desteklenmesi sırasında karşılaşılan sorunlar da tünel duraylılığını etkilemektedir. Sıkışma için tünel örtü yüksekliği ve kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı temel faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır (Jethwa vd. 1984, Sakurai 1983, Singh vd. 1992, Goel vd. 1995, Hoek ve Marinos 2000).

\* Corresponding author: eaygar@gmail.com • https://orcid.org/0000-0002-5738-4602

https://doi.org/10.30797/madencilik.1054714

Zayıf zeminler için destek sistemlerinin tasarımında iki ana yaklaşım üzerinde durulmaktadır: aktif ve pasif destek sistemi tasarımı. Bunlardan ilki olan aktif destek sistemi tasarımında deformasyona izin verilmeden rijit bir tahkimat uygulanırken pasif yaklaşımda ise deformasyona müsaade edilerek esnek bir tahkimat uygulanmaktadır. Schubert (1996) yaptığı çalışmada iksalar üzerinde deformasyon boşluğu önermiştir. Hoek (2007, 2012) ise meydana gelen deformasyonlar için TH tipi kayan iksalar önermiş ayrıca tünel ayna ve tavan duraylılığının önemi üzerinde durmuştur. Ayrıca zayıf zemin içinde çift tüp olarak açılan geniş çaplı tünellerde ise iki tünelin birbirine olan etkisi önem kazanmaktadır. Tünellerin kazıları sırasında iki tüp aynası arasında belirli bir mesafe bırakılması önerilir. Buna ek olarak iki tünel arasındaki topuk mesafesi ise en az tünel çapının 1,5 katı olacak şekilde bırakılması önerilir (KGM, 2013). Tünel kazısı sırasında ise Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) (Rabcewicz, 1964 a, b and 1965; Rabcewicz and Golser, 1973) prensiplerine göre tünel üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde bölümlendirilmektedir. Zira tünel kazısının tek aşamada yapılması mümkün olamamaktadır. Bu durumda ise üst yarı, alt yarı ve invert kazıları arasındaki mesafe çok önem kazanmaktadır. Sağlam kayalarda bu mesafe 100 ila 200 m'ye kadar çıkarken zayıf kayalarda bu değer 20-25 m'ye kadar düşmektedir. Son dönemlerde ise İtalyan yöntemi olarak karşımıza çıkan "kaya ve zeminlerde deformasyon kontrollü analiz" (ADECO-RS) yöntemi tam kesit kazı prensibine göre destek sistemi yapılmaktadır Lunardi 2000a, 2000b, 2008, 2014, 2016, Barla 2002). ADECO-RS yönteminde tünel ayna ve tavan duraylılığı çok önemlidir. Bunun için tünel aynasında uzun fiber bulonlar çakılarak ayna tamamen duraylı hale getirilmektedir. Bu aşamadan sonra tam kesit tünel kazı işlemi yapılmaktadır.

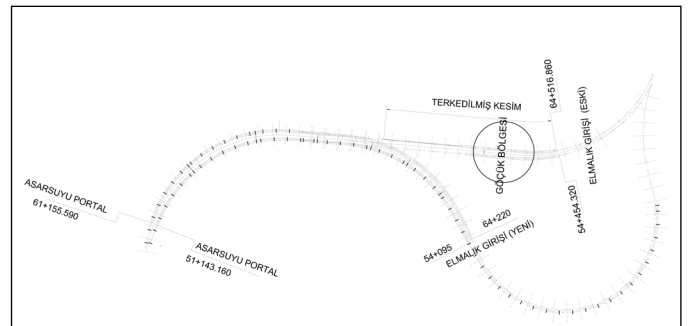
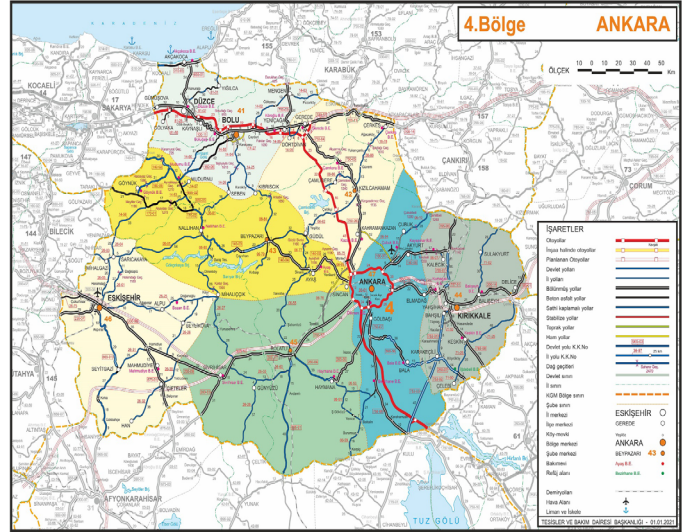
Bu çalışma kapsamında, zayıf zeminlerde açılan tünellerde kazı kademeleri ile tünellerin birbirine olan etkisinin incelenmesi amacıyla Bolu Tünellerindeki uygulamalar dikkate alınmıştır. Bunun için 3 boyutlu analiz imkanı sunan Flac3d (Itasca, 2002) programı kullanılarak tünel kazı kademeleri ile iki tünelin birbirine olan etkisi incelenmiştir. Bilindiği üzere Bolu Tüneli yapımı 13 yıl süren, kazı çapı 18 m'ye varan geniş çaplı çift tüpten oluşan bir tüneldir. Kazı işlemi üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde olup tüneller arasında 55 m ile 60 m arasında değişen mesafe bırakılmıştır. Kazı işlemi sırasında tünellerde ciddi deformasyonlar ile karşılaşmış ve tünel destek sistemlerinde stabilite ve göçük problemleri ile karşılaşmıştır. Bu sebeple Bolu Tünellerinde yapılan uygulamalar zayıf kaya kütlelerinde açılan tüneller için çok önemli veriler içermektedir.

## 1. Bolu Tüneli

Bolu Tüneli Ankara-İstanbul Otoyolu içerisinde yer almakta olup, 3 şeritli çift tünelden oluşmaktadır. İstanbul tarafında (Asarsuyu girişi) kazı işlemleri 1993 yılında, Ankara tarafında (Elmalık girişi) ise 1994 yılında kazı işlemlerine başlanmıştır. Tünel kazı işlemleri 2006 yılında tamamlanarak 2007 yılında trafiğe açılmıştır (Şekil 1). Kazı işlemleri toplam 13 yıl sürmüştür. Tüneller arasında 50 ila 60 m arasında değişen topuk bırakılmıştır. Tünel örtü yüksekliği genelde 100 ila 150 m arasında değişmekte olup, en yüksek örtü yüksekliği ise 250 m'dir. Tünel kazı çapı destek sınıflarına bağlı olarak 13 m ile 18,2 m arasında değişmektedir. Kazı alanı ise 133 m<sup>2</sup> ile 260 m<sup>2</sup> arasındadır. Tünellerin tamamlanmış halinde yatay açıklık olarak 14,0 m ve yükseklik ise 8,60 m'dir (Şekil 2).

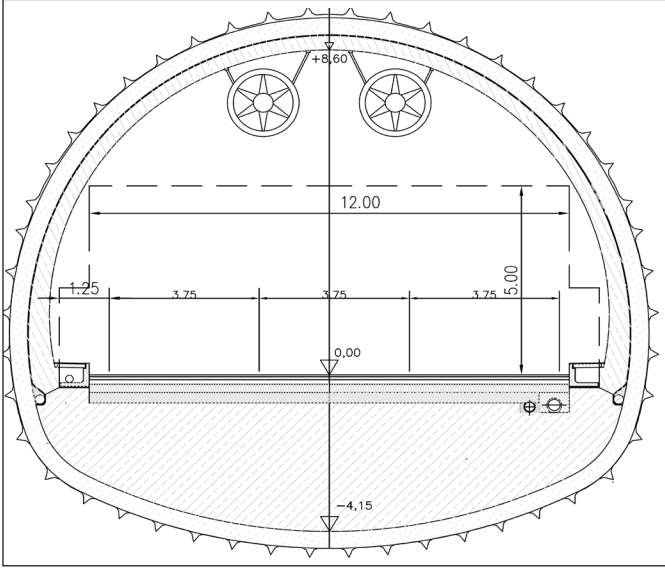
Bolu Tünelleri Yeni Avusturya Tünelcilik (NATM) Yöntemine göre projelendirilmiştir. Projelendirme aşamasında sıkışan kayadan çok sağlam kaya sınıfına kadar destek sistemleri belirlenerek kazı işlemlerine başlanmıştır. Tünel kazısı sırasında

ise beklenmeyen jeolojik koşullara göre deformasyonlarda ciddi artışlar gözlenmiştir. Bu artışlar yer yer Elmalık girişinde yeralan filiş serileri ile kısa fay zonlarının toleransın 4 ile 5 katına kadar çıkmıştır. Karşılaşılan yeni jeolojik koşullara göre tünel destek sistemleri sürekli olarak revize edilmiştir. Destek sistemlerinde yapılan bu değişiklikler ilk dönemlerde NATM prensipleri içerisinde kalarak devam etmiş ancak başarı sağlanamamıştır. 1998 yılı itibarı ile de NATM prensiplerinin dışına çıkılarak esnek bir dış kemer ilkesinden vazgeçilmiştir. Yapılan bu revizyonlarda kaplama kalınlığının tamamen artırılması yönüne doğru gidilmiştir. Bu amaçla kısa fay zonlarında dış kaplama ile iç kaplama arasında ara kaplama eklenmiş (Seçenek 3), uzun fay zonlarında ise alt yarı pilot tünel yöntemi (Seçenek 4) kullanılmıştır. 12 Kasım 1999 Düzce depreminde meydana gelen göçük sonrasında ise bu yöntemlerin uygulanmasına devam edilmiştir. Düzce depreminde Elmalık girişinde yaşanan göçük incelendiğinde deformasyonların devam ettiği ve sönümlenemediği bölgede oluştuğu gözlenmiştir. Bu bölgede iç kaplaması yapılan ilk 400 m lik kesimde ise herhangi bir hasar meydana gelmemiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Bolu Tüneli yer bulduru haritası





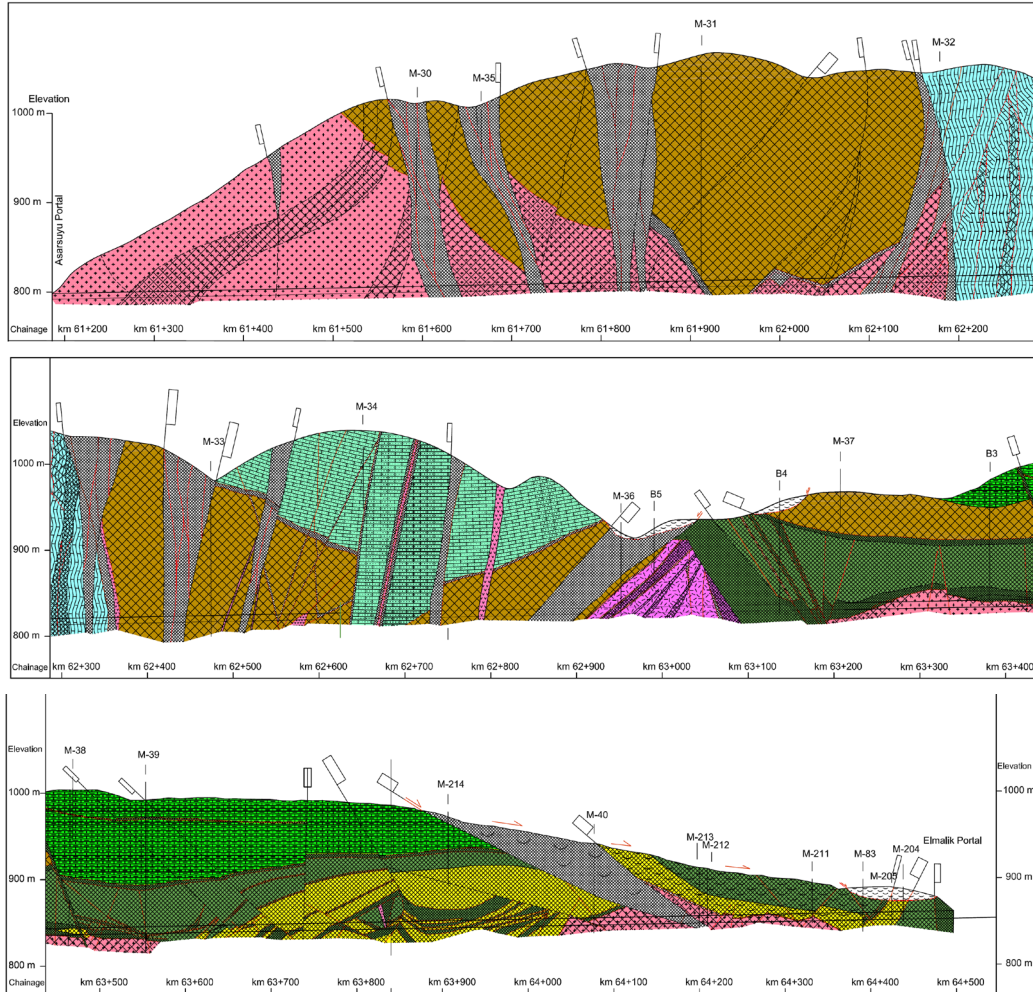
Şekil 2. Bolu Tüneli en kesiti

## 2. Jeolojik-Jeoteknik Koşullar

Bolu Tüneli güzergah boyunca tektonizmaya uğramış birimler içerisinde açılmıştır. Tüneli etkileyen ana fay sistemleri 1. Derece aktif fay sistemleridir. Bolu Tüneli boyunca yeralan birimler iki gruba ayrılabilir. İlk grup İstanbul girişinde (Asarsuyu) Metakristalin

kayalardan oluşmakta olup genelde metasediman seriler içerisinde açılmıştır. Bu bölüm Bakacak fay zonunun tüneli kestiği yaklaşık km:62+800 e kadar olan bölgeyi kapsamaktadır. Bu noktadan sonra ise Ankara girişinde (Elmalık) yeralan filiş serisini kapsamaktadır. Bu bölgede düşük açılı faylar ile kesilmiş olup bu iki grup arasında yaklaşık 200 m uzunluğundaki Bakacak fayı bulunmaktadır. Elmalık girişinde tüneli olumsuz etkileyen alttaki metakristalin tabaka üzerinde yeralan üstteki sedimanter serisi içerisindeki düşük açılı faylardır. Tünel kazısı ise genelde bu bölümde yapılmış olup beklenmeyen aşırı deformasyonlara neden olmuştur. Elmalık tarafında karşılaşılan filiş serileri tektonizmaya uğramış kiltası, silttaşı ve kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Bu kesim genel olarak kaygan yüzeyli ve yüksek plastik özelliklere sahip fay kili malzemesi içermektedir. Tüneli olumsuz etkileyen Bakacak fayı için ise Lettis vd (2000) tarafından yapılan çalışmada fayın uzunluğunun 10 ile 15 km arasında değiştiği belirtilmiştir ve tüneli 200 m'lik bir kesimde kestiği belirtilmiştir. Fayın yönelimi yaklaşık olarak doğu-batı yönünde olup tüneli km:62+800 ile 63+000 arasında dik olarak kesmektedir. Bu fay zonu kırmızı renkli yüksek plastik özellikli olup büyük oranda kaygan yüzeylere sahiptir.

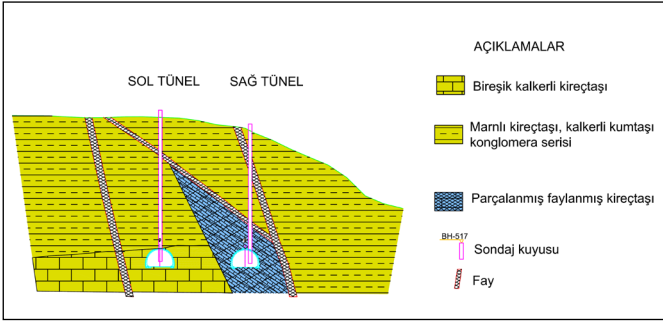
Bolu tüneli 4 ana bölüme ayrılabilir. Bunlar metakristalin tabaka (Yedigöller formasyon), metasediman serileri (İkizoluk formasyonu), Filiş serisi (Fındıcak Formasyonu) ve killi fay zonları olarak ayrılabilir (Dalgıç, 2002). Bolu Tüneli'nde sayısal analiz çalışmaları için metakristalin tabaka ile filiş serileri içinde geçilen bölümler incelenmiştir. Bu bölümlerin örtü yükseklikleri filiş serisinde 50 m, metakristalin tabaka için ise 100 m'dir. Şekil 3'te Bolu Tüneli'ne ait jeolojik profil verilmektedir.



Şekil 3. Bolu Tüneli jeolojik profili (Geoconsult,1998)

## 2.1. Filiş serisinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri

Filiş serisi içinde geçilen bölüm tünelin Elmalık girişine yakın kısmında olup km:63+910 ile 64+120 arasında yer almaktadır. Tünelin bu bölümü, temelde düşük plastik özellik gösteren filiş serisinde kazısı yapılmış kiltası, kumtaşı ve marnlı kireçtaşı içermektedir. Marnlı kireçtaşı ve biresik kalkerli kumtaşı az dereceden orta dereceye kadar bozunmuş, zayıftan orta dereceye kadar değişen dayanıma sahiptir. Kiltası tabakaları ise yüksek oranda bozunmuş ve oldukça zayıf özelliklere sahiptir ve bloklu malzeme ile ince matriksler halindedir. Matriks, toplam kütleinin %20 ila 40'ını oluşturmaktadır. İnce matriksler killi kumlu silt yapılarından oluşmaktadır. Şekil 4'de bu bölüme ait jeolojik kesit sunulmaktadır. Çizelge 1'de kaya kütle parametreleri verilmektedir (Geoconsult, 2002).



Şekil 4. Filiş serisi içinde geçilen bölümün jeolojik kesiti

Çizelge 1. Filiş serisine ait zemin parametreleri (Geoconsult, 2002)

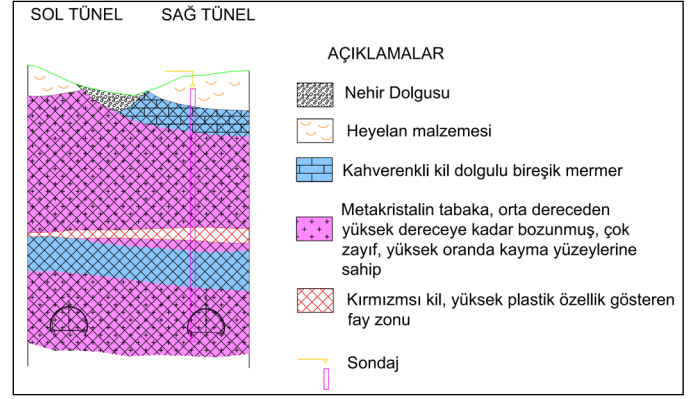
İçsel sürtünme açısı	Kohezyon	Young modülü	Hacimsel modül	Makaslama modülü	Birim hacim ağırlık
20°	50 kPa	493 MPa	411 MPa	190 MPa	22 kN/m <sup>3</sup>

## 2.2. Metakristalin tabakanın jeolojik ve jeoteknik özellikleri

Metakristalin tabaka içinde geçilen bölüm km: 62+890 ile 63+080 arasında yer almaktadır. Kaya kütleli amfibolitler ile beyaz renkli sağlam kuvars içinde makaslama bölümlerine sahiptir. Bu bölüm kahverengi yeşil ve gri renkli orta dereceden yüksek dereceye kadar bozunmuş olup oldukça zayıf özelliklere sahiptir. Şekil 5'te metakristalin tabakaya ait jeolojik kesit sunulmaktadır. Sayısal modellemelerde kullanılan bölüme ait zemin parametreleri Çizelge 2'de verilmektedir (Geoconsult, 2002).

Çizelge 2. Metakristalin tabakaya ait zemin parametreleri (Geoconsult, 2002)

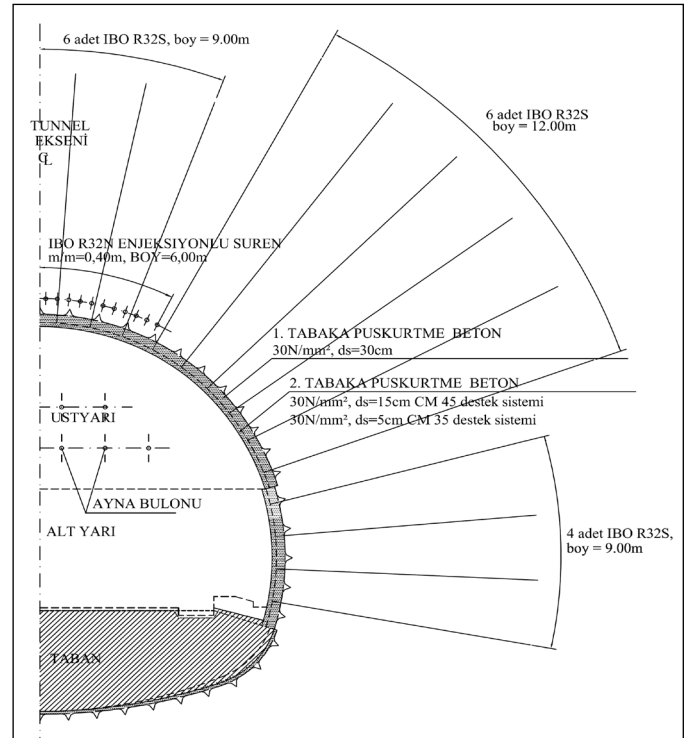
İçsel sürtünme açısı	Kohezyon	Deformasyon modülü	Hacimsel modül	Makaslama modülü	Birim hacim ağırlığı
25°	50 kPa	1000 MPa	833 MPa	384 MPa	22 kN/m <sup>3</sup>



Şekil 5. Metakristalin tabaka içinde geçilen bölümün jeolojik kesiti

## 3. Sayısal Analizler

Sayısal analiz çalışmalarında FLAC<sup>3D</sup> programı kullanılmıştır. Flac3D programı sonlu farklar metodu ile çalışan bir sayısal analiz programıdır (Itasca, 2002). 3 boyutlu olarak zemin, kaya ve diğer yapı elemanlarını modelleyebilmektedir. Tünel analizlerinde kullanılacak olan yapısal elemanlar modele tanımlanabilmektedir. Modelde kazı işlemi üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde modellenmekte ve destek elemanları da modele tanımlanabilmektedir. Sayısal analizler için Bolu Tüneli'nde CM35 ve CM45 destek sınıfları seçilmiş olup (Şekil 6), bu kesimler sırasıyla metakristalin tabaka ile filiş serisi içerisinde yer almaktadır. Püskürtme beton kalınlıkları sırası ile 35 cm ve 45 cm olup 9 m ile 12 m uzunluklarında kendinden delgili bulonlar kullanılmıştır. Tavan kesiminde ise süren olarak IBO tipi bulonlar kullanılmıştır.



Şekil 6. CM 35 ve CM 45 destek sistemi detayları (Aygar, 2020)



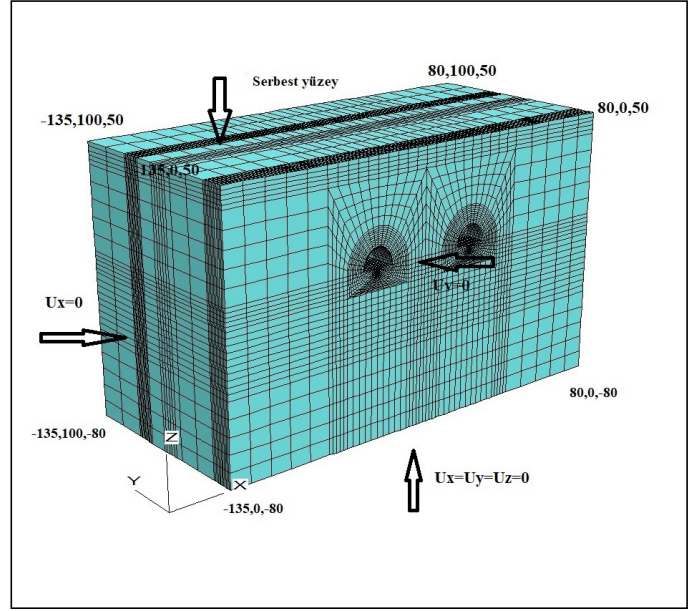
### 3.1. FLAC<sup>3D</sup> programı ile statik analizler için yapılan modelleme çalışmaları

Statik çözümler için FLAC<sup>3D</sup> programı ile oluşturulan modellerde tünel kazı ve destek sistemleri modellenmiştir. Modelleme sonuçları değerlendirilerek tünelde meydana gelen yenilme durumu ve yerdeğiştirmeler incelenmiştir.

Statik durumda meydana gelen değişimler ve elde edilen sonuçlar tünel kazısı ve destek sistemlerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Zira oluşturulan modeller Bolu Tünelleri'nde uygulanan kazı ve destek sistemi ile örtüşmektedir. Bundan dolayı statik durumda meydana gelen değişimlerin incelenmesi destek ve kazı sisteminin doğruluğu açısından önem kazanmaktadır.

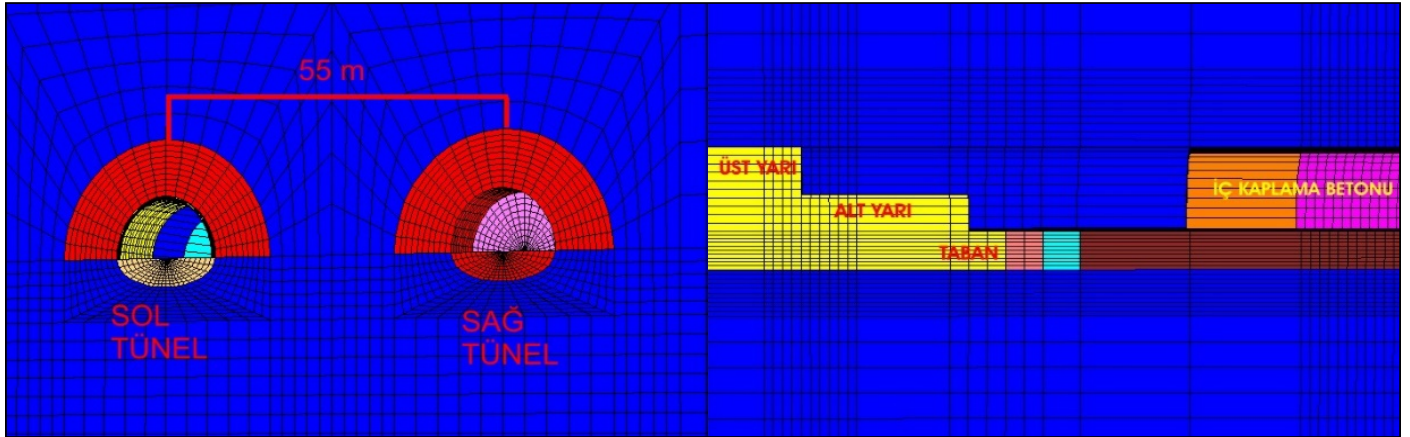
Bolu tünelleri için normal arazi koşullarına uygun olacak şekilde modeller oluşturulmuştur. Modelin tünel başlangıç noktaları 0 olarak kabul edilmiştir. Modelde sol tünel başlangıç noktası 0,0,0 sağ tünelde ise 0,55,0 olarak alınmıştır. Kazı işlemleri 0'dan itibaren Y eksenini boyunca yapılmıştır.

Modelleme sırasında yerçekimi ivmesi kullanılarak başlangıç gerilmeleri oluşturulmuştur. Oluşturulan model invertte x, y, z yönlerinde sabitlenirken, sol ve sağ yüzeyleri x yönlerinde, modelin ön ve arka yüzeyleri y yönünde sabitlenmiş ve tavan ise sabitlenmemiştir (Şekil 7). Modellemelerde sınır koşulları ile açıklık etkileşimini önlemek için, en büyük açıklığın yükseklik veya genişliğinden en az 4 ila 5 misli mesafede olması gerekmektedir. Bundan dolayı modelin sol tarafında 80 m, sağ tarafında ise 135 m, invert bölümünde ise 80 m mesafe bırakılarak modellenmesi yapılmıştır. Model derinliği, y eksenini diğer bir ifadeyle tünel eksenini yönünde 100 m olarak alınmıştır. Tünel çapının 16 m olduğu göz önüne alındığında modelde sınır koşulları uygun olmaktadır.



Şekil 7. Oluşturulan modelde sınır koşulları

Modelde arazi koşullarına uygun olarak sağ ve sol tünel arasında eksenden eksene 55 m mesafe bırakılmıştır. Tünel kazısı üç aşamada yapılmaktadır. Bu aşamalar üst yarı, alt yarı ve invert kazısı şeklindedir. Modellemede tünel kazısı uygulama aşamasında olduğu gibi üç aşamada yapılmıştır (Şekil 8).

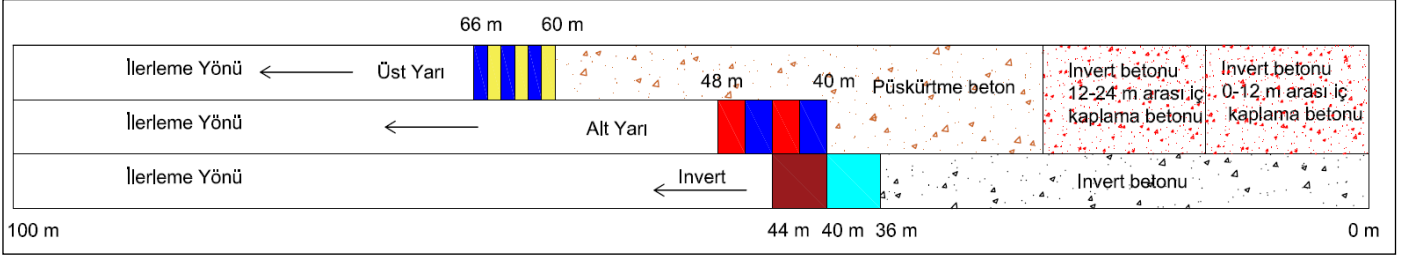


Şekil 8. FLAC<sup>3D</sup> programı ile oluşturulan modelde tüneller arasında bırakılan mesafe

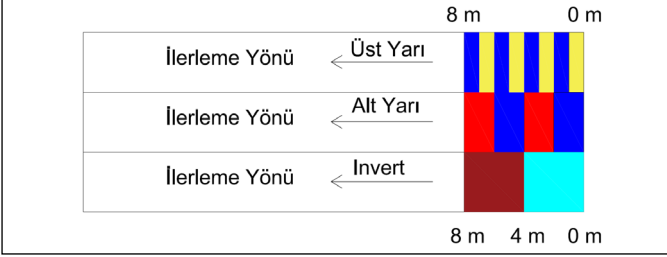
Tünellerde üst yarı, alt yarı ve invert kemeri kısımları arasında gerçek uygulamaya paralel olarak tünel eksenini yönünde 60 metre mesafe bırakılarak yapılmıştır. Şekil 9'da modelleme aşaması sırasında uygulanan kazı ve destek sistemi şematik olarak verilmektedir. Modelleme başlangıcında bu mesafeyi oluşturmak için sol tünelde ilk 40 m'lik kısımda üst yarı ve alt yarı bölümlerinde kazı ve desteklerin yapıldığı varsayılarak modelin bu bölümü boşaltılmış ve destek elemanları yerleştirilmiştir. Aynı şekilde sol tünel üst yarı bölümünde 40 ile 60 m'lerde de kazı ve destek işleminin yapıldığı ayrıca invert bölümünde de ilk 36 m'lik bölümün kazı ve invert betonun tamamlandığı varsayılmıştır. Ayrıca sol tünelde ilk 24 m'lik bölümde iç kaplamanın yapıldığı düşünülmektedir modelde uygulanmıştır. Böylelikle sol ve sağ tüneller arasında tünel eksenini yönünde istenilen 60 m'lik mesafe sağlanmıştır. İnşaat aşamasında üst yarı ile alt yarı arasında 20-30 m mesafe bırakılmaktadır. Invert

ile alt yarı arasındaki mesafe ise en fazla 4 m olmaktadır. Kazı işlemleri, her bir kademede üst yarıda 1 m, alt yarı da 2 m ve invertte 4 m olarak yapılmaktadır. Modelde kazı işlemleri tünelde yapılana uygun olarak sol tünelde üst yarıda 60. m den başlayarak 1'er m'lik kazılarla 60 ile 66. m'ye kadar 6 aşamada, alt yarıda ise 40 ile 46 m'ye kadar 2'şer m'lik kazılarla 3 aşamada, invert bölümünde ise 36 ile 44 m'ye kadar 4'er m'lik kazılarla 2 aşamada yapılmıştır. Ayrıca sol tünelde 0 ile 24 m'ler arasında iç kaplama betonu yapılmıştır (Şekil 9). Sol tünelde kazı ve tahkimat işlemleri bitirildikten sonra sağ tünelde kazı işlemlerine başlanmıştır. Üst yarıda ilk 8 m'lik bölümün kazısı 1'er m'lik kazılarla 8 aşamada, alt yarıda aynı şekilde ilk 8 m'lik bölümün kazısı 2'şer m'lik kazılarla 4 aşamada ve invert bölümünde ise ilk 8 m'lik bölümün kazısı 4'er m'lik kazılarla 2 aşamada bitirilmiştir (Şekil 10). Şekil 10 sağ tünelde kazı durumunun tamamlanmış halini göstermektedir.



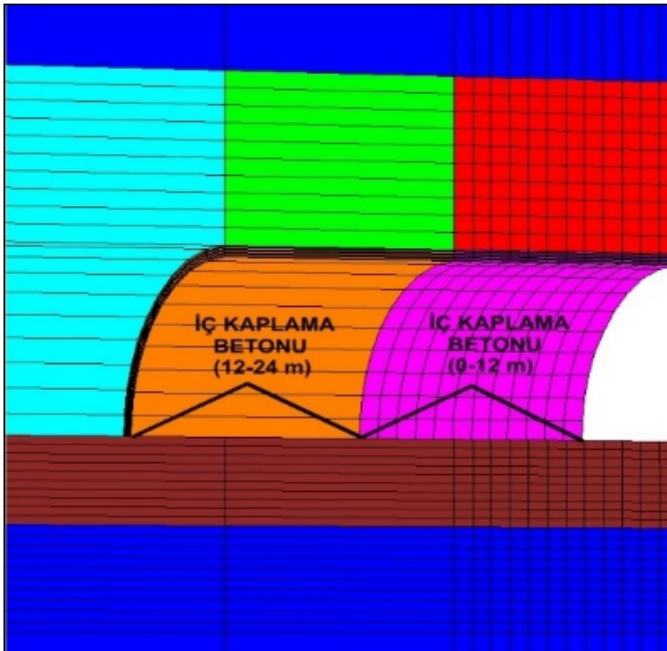


Şekil 9. Sol tünelde yapılan modelleme aşamaları

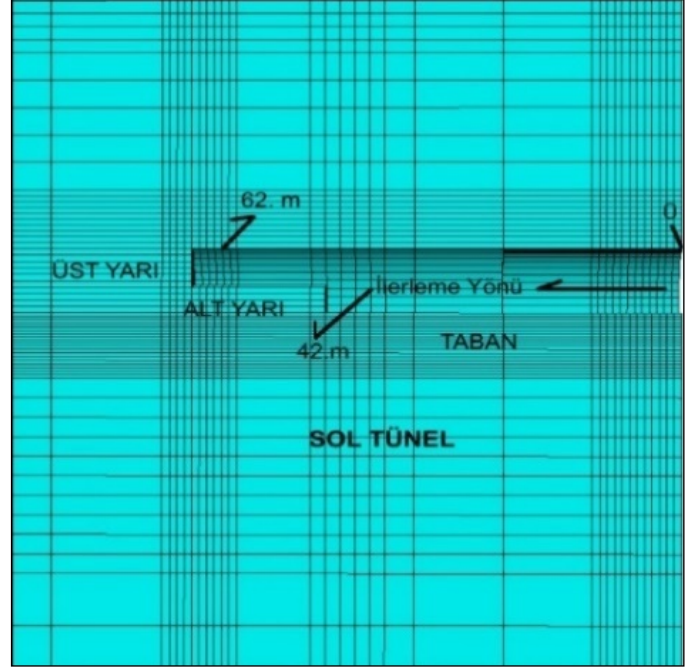


Şekil 10. Sağ tünelde modelleme aşamaları

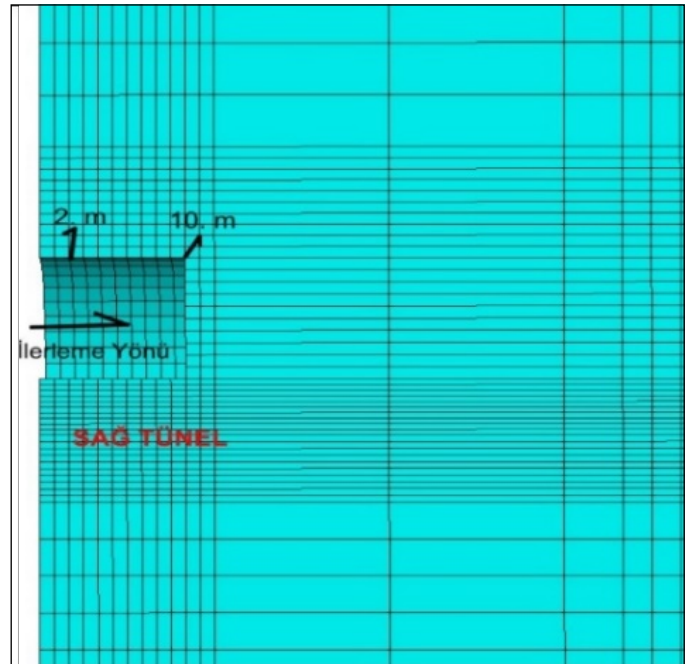
Statik analizlerde iç kaplamanın yapılmadığı durumu ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmek için sağ tünelde iç kaplama betonu yapılmamıştır. Şekil 11'de sol tünel için modelde oluşturulan iç kaplama betonu gösterilmektedir. Model üzerinde meydana gelen değişimleri görebilmek ve zamana bağlı olarak yerdeğıştirmeler ile gerilmeleri izleyebilmek amacıyla referans noktaları seçilmiştir. Sol tünel üst yarı kazısı sırasında meydana gelen değışimler için 62 m, sol tünel alt yarıda meydana gelen değışimleri görebilmek amacıyla 42 m, sağ tünelde üst yarı tavan kısmında meydana gelen değışimleri görebilmek amacıyla 2 m seçilmiştir. Belirlenen bu noktalarda modelleme aşamalarına bağılı olarak yerdeğıştirme grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 12'de model üzerinde belirlenen noktaların konumları verilmiştir.



Şekil 11. Modelde oluşturulan iç kaplama betonunun kesiti görünüşü



a) Sol tünel üzerinde belirlenen noktalar



b) Sağ tünel üzerinde belirlenen noktalar

Şekil 12. Model üzerinde yerdeğıştirme ve gerilmelerin incelenmesi belirlenen noktalar

Ayrıca tünelde meydana gelen yenilme durumları incelenmiştir. Flac3d programında yenilme durumları verilirken aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır (Itasca, 2002);

**Shear-n:** makaslama gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ve hala devam ettiğini göstermektedir.

**Shear-p:** makaslama gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ancak kuvvetlerin azalmasından dolayı yenilmenin durduğunu göstermektedir.

**Tension-n:** çekme gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ve hala devam ettiğini göstermektedir.

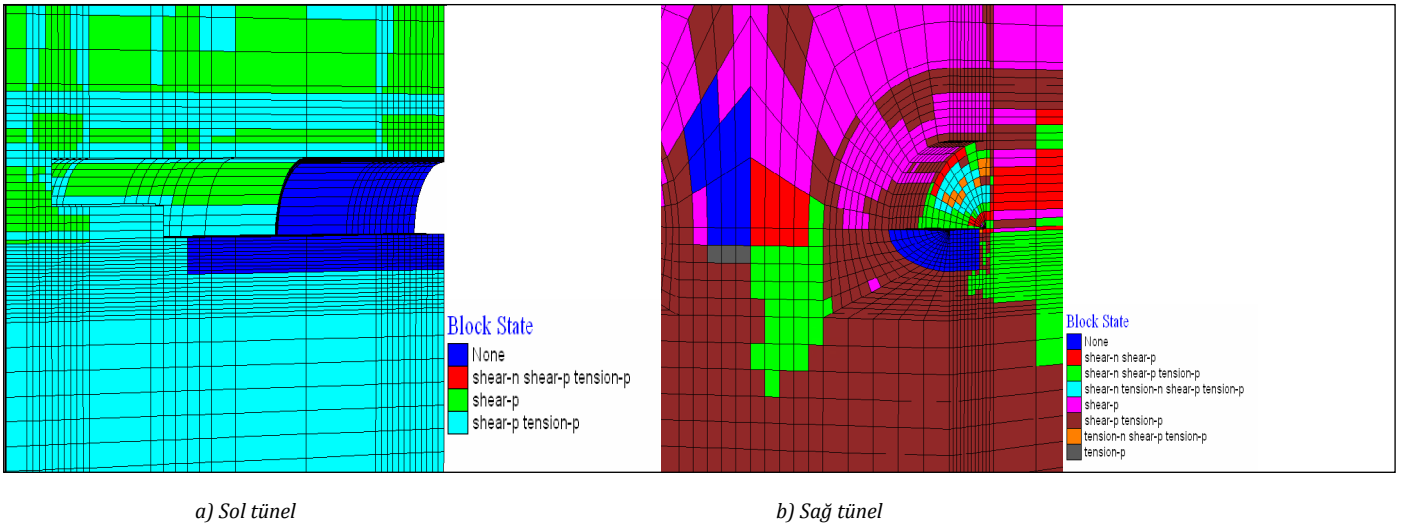
**Tension-p:** Çekme gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ancak kuvvetlerin azalması nedeniyle durduğunu göstermektedir.

**N:** Herhangi bir yenilmenin olmadığını göstermektedir.

Filiş serisinde açılan tünel için sağ tüneldeki kazı işlemi sırasında, ilk etapta üst yarıda ilk 10 m'lik bölümün kazısı yapılmış daha sonra alt yarı ve invert kazılarına başlanmıştır. Metakristalin bölümde ise, üst yarıda 2 m kazı, daha sonra alt yarıda 2 m kazı işlemi ile beraber tünel kazısı bir bütün olarak devam etmiştir. Böyle 2 farklı sistemin seçilmesindeki temel etken ring kapanma mesafesinin tüneller üzerinde etkisini görebilmektir.

### 3.1.1. Filiş Serisi İçin Yapılan Statik Çözümler

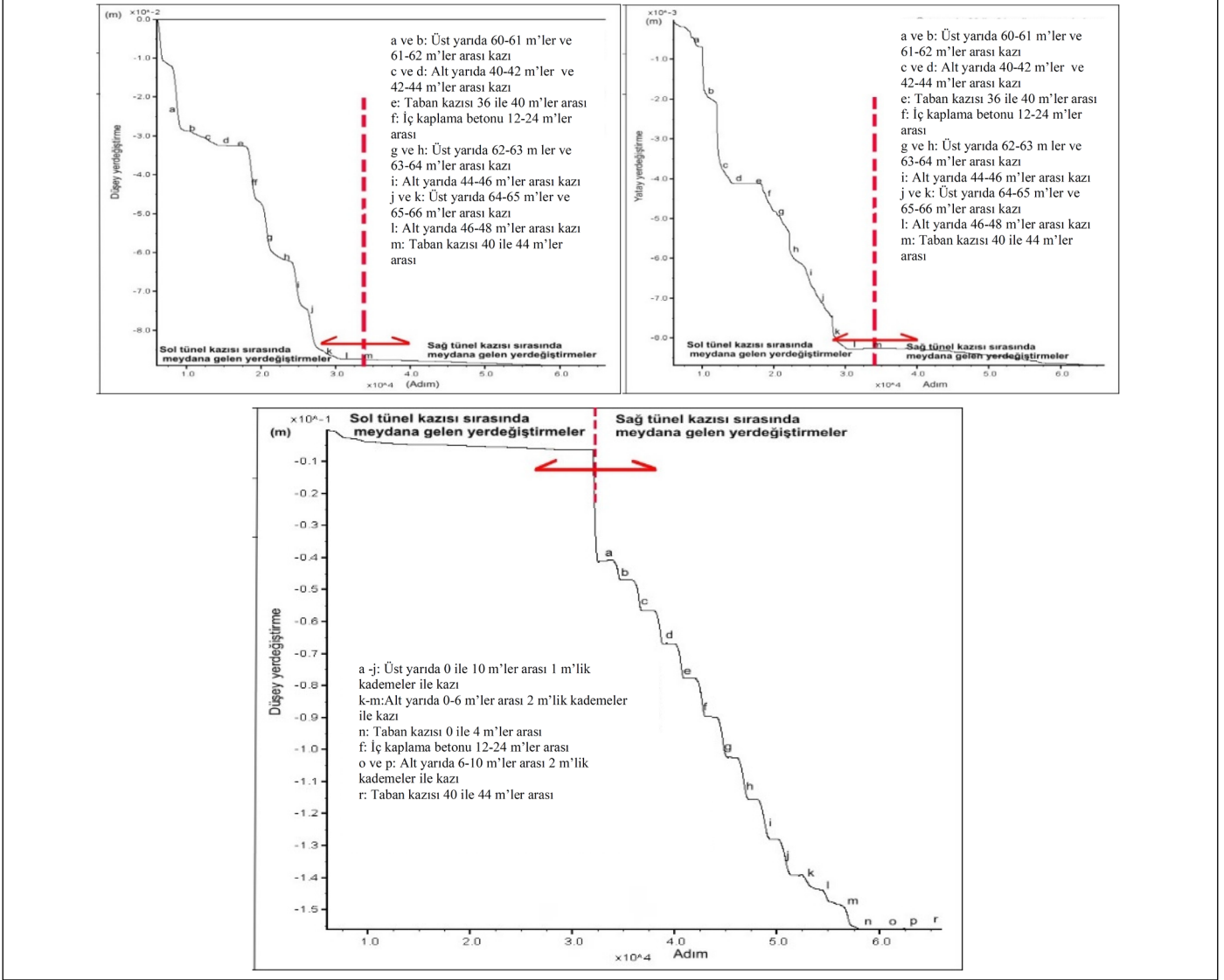
Tünellerde en son aşamada meydana gelen yenilme durumları ile yerdeğiştirme değişimleri incelenmiştir. Oluşturulan modellerde statik koşullarda meydana gelen yenilme durumları Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 13. Statik analiz sonucunda sol ve sağ tünelde meydana gelen yenilme durumu (kesit görünüşü)

Çizelge 3. Tünellerde meydana gelen yerdeğiştirme ve gerilmeler

Belirlenen noktalar	x yönü (mm)	y yönü (mm)	z yönü (mm)
Sol tünel 62 m tünel tavanı	1,84	12,2	-89
Sol tünel 42 m alt yarı	-8,63	-1,97	-18,5
Sağ tünel 2 m tünel tavanı	8,94	-7,01	-156



Şekil 14. Sol tünel üst yarı 62. m'de, alt yarı 42.m'de ve sağ tünel 2.m'de tünel kazı aşamalarına bağlı olarak meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler

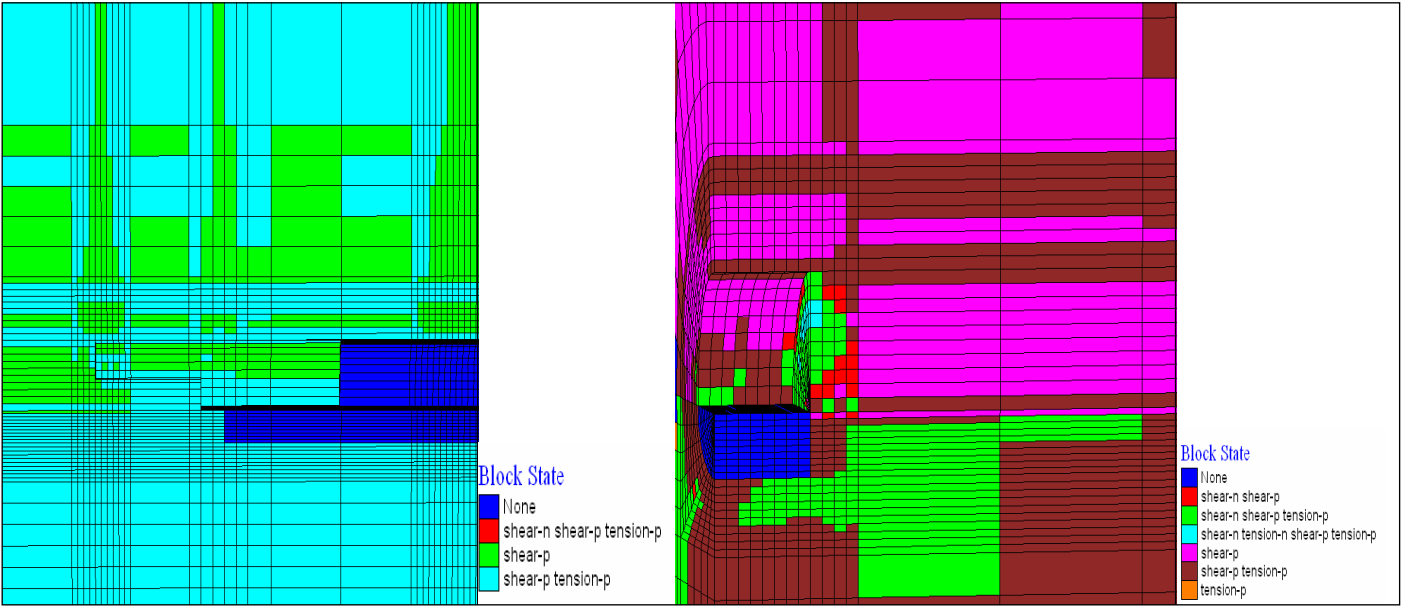
### 3.1.2. Metakristalin Tabaka İçin Yapılan Statik Analiz Çözümleri

Metakristalin tabakada analizler sonucunda meydana gelen yenilme durumları Şekil 15' te sunulmaktadır. Sol tüneldeki yenilme durumları incelendiğinde alt yarı bölümünde makaslama ve çekme gerilmelerine bağlı olarak yenilmelerin olduğu ve kuvvetlerin azalmasıyla durduğu gözlenmiştir. Üst yarı bölümünde ise etkin olarak makaslama kuvvetlerin etkisiyle yenilmelerin meydana geldiği ve zamanla gerilmelerin azalmasıyla durduğu gözlenmiştir. Sağ tüneldeki yenilme durumlarında ise alt yarı bölümünde makaslama kuvvetlerin etkisiyle yenilmelerin olduğu ve gerilmelerin azalmasıyla durduğu gözlenirken invert bölümüne yakın kısımlarında makaslama kuvvetlerin etkisiyle yenilmelerin devam ettiği görülmektedir. Üst yarı bölümünde ise etkin olarak makaslama kuvvetlerinin etkisiyle yenilmelerin meydana geldiği ve zamanla kuvvetlerin azalmasıyla durduğu gözlenmiştir. Şekil 16'da ve Çizelge 4'de tünellerde meydana gelen yerdeğiştirmeler ve gerilmeler sunulmaktadır. Meydana gelen yerdeğiştirmelerden de görülebileceği gibi, filiş serisine benzer şekilde sol tünelde kazı işleminin bitmesi ile beraber sağ tünel kazısına başlandığı dönem sırasında yerdeğiştirmelerde bir değişim gözlenmemiş ve sabit olarak devam etmiştir. Bir anlamda sağ tünel kazısının sol tünelde bir etkisinin olmadığını, sol tünel ile sağ tünel arasında bırakılan topuk ve ayna aralarındaki mesafelerin yeterli olduğunu göster-

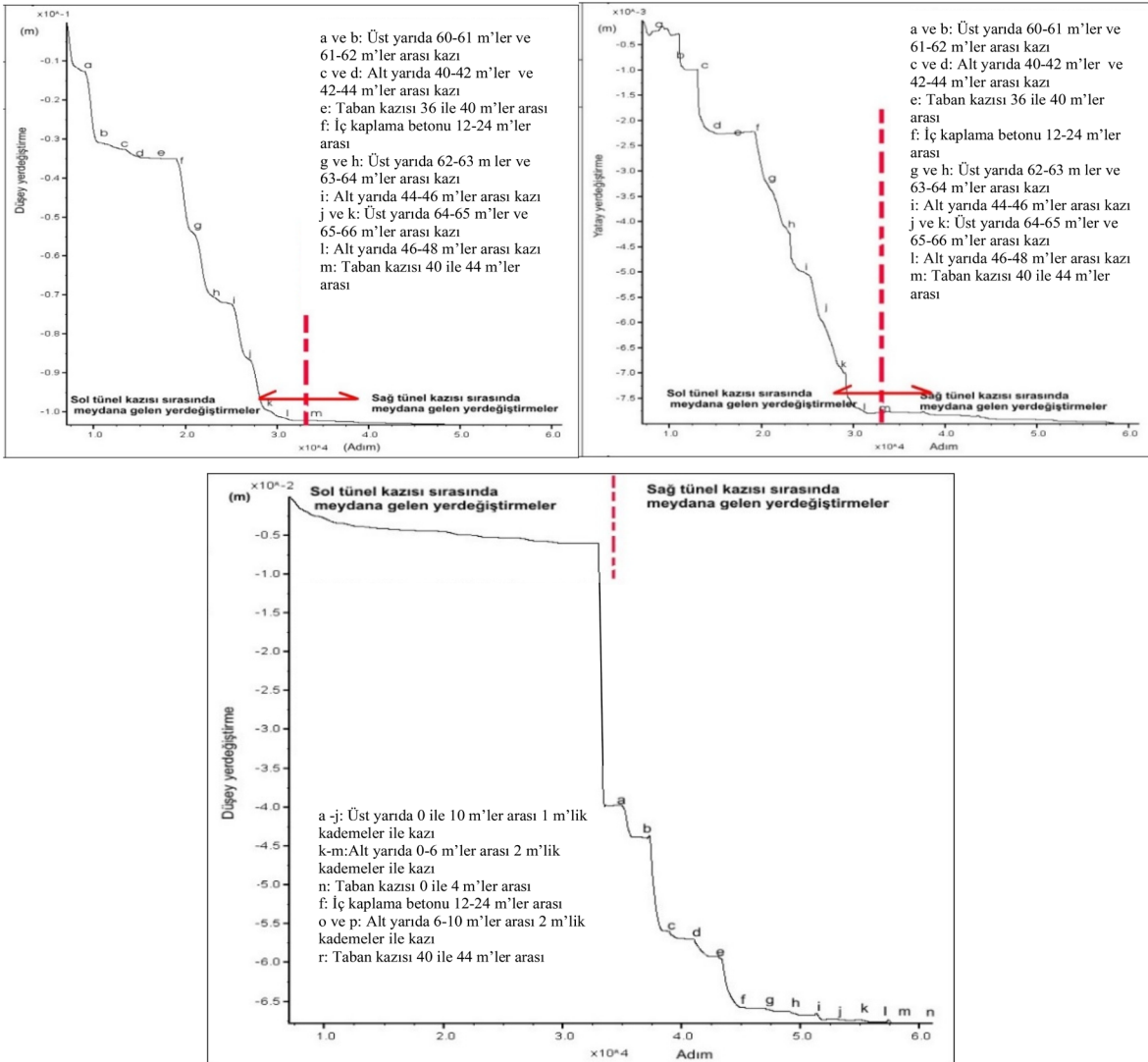
mektedir. Tünellerde meydana gelen değişimler sınır değerler içerisinde kalmıştır. Tünellerde yapılan kazı aşamaları ve destek sistemleri ile tünel duraylılığı sağlanmıştır. Ayrıca filiş ve metakristalin tabakalarda sağ tünel için yapılan farklı modelleme aşamaları incelendiğinde, üst yarıda kazı işleminin 10 m devam ederek daha sonra alt yarı ve invert kazılarının yapıldığı durumda tüneldeki yerdeğiştirmelerin daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Metakristalin tabaka da ise; üst yarı, alt yarı ve invert kazılarının ardışık olarak yapılarak tünelin bir bütün olarak (tünel halkasının tamamlanması) destek görevini yapmasından dolayı yerdeğiştirmelerin daha yavaş düzeyde olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç bize tünelin üst yarı, alt yarı ve invert kazılarının en kısa sürede bitirilmesi ve tünelin bir bütün olarak destek görevinin yapması tünel duraylılığı açısından önemini göstermektedir.

Çizelge 4. Tünellerde meydana gelen yerdeğiştirmeler

Belirlenen noktalar	x yönü (mm)	y yönü (mm)	z yönü (mm)
Sol tünel 62 m tünel tavanı	1,22	15,3	10,3
Sol tünel 42 m alt yarı	8,00	26,9	19,4
Sağ tünel 2 m tünel tavanı	3,38	44,7	67,8



Şekil 15. Statik analiz sonucunda sol ve sağ tünelde meydana gelen yenilme durumu



Şekil 16. Sol tünel üst yarı 62 m'de, alt yarı 42 m'de ve sağ tünel 2 m'de tünel kazı aşamalarına bağlı olarak meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler

#### 4. Sonuçlar

Analizlerde yerdeğiştirmeler sınır değerler içerisinde kalmaktadır. Tünel kazısının ardışık olarak yapılması tünel stabilitesi açısından önemlidir. Üst yarı, alt yarı ve invert mesafeleri mümkün olduğunca erken tamamlanmalı ve tünel destek sistemleri bir bütün olarak çalışmalıdır.

İki tünel arasında bırakılan topuk mesafesi ile üst yarı aynaları arasındaki bırakılan mesafeler yeterli geldiği görülmüştür.

Zayıf zeminlerde açılan iki tünelin birbirine olan etkisinin en aza indirilmesi en önemli faktörlerden birisidir.

Her bir kaya sınıfı için bu mesafeler zemine göre revize edilmelidir. Aksi takdirde tünellerin birbirine olan etkisi tünel destek sistemlerinin stabilitesi üzerinde olumsuz etki yapacaktır.

Zayıf zeminlerde açılan tünellerde iç kaplama betonu tünelde deformasyonların sönümlenmesinden hemen sonra yapılmalıdır. Aksi takdirde oluşacak olan şişme ve sıkışma basınçları uzun dönemde dış kaplamanın stabilitesini olumsuz etkileyecektir.

Zayıf zeminlerde yapılacak olan iç kaplama uzun dönemde oluşabilecek olan şişme ve sıkışma basınçları da karşılanacak düzeyde olmalıdır. Bu bölgelerde iç kaplama donatılı olarak yapılmalıdır.

#### Kaynaklar

Aygar, E. B. 2000. Yeni Avusturya tünencilik yöntemine eleştirel bir yaklaşım. [master tezi]. [Ankara]:Hacettepe University

Aygar, E.B. 2007. Bolu Tüneli duraylılığının statik ve dinamik analiz yöntemleriyle incelenmesi. [doktora tezi]. [Ankara]: Hacettepe University.

Aygar, E.B. 2020. Evaluation of new austrian tunnelling method applied to bolu tunnel's weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12 (2020) 541-556.

Aygar, E.B. 2021a. An evaluation on causes behind the bolu tunnel collapse following the 12 November 2 1999 düzce earthquake: seismic action or inadequate tunnel support capacity, in Reviewer.

Aygar, E.B. 2021b. An assessment on problems encountered during tunneling in graphitic schists, in Reviewer.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2020. Problems encountered during a railway tunnel excavation in squeezing and swelling materials and possible engineering measures: a Case study from turkey. *Sustainability*. 12, 1166, <https://doi.org/10.3390/su12031166>.

Aygar, E.B. Gokceoglu C. 2021a. Evaluation of collapsed zone in t24 tunnel (ankara-istanbul high speed railway project, turkey). Euroengeo. 3rd European Regional Conference of IAEG.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2021b. A special support design for a large-span tunnel crossing an activefault (t9 tunnel, ankara-sivas high-speed railway project, turkey). *Environmental Earth Sciences*, 80 (1), 37, <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09328-1>.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2021c. Analytical solutions and 3d numerical analyses of a shallow tunnel excavated in weak ground: a case from turkey. *International Journal of Geo-Engineering*. 12 (1), 9, DOI: 10.1186/s40703-021-00142-7.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2021d. Evaluation of collapse mechanism and portal interaction of a high-speed railway tunnel (t29 Tunnel, turkey). Eurock 2021.Torino.

Barla, G. 2002. Tunnelling mechanics tunnelling under squeezing rock conditions tunnelling mechanics - advances in geotechnical engi-

neering and tunnelling (pp.169-268) chapter: 3 publisher: P.O.Box 1675 Editors: D. Kolymbas.

Barla, G. 2016. Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2016) 294-303.

Dalgıç, S. 2002. Tunneling in squeezing rock, the bolu tunnel, anatolian motorway. turkey. *Engineering Geology*.

Geoconsult ZT GmbH. 1998. Bolu tunnel geological longitudinal profile along left tube as built conditions, asarsuyu portal to elmalık portal.

Geoconsult ZT GmbH. 2002. Anatolian motorway stretch-2 bolu tunnel by-pass rock support class distribuiton.

Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithakan, A.G. 1995. Tunnelling through the young Himalayas – a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel. *Engrg. Geol.*, 39, pp. 31-44.

Hoek, E. 2001. Big tunnels in bad rock, The 36th Karl Terzaghi lecture. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, A.S. C.E.*, 127(9), 726-740.

Hoek, E. 2007. Practical Rock Engineering, p 341, <https://www.rocs-science.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>.

Hoek, E. 2012. Rock Support Interaction analysis for tunnels in weak rock masses, <https://www.rocs-science.com/documents/pdfs/rocsnews/winter2012/Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf>.

Hoek, E., Marinos, P. 2000. Predicting tunnel squeezing. *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2.

Itasca, 2002. Flac3d User Manual Getting Started.

Jethwa, J. L. 1981. Evaluation of rock pressures in tunnels through squeezing ground in lower himalayas. PhD thesis.Department of Civil Engineering. University of Roorkee,India, 272.

KGM (General Directorate of Highways). 2013. Technical specifications of general directorate of highways.

Lettis, W. & Associates Inc., A.Barka, 2000. Geologic Characterisation of Fault Rupture Hazard, Gümüşova-Gerede Motorway project report.

Lunardi, P. 2000a. The underground as a resource and reserve for new spaces; adec-rs as an effective tool to be able to realize them (part 1). Proceedings of the Bindi R, Cassani G World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.

Lunardi, P. 2000b. The underground as a resource and reserve for new spaces; adeco-rs as an effective tool to be able to realize them (part 2). Proceedings of the Bindi R, Cassani G World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.

Lunardi, P. 2008. Design and construction of tunnels, analysis of controlled deformation in rocks and soils (adeco-rs). 587 p.

Lunardi, P. 2014. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils. T&T Interneational ADECO-RS Approach, [www.rocksoil.com](http://www.rocksoil.com).

Lunardi, P. 2016. Evolution of design and construction approaches in the field of tunnelling: the results of applying ADECO-RS when constructing large underground works in urban areas. *Procedia Engineering*, 165, 484 – 496.

Rabcewicz, L. 1964a.The new austrian tunnelling method, part one. *Water Power*. 453–7.



- Rabcewicz, L. 1964b. The new austrian tunnelling method, part two. Water Power 1964b; 511-5.
- Rabcewicz L. 1965. The new austrian tunnelling method, part three. Water Power 1965; 19-24.
- Rabcewicz, L, Golser J. 1973. Principles of dimensioning the supporting system for the "new austrian tunnelling method". Water Power, Marc, 88-93.
- Sakurai, S. 1983. Displacement measurements associated with the design of underground openings. Proc. Int. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zurich 2, 1163-1178.
- Schubert, W. 1996. Dealing with squeezing conditions in Alpine tunnels." Rock Mech. Rock Engng. 29(3), 145-153.
- Singh, B., J, L., Jethwa, A. R., Dube, B., Singh. 1992. Correlation between observed support pressure and rock mass quality." Tunnelling and Underground Space Technology. 7(1).





Derleme / Review

## Kritik Hammaddelerin Geri Dönüşüm ile Döngüsel Ekonomiye Kazandırılması

### *Gaining of Critical Raw Materials to Circular Economy by Recycling*

Ata Akcil<sup>a,\*</sup>, Ceren Erüst Ünal<sup>b,\*\*</sup>, M. Demet Okudan Altındaş<sup>c,\*\*\*</sup><sup>a</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE<sup>b</sup> Munzur Üniversitesi, Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Tunceli, TÜRKİYE<sup>c</sup> Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Fakültesi İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

Geliş-Received: 12 August - Ağustos 2021 \* Kabul - Accepted: 22 Şubat - February 2022

ÖZ

Endüstri 4.0 devrimi ve Nesnelerin İnterneti gibi teknolojilerle dijitalleşme, kaynaklarımızın ve ekonomilerimizin döngüsel olmasını gerektirmektedir. En başta Avrupa Birliği olmak üzere tüm ülkeler, kritik hammaddelerin sorumlu tüketiminin, üretiminin ve geri dönüşümünün sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmanın bir yolu olarak çok önemli olduğu konusunda hemfikirlerdir. Ömrünü tamamlamış ürünlerden kritik hammaddelerin geri kazanılması için uygun maliyetli bir geri dönüşüm yöntemi, madencilikten çok daha az çevresel etkiye sahiptir. Biyohidrometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler, kritik hammaddelerin, özellikle nadir toprak elementlerinin çıkarılması için hızlı gelişen, seçici, çevre dostu ve uygun maliyetli teknolojilerdir. Bu makale, ikincil kaynaklara genel bir bakış sağlamakta ve kritik hammaddelerin kazanımı için ekonomik bir yol olarak hizmet edebilecek bazı umut verici yöntemlerin kullanımına ilişkin yürütülen çalışmaların senaryosunu özetlemektedir.

**Anahtar Kelime:** *Biyohidrometalurji, Döngüsel ekonomi, Geri dönüşüm, Hidrometalurji, Kritik hammadde*

A B S T R A C T

Digitalization with technologies such as the Industry 4.0 revolution and the Internet of Things requires our resources and economies to be circular. All countries, especially the European Union agree that responsible consumption, production and recycling of critical raw materials are essential as a means of achieving sustainable development goals. A cost-effective recycling method for the recovery of critical raw materials from end-of-life products has far less environmental impact than mining. Biohydrometallurgical and hydrometallurgical methods are fast developing, selective, eco-friendly, and cost-effective technologies for the extraction of critical raw materials especially rare earth elements. This article provides an overview of secondary resources and summarizes the scenario of studies regarding the use of some promising methods that can serve as an economical way to recover critical raw materials.

**Keywords:** *Biohydrometallurgy, Circular economy, Recycling, Hydrometallurgy, Critical raw material*

### Giriş

Son on yılda, hammadde arzı ve aksaklıkların potansiyel olumsuz etkileri konusundaki artan endişelere yanıt olarak "kritik hammadde" kavramı ortaya çıkmıştır (Avrupa Komisyonu, 2010). Bir 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 etiketlenmektedir (Massari ve Ruberti, 2013). Her üç yılda bir Avrupa Komisyonu tarafından yayınlanan

listeye yeni hammaddeler eklenmekte veya kritik durumda olmayan hammaddeler bu listeden çıkartılmaktadır.

2020 yılında Avrupa Komisyonu, bölgesel endüstrilerin ortaya çıkan birçok önemli teknoloji için kritik olan ve olası siyasi gerginlikler nedeniyle önemini vurgulayan 30 hammaddenin bir listesini yayınlamıştır (Avrupa Komisyonu, 2020a). 2017 ve 2020 kritik hammadde listesi karşılaştırıldığında; 2017 yılında kritik hammadde olarak görülmeyen Boksit, Lityum ve Titanyum'un listeye eklendiği ve tam tersi 2017'de kritik hammadde olarak görülen Helyum'un ise

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: ataakcil@sdu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-9991-0543>\*\* cerenerust@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-9459-3374>\*\*\* medihademet.okudan@sbu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-6014-903X>

2020 kritik hammadde listesinden çıkarıldığı görülmektedir. Ayrıca stronsiyum 2020 kritik hammadde listesinde yer alan tek yeni aday hammaddedir.

**Çizelge 1.** Kritik öneme sahip hammaddelerin listesi (Avrupa Komisyonu, 2020)

2017 ve 2020 Kritik Hammaddeler			
Antimon	Fosfor	Magnezyum	HNTE
Barit	Galyum	Niyobyum	PGM
Berilyum	Germanyum	Silikon metal	Helyum
Bizmut	Hafniyum	Skandiyum	Boksit
Borat	İndiyum	Tantalyum	Lityum
Doğal grafit	Kobalt	Tungsten	Titanyum
Doğal kauçuk	Koklaşabilir taş kömürü	Vanadyum	Stronsiyum
Fosfat kayaları	Kalsiyum florit	ANTE	

- 2017 ve 2020 kritik hammaddeleri
- ◆ 2017’de kritik hammadde olup 2020’de listeden çıkarılanlar
- 2017’de kritik hammadde olmayıp 2020 listesine eklenenler
- 2017’de değerlendirilmeyip 2020’de değerlendirilen kritik hammaddeler

“Kritiklik Seviyesi” 2 ana başlık altında toplanmıştır:

1-) Ekonomik Önem (EÖ): Avrupa Birliği’ndeki son tüketim uygulamalarında kullanılan belirli bir hammaddenin önemine ve bu uygulamalarda yerine kullanılacak hammaddelerin önemine dayanır.

2-) Arz Riski (AR): Belirli bir hammaddenin tedarik edilememe riskini ölçen faktörlere dayanarak hesaplanır. Bu faktörlerden bazıları; küresel arz, kaynak sağlayan ülkeler, ülkeler arası ticaret kısıtlamaları ve anlaşmaları, ikame hammaddelerin varlığı, arzı sağlayan ülkelerin yönetim durumu gibi faktörlerdir.

Kritik hammaddeler, grafiğin kritiklik bölgesi (Arz Riski  $\geq 1$  ve Ekonomik Önem  $\geq 2.8$ ) içinde bulunmaktadır (Şekil 1). Bu kri-

**Çizelge 2.** Piyasa değeri ve küresel üreticiler ile ortak kritik hammaddelerin listesi (Panda ve Akcil, 2021)

Hammaddeler	Küresel Pazar Değeri (milyon \$)	En büyük üreticiler*
Antimon	153	Çin (%63)
Galyum	5.275	Çin (%97)
Germanyum	2.855	Çin (%65)
İndiyum	5.275	Çin (%39)
Lityum	1.978	Avustralya (%61)
Kobalt	1.576	KDC <sup>1</sup> (%71)
Niyobyum	15.905	Brezilya (%88)
NTE	4.338	Çin (%72)
PGM	51.234	GA <sup>2</sup> (%57)
Skandiyum	4.338	-
Tantalyum	6.029	KDC <sup>1</sup> (%41)
Titanyum	4.485	Çin (%40-Metal, %27 İlmenit) Avustralya (%29- Rutil)
Tungsten	571	Çin (%82)
Vanadyum	5.099	Çin (%54)

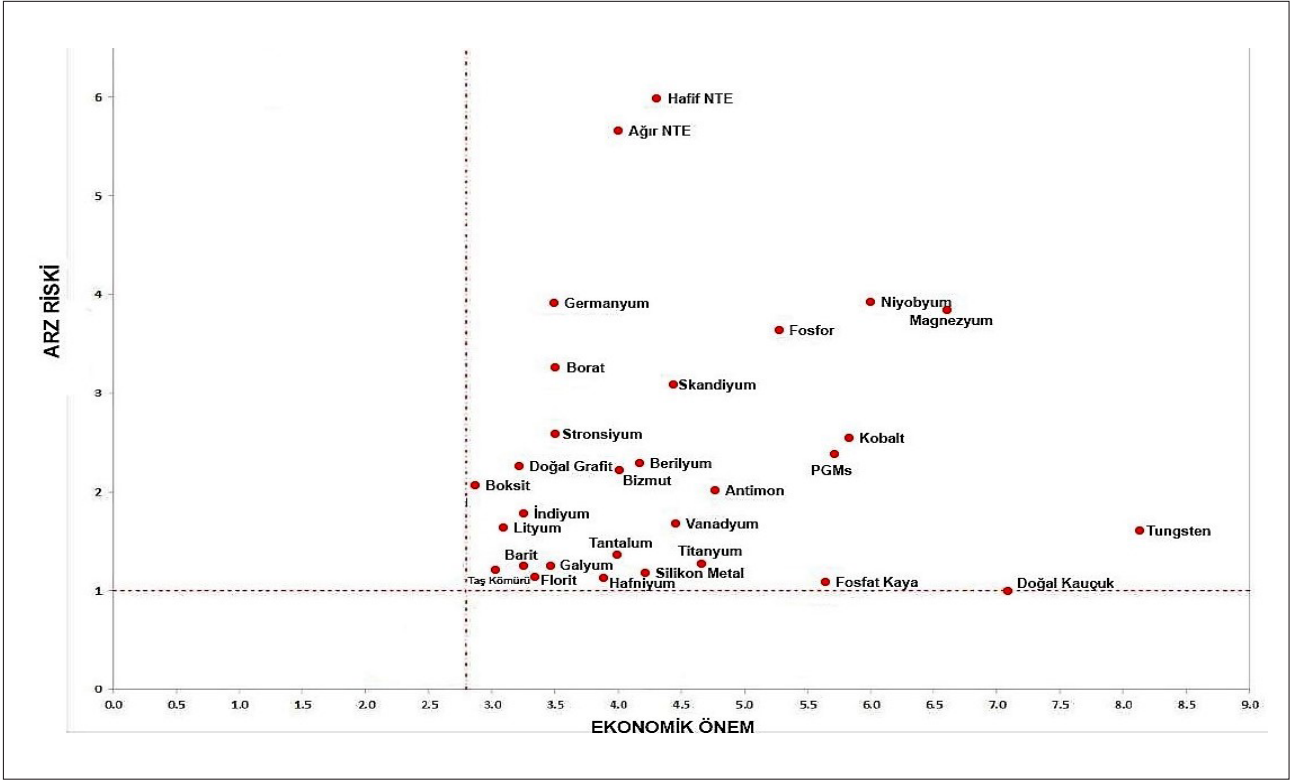
\*coğrafi potansiyeli gösterir.

<sup>1</sup>Kongo Demokratik Cumhuriyeti, <sup>2</sup>Güney Afrika

tik hammaddeler listesinde, Çizelge 1’de verilen 27 hammadde ve 3 element grubu yer almaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020a). Üç element grubu; Platin Grup Metalleri (PGM) (iridyum, paladyum, platin, rodyum, rutenyum), Ağır Nadir Toprak Elementleri (ANTE) (disporsiyum, erbiyum, evropiyum, gadolinyum, holmiyum, lutesyum, terbiyum, tulyum, iterbiyum, itriyum) ve Hafif Nadir Toprak Elementlerini (HNTE) (lantanyum, seryum, praseodim, neodimyum, samaryum) içermektedir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke kritik hammadde talebini karşılayamadığından, metal ve metal konsantrelerin ithalatına bağımlılıkları nedeni ile bölgesel kritik hammadde listelerini oluşturmuştur. 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 (US-DOE, 2019). AB, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avustralya kritik hammadde raporlarında sunulan ortak kritik hammaddelerin 2019 yılı verileri ile piyasa değerleri ve küresel üreticilerinin bir listesi Çizelge 2’de gösterilmektedir.

Endüstri 4.0 hedefleri ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojilerinin benimsenmesiyle ileri teknoloji ürünlerinin ve mühendislik sistemlerinin üretiminde kullanılan bu kritik hammaddelerin kazanım oranlarını en üst düzeye çıkarmak için uluslararası atık yönetim çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Awasthi vd., 2018). Etkili toplama sistemleri, kritik hammaddelerin geri dönüşümü/kazanımı için bir ön koşuldur ve bu amaçla kullanılan altyapının yerel koşullara uygun olması gerekir. Atık miktarını azaltma, tamirat, yeniden kullanım ve geri dönüşümün daha belirgin hale gelmesiyle malzeme akışlarını ele alan ve döngüsel ekonomiye (DE) doğru ilerleyen çok yönlü bir yol izlenmelidir (Scott ve Barrett, 2015). Birincil kaynakların arama, madencilik ve işlenmesinden sonra elde edilen kritik hammaddelerin döngüsel ekonomi akış şeması Şekil 2’de gösterilmektedir. Döngüsel ekonomi, ürünlerin, malzemelerin ve kaynakların kullanım ömrünün mümkün olduğu kadar uzun sürdüğü, kaynak kullanımını ve geri dönüşüm yolu ile kaynak kaybını en aza indiren bir ekonomidir (Avrupa Komisyonu, 2017). Geri dönüşüm / kazanım ile hammadde kazanımı işlevsel hale getirilerek sürdürülebilir kaynak kullanımını hedeflenmektedir.



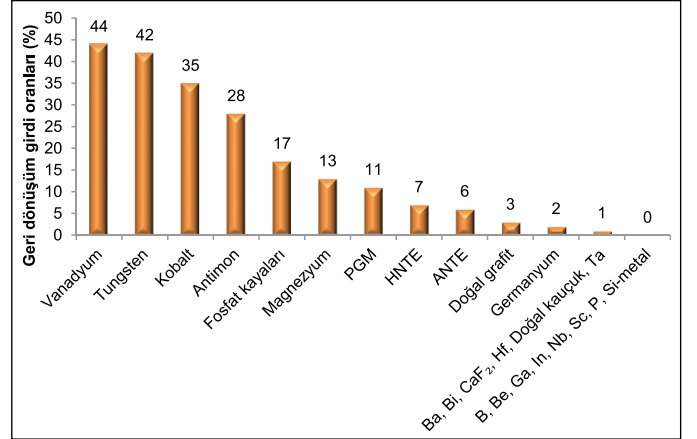
NTE: Nadir Toprak Elementleri, PGMs: Platin Grup Metalleri

Şekil 1. Kritik hammaddelerin arz riski - Ekonomik önem grafiği (Avrupa Komisyonu, 2020a)



Şekil 2. Döngüsel ekonomi akış şeması (EIT RawMaterials, 2020a)

Geri dönüşüm, önemli bir ikincil hammadde (İHM) kaynağıdır. Hammadde arzının güvenliğine ve daha döngüsel bir ekonomiye doğru ilerlemeye katkı sağlayabilir. Bazı kritik hammaddelerin yüksek geri dönüşüm potansiyeli olmasına ve hükümetlerin döngüsel ekonomiye geçme yönündeki teşviklerine rağmen, kullanım ömrü dolmuş (End-of-life, EoL) ürünlerin geri dönüşüm girdi oranları oldukça düşüktür (Şekil 3).



Şekil 3. AB'nin kritik hammadde talebini karşılamak için geri dönüşümün mevcut katkısı: EoL ürünlerin geri dönüşüm girdi oranları (Deloitte Sustainability, 2017)

Avrupa Komisyonu, Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'nda Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) kapsamında batarya ve araçların gelecek hareketliliğinin temelini oluşturacağı belirtilmiş ve döngüsel iş modellerini teşvik etmek amacıyla ömrünü tamamlamış elektrikli araçlarla (EOL-EVs) ilgili geri dönüşüm verimliliğinin artırılmasının önemi vurgulanmıştır (Avrupa Komisyonu, 2020b). Türkiye'de 16 Temmuz 2021 tarihinde Yeşil Mutabakat Eylem Planı'na ilişkin genelge yayımlanarak, eylem planının uygulanmasını takip etmek ve gerekli koordinasyonu sağlamak üzere "Yeşil Mutabakat Çalışma Grubu" oluşturulmuştur (Resmî Gazete, 2021). Eylem Planı çerçevesinde 9 temel başlık altında (sınırdaki karbon düzenlemeleri, yeşil ve döngüsel bir ekonomi, yeşil finansman, temiz, ekonomik ve



güvenli enerji arzı, sürdürülebilir tarım, sürdürülebilir akıllı ulaşım, iklim değişikliği ile mücadele, diplomasi, Avrupa Yeşil Mutabakatı bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri) 32 hedef ve belirlenen hedeflere ulaşılması amacıyla 81 aşama yer almaktadır. Eylem Planının “Yeşil ve Döngüsel Bir Ekonomi” başlığı altında gerçekleştirilecek adımlar ile Avrupa Komisyonu Ekonomi Eylem Planına adaptasyonunun sağlanması ve AB’deki değişikliklerin ülkemiz üzerindeki olası etkilerine karşı hazırlıklı olunması hedeflenmektedir. Bu nedenle, ulusal döngüsel ekonomi eylem planının hazırlanması oldukça önemlidir. Bu doğrultuda geri kazanılmış ikincil ürün ve malzeme kullanımı için teknik kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir (Yeşil Mutabakat Eylem Planı, 2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021 doğrultusunda ülkemizin yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği çalışmalarının, Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında getirilen değişikliklere paralel olarak değerlendirilmesi ve ihtiyaç olması halinde geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu derleme; Avrupa ve dünya çapında yayınlanmış kritik hammadde ve döngüsel ekonomi raporlarını ve 30’dan fazla araştırma makalesini içermektedir. Teknik ve ekonomik fizibiliteye bağlı olarak, kritik metallerin ömrünü tamamlamış ürünlerden geri dönüş-

türülmesine odaklanan en son eğilimler yansıtılmış ve hidro&bi-yohidro-metalurjik çalışmalar özetlenmiştir. Stratejik sektörlerde kullanılan ve kritik hammadde sınıfında yer alan NTE’lerin geri kazanımı ve yönetim stratejileri hakkında da bazı çevre dostu yenilikçi çalışmalar yer almaktadır ve bu tür yaklaşımlar günümüzde oldukça fazla ilgi görmektedir.

### 1. Kritik hammaddeler nerede kullanılır?

Hammaddeler AB ekonomisinin tüm sektörleri için kilit unsurlardır. Özellikle kritik hammadde olarak değerlendirilenler (Avrupa Komisyonu, 2020a), yenilenebilir enerji, elektrikli araç teknolojisi (e-mobilite), savunma sanayi, havacılık ve dijital teknolojiler gibi stratejik sektörlerin geliştirilmesi için temel ön koşullardır (Buchert vd., 2012). Ayrıca çeşitli endüstriyel ekosistemlerin işleyişi ve bütünlüğü için gereklidir (Çizelge 3). Kritik hammaddeler kategorisinde yer alan tungsten, telefonlarda titreşim özelliğini sağlamaktadır. Galyum ve indiyum ise LED teknolojisinin bir parçasıdır. Yarı iletkenler silikon metale, hidrojen yakıt hücreleri ve elektrolizörler ise PGM’lere ihtiyaç duyarlar (Avrupa Komisyonu, 2020c).

**Çizelge 3.** Endüstriyel Ekosistemler için Kritik Hammaddelerin Uygunluğu (Avrupa Komisyonu, 2020c)

	Havacılık Savunma	Elektronik	Mobilite Otomotiv	Enerji yoğun endüstriler	Yenilenebilir enerji	Sağlık	Dijital	İnşaat
Antimon	✓		✓					✓
Barit			✓	✓		✓		✓
Boksit	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Berilyum	✓	✓	✓		✓		✓	
Bizmut	✓	✓		✓		✓	✓	✓
Borat	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Kobalt	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Koklaşabilir taş kömürü			✓	✓	✓			
Kalsiyum florit				✓				
Galyum	✓	✓	✓		✓		✓	✓
Germanyum	✓	✓		✓	✓			
Hafniyum	✓	✓		✓	✓		✓	
İndiyum	✓	✓			✓		✓	
Lityum	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Magnezyum	✓	✓	✓	✓			✓	✓
Doğal grafit	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Doğal kauçuk	✓		✓			✓		
Niyobyum	✓	✓	✓	✓		✓		✓
Fosfat kayaları				✓				
Fosfor	✓			✓				
Skandiyum	✓		✓		✓			
Silikon metal	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Stronsiyum	✓	✓		✓		✓		✓
Tantalyum	✓	✓		✓	✓		✓	
Titanyum	✓	✓	✓	✓		✓		✓
Tungsten	✓	✓	✓	✓		✓		
Vanadyum	✓		✓	✓	✓	✓		✓
PGM	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
ANTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
HNTE	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

Mevcut bilgilere dayanarak yayınlanan Avrupa Komisyonu öngörülerinde belirtilen stratejik teknolojiler ve sektörler, 2030 ve 2050 yılı için kritik hammadde görünümünü sağlayarak son verilere dayalı kritiklik değerlendirmesini tamamlamaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020d). AB'nin (COVID-19 salgını öncesi) 2050 yılı için iklim nötrlüğü senaryolarını tahmini hammadde talebine çevirmekte ve tedarik zincirlerinin farklı seviyelerindeki tedarik risklerini ele almaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020a). Buna göre; tüm AB ekonomisine mevcut arz ile kıyaslandığında elektrikli araç pilleri ve enerji depolama için, AB'nin 2030'da 18 kat daha fazla lityum ve 5 kat daha fazla kobalt ve 2050'de neredeyse 60 kat daha fazla lityum ve 15 kat daha fazla kobalt ihtiyacı olacaktır. Talepteki bu artışın arz sorunlarına yol açacağı açıkça görülmektedir.

Kalıcı mıknatıslarda kullanılan NTE'lere olan talep (örn. elektrikli araçlar) dijital teknolojiler veya rüzgar jeneratörleri için 2050 yılına kadar on kat artabilir (Avrupa Komisyonu, 2020c). NTE'ler, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, elektrikli araçlar ve enerji verimli aydınlatmada ikamesi olmayan hammaddeler olup iklim değişikliğiyle mücadele ve çevresel kaygıların giderilmesi için de oldukça önemlidir. Örneğin, ülkelerin iklim ve enerji hedeflerini karşılaması için gerekli olan ve Avrupa Yeşil Mutabakatı ile belirtilen düşük karbonlu teknolojilerin üretiminde NTE'lere olan talebin 2030 yılına kadar 20 kat artması beklenmektedir (EIT Raw-Materials, 2020b;c).

Piller, elektrikli araçlar için bir güç kaynağı olmanın yanında güneş ve rüzgar gibi çeşitli kaynaklardan üretilen enerjiyi de depolar. Kobalt, lityum, grafit ve nikel, pil üretiminde kullanılan stratejik hammaddelerdir. Dispersiyum, neodimyum ve praseodim ise elektrikli araçlar ve rüzgar jeneratörleri için motor yapımında hayati önem taşıyan nadir toprak elementleridir. Lityum-iyon piller savunma uygulamaları için çok önemli olmakla birlikte, bunların

gelişimi ve gelecekteki kullanımı, öncelikle taşınabilir elektronik cihazlara, sabit enerji depolamaya ve elektrikli araçlara yönelik sivil talepten kaynaklanmaktadır (Bobba vd., 2020).

Orta ve uzun vadede yakıt hücreleri, hidrojen yakıt tedariki ile potansiyel bir temiz enerji çözümü sunacaktır. Yakıt hücreleri, sürdürülebilir ve güvenli enerji tedarik sistemlerine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Yakıt hücrelerinde, oksidasyon redüksiyon reaksiyonları ile yakıttan güce dönüşüm için yüksek katalitik aktivite ve seçiciliği nedeni ile yaygın olarak platin veya platin grubu metallerden yapılan katalizörler kullanılmaktadır. Mevcut araştırmalar, katalizörlerde bu kritik metalleri azaltmaya veya ortadan kaldırmaya ve artan aktivite ve dayanıklılık üzerine odaklanmaktadır (Leader, Gaustad ve Babbitt, 2019).

Robotik; endüstri, tarım, tıp, ulaşım, sosyal hizmetler, askeriye, uzay araştırmaları ve denizaltı operasyonlarının birçok uygulama alanı için muazzam potansiyele sahip gelişmekte olan bir teknolojidir. Robotikte kullanılan 44 hammaddeden 19'u AB ekonomisi için kritik olarak etiketlenmektedir. Çin, robotik uygulamalarda kullanılan kritik hammaddelerin %40'ından fazlasını sağlaması sebebiyle en büyük kritik hammadde tedarikçisi konumundadır ve onu Güney Afrika (%10) ve Rusya (%9) izlemektedir (Bobba vd., 2020).

Dron olarak da bilinen "İnsansız Hava Araçları" (İHA), 1970'lerden itibaren başlayan sivil uygulamaları ile 2015 yılına kadar tarım, bilim, lojistik ve ticaret gibi çeşitli alanlarda gerçekleştirilen bir milyonun üzerinde ünite satışı sayesinde pazara hakim konumda olmuştur. Bununla birlikte, değer açısından pazar çoğunluğuna hala askeri uygulamalar hakim olup bunu ticari ve hobi uygulamaları izlemektedir (Statista, 2019). Çizelge 4'te stratejik sektörlerde kullanılan teknolojiler ve bu teknolojilerin içerdiği kritik hammaddeler belirtilmiştir.

**Çizelge 4.** Stratejik sektörlerde kullanılan teknolojiler ve kritik hammaddeler (Bobba vd., 2020)

Teknolojiler		Kritik Hammaddeler
 Lityum-iyon Pil Teknolojisi	Hem e-mobilite hem de aralıklı elektrik üretimi sağlayan enerji depolama sistemlerinde hızla yayılmaktadır. Savunma sanayi için giderek daha önemli hale gelmektedir.	C, Si, Ti, Co, Li, Nb
 Yakıt Hücreleri	Yakıt olarak hidrojen ile, henüz çok yaygın olmamasına rağmen, gelecekte enerji sistemlerinin dekarbonizasyonu ve e-mobilite için yüksek potansiyel sunacak olan önemli bir enerji dönüştürme teknolojisidir.	Co, Pd, Pt, C, Sr, Ti
 Rüzgar Enerjisi	İklim değişikliği için en uygun maliyetli yenilenebilir enerji teknolojilerinden birisi olup büyüyen bir sektör olmaya devam etmektedir.	Nb, B, Dy, Nd, Pr
 Elektrikli Çekiş Motorları	Elektrikli araçlarda temel bileşenlerdendir. NTE içeren kalıcı mıknatıslı motorlar, günümüzde ve gelecekteki e-mobilite uygulamaları için özellikle etkili ve caziptirler.	B, Dy, Nd, Pr, Si
 Fotovoltaik Teknolojiler	Rüzgar enerjisi ile elektrik sektörünün küresel dönüşümüne öncülük etmektedir.	B, Ge, Si, Ga, In, Mo
 Robotik	Enerji teknolojileri ve otomotiv uygulamalarında olduğu gibi savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde de üretim aşamalarında rolü giderek artan, gelişmekte olan bir teknolojidir.	Be, Ga, In, Nb, Ti, B, Dy, Nd, Pr
 Dronlar	İHA, hem sivil hem de çeşitli savunma uygulamaları için giderek daha fazla kullanılmaktadır.	Be, Ga, Ge, In, Hf, Mg, Nb, Sc, Ti
 3D Baskı	Geleneksel tedarik zincirlerini hızla yeniden şekillendirecek ve özellikle savunma sanayi ve havacılıkta geleneksel imalatın yerini alacak, tüketilen hammadde ve işlenmiş malzeme miktarında ve türünde önemli bir değişikliğe yol açacaktır.	Ti, Mg, Co, Hf, Nb, Sc, Si, W, V
 Dijital Teknolojiler	Kritik hammaddelerin çoğu, bilgi ve iletişim teknolojisi (BIT) cihazları ve gelişmiş elektronik cihazlar için özellikle gereklidir.	B, Co, Ga, Ge, Si, Li, C, In, Mg, W, NTE, PGM

Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve diğer ülkeler, gelecekteki tedarikleri güvence altına almak, kaynak açısından zengin ülkelerle ortaklıklar yoluyla tedarik kaynaklarını çeşitlendirmek ve kendi iç hammadde bazlı değer zincirlerini geliştirmek için hızlı bir şekilde çalışmalarını sürdürmektedirler (Avrupa Komisyonu, 2020c). Rademaker vd. (2013), özellikle AB'nin Çin'e bağımlılığı bulunan NTE'lerin kritiklik seviyelerini azaltmak için bu hammaddelerin geri dönüşümüne odaklanmıştır. 2030 yılına kadar rüzgar türbinleri, elektrikli araçlar ve sabit disk sürücülerinde kullanılan kalıcı mıknatısların içerdiği neodimyum ve dispersiyuma küresel talebin artacağını ve uzun vadede NTE geri dönüşümünün toplam talebin önemli bir bölümünü karşılayacağını ön görmektedir.

## 2. Kritik hammaddelerin döngüsel ekonomiye kazandırılması

Son yıllarda Avrupa Birliği'nde birincil üretimin kısıtlılığı, yüksek ithalat bağımlılık oranı, düşük ikame, düşük geri dönüşüm oranına sahip olan ve Endüstri 4.0 devriminin anahtarı olarak anılan kritik hammaddelerin geri dönüşümü daha da önemli hale gelmektedir (Løvik vd., 2018). Gelişmelere ek olarak, mevcut COVID-19 salgını küresel makroekonomik ölçekte derin etkilere neden olmuştur. Dünyanın neredeyse yarısı kilit altındayken, COVID-19 salgınına etkili bir yanıt için gerekli olan bazı kritik hammaddelerin arzının sürmesi endişe kaynağı haline gelmiştir (Akcil vd., 2020; UNECE, 2020). Kritiklik sorununa en büyük çözüm, ürün/bileşenlerin yeniden kullanımı ve verimli olarak geri dönüşüm yoluyla birden çok ürünün yaşam döngüsü boyunca ekonomi içinde tutulduğu döngüsel ekonominin benimsenmesidir (Krystofik vd., 2018). Böylece kritik hammaddelerin ekonomik üretkenliği en üst düzeye çıkarılmış ve küresel talep azaltılmış olur.

Şu anda metallerin kazanımı için uygulanan mevcut yöntemler pirometalurjik, hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik yöntemlerdir. Pirometalurjik yöntemler, genellikle materyallerin homojen olmaması, yüksek geri dönüşüm maliyetleri ve daha düşük ticari değere sahip saf olmayan geri dönüştürülmüş ürünler gibi farklı nedenlerden dolayı tercih edilmemektedir. Geri dönüşüm ürünlerinin birincil kaynak olan madencilik sektörüyle rekabet etmesi beklenmektedir (Jha vd., 2016). Hidrometalurjik yöntemler, liç yönteminin ardından çöktürme, sıvı-sıvı ekstraksiyon, adsorpsiyon ve iyon değişimi gibi çözelti saflaştırma tekniklerine dayanmaktadır (Tan vd., 2016; Venkatesan vd., 2018; Yurramendi vd., 2019). Yüksek maliyeti ve asidik koşullar kullanımını zorlaştırırsa da metal-organik çözücü tabanlı yöntemler de çevre dostu olarak görülmekte ve bu konu üzerinde araştırma faaliyetleri gerçekleştirilmektedir (Cheisson vd., 2019; Sun vd., 2018). Son zamanlarda öne çıkan biyohidrometalurjik yaklaşımlar daha az maliyet gerektirmesi, büyük ölçekli uygulamalar için teknik fizibilite sağlaması ve toksik veya tehlikeli yan ürünler oluşturmaması sebebiyle kritik metallerin kazanılması için umut verici olmaktadır (Sethurajan ve Gaydardzhiev, 2021).

Uygun kazanım yöntemi ikincil kaynağın türü ve kritik hammadde içeriğine göre belirlenmektedir. İkincil kaynaklardan kritik hammaddelerin kazanımı için son yıllarda gerçekleştirilen hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik çalışmalar Çizelge 6'da sunulmuştur. Işık yayan diyot (LED) endüstrisinde açığa çıkan Galyum nitrid (GaN) atığı yüksek ekonomik potansiyele sahip galyum içeriği nedeniyle oldukça önemlidir. Chen vd. (2018), GaN atığını farklı asitlerin etkisi, konsantrasyon, basınç, sıvı-katı oranı, sıcaklık ve zaman gibi farklı deneysel parametreler ile değerlendirmiş ve yaklaşık %98,5 verim ile galyum kazanmayı başarmışlardır. Kullanım ömrü dolmuş araçların içerdiği kritik metallerin kazanımı için bu araçların çeşitli parçaları üzerine birçok araş-

tırma faaliyetinde bulunulmuş ve çeşitli hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik yöntemler test edilmiştir (Chan vd., 2020; Ilyas vd., 2020; Muddana ve Baral, 2019). Hammaddelerin geri kazanılması için EoL-fotovoltaik panellerin (PVs) geri dönüştürülmesine odaklanılmış araştırma faaliyetleri de zamanla artmaktadır (Chung vd., 2021; Savvilitidou ve Gidarakos, 2020).

Arz riski ve ekonomik önem açısından düşük-orta arz riski altında olduğu kabul edilen lityumun üretimi için birincil kaynaklar son yıllarda hızla tükenmektedir (Munir vd., 2020). Kullanılmış Lityum iyon bataryalar (LİB)'da bulunan Li miktarı, birincil Li kaynaklarından (spodümen cevheri) neredeyse 10 kat daha fazladır (Zhao vd., 2019). 100 kg katotlu bir lityum iyon araba aküsü 6-12 kg Co ve 36-48 kg Ni içermektedir. 2050 yılına kadar, yılda 50 milyon ile 80 milyon elektrikli araç üretmek için 500.000-800.000 ton kobalt ihtiyacı doğacaktır. Bu rakamlar 2030'un ötesinde, mevcut madencilik kapasitelerini çoktan aşacaktır (Turcheniuk vd., 2018). LİB'ler, arz riski ve ekonomik önemi daha yüksek olan Co ve bunun yanında Cu, Mn ve Ni gibi metaller için alternatif kaynak olarak görülmektedir. Kullanılmış LİB'lerin uygun yöntemler ile geri dönüşümü daha da acil hale gelmektedir (Sethurajan ve Gaydardzhiev, 2021). Bu nedenle çeşitli şirketler (Accurec (Krefeld, Almanya), Toxco Inc. (Anaheim, Amerika Birleşik Devletleri/ Kanada), Umicore (Brüksel, Belçika), Sony (Tokyo, Japonya), vb. tarafından birçok hidrometalurjik proses geliştirilmiştir (Çizelge 5).

**Çizelge 5.** LİB geri dönüşümünde kullanılan endüstriyel uygulamaların özeti (Lv vd., 2018)

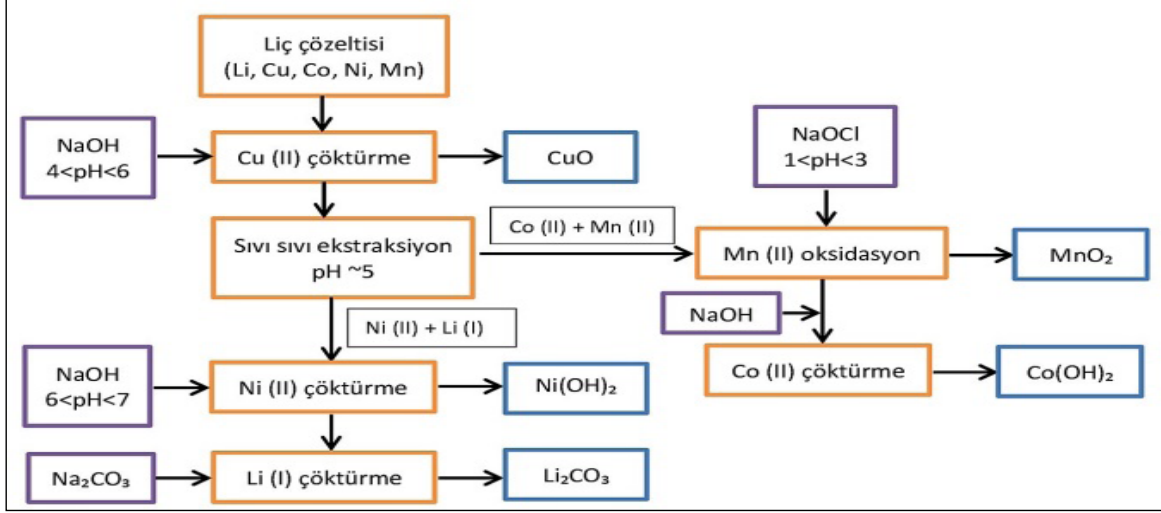
Şirket	Proses	Kazanılan metaller	Kapasite (ton/yıl)
Umicore (Belçika)	Pirometalurji	CoCl <sub>2</sub>	7000
	Hidrometalurji	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Ni(OH) <sub>2</sub>	
Glencore (Kanada+ Norveç)	Pirometalurji	Alaşım (Ni/Co/Cu)	7000
	Hidrometalurji		
Accurec GmbH (Almanya)	Hidrometalurji	Co alaşım Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6000
Retriev Teknolojileri (Amerika Birleşik Devletleri)	Hidrometalurji	Co tuzu Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	4500
Sumitomo-Sony (Japonya)	Pirometalurji Hidrometalurji	Alaşım (Ni/Co/Cu) CoO	150

LİB'lere deşarj, sökmeye, kırma ve eleme gibi bir dizi ön işlem ve liç ve/veya biyoliç yönteminin ardından uygulanacak çöktürme yöntemi, yüklü çözeltinin içerdiği safsızlıklar nedeni ile Li ve Co ekstraksiyonu için sınırlı ve zaman alıcıdır (Provazi vd., 2011). Son çalışmalar, aşamalı çöktürme ve solvent ekstraksiyonuna dayalı tekniklerin sürekli modda çalışmaya olanak sağlaması, az reaktif tüketimi ve reaktif rejenerasyonu gibi sebepler dolayısıyla daha verimli olduğunu göstermektedir (Othman vd., 2020; Wellens vd., 2012). Djoudi vd. (2021), lityum, kobalt, nikel, mangan ve bakır LİB'lerin yüklü liç çözeltisinden kazanmak için hidrometalurjik bir süreç tasarlamışlardır (Şekil 4).

**Çizelge 6.** Kritik hammaddelerin ikincil kaynaklardan geri kazanımı üzerine son yıllarda gerçekleştirilen hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik çalışmalar

Atık Kaynağı	Yöntem	Optimum koşullar	Verim (%)	Referans
Galyum Nitrür (GaN) atığı (LED endüstrisi)	Basıncılı HCl liçi	0,25 mol/L HCl, 30 mL/g s/k oranı, 200°C (15 atm) sıcaklık, 180 dk liç süresi	Ga 98,46	Chen vd., 2018
NdFeB mıknatıslar (Rüzgar türbinleri)	1-Demagnetizasyon 2-HCl liçi 3-Okzalit ile çöktürme 4-Kavurma	1-850°C 2-0,5 M HCl, 95°C liç sıcaklığı, 100 g/L k/s oranı, 500 dev/dk karıştırma hızı, 300 dk liç süresi 3-1 M okzalit asit, pH 2'de 4-800°C kavurma sıcaklığı, 120 dk kavurma süresi	NTE 99	Kumari vd., 2018
NdFeB mıknatıslar	1-Sentetik HCl liç çözeltisi 2- Primene 81R-Cyanex 572 iyonik sıvısı ile karşı akımlı solvent ekstraksiyonu 3-Organik faz sıyırma	1- 9,00 g/dm <sup>3</sup> Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 0,50 g/dm <sup>3</sup> Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve 2,55 g/dm <sup>3</sup> Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içeren sentetik liç çözeltisi 2- 0,30 M P81R-Cy572, organik/sıvı faz oranı (O/S)=1/4, ardından 10 dakika çalkalama (2 aşamalı) 3-1,2 M HCl ile sıyırma	Nd(III) 99,7 Tb(III) 99,99 Dy(III) 99	Pavón vd., 2018
NdFeB mıknatıslar	1-Demagnetizasyon 2-Öğütme 3-Organik asit liçi 4-Solvent ekstraksiyon	1- 400 °C,1,5 saat 2- < 355 µm tane boyutu 3-1 M Glikolik asit, 70°C sıcaklık, 1/80 k/s oranı 4- 1 M D2EHPA, 1:1 organik/sıvı faz, 25°C	NTE 95	Gergoric vd., 2019
Akışkan katalitik kırma katalizörü	Fungal liç ( <i>Aspergillus niger</i> )	30°C sıcaklık, 6,4 pH, %1 katı yoğunluğu, 21 gün biyoliç süresi	Ti 76 V 52	Muddana ve Baral, 2019
Dizel oksidasyon katalizörleri	HCl +H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> liçi	8 mol/L HCl, %3 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , %8 k/s oranı, 55°C sıcaklık, 180 dk liç süresi	Pd 94 Pt 90	Ilyas vd., 2020
Cu-In-Se (CIS) paneller	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> liçi	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0,01 k/s oranı, 90°C sıcaklık, 500 dev/dk karıştırma hızı, 1 saat liç süresi	In 96,1	Savvilotidou ve Gidarakos, 2020
Lityum-iyon bataryalar (Elektrikli araçlar)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %1 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 20 g/L k/s oranı, 50°C sıcaklık, 60 dk liç süresi	Li 100 Co 98,4 Ni 98,6 Mn 98,6	Chan vd., 2020
Lityum-iyon bataryalar (Dizüstü bilgisayarlar)	Orta derecede termofilik bakteri liçi ( <i>Acidithiobacillus caldus</i> , <i>Leptospirillum ferriphilum</i> , <i>Sulfobacillus spp.</i> ve <i>Ferroplasma spp.</i> )	45°C sıcaklık, 130 dev/dk karıştırma hızı, 24,25 g/l FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O, 2 gün biyoliç süresi	Co 99,9 Li 84	Ghassa vd., 2020
Lityum-iyon bataryaların LiCoO <sub>2</sub> katot aktif malzemesi	Asidofilik bakteri liçi ( <i>Leptospirillum ferriphilum</i> ve <i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i> )	%5 k/s oranı, 1,25 pH, 42°C sıcaklık, 180 dev/dk karıştırma hızı, 0,3 g/L GSH (glutatyon) ilavesi, 1,5 gün biyoliç süresi	Li 98 Co 96	Liu vd., 2020
Lityum-iyon bataryalar	1-Sentetik HCl liç çözeltisi 2- [P8888][Oleate] iyonik sıvısı ile solvent ekstraksiyon	1-4.0 M HCl çözeltisi içinde 1 g/L Co, 1,14 g/L Mn, 1,40 g/L Ni ve 0,39 g/L Li 2- 8 M HCl'de (pH = -0,9), O/S=1, 22°C, 5 dk, 40 dev/dk karıştırma hızında solvent ekstraksiyon	Co >99 Mn 89	Othman vd., 2020
c-Si fotovoltaik paneller	I <sub>2</sub> -KI ve HNO <sub>3</sub> liçi	1:10 k/s oranı, 0,35 M I <sub>2</sub> konsantrasyonu, 0,7 M I <sup>-</sup> konsantrasyonu ve 10 dk liç süresi	Ag 95	Chung vd., 2021
Lityum-iyon bataryalar	1-Sentetik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> liç çözeltisi 2- ALi-SCN iyonik sıvısı ile solvent ekstraksiyon 3-Alamin 336, Cyanex 301 ve Ali-CY iyonik sıvıları ile solvent ekstraksiyon	1-2.0 mol/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisi içinde 2590 mg/L Co, 2610 mg/L Ni, 1400 mg/L Mn, 800 mg/L Li 2-0,3 mol/L ALi-SCN, O/S=1 solvent ekstraksiyon ve %5 NH <sub>3</sub> ile Co sıyırma 3-0,5 mol/L Alamin 336+Cyanex 301, pH 2'de SX ve %75 kral suyu ile Ni sıyırma-1 mol/L Ali-CY, pH 2'de SX ve 1 mol/L HCl ile Mn sıyırma	Co 92,0 Ni 99,9 Mn 99,9 Li 99,9	Nguyen ve Lee, 2021
Lityum-iyon bataryalar	1-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> liçi 2-NaOH ile kademeli çöktürme	2- 1-2 M NaOH ile pH 4-6'da Cu, pH 6-7'de Ni, pH 8'de Co, pH 10'da Mn ve Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ile Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,	Co 100	Djoudi vd., 2021





Şekil 4. LİB'lerden metallerin kazanımı için tasarlanmış hidrometalurjik süreç (Djoudi vd., 2021)

NdFeB mıknatıslar, ağırlıkça yaklaşık %30-35 oranında NTE içermektedir (Schulze ve Buchert 2016). Esas olarak Nd, Pr gibi HNTE'nin yanı sıra az miktarda Dy, Tb ve Gd gibi ANTE de içermektedir (Kumari vd., 2018). Rüzgar türbinlerinin jeneratörlerinde bulunan NdFeB mıknatısların ağırlığının 1000-2000 kg'a kadar çıktığı düşünüldüğünde rüzgar türbinlerinden kazanılan bu kritik hammaddeler toplam NTE arzında önemli bir rol oynayacaktır (Yang vd., 2017). Bu kapsamda, Kumari vd., (2018), kullanılmış rüzgar türbini mıknatıslarından NTE'leri (Nd, Pr ve Dy) geri kazanmak için bir piro-hidrometalurjik yöntem geliştirmiştir. Rüzgar türbinlerinin NdFeB mıknatısları için 850°C'de demagnetizasyon işleminin ardından 0,5 M HCl ile 95°C liç sıcaklığı, 100 g/L katı/sıvı (k/s) oranı, 500 dev/dk karıştırma hızı ve 300 dk liç süresinde NTE'lerinin neredeyse tamamı çözeltilmiş. Okzalit ile çöktürme ve kavurma işlemlerinin ardından %99 saflıkta karışık nadir toprak oksitleri (NTO) elde edilmiştir. Itakura vd. (2006), 3 M HCl ve 0,2 N oksalik asit içeren sulu bir çözelti içinde 110°C'de 6 saat boyunca optimum koşullar altında ticari olarak temin edilebilen Ni kaplı NdFeB sinterlenmiş mıknatıslardan hidrotermal yöntem ile NTE'lerinin kazanımını sağlamışlardır. Başka bir çalışma, neodimyum ve dispersiyumun %80'den fazlasının seçici olarak kazanımının, kavrulmuş NdFeB mıknatıslardan 180°C'de bir otoklavda 0,02 mol/L HCl çözeltisi ile mümkün olduğunu göstermiştir (Koyama vd., 2009). Gergoric vd. (2019), benzer olarak asit liçinin ardından solvent ekstraksiyon yöntemi kullanarak %95'in üzerinde NTE kazanmışlardır.

Sürdürülebilirlik ve ekolojik açıdan, genellikle NTE ve Fe arasında yüksek seçiciliğe sahip olan iyonik sıvılar ile solvent ekstraksiyon yöntemi de atık asidin geri dönüştürülebilirliğini ve metallerin verimli bir şekilde ekstraksiyonunu sağlamaktadır (Kitagawa ve Uemura, 2017; Padhan ve Sarangi, 2017). İyonik sıvılar, sıvı sıvı ekstraksiyon işlemlerinde organik fazın yerini alabilir ve uçucu olmamaları nedeniyle daha güvenli sistemler ortaya çıkarabilirler (Wellens vd., 2012). Esasen bu işlem, NTE'lerin kendilerini iki karışmaz sıvı metal fazı arasında dağıttığı bir sıvı alaşım sistemi tarafından NTE alaşımının seçici olarak çözülmesinden oluşur (Binne-mans vd., 2013). Triheksil(tetradecil)fosfonyum klorür (Cyphos® IL101), üç değerlikli nadir toprak iyonlarının ekstraksiyonu ve HCl çözeltilerinden Fe<sup>3+</sup> iyonlarının ekstraksiyonu için iyi karakterize edilmiş bir iyonik sıvıdır (Vander Hoogerstraete vd., 2013). Nd'nin klorürlü liç çözeltisinden ekstraksiyonu için Cyanex 302, PC88A, Cyanex 272, NaCyanex 302, NaPC88A ve NaCyanex 272 arasında karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirilmiş ve Cyanex 272'nin diğer solventlere göre daha yüksek ekstraksiyon hızına sahip oldu-

ğu fakat pH değişikliklerine oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir (Padhan vd., 2017). Pavón vd. (2018), sentezlenen Primene 81R-Cyanex 572 iyonik sıvıların, pH değerine duyarlılık eksikliklerinin üstesinden gelebildiğini bildirmişlerdir. 0,30 mol/L Primene 81R-Cyanex 572 iyonik sıvı ile iki aşamalı ters akım ekstraksiyon işleminde pH ayarlaması olmadan Nd/Tb/Dy içeren sentetik liç çözeltisinden %99,7 Nd ekstrakte etmeyi başarmışlardır. Kubota vd. (2012), iyonik sıvı 1-oktil-3-metilimidazolyum bis(triflorometansülfonil)imid içinde çözülmüş N,N-diocetildiglikolamik asitten (DODGAA) oluşan iyonik sıvı bazlı destekli bir sıvı membran sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde nadir toprak iyonları, demir (III) iyonlarına karşı yüksek geçirgenlik göstermiştir.

İyonik sıvı ekstraksiyonunun hala belirsiz mekanizmalar olması ve çoğu iyonik sıvı türünün yüksek fiyata sahip olması, yaygın kullanımına engeldir. Fakat kimyasal tüketimini azaltan, seçiciliği yüksek iyonik sıvıların kullanıldığı ve geri dönüştürüldüğü kapalı döngü sistemleri de yeni araştırma konuları arasında yerini almaktadır (Kitagawa ve Uemura, 2017). Araştırma faaliyetlerinin genişletilmesi ile NTE geri dönüşümü, sıfır atık çözümlerinin elde edilmesi (yani, NTE'lerin geri kazanılması ve atıkların değerlendirilmesi) açısından önemlidir. Tüm bu örnekler ile önerilen geri dönüşüm akış çizelgelerinin ticarileştirilmesine ilişkin bilinçli kararların alınması, her zamanki gibi bir iş senaryosuna göre genel bir çevresel faydayı destekleyen sağlam Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çalışmaları yapıldıktan sonra mümkün olacaktır.

### 3. Sonuçlar

Yüksek ekonomik değere ve arz riskine sahip kritik hammaddeleri barındıran atıkların geri dönüşümünü sağlamak ve bu kritik hammaddelerin sürdürülebilir tedarikini güvence altına almak, tüm ülkeler için zorunlu bir hedeftir. Atık NdFeB mıknatıslar, LİB'ler, PV'ler gibi ikincil kaynaklar, çevreye ve topluma fayda sağlayan geri dönüşüm teknikleri ile kritik metallerin talebini karşılamak için büyük bir potansiyele sahiptir. Teknoloji için kritik metallerin arzı halihazırda bir endişe konusu iken, COVID-19 salgını uluslararası tedarik zincirlerini bozarak daha fazla endişeye neden olmuştur.

Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Birleşmiş Milletler Paris Anlaşması gibi ulusal ve uluslararası önlemler ile iklim değişikliğinin önüne geçilmesi ve gelecek nesiller için yeterli kaynakların bırakılması hedeflenmektedir. Dijital ve temiz teknolojilerde kullanılan kritik

hammadelerin çoğu, özellikle NTE'ler, tedarik zincirleri ve döngüsel ekonomi için bir yol haritası oluşturarak, bu hedeflere ulaşılması yolunda atılan adımlardır. Bu bağlamda, kritik hammadde üretimi için ikincil kaynakların işlenmesini amaçlayan yeni geri dönüşüm teknolojileri, çevresel sorunları hafifletmenin yanı sıra değerli maden kaynaklarının korunmasına da olanak sağlayacaktır. Geri dönüşüm için geliştirilen hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik süreçler, hammaddelerden katma değer sağlama olanaklarını ortaya koymaktadır. Hidrometalurjik yöntemlere entegre edilen yeni, ekonomik ve çevreye duyarlı biyohidrometalurjik yolların uygulanması umut verici bir seçenek olsa da bu çalışmalar pilot ölçekte testler, proses dizayn ve tekno-ekonomik analiz gerektirmektedir. Bu amaçla, küresel olarak HydroWEEE EUPF7, RE-E4EU H2020, EIT RawMaterials projeleri gibi endüstriyel süreç ve teknoloji geliştirme projelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde, kritik hammaddelerin kazanımı sürdürülebilir değildir. Kritik hammaddelerin atıklardan etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kazanımı için çeşitli yeni teknolojilerin yakın zamandaki gelişimi, bilim dünyasında çok fazla dikkat çekmekte ve araştırma faaliyetleri hızla genişletilmektedir. Özellikle kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerinin potansiyelini araştıran senaryolar arttıkça, endüstrideki kritik hammaddelerin döngüsellik potansiyelleri değerlendirilmekte ve uygun eko-tasarım yolları oluşturulmaktadır. Bu teknolojiler doğru kullanılırsa, yalnızca tedarik riskini azaltarak ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik arasında denge kurmaya da yardımcı olabilirler.

## Kaynaklar

- Akcil, A., Sun, Z., Panda, S., 2020. COVID-19 disruptions to tech-metals supply are a wake-up call. *Nature*, 587, 365-367. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03190-8>.
- Awasthi, A. K., Li, J., Koh, L., Ogunseitan, O. A., 2019. Circular economy and electronic waste. *Nature Electronics*, 2, 86-89. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0225-2>.
- Avrupa Komisyonu, 2010. Critical Raw Materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. Erişim tarihi: 30.04. 2020. <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5662/attachments/1/translations>.
- Avrupa Komisyonu, 2017. The role of waste-to-energy in the circular economy. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Erişim tarihi: 25.04.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN>.
- Avrupa Komisyonu, 2020a. 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](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en).
- Avrupa Komisyonu, 2020b. Circular Economy Action Plan The European Green Deal. Erişim tarihi: 25.06.2021. [https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/new\\_circular\\_economy\\_action\\_plan.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/new_circular_economy_action_plan.pdf).
- Avrupa Komisyonu, 2020c. Communication 'Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability', COM (2020) 474 final, 2020. Erişim tarihi: 28.06.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- Avrupa Komisyonu, 2020d. Critical Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU—A Foresight Study; European Commission: Brussels, Belgium. Erişim tarihi: 22.12.2021. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>.
- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Gerven, T.V., 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>.
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., Pavel, C., 2020. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU-A Foresight Study. ISBN 978-92-76-15336-8. doi: 10.2873/58081
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel, D., 2012. Recycling Critical Raw Materials from Waste Electronic Equipment. *Freiburg: Öko-Institut*, 49(0), 30-40.
- Chan, K. H., Malik, M., Anawati, J., Azimi, G., 2020. Recycling of end-of-life lithium-ion battery of electric vehicles. Symposium on Rare Metal Technology, 2020 held at the 149th Annual Meeting and Exhibition, TMS 2020; San Diego; United States, 238549, 23-32. DOI: 10.1007/978-3-030-36758-9\_3.
- Charles, R. G., Douglas, P., Dowling, M., Liversage, G., Davies, M. L., 2020. Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE—evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104923.
- Cheisson, T., Cole, B. E., Manor, B. C., Carroll, P. J., Schelter, E. J., 2019. Phosphoryl-ligand adducts of rare earth-TriNOx complexes: systematic studies and implications for separations chemistry. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 7, 4993-5001.
- Chen, W. S., Hsu, L. L., Wang, L. P., 2018. Recycling the GaN waste from LED industry by pressurized leaching method. *Metals*, 8, 861.
- Chung, J., Seo, B., Lee, J., Kim, J. Y., 2021. Comparative analysis of I2-KI and HNO3 leaching in a life cycle perspective: Towards sustainable recycling of end-of-life c-Si PV panel. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 123989.
- Deloitte Sustainability, 2017. Study on the review of the list of Critical Raw Materials — Criticality Assessment, Report prepared for the European Commission, doi:10.2873/876644.
- Djoudi, N., Le Page Mostefa, M., Muhr, H., 2021. Hydrometallurgical process to recover cobalt from spent li-ion batteries. *Resources*, 10(6), 58. <https://doi.org/10.3390/resources10060058>.
- EIT RawMaterials, 2020a. Erişim tarihi: 25.06.2021. [https://eitrawmaterials.eu/?attachment\\_id=6207#lightbox\[postimages\]/0](https://eitrawmaterials.eu/?attachment_id=6207#lightbox[postimages]/0)
- EIT RawMaterials, 2020b. EIT RawMaterials supports the world after COVID-19 in securing a sustainable supply of raw materials and advanced materials – for Europe's green future and competitiveness. Erişim tarihi: 20.05.2020. <https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/04/EIT-RawMaterials-Position-Paper-on-COVID-19.pdf>.
- EIT RawMaterials, 2020c. EIT RawMaterials supports the European Green Deal with a focus on raw materials and advanced materials to secure Europe's industrial leadership and sustainable future. Erişim tarihi: 20.05.2020. [https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/01/2020-01-28\\_EIT-RawMaterials-Position-Paper-Green-Deal.pdf](https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/01/2020-01-28_EIT-RawMaterials-Position-Paper-Green-Deal.pdf).
- Gergoric, M., Barrier, A., Retegan, T., 2019. Recovery of Rare-Earth Elements from Neodymium Magnet Waste Using Glycolic, Maleic, and Ascorbic Acids Followed by Solvent Extraction. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5(1), 85-96.
- Ghassa, S., Farzanegan, A., Gharabaghi, M., Abdollahi, H., 2020. Novel bio-leaching of waste lithium ion batteries by mixed moderate thermophilic microorganisms, using iron scrap as energy source and reducing agent. *Hydrometallurgy*, 197, 105465.
- Ilyas, S., Srivastava, R. R., Kim, H., Cheema, H. A., 2020. Hydrometallurgical recycling of palladium and platinum from exhausted diesel oxidation catalysts. *Separation and Purification Technology*, 248, 117029.
- Itakura, T., Sasai, R., Itoh, H., 2006. Resource recovery from NdFeB sintered magnet by hydrothermal treatment. *J. Alloys Compd.*, 408, 1382-1385.
- Jha, M. K., Kumari, A., Panda, R., Kumar, Rajesh, J., Yoo, K., Lee, J. Y., 2016. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. *Hydrometallurgy*, 165, 2-26.
- Kitagawa, J., Uemura, R., 2017. Rare Earth Extraction from NdFeB Magnet Using a Closed-Loop Acid Process. *Scientific Reports*, 7(1), 8039.

- Koyama, K., Kitajima, A., Tanaka, M., 2009. Selective leaching of rare-earth elements from an Nd-Fe-B magnet. *Kidorui*, 54, 36-37.
- Krystofik, M., Bustamante, M., Badami, K., 2018. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 24-33.
- Kubota, F., Baba, Y., Goto, M., 2012. Application of Ionic Liquids for the Separation of Rare Earth Metals. *Solv. Extr. Res. Dev. Jpn.*, 19, 17-28.
- Kumari, A., Sinha, M. K., Pramanik, S., Sahu, S. K., 2018. Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management*, 75, 486-498.
- Leader, A., Gaustad, G., Babbitt, C., 2019. The Effect of Critical Material Prices on the Competitiveness of Clean Energy Technologies. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 8(2), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s40243-019-0146-z>.
- Liu, X., Liu, H., Wu, W., Zhang, X., Gu, T., Zhu, M., Tan, W., 2020. Oxidative stress induced by metal ions in bioleaching of LiCoO<sub>2</sub> by an acidophilic microbial consortium. *Frontiers in Microbiology*, 10, 3058. Doi:10.3389/fmicb.2019.03058.
- Løvnik, A. N., Hagelūken, C., Wāger, P., 2018. Improving supply security of critical metals: Current developments and research in the EU. *Sustainable Materials and Technologies*, 15, 9-18.
- Lv, W., Wang, Z., Cao, H., Sun, Y., Zhang, Y., Sun, Z., 2018. A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6, 1504-1521.
- Massari, S., Ruberti, M., 2013. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 38, 36-43.
- Muddana, M. H., Baral, S.S., 2019. A comparative study of the extraction of metals from the spent fluid catalytic cracking catalyst using chemical leaching and bioleaching by *Aspergillus Niger*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103335>.
- Munir, H., Srivastava, R. R., Kim, H., Ilyas, S., Khosa, M. K., Yameen, B., 2020. Leaching of exhausted LNCM cathode batteries in ascorbic acid lixiviant: a green recycling approach, reaction kinetics and process mechanism. *J. Chem. Tech. Biotech.*, 95, 2286-2294.
- Nguyen, V.N.H., Lee, M.S., 2021. Separation of Co(II), Ni(II), Mn(II) and Li(I) from synthetic sulfuric acid leaching solution of spent lithium ion batteries by solvent extraction. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 96(5), 1205-1217.
- Othman, E.A., van der Ham, A.G.J., Miedema, H., Kersten, S.R.A., 2020. Recovery of metals from spent lithium-ion batteries using ionic liquid [P8888][Oleate]. *Separation and Purification Technology*, 252, 117435. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117435>.
- Padhan, E., Nayak, A.K., Sarangi, K., 2017. Recovery of neodymium and dysprosium from NdFeB magnet swarf. *Hydrometallurgy*, 174, 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.015>.
- Padhan, E., Sarangi, K., 2017. Recovery of Nd and Pr from NdFeB magnet leachates with bi-functional ionic liquids based on Aliquat 336 and Cyanex 272. *Hydrometallurgy*, 167, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.11.008>.
- Panda, S., Akcil, A., 2021. Securing supplies of technology critical metals: Resource recycling and waste management. *Waste Manag.*, 123, 48-51.
- Pavón, S., Fortuny, A., Coll, M.T., Sastre, A.M., 2018. Neodymium recovery from NdFeB magnet wastes using Primene 81R-Cyanex 572 IL by solvent extraction. *Journal of Environmental Management*, 222, 359-367.
- Provazi, K., Campos, B.A., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A.S., 2011. Metal separation from mixed types of batteries using selective precipitation and liquid-liquid extraction techniques. *Waste Manage.*, 31, 59-64.
- Rademaker, J. H., Kleijn, R., Yang, Y., 2013. Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality: A Systemic Evaluation of the Potential Yield of NdFeB Magnet Recycling. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 10129-10136.
- Resmi Gazete, 2021. Yeşil Mutabakat Eylem Planı. Erişim tarihi: 23.07.2021. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/07/20210716-8.pdf>.
- Savvilotidou, V., Gidarakos, E., 2020. Pre-concentration and recovery of silver and indium from crystalline silicon and copper indium selenide photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119440.
- Schulze, R., Buchert, M., 2016. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resources, Conservation and Recycling* 113, 12-27.
- Scott, K., Barrett, J., 2015. An integration of net imported emissions into climate change targets. *Environ. Sci. Policy*, 52, 150-215.
- Sethurajan, M., Gaydardzhiev, S., 2021. Bioprocessing of spent lithium ion batteries for critical metals recovery - A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105225.
- Sun, D. T., Gasilova, N., Yang, S., Oveisi, E., Queen, W. L., 2018. Rapid, selective extraction of trace amounts of gold from complex water mixtures with a metal-organic framework (MOF)/polymer composite. *J. Am. Chem. Soc.*, 140, 16697-16703.
- Tan, Q., Deng, C., Li, J., 2016. Innovative application of mechanical activation for rare earth elements recovering: process optimization and mechanism exploration. *Sci. Rep.*, 6, 1-10.
- US-DOE, 2019. Testimony of Assistant Secretary Daniel Simmons for Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy Before the U.S. Senate Committee on Energy & Natural Resources, Erişim tarihi: 25.06.2021. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/11/f68/11-6-19-Daniel-Simmons-FT-SENRF.pdf>.
- Turcheniuk, K., Bondarev, D., Singhal, V., Yushin, G., 2018. Ten years left to redesign lithium-ion batteries. *Nature*, 559 (7715), 467-470.
- UNECE, 2020. Securing critical raw materials supply is key to the response to COVID-19. Erişim tarihi: 27.05.2020. <https://www.unece.org/info/media/presscurrent-press-h/sustainable-energy/2020/securing-critical-raw-materials-supply-is-key-to-the-response-to-covid-19/doc.html>.
- Vander Hoogerstraete, T., Wellens, S., Verachtert, K., Binnemans, K., 2013. Removal of transition metals from rare earths by solvent extraction with an undiluted phosphonium ionic liquid: separations relevant to rare-earth magnet recycling. *Green Chem.*, 15, 919-927.
- Venkatesan, P., Vander Hoogerstraete, T., Binnemans, K., Sun, Z., Sietsma, J., Yang, Y., 2018. Selective Extraction of Rare-Earth Elements from Nd-Fe-B Magnets by a Room-temperature Electrolysis Pretreatment Step. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6, 9375-9382.
- Wellens, S., Thijs, B., Binnemans, K., 2012. An environmentally friendlier approach to hydrometallurgy: highly selective separation of cobalt from nickel by solvent extraction with undiluted phosphonium ionic liquids. *Green Chem.*, 14 (2012), 1657-1665.
- Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P. T., Binnemans, K., 2017. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 122-149.
- Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021. Erişim tarihi: 03.08.2021. <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%20C5%9E%20C4%B0L.pdf>.
- Yurramendi, L., Gijsemans, L., Forte, F., Aldana, J. L., del Río, C., Binnemans, K., 2019. Enhancing rare-earth recovery from lamp phosphor waste. *Hydrometallurgy*, 187, 38-44.
- Zhao, J., Qu, X., Qu, J., Zhang, B., Ning, Z., Xie, H., Zhou, X., Song, Q., Xing, P., Yin, H., 2019. Extraction of Co and Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> from cathode materials of spent lithium-ion batteries through a combined acid-leaching and electro-deoxidation approach. *J. Hazard. Mater.* 379, 120817.

ISSN 2564-7024



9 772564 702003