

MT Bilimsel

Yer Altı Kaynakları Dergisi | *Journal of Underground Resources*

Derginin Adı
MT Bilimsel

İmtiyaz Sahibi
MAYEB Basın Yayın
İnsan Kaynakları Ltd. Şti.
adına Onur Aydın

Genel Koordinatör
Onur Aydın
onur@mayeb.com.tr

Yazı İşleri Müdürü
Volkan Okyay
volkan@mayeb.com.tr

Yurtdışı İlişkiler
Eray İmgel
eray@mayeb.com.tr

Grafik Tasarım - Uygulama
Simge Ören
simge@mayeb.com.tr

Hukuk Danışmanı
Av. Evrim İnal
evrim@madencilik-turkiye.com

Yayın İdare Merkezi
1042. Cd. (Eski 4. Cd.) 1335. Sk.
(Eski 19. Sk.) Vadi Köşk Apt.
No: 6/8 A. Öveçler ANK.
Tel : +90 (312) 482 18 60
Fax : +90 (312) 482 18 61

info@mtbilimsel.com
www.mtbilimsel.com

Yerel Süreli Yayındır

ISSN 2146-9431

Ulusal Hakemli Dergidir



Yayın Kurulu

Baş Editör:

C. Okay Aksoy (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
o.aksoy@mtbilimsel.com

Yardımcı Editörler:

Mahmut Yavuz

Eskişehir Osmangazi Üni., Maden Müh. Bölümü

Vehbi Özacar

Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü

Eren Kömürlü

Karadeniz Teknik Üni., Maden Müh. Bölümü

Madencilik Türkiye Dergisi Temsilcisi

Onur Aydın (Madencilik Türkiye Dergisi)
onur@mtbilimsel.com

Editörler (Alfabetik):

- Ali Sarıışık (Afyon Kocatepe Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Bahtiyar Ünver (Hacettepe Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Christopher Mark (Mine Safety & Health Admin., Coal Mine S. & H.)
- Çağatay Pamukçu (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Emin Candansayar (Ankara Üni., Jeofizik Müh. Bölümü)
- Erol Kaya (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
- G. Gülsev Uyar Aldaş (Ankara Üni., Jeofizik Müh. Bölümü)
- Güner Gürtunca (National Institute for Occupational Safety & Health)
- Hakan Başarır (Malatya İnönü Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Işık Yılmaz (Cumhuriyet Üni., Jeoloji Müh. Bölümü)
- İhsan Özkan (Selçuk Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Kadri Dağdelen (Colorado School Of Mines, Dept. of Mining Eng.)
- Kerim Küçük (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Melih Geniş (Zonguldak Karaelmas Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Melih İphar (Eskişehir Osmangazi Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Mustafa Ayhan (Dicle Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Nuh Bilgin (İstanbul Teknik Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Nuray Demirel (Orta Doğu Teknik Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Pinnaduva Kulatilake (The Univ. of Arizona, Dept. of Min. & Geo. Eng.)
- Raşit Altındağ (Süleyman Demirel Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Reşat Ulusay (Hacettepe Üni., Jeoloji Müh. Bölümü)
- Sair Kahraman (Niğde Üni., Maden Müh. Bölümü)
- Samuel Frimpong (Missouri Univ. of Science & Tech., Dept. of Min. Eng.)
- Şevket Durucan (Imperial College, Mining And Environmental Eng.)
- Tim Joseph (Univ. of Alberta, School of Mining & Petroleum Eng.)
- Turgay Ertekin (The Pennsylvania State Univ., Petroleum & Nat. Gas Eng.)
- Turgay Onargan (Dokuz Eylül Üni., Maden Müh. Bölümü)

Yıl:7 | Sayı:13 | Ocak 2018

ISSN: 2146-9431

Year:7 | Number:13 | January 2018

İçindekiler

Hakan Ak, Mehmet Aksoy

Akyazı Tüneli Patlatmalı Kazı Çalışmalarında Oluşan Titreşimlerin Çevresel Etkilerinin Araştırılması.....1

Serdar Yaşar, Ali Osman Yılmaz

Negatif Açılı Bir Kama Tipi Keskiden Elde Edilen Deneysel Sonuçların Teorik Sonuçlarla Kıyaslanması.....13

Gökhan ALTIN, Serkan INAL, İbrahim ALP & Mehmet Emin LEKİLİ

Recovery of Chromite from Processing Plant Tailing by Vertical Ring and Pulsating High-Gradient Magnetic Separation.....23

Fatma Sinem Özkan

Ünlüpınar (Kelkit-Gümüşhane) Yöresindeki Kireçtaşlarının Doğal Yapı Taşı olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması.....37

Makale Gönderim Tarihi: 05.10.2017

Yayına Kabul Tarihi: 27.10.2017

Akyazı Tüneli Patlatmalı Kazı Çalışmalarında Oluşan Titreşimlerin Çevresel Etkilerinin Araştırılması

*Akyazı Tüneli Patlatmalı Kazı Çalışmalarında Oluşan Titreşimlerin Çevresel Etkilerinin Araştırılması*Hakan Ak^{1*}, Mehmet Aksoy¹¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, Eskişehir

*Sorumlu Yazar: hak@ogu.edu.tr

Özet

Madencilik ve inşaat sektöründe yapılan patlatmalı kazılar, titreşim ve hava şoku gibi çevresel sorunlara neden olabilmektedir. Patlatma kaynaklı çevresel sorunları azaltmak için yerleşim bölgelerinde yapılacak patlatmaların dikkatlice tasarlanması ve atımların kontrollü olarak yapılması zorunludur. Patlatmaların tasarlanması ve kontrolü için sahaya özgün titreşim yayılım denkleminin belirlenmesi ve hasar risk analizinin yapılması, patlatmanın çevresel etkilerini azaltmada oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, Trabzon ili Akyazı ilçesindeki Akyazı karayolu tüneline yapılan patlatmalı kazı çalışmaları titreşim ve hava şoku ölçer cihazlarla izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Yapılan patlatmaların çevredeki yapılar için hasar riski yaratıp yaratmayacağı değerlendirilmiştir. Kaydedilen olaylardan elde edilen ölçekli mesafe (SD) ve en büyük parçacık hızı (PPV) veri çiftleri istatistiksel analize tabi tutularak bu sahaya özgün titreşim yayılım denkleminin sabitleri belirlenmiştir. Elde edilen bu denklem kullanılarak farklı mesafelerde farklı gecikme başına düşen şarj miktarları için en büyük parçacık hız (PPV) tahminleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hava şoku, patlatma, yer sarsıntısı, titreşim yayılım denklemleri, tünel

Abstract

Excavation by blasting in mining and civil works can cause environmental problems such as vibration and air shock. In order to reduce these environmental problems, blasting should be carefully designed and performed under control. The determination of the attenuation characteristics of the site and the analysis of damage risks are important to reduce the environmental impacts of blasting. In this study, shots fired at the construction of Akyazı Highway Tunnel at Trabzon city were monitored and recorded by using vibration monitors. Firstly, these events were evaluated in terms of damage risks. The site constants of attenuation formulae were found by applying statistical analysis to SD-PPV data pairs. Peak particle velocities are predicted for different explosive amounts per delay with different distances.

Keywords: Air shock, blasting, vibration, ground attenuation formulae, tunnel

1. Giriş

Delme ve patlatma, madencilik ve inşaat sektöründe en yaygın olarak kullanılan kazı tekniğidir. Patlatmanın kaçınılmaz olduğu bu ve benzeri sektörlerde, yer sarsıntısı ve hava şokundan kaynaklanan çevre problemleri ile sıkça karşılaşmakta, bölge halkı ve inşaat firması arasında çeşitli anlaşmazlık ve sorunlara neden olmaktadır (Ak ve ark., 2013). Bu nedenle söz konusu bu sorunların önlenmesi ya da yönetmeliklerde belirtilen sınır değerlerin altında tutulması giderek önem kazanmaktadır.

Patlatma ile çevreye verilen olumsuzlukların en önemlisi yer sarsıntısıdır (titreşim). Patlatma kaynaklı şok dalgaları kayaç içinde sismik dalgalar şeklinde ve her yöne doğru yayılır. Bu sismik dalgalar, kayaçların derinliklerine ulaşabilen P ve S dalgası şeklinde sınıflandırılır ve gövde dalgaları olarak adlandırılır. Kayaç yapısında bulunan tabakalar, süreksizlikler yansıma ve kırılma odakları oluşturarak yüzey dalgaları olarak isimlendirilen sismik dalgaların oluşmasına neden olur. Jeolojik yapıya bağlı olarak oluşan yüzey dalgaları çok çeşitli olmasına rağmen temel olarak iki yüzey dalgası (Rayleigh ve Love dalgaları) tanımlanmaktadır (Erkoç, 1998). Bu sismik dalgalar yüzeyde titreşim olarak hissedilir ve çeşitli çevresel sorunlara yol açar.

Patlatma kaynaklı çevresel sorunlar, patlatmalı kazı yapılan bölge ve yakınlarında bulunan yapı ve tüm canlıları doğrudan etkilemekte, can ve mal güvenliklerini tehdit ettiği gibi, çeşitli psikolojik sorunların doğmasına da yol açabilmektedir. Bu yüzden patlatmadan kaynaklanan çevresel etkilerin belirlenmesine yönelik yer sarsıntısı ve hava şoku ölçümleri büyük önem taşımaktadır. Patlatmalı kazılarda patlatma tasarımları bu çevresel sorunları en aza indirecek şekilde planlanmalı ve planlanan patlatma tasarımları kontrollü olarak gerçekleştirilmelidir. Bu tür tasarımlar ancak sistematik deneysel çalışmalarla mümkün olabilmektedir (Karadoğan ve ark., 2010; Arpaz, 2000; Dowding, 1985; Johnston ve Durucan, 1994; Kahrıman, 1995; Kahrıman ve ark., 2006; Karadoğan, 2008; Kahrıman ve Ceylanoğlu, 2001). Bu tür tasarımları gerçekleştirmek için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Patlatma kaynaklı yer sarsıntılarının değerlendirilmesi ile ilgili literatürde yapılan çalışmaların büyük bölümü, atımda kullanılan gecikme başına düşen patlayıcı madde miktarı ve atım noktasına olan mesafe gibi iki önemli parametre üzerinde durmakta ve patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntılarını bu iki parametreye dayanan eşitliklerle modellenmektedir. Önerilen ölçüme dayalı modellerde patlatma kaynaklı yer sarsıntılarının oluşum ve gelişiminde etkili olan veya olabilecek diğer faktörler saha sabitlerin aracılığıyla modele katılmaktadır (Arpaz ve ark., 2013).

Ölçüm temeline dayanan yöntem; sahada yapılan patlatmalı kazı çalışmalarının titreşim ve hava şoku ölçer cihazlarla izlenmesi, yeterli sayıda olay kaydının alınması, kaydedilen bu olayların istatistiksel analize tabi tutularak sahaya özgün titreşim yayılım denklemindeki saha sabitlerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Sahaya özgün yayılım denkleminin belirlenmesinde literatürde farklı genel tahmin denklemleri (USBM, Ambraseys-Hendron, Langefors-Kihlstrom ve Birch-Schaffer v.b.) önerilmiştir (Khandelwal ve Singh, 2007; Ceylanoğlu ve Arpaz, 2001).

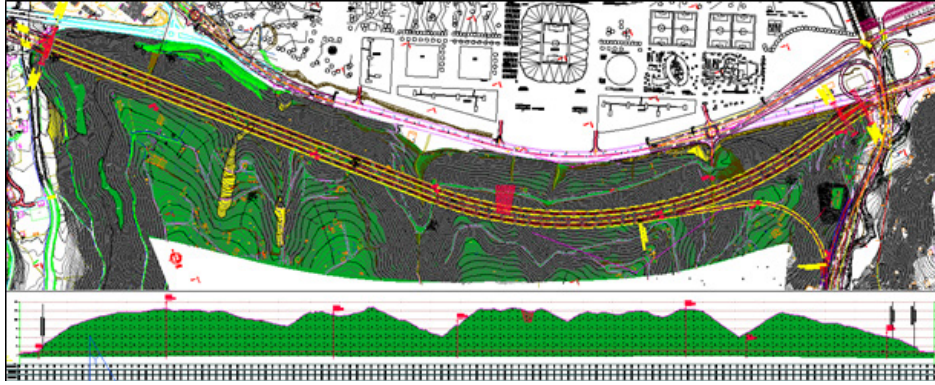
Bu çalışma kapsamında; Trabzon şehir geçişi Kanuni Bulvarı ile Akyazı ve sahil bağlantı yolları yapım işi bünyesinde açılan Akyazı Tüneli çalışmaları dâhilinde yapılan patlatmalardan kaynaklanan titreşim ve hava şoku ölçümleri yapılmış ve sahaya özgün titreşim yayılım denkleminin saha sabitleri belirlenmiştir.

2. Çalışma Sahası

Bu çalışma Trabzon il sınırları içerisinde bulunan Akyazı tüneli kazısı esnasında gerçekleştirilmiş olup haritadaki yeri Google Earth görüntüsü olarak Şekil 1’de verilmiştir. Akyazı tünelinin yaklaşık 2476 m uzunluğunda, 3 şeritli ve çift tüplü olarak NATM yöntemiyle açılması planlanmıştır. Ayrıca proje sahasında Akyazı tünelinin yaklaşık km:2+540’inde ayrılıp anayola bağlanan 2 şeritli, yaklaşık 616 m uzunluğunda bağlantı tüneli yer almaktadır. Akyazı tünelinin plan ve kesit görünümü Şekil 2’de verilmiştir.



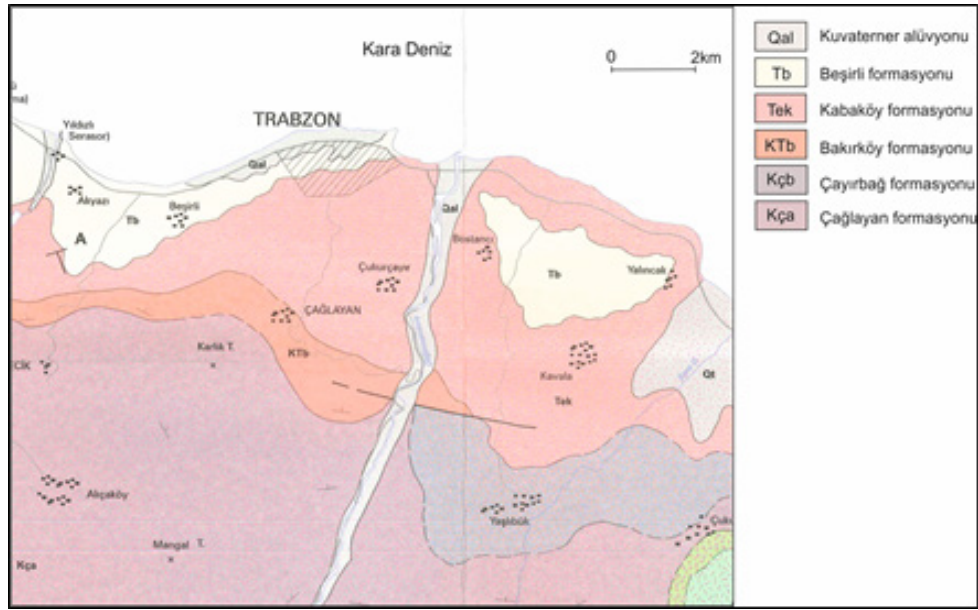
Şekil 1. Çalışma sahası yer bulduru haritası



Şekil 2. Akyazı tüneli plan ve kesit görünümü

3. Çalışma Sahasının Jeolojisi

Trabzon İli, Doğu Pontid Tektonik Ünitesinin kuzeydoğusunda yer alır. Bu tektonik ünite; batıda Kızılırmak vadisinden, doğuda Gürcistan sınırına kadar yaklaşık 500 km uzunluğunda ve kuzeyde Karadeniz kıyısından, güneyde Kuzey Anadolu Fayına kadar yaklaşık 50-75 km genişliğinde metallojenik bir kuşak oluşturur. Geniş anlamda ise; Alpin dağ oluşuma bağlı olarak Jura-Pliyosen zaman aralığında gelişmiş adayayı dizisinin bir parçasıdır. Trabzon ili ve çevresinin genelleştirilmiş jeoloji haritası Şekil 3, stratigrafik kesit ise Şekil 4’de verilmiştir (Fugro Sial, 2013).



Şekil 3. Trabzon ili ve civarının geliştirilmiş jeoloji haritası (Fugro Sial, 2013).

Yaş	Formasyon	Kaya Türü	Açıklamalar
Kuvaterner	Alüvyon	Qal	Çakıl, kum, kilden oluşan dere çökeli, taraça ve yamaç molozu
Pliyosen	Beşirli formasyonu	Tb	Kumtaşı, çamurtaşı, konglomera, bazalt ve aglomera
Eosen	Kabaköy formasyonu	Tek	Andezit, bazalt ve piroklastikleri, kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve tuf
Paleosen	Bakırköy formasyonu	KTb	Kumtaşı, marn, şeyl, killi kireçtaşı, tuf
Üst Kretase	Çayırbağ formasyonu	Kçb	Riyolit, riyodasit ve piroklastikleri
	Çağlayan formasyonu	Kça	Bazalt, andezit ve piroklastikleri

Şekil 4. Trabzon ili ve çevresine ait geliştirilmiş stratigrafik kesit (Fugro Sial, 2013).

Akyazı tünel inşaatı güzergâhı boyunca, ana kaya birimi Beşirli formasyonudur. Bu formasyon, Kabaköy Formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelen kaba taneli çakıltaşı ve kumtaşları formasyonudur ve Güven (1983) tarafından Beşirli Formasyonu olarak adlandırılmıştır (Fugro Sial, 2013).

Trabzon'un batısında Beşirli köyü dolaylarında tip kesit veren formasyon Akyazı, Sera dere, kalenima Dere ağızlarında ve Yorma batısında izlenir. Formasyonun kalınlığı 50-75 m arasında değişmektedir. Formasyon genellikle gevşek çimentolu, iri taneli konglomera, daha az kumtaşı

ve kiltası seviyelerinden oluşmaktadır. Bu malzemeler tümüyle Kabaköy formasyonundan türemiştir. Yer yer iri taneli andezit veya bazalt çakıl ve bloklardan oluşan konglomeralar, aglomerayı andırır. Bazen iyi derecelenme ve çapraz tabakalanma yapıları gözlense de, yine de etkin aşınma ve kısa mesafeli taşınma sonucu hızlı çökelmiş bir yığılım malzemesi görünümü egemendir. Yaşını saptayacak herhangi bir veri bulunamayan formasyonun, Eosen yaşlı Kabaköy formasyonu üzerinde uyumsuz olarak bulunuşu ve kumlu-killi seviyelerde taşınmış Miyosen yaşlı fosil parçaları içermesi göz önünde tutularak Pliyosen yaşlı olduğu kabul edilmiştir (Fugro Sial, 2013).

4. Çalışmada Uygulanan Yöntem

Sahadaki patlatmalar araştırma ekibince farklı tarihlerde yerinde yapılan gözlem ve ölçümlerle izlenmiştir. Çalışmalar esnasında, öncelikle söz konusu sahada uygulanagelmekte olan patlatma düzeni ile ilgili gözlem ve incelemeler yapılmış, tünelde uygulanan patlatma düzenine müdahale edilmemiştir.

Saha çalışmasında, Akyazı Tünelinde toplam 17 adet atım, 3 adet titreşim ve hava şoku ölçer cihazıyla toplamda 16 farklı istasyonda izlenmiştir. İstasyon noktalarının yerleri seçilirken kritik noktalarda bulunan yapıların yakınlarında olmasına özen gösterilmiştir. Kritik yapıların yanında oluşturulan istasyon noktalarından iki tanesinin fotoğrafı Şekil 5’de verilmektedir. İzlenen atımlara ait patlatma geometrisi ve oluşturulan istasyonların konum bilgileri ilgili şirketin mühendislerince sağlanmıştır.



Şekil 5. İki farklı titreşim ölçüm istasyonunun görünümü

Oluşturulan bu istasyon noktalarında alınan titreşim ve hava şoku kayıtları, öncelikle ülkemizin eşik hasar limitlerine göre değerlendirilmiştir. Sonrasında elde edilen veri çiftleri (PPV-SD) istatistiksel analize tabi tutularak çalışma sahasına özgün titreşim yayılım tahmin denklemi belirlenmiş ve risk analizleri yapılmıştır.

5. Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Akyazı tünel inşaatında sağ ve sol tüplerde yapılan patlatmalı kazılarda, ilgili firma mühendislerince geliştirilen üç adet genel patlatma düzeni kullanılmaktadır. Bu düzenlerden bir tanesi örnek olarak Şekil 6’da verilmektedir.



KAPSÜL NO	KAPSÜL SAYISI	LOKUM MİKTARI	TOPLAM DİNAMİT
1	8	5	20 KG
3	8	5	20 KG
5	8	5	20 KG
7	6	5	15 KG
9	10	5	25 KG
11	10	5	25 KG
13	10	5	25 KG
15	10	5	25 KG
17	10	2	10 KG
19	10	5	25 KG
21	10	5	25 KG
23	10	5	25 KG
TOPLAM	110		260 KG

Şekil 6. Genel patlatma düzeni örneği

Tünel patlatmalı kazı çalışmaları, delik çapı 45 mm ve delik boyu 3,5 m olacak şekilde yapılmaktadır. Akyazı tünel çalışmalarında yapılan patlatmalı kazılarda, araştırma ekibince titreşim ve hava şoku ölçümleri yapılan atımlara ait patlatma geometrisi bilgileri ve atım noktalarının koordinatları Tablo 1'de verilmiştir (Ak ve Aksoy, 2014a; 2014b).

Tablo 1. İzlenen atımlara ait patlatma geometrisi ve atım noktası koordinatları

Atım No	Atım Noktası Koordinatları			Delik Sayısı (adet)	Toplam Şarj (kg)	Gecikme Başına Şarj (kg)	Atım Yeri
	Y	X	Z				
1	555003	4540114	13,40	74	160	20	Çıkış sağ tüp
2	554922	4540125	14,10	110	260	25	Çıkış sol tüp
3	554999	4540113	13,40	76	158	20	Çıkış sağ tüp
4	553178	4541023	21,00	76	160	16	Giriş sağ tüp
5	553201	4541046	21,00	90	260	30	Giriş sol tüp
6	554919	4540124	14,10	110	260	25	Çıkış sol tüp
7	554997	4540111	13,40	76	160	20	Çıkış sağ tüp
8	553181	4541021	20,80	90	220	25	Giriş sağ tüp
9	553203	4541044	20,80	90	260	30	Giriş sol tüp
10	554994	4540110	13,40	76	160	20	Çıkış sağ tüp
11	554916	4540124	14,10	110	260	25	Çıkış sol tüp
12	553708	4540581	13,95	100	280	30	Giriş sol tüp
13	554242	4540184	15,39	100	280	30	Çıkış sol tüp
14	553685	4540560	13,89	100	280	30	Giriş sağ tüp
15	553712	4540578	14,07	100	280	30	Giriş sol tüp
16	553694	4540559	14,01	100	280	30	Giriş sağ tüp
17	553714	4540576	14,00	100	280	30	Giriş sol tüp

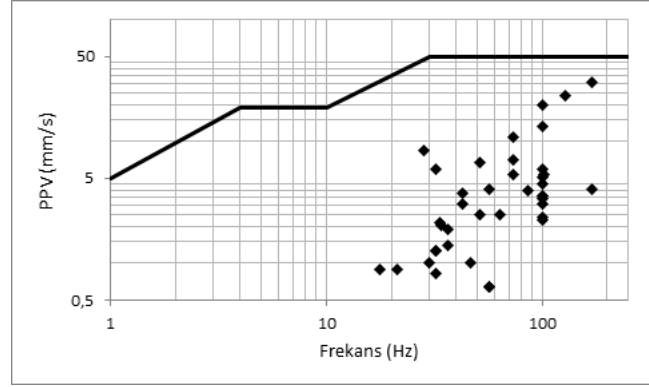
Kayıt altına alınan 40 adet olayın en büyük parçacık hızları (PPV), hava şokları, frekans değerleri ile ölçekli mesafe değerlerini ve istasyon noktası koordinatlarını içeren bilgiler Tablo 2’de ayrıntılı olarak verilmiştir (Ak ve Aksoy, 2014a; 2014b).

Tablo 2. Ölçülen titreşimlere ait veriler

Atım No	İstasyon No	Kayıt Cihazı	İstasyon Noktası Koordinatları			Mesafe (R) (m)	Ölçekli Mesafe (SD)	Hava Şoku (dB)	Maks. PPV (mm/s)	F (Hz)
			Y	X	Z					
1	1	White	555154	4540135	14.83	153	34.12	140	4.06	171
	2	Blaster I	555121	4540146	23.21	123	27.45	123	2.16	34
	3	Blaster II	555123	4540128	22.96	122	27.23	119	3.05	43
2	1	White	555154	4540135	14.83	232	46.39	132	1.02	47
	2	Blaster I	555121	4540146	23.21	200	40.01	130	0.83	32
	4	Blaster II	555119	4540078	30.38	203	40.57	*	*	*
3	7	White	555059	4540089	41.26	70	15.68	118	30.48	171
	5	Blaster I	555102	4540143	25.85	108	24.16	133	6.73	51
	6	Blaster II	555087	4540112	33.89	90	20.06	126	8.51	28
4	8	White	553044	4541160	12.06	192	47.93	148	4.06	57
	9	Blaster I	553065	4541183	12.06	196	49.06	134	*	*
	10	Blaster II	553008	4541119	20.00	195	48.82	136	0.64	57
5	11	White	553102	4541191	11.00	175	31.94	130	1.27	32
	9	Blaster I	553065	4541183	12.06	193	35.26	148	1.40	37
	8	Blaster II	553044	4541160	12.06	194	35.37	145	0.64	57
6	7	White	555059	4540089	41.26	147	29.40	118	2.54	51
	12	Blaster I	555022	4540048	38.79	130	26.07	111	5.97	100
	6	Blaster II	555087	4540112	33.89	169	33.83	129	1.90	37
7	7	White	555059	4540089	41.26	72	16.03	120	24.13	128
	12	Blaster I	555022	4540048	38.79	72	16.18	115	20.10	100
	6	Blaster II	555087	4540112	33.89	92	20.56	129	7.11	73
8	11	White	553102	4541191	11.00	188	37.53	125	1.02	30
	9	Blaster I	553065	4541183	12.06	200	40.03	135	*	*
	13	Blaster II	552955	4541187	8.71	281	56.19	142	0.89	21
9	11	White	553102	4541191	11.00	179	32.65	131	1.27	32
	9	Blaster I	553065	4541183	12.06	197	35.98	147	2.03	34
	13	Blaster II	552955	4541187	8.71	287	52.43	135	0.89	18
10	7	White	555059	4540089	41.26	74	16.58	118	10.99	73
	12	Blaster I	555022	4540048	38.79	72	16.20	115	13.50	100
	14	Blaster II	555084	4540056	27.03	106	23.73	124	5.97	32
11	7	White	555059	4540089	41.26	150	29.95	118	5.33	102
	12	Blaster I	555022	4540048	38.79	132	26.48	112	5.08	100
	6	Blaster II	555087	4540112	33.89	172	34.42	130	2.54	64
12	15	Blaster I	553832	4540424	69.88	208	37.96	102	3.43	100
	16	Blaster II	553845	4540426	64.01	213	38.86	94	3.56	100
13	15	Blaster I	555154	4540135	14.83	479	87.43	*	*	*
	16	Blaster II	555121	4540146	23.21	468	85.48	*	*	*
14	15	Blaster I	555123	4540128	22.96	208	37.91	106	3.05	100
	16	Blaster II	555154	4540135	14.83	214	39.11	96	5.33	73
15	15	Blaster I	555121	4540146	23.21	203	37.06	103	2.41	100
	16	Blaster II	555119	4540078	30.38	208	37.94	94	3.94	85
16	15	Blaster I	555059	4540089	41.26	200	36.59	106	2.29	100
	16	Blaster II	555102	4540143	25.85	207	37.72	96	3.81	43
17	15	Blaster I	555087	4540112	33.89	200	36.55	104	3.56	100
	16	Blaster II	553044	4541160	12.06	205	37.42	94	4.44	100

6. Hasar risk analizi

Yapılan patlatmalı kazı çalışmalarında ölçülen yer sarsıntıları, Çevre ve Orman Bakanlığı’nın “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” nin 25/a maddesine göre değerlendirilmiş ve PPV-Frekans grafiği Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Atımlarda kaydedilen maksimum parçacık hızı ve frekans grafiği

Atımlarda kaydedilen olaylarda ortaya çıkan maksimum parçacık hızlarına karşılık gelen frekans değerlerinin dağılımları incelendiğinde; frekans değerlerinin yüksek ve bu frekans değerlerine karşılık gelen maksimum parçacık hızı (PPV) değerlerinin ise yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin frekanslarının yüksek olması, bu titreşimlerin çevredeki yapılara hasar verme riskini, yapıların öz frekans değerlerinden (5-10 Hz) oldukça yüksek olması nedeniyle azaltmaktadır. Yapılan ölçümler esnasında kaydedilen en büyük parçacık hızı (PPV) ve ölçekli mesafe (SD) veri çiftleri, bu sahaya özgün titreşim yayılım formülünün belirlenmesi amacıyla istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Bu analizde, literatürde yaygın olarak kullanılan ve aşağıda genel formu Eş.1'de verilen tahmin denkleminin bu sahaya özgün saha sabitleri belirlenmiştir (Dowding, 1985):

$$PPV = K \cdot SD^{-\beta}$$

1

$$SD = \frac{R}{\sqrt{W}}$$

PPV: en büyük parçacık hızı (mm/sn)

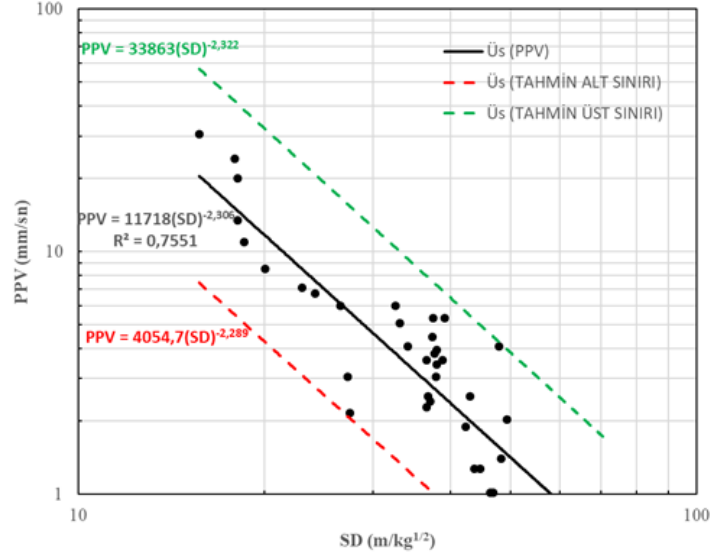
SD: Ölçekli mesafe

R: Atım ve ölçüm istasyonu arası uzaklık (m)

W: Gecikme başına düşen patlayıcı miktarı (kg)

K, β : saha sabitleri

Ayrıca bu veri çiftlerinden yararlanarak %95 tahmin güven aralıkları ve alt, üst güven tahmin eşitlikleri bulunmuştur. Elde edilen alt, ortalama ve üst tahmin aralığı grafikleri Şekil 8'de ve eşitlikleri ise Tablo 9'da verilmiştir.



Şekil 8. PPV-SD üst, ortalama ve alt sınır tahmin grafiği

Tablo 9. Alt, ortalama ve üst tahmin güven aralığı denklemleri

Tahmin Denklemleri	Eşitlik
Üst tahmin güven aralığı denklemi (%95)	$PPV = 33863(SD)^{-2,322}$
Ortalama tahmin denklemi (%50)	$PPV = 11718(SD)^{-2,306}$ (r=0,87)
Alt tahmin güven aralığı denklemi (%95)	$PPV = 4055(SD)^{-2,289}$

Ortalama tahmin eşitliği kullanılarak, farklı mesafe ve farklı gecikme başına düşen şarj (patlayıcı madde) miktarları için parçacık hızı tahminleri yapılmış ve tahminler Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Ortalama tahmin denklemi kullanılarak hesaplanan parçacık hız değerleri

Gecikme Başına Şarj Miktarı (kg)	Tahmin Edilen Parçacık Hız Değerleri (mm/sn)								
	Mesafe (m)								
	50	75	100	125	150	175	200	225	250
5	9,06	3,56	1,83	1,09	0,72	0,50	0,37	0,28	0,22
10	20,14	7,91	4,07	2,43	1,60	1,12	0,82	0,63	0,49
15	32,14	12,62	6,50	3,89	2,55	1,79	1,31	1,00	0,79
20	44,78	17,58	9,06	5,41	3,56	2,49	1,83	1,40	1,09
25	57,92	22,74	11,71	7,00	4,60	3,22	2,37	1,81	1,42
30	71,47	28,06	14,45	8,64	5,67	3,98	2,92	2,23	1,75

Ortalama tahmin denklemi ile eşik hasar ve mesafe gözetilerek hesaplanan güvenli patlayıcı madde miktarları Tablo 11'de verilmiştir. Bu tabloda izin verilen eşik hasar limitleri yönetmelikte belirtilen en düşük hız limitleri olarak alınmıştır.

Tablo 11. Eşik hasar ve mesafe gözetilerek ortalama tahmin denklemi ile hesaplanan patlayıcı miktarları

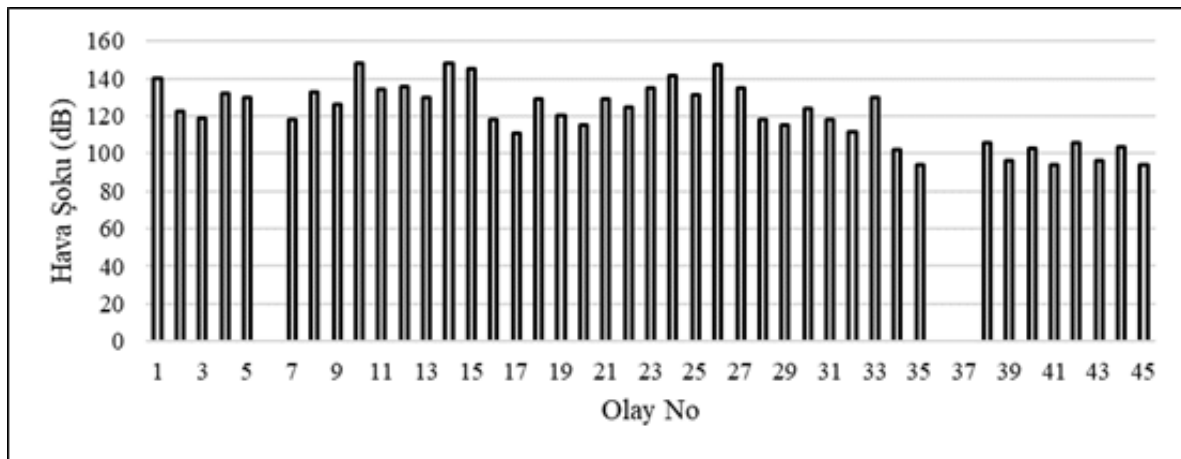
İzin verilen Eşik Hasar Limiti (PPV, mm/sn)	Mesafe (m)	Gecikme Başına Maksimum Şarj Miktarı (W, kg)
5	50	3
	75	7
	100	12
	125	19
	150	27
	175	37
19	50	10
	75	21
	100	38
	125	59
	150	86
	175	116

Tablo 11 incelendiğinde eşik hasar limiti 5 mm/sn alındığında 50 metre ve 175 metre arası mesafeler için hesaplanan gecikme başına şarj miktarı 3 kg ile 37 kg arasında değişmektedir. Tünel inşaatında genel olarak 20-30 kg arasında gecikme başına şarj kullanıldığı göz önünde bulundurulursa, atım noktasına 150 metreden daha yakın ve sağlam olmayan veya tarihi yapılarda hasar riski oluşabileceği söylenebilir. Bu durumda üst tahmin denklemi kullanılarak yeni patlayıcı miktarları %95 güvenilirlikle hesaplanabilir. Ancak, hesaplanan yeni patlayıcı miktarları ile ekonomik patlatmalı kazı yapılamayabilir ve alternatif kazı yöntemlerinin kullanılması zorunluluğu doğabilir.

6.1. Hava şoku

Patlatmalar sırasında desibel (dB) olarak ölçülen hava şokları ölçme istasyonunda 140 dB' den yüksek değerlere ulaştığında; sestən rahatsız olma, pencere camı kırılmaları, binalarda hasar gibi olumsuzluklara neden olabilmektedir. ABD'de (USBM ve OSM kuralları) yapılan yasal düzenlemelerle 140 desibele karşılık gelen hava şoku düzeyi hasar başlangıç ve gürültü üst sınırı olarak belirlenmiştir.

Araştırma kapsamında, söz konusu tünelde yapılan 17 atımın titreşim ölçer cihazları tarafından hava şoku değerleri de kayıt edilmiştir. Elde edilen hava şoku değerleri Şekil 12'de sütun grafiği olarak verilmektedir.



Şekil 12. İstasyon noktalarında ölçülen hava şoku değerleri

Şekil 12 incelendiğinde, 6 adet hava şoku ölçümünün 140 dB ve bu değerin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu ölçümlerin yapıldığı istasyon noktalarının, portal önünde ya da yakınında olması ve portal önünde herhangi bir önlem alınmaması nedeniyle hava şoku değerlerin yüksek çıkması beklenen bir durumdur.

7. Sonuçlar

Akyazı tüneli inşaatı esnasında yapılan patlatmalı kazı çalışmalarından farklı tarihlerde titreşim ve hava şoku ölçümleri yapılmıştır. İzlenen atımlarda kaydedilen parçacık hız ve frekansları, yönetmeliğe göre değerlendirilmiş ve tüm ölçümlerin izin verilen sınırların altında kaldığı görülmüştür.

Yapılan ölçümlere ait PPV-SD veri çiftleri istatistiksel analize tabi tutularak bu sahaya özgün yayılım denklemlerinin saha sabitleri alt, ortalama ve üst güven aralıkları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Ortalama tahmin denklemi kullanılarak farklı mesafe ve farklı gecikme başına düşen şarj miktarları için parçacık hızları tahminleri yapılmıştır. Tünelde yapılacak patlatma noktasının çevredeki yapılara olan mesafesi 150 metrenin üzerinde olduğu durumlarda, parçacık hız tahminleri için ortalama tahmin denkleminin kullanılması önerilmektedir.

Atım noktasına 150 metreden yakın olan kritik hassas yapılar için ise tahminin güvenilirliğini arttırmak için (%95); gecikme başına düşen patlayıcı madde miktarlarının tahmininde, üst tahmin denkleminin kullanılması önerilmektedir. Ancak, bu denklem kullanılarak hesaplanacak patlayıcı madde miktarlarının oldukça düşük olacağı ve ekonomik patlatmalı kazı yapılamayacağı bilinen bir gerçektir. Bu durumda diğer kazı yöntemlerinin kullanılması önerilmekle beraber, kazı ekonomisi ve imkânları delme – patlatma yönteminin kullanılmasını zorunlu kılıyorsa, ortalama tahmin denklemi kullanılarak gecikme başına düşen şarj miktarları hesaplanabilir. Bu miktarlar ile yapılacak patlatmaların sürekli olarak titreşim ölçer cihazları ile izlenmesi gerekmektedir. Ölçülen titreşim değerlerinin izin verilen sınırların üzerine çıkması durumunda ise patlatma paterninin gözden geçirilmesi önerilmektedir. Bu nedenle kullanılacak patlayıcı madde miktarları belirlenirken patlatma noktasına yakın kritik yapıların durumları dikkatlice araştırılıp belirlenmelidir.

Son olarak, patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin, her zaman çevre yapılar için belli bir hızda hasar riski taşıyabileceği gerçeği gözden uzak tutulmamalıdır. Meskûn mahallerde yapılan patlatmalı kazı çalışmalarından kaynaklanan yer sarsıntısı veya hava şoku izin verilen sınırların altında kalsa bile insanlar üzerinde psikolojik etkiler bırakabilir. Bu etkileri en aza indirmek için; öncelikle bu bölgedeki insanların konu hakkında bilgilendirilmesi, yapılacak atımların belirli aralıklarla titreşim ölçümlerinin yapılması, patlatma tasarım ve protokollerinin tutulması önem arz etmektedir.

Kaynaklar

Ak, H., İphar, M., Yavuz, M., Konuk A., 2013. Bir Maden İşletmesinde Patlatmadan Kaynaklanan Çevresel Etkilerin Analizi, VII. Delme Patlatma Sempozyumu, 07-08 Kasım, Eskişehir, 69-78.

Ak, H. ve Aksoy, M., 2014a. Trabzon Şehir Geçişi Kanuni Bulvarı Projesi Akyazı Tüneli Patlatmalı Kazı Çalışmalarından Kaynaklanan Titreşim ve Hava Şoku Ölçümü ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Döner Sermaye Projesi, Ocak.

Ak, H. ve Aksoy, M., 2014b. Trabzon Şehir Geçişi Kanuni Bulvarı Projesi Akyazı, Beşirli ve Boztepe Tüneli Patlatmalı Kazı Çalışmalarından Kaynaklanan Titreşim ve Hava Şoku Ölçümü ve Çevresel

Etkilerinin Değerlendirilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Döner Sermaye Projesi, Eylül.

Arpaz, E., 2000. Türkiye'deki Bazı Açık İşletmelerde Patlatmalardan Kaynaklanan Titreşimlerin İzlenmesi ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

Ceylanoğlu, A., Arpaz, E., 2001. Belirli bir Kaya Kütlelerinde Oluşturulan Yer Sarsıntılarının Ölçümü ve Değerlendirilmesi, Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi TUMAKS 2001, 19-22 Haziran 2001, Ankara, pp 39-45.

Dowding, C.H., 1985. Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice-Hall, USA.

Erkoç, Ö.Y., 1998. Patlatma ile Çevreye Verilen Sarsıntılar ve Hasar Kriteri Üzerine Bir Tartışma, III. Delme ve Patlatma Sempozyumu, 129-139.

Fugro Sial, 2013. Trabzon Şehir Geçişi Kanuni Bulvarı İle Akyazı Ve Sahil Bağlantı Yolları Yapımı İşi Akyazı Tüneli Jeolojik - Hidrojeolojik Mühendislik Jeolojisi Etüd Raporu, Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti, Temmuz.

Jonston, G.J., Durucan, Ş., 1994. The Numerical Prediction, Analysis and Modelling of Ground Vibration Induced by Blasting, Third International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 18-20 October, İstanbul.

Kahrıman, A., 1995. Sivas Ulaş Yöresi Sölesit Cevheri ve Yankayaçları için Optimum Patlatma Koşullarının Araştırılması ve Kayaç Özellikleri ile İlişkilendirilmesi, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

Kahrıman, A., Özer, U., Aksoy, M., Karadoğan, A., Tuncer, G., 2006. Environmental Impacts of Bench Blasting at Hisarcık Boron Open Pit Mine in Turkey, Environmental Geology, Vol. 50, No 7, P 1015-1023.

Kahrıman, A., Ceylanoğlu, A., 2001. Evaluation of Measurement Results of Ground Vibration Induced by Blasting in a Celestite Open Pit Mine in Turkey, Pakistan Journal of Applied Sciences, 1(2), p 135-138.

Karadoğan, A., 2008. Patlatmadan Kaynaklanan Titreşimler İçin Ulusal Yapı Hasar Kriterleri Oluşturulabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Karadoğan, A., Özer, Ü., Kahrıman, A., 2010. Patlatmadan Kaynaklanan Sarsıntılar İçin Risk Analizi Modeli, VI. Delme Patlatma Sempozyumu, 4-5 Kasım, Ankara, 205-217.

Khandelwal, M., and Singh, T.N., 2007. Evaluation of blast-induced ground vibration predictors, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27 (2007) pp 116–125.

Makale Gönderim Tarihi: 16.11.2017

Yayına Kabul Tarihi: 07.12.2017

Negatif Açılı Bir Kama Tipi Keskinden Elde Edilen Deneysel Sonuçların Teorik Sonuçlarla Kıyaslanması

Comparison of Theoretical and Experimental Data in Rock Cutting with a Negative Rake Angled Chisel Pick

Serdar Yaşar^{1*}, Ali Osman Yılmaz¹

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

*Sorumlu Yazar: seyasar@ktu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada altı farklı kayaç numunesi negatif açılı (-5°) bir kama tipi keski ile kaya kesme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyden elde edilen sonuçlar, basit kama tipi keski için geliştirilmiş olan Evans ve Nishimatsu modellerinden elde edilen teorik kesme kuvveti ile karşılaştırılmıştır. Eşitliklere dahil edilen sürtünme açılarının etkileri ayrıca incelenmiştir. Sonuç olarak sürtünme açısı hesaplamalara dahil edildiğinde Nishimatsu modelinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kazı mekaniği, keski kuvvetleri, kaya kesme teorileri.

Abstract

In the present study, six different rock samples were conducted to rock cutting testing with using a negative rake angled (-5°) chisel pick. Experimental results obtained from these tests were compared with results of theoretical models of Evans and Nishimatsu. Effect of friction on cutting force estimation was discussed basically. As a results, it was seen that if the friction angle is considered in theoretical models, Nishimatsu model gave better results when compared with actual data.

Keywords: Rock cutting mechanics, tool forces, rock cutting theories.

1.Giriş

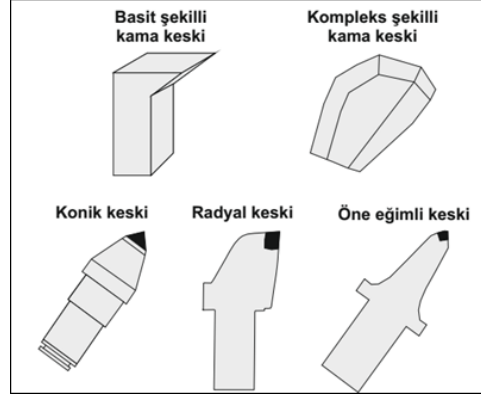
Mekanize kazı, patlatmalı kazı yöntemine alternatif tek ekonomik kazı yöntemidir ve kazı makinelerinin başarısı doğrudan kesici kafalarda bulunan keskinlerin performansına bağlıdır (Mellor, 1977). Keski performansının en önemli göstergelerinden biri de keski kuvvetleridir. Kazı sırasında keskiye üç boyutta kuvvetler etkimektedir, kesme kuvveti, normal kuvvet ve yanal kuvvet. Kısmi cepheli tünel/galeri açma makinelerinde kullanılan kazıyıcı (kama tipi) keskinler için en önemli kuvvet bileşeni, hareketin yönünde olan ve enerjiyi harcayan bileşen olan kesme kuvvetidir.

Kesme kuvvetinin belirlenebilmesi için geliştirilen çeşitli metotlar bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak teorik modeller (Evans, 1958), kaya kesme deneyleri (Yasar, 2017), görgül yöntemler (Bilgin vd., 2006) ve nümerik yöntemler (Menezes vd., 2014) gösterilebilir. Görgül yöntemlerin tahmin yetenekleri kullandıkları veri sayısı gibi parametreler ile doğrudan ilgilidir. Nümerik yöntemler ise kaya kesme olayını tam olarak modelleyememektedir ve daha gelişmiş modelleme araçlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Keski kuvvetlerinin bulunabileceği en kesin yöntem laboratuvar kesme deneyleridir (Rostami vd., 1996). Ancak bu deneyler çok sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır. Teorik modeller, kaya-keski etkileşimini açıklamaya çalışarak keskiye gelen kesme kuvvetinin bulunmasını amaçlamaktadır. Her ne kadar kesme mekanizmasını açıklamaya yardımcı olsalar da hala tahmin yetenekleri yeterince gelişmemiştir, çeşitli durumlarda deneysel verilerden elde edilen sonuçlar ile örtüşmemektedirler. Bundan dolayı daha fazla kaya kesme deneyi yapılarak, bu deneylerden elde edilen sonuçlar yardımı ile kesme teorilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

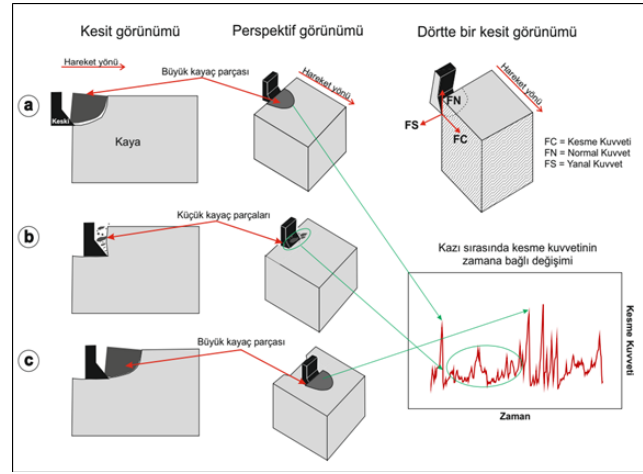
Bu çalışmada altı farklı magmatik kayaç (kırmızı andezit, gri andezit, yeşil tuf, gri tuf, kahverengi tuf ve sarı tuf) negatif kesme açısına sahip bir basit kama tipi keski ile 5 mm kesme derinliğinden kesilmiştir ve deneyden elde edilen deneysel kesme kuvveti kaydedilmiştir. Bu deney şartları için Evans ve Nishimatsu modelleri kullanılarak teorik kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu teorik ve deneysel kesme kuvvetleri karşılaştırılarak sonuçlar irdelemiştir. Sonuç olarak sürtünme açısı hesaplamalara dahil edildiğinde Nishimatsu modelinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

2. Kazıyıcı Keskinlerin (Drag Picks) Kayaç Kesme Mekanizması

Kazı makinelerinde kullanılan keskinler kabaca iki kısma ayrılabilir. Bunlar, kazıyıcı keskinler ya da kama keskinler (drag picks) ve dönen keskinlerdir (roller bits). Kazıyıcı keskinler genellikle kısmi cepheli tünel/galeri açma makinelerinde kullanılırken, dönen keskinler ise genellikle tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılmaktadırlar. İki keski grubunun kazı prensipleri birbiri ile benzerlik göstermemektedir ve çalışma kazıyıcı keskinler üstüne yoğunlaştığı için dönen keskinler ile alakalı daha fazla bilgiye yer verilmeyecektir. Kazıyıcı keskinler toplam beş başlık altında toplanabilir. Bunlar, basit kama tipi keski, kompleks kama tipi keski, konik keski, radyal keski ve öne eğimli keskinlerdir (Şekil 1). Günümüze kadar geliştirilen kesme teorileri basit kama tipi ve konik keskinler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada ise yalnızca basit kama tipi keskinlere vurgu yapılacaktır. Kazıyıcı keskinlerin kazı prensipleri birbiri ile örtüşmektedir. Bu genel prensip Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Kazıyıcı keski (Yasar, 2017)



Şekil 2. Kazıyıcı keski mekanizması (Yasar, 2017)

Şekli kısaca açıklamak gerekirse, kazı başlarken ilk olarak keski kayaca batmaya çalışmaktadır ve batarken de kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi grafiğinden görüldüğü gibi bir kuvvet piki oluşmaktadır. Bu parça koştuktan sonra kuvvet değerinde ani bir düşüş yaşanmakta ve ardından da küçük parçalar kazılarak sökülmemektedir ve bu aşamada da küçük kuvvet pikleri oluşmaktadır. Son olarak, keski kayaca tekrar batmaya çalışarak büyük bir parça koparıırken büyük bir kuvvet pikinin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bu döngüsel işlem kaya kesme işi bitene kadar bu şekilde devam etmektedir. Şekilde görülen keski sivri yani pozitif kesme açılı bir keskidir. Ancak negatif açılı bir keski de durum farklı olmayacaktır. Keski kayaca batmak yerine önündeki kayaç parçasını iterek büyük parçayı koparacaktır (Yaşar, 2017). Şekil 2’de ayrıca keskiye gelen üç boyuttaki kuvvetler de görülmektedir.

Geliştirilen kaya kesme teorileri ise Şekil 2’de görülen büyük parçanın koparılması için gerekli kuvvetin bulunmasına yoğunlaşmaktadır. İlk kaya kesme teorisi Evans’ın (1958) kömür kesme teorisidir ve bu teorisin basitleştirilmiş şematik gösterimi Şekil 3’te görülmektedir. Evans, çeşitli kömürler üzerinde simetrik kama keski ile gerçekleştirdiği kesme deneyleri sonucunda teorisini ortaya atmıştır. Kesme deneylerinin sonucunda, keskinin kayaya batması sonucu keski ucundan başlayarak serbest kaya yüzeyine doğru hareket eden bir kırılma hattı (xy) gözlemlenmiştir. Bu kırılma ara yüzeyinde çekme gerilmelerinin oluştuğunu ve kesilen numunenin çekme dayanımının aşıldığında bu kırılma yüzeyinin (xy) serbest kalarak kömür parçasının koştüğünü iddia etmiştir.

Keski genişliğinin kesme derinliğinden çok daha fazla olması nedeniyle, Evans düzlem germe halinin geçerli olduğunu ve problemin iki boyutta incelenebileceğini, yani gerilmelerin kalınlık boyunca sabit olduğunu, belirtmiştir. Bu problem bir denge problemi gibi ele alınmıştır ve bir mesnetteki gerilmeler problemine benzetilerek çözülmüştür. İlk planda sürtünme sıfır kabul edilerek, kırılma anındaki kuvvetlerin momenti alınarak kesme kuvvetinin bulunabilmesi için şu eşitlik önerilmiştir:

$$FC' = \frac{2 \sigma_t d w \sin \theta}{1 - \sin \theta} \quad (1)$$

Burada;

- FC' = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_t = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,
d = Kesme derinliği, mm,
w = Keski genişliği, mm,
 θ = Yarım uç açısıdır, °

Geliştirilen bu model, pratikte kullanımı olmayan simetrik kesmeler içindir. Bundan dolayı, teo-
rinin pratikte de uygulanabilmesi için Roxborough (1973), basit kama tipi keski olarak adlandırılan
asimetrik kama kesmeler için Şekil 3'te görülen şematik biçimde teoriyi güncellemiştir ve
eşitliği şu şekilde tekrar düzenlemiştir:

$$FC' = \frac{2 \sigma_t d w \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)}{1 - \sin \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)} \quad (2)$$

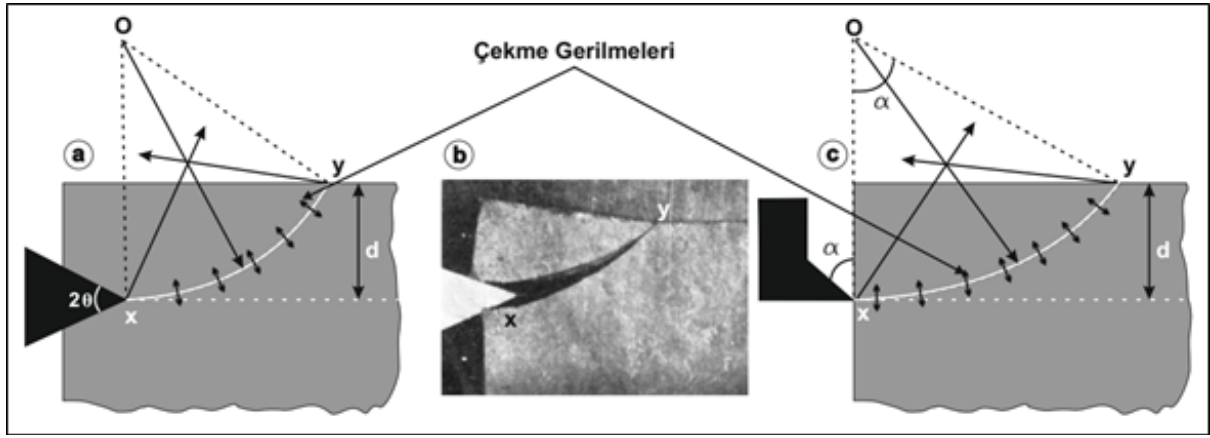
Burada;

- FC' = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_t = Kayacın direkt çekme dayanımı, MPa,
d = Kesme derinliği, mm,
w = Keski genişliği, mm,
 α = Kesme açısı, °dir.

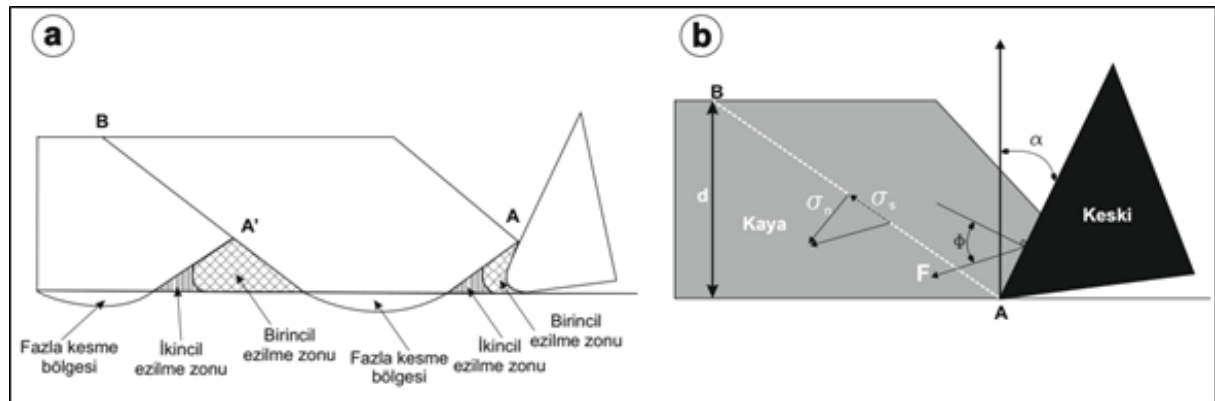
Evans, farklı kömür numuneleri üzerindeki kaya kesme deneylerinden elde ettiği çekme dayanımı değerleri ile direkt çekme deneyinden elde edilen çekme dayanımı değerlerini karşılaştırmıştır ve kesme deneyinden elde edilen çekme dayanımı değerinin gerçek değerlerin yaklaşık olarak beşte biri olduğunu saptamıştır. Bunun üstesinden gelmek için de çekme gerilmelerinin Şekil 3'deki (xy) hattı boyunca eşit şekilde dağılmadığını, (x) noktasındaki gerilmenin kayacın çekme dayanımına eşit olurken (y) noktasında sıfıra düştüğünü iddia etmiştir ve Nishimatsu (1972) tarafından da kullanılan gerilme dağılım faktörünü 1 no'lu eşitliğe eklemiştir. Ancak n'nin nasıl bulunacağı hakkında bir bilgi vermemiş sadece rastgele değerler atamıştır. Örneğin, n değerini 8 olarak kabul ettiğinde kesme deneylerinden elde ettiği çekme dayanımı değerleri ile çekme dayanımı deneyinden elde ettiği değerlerin aynı olduğunu belirtmiştir.

Diğer yandan, Nishimatsu (1972) Mohr-Coulomb kırılma prensibini göz önüne alarak, Merchant'ın metal kesme teorisine benzer bir teori ileri sürmüştür. Bu teoriye göre kesme

sırasında kayaçtan kopan parçaların oluşumunda kayacın kesme dayanımı etkilidir. Ayrıca Nishimatsu, kesme işleminde oluşan pasaların her zaman Evans'ın teorisinde olduğu gibi dairesel değil düz de olabildiğini gözlemlemiştir. Nishimatsu teorisini tanımlarken kaya kesme işleminde birincil ve ikincil ezilme zonlarından ve fazla kırılmadan bahsederek kaya kesmeyi tanımlamıştır (Şekil 4). Nishimatsu'ya göre kaya kesmenin basitleştirilmiş şematik gösterimi ve basitleştirilmiş gösterim üzerinde gerilmelerin dağılımı ve kuvvet oluşumu Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, kesme işlemi sırasında keski önünde bulunan kaya parçasını iterek (AB) hattı boyunca kesme gerilmeleri (σ_s) oluşturmaktadır. Buna ilave olarak keskinin kendi hareketinden doğan birde kesme hattına dik etkiyen normal gerilmeler (σ_n) görülmektedir. Bu da problemin Mohr-Coulomb yenilme kriteri yardımı ile çözümlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3. (a) Evans (1958) teorisinin şematik gösterimi (b) Evans tarafından gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kırılma hattı (c) Evans teorisinin Roxborough (1973) tarafında asimetrik kama tipi keski için geliştirilmesi (Yasar, 2017)



Şekil 4. (a) Nishimatsu (1972) kaya kesme teorisinin şematik gösterimi (b) Kesme sırasında gerilmelerin dağılımı ve kuvvet oluşumu (Yasar, 2017)

Nishimatsu, (AB) kesme hattı boyunca gerilmelerin sabit olmadığını ve A noktasında maksimum, B noktasında ise minimum olduğunu ileri sürmüştür. Bu ön kabulde birlikte gerilme dağılım faktörünü (n) tanımlamıştır. Gerilme dağılım faktörünün kayaç özelliklerinin değil yalnızca kesme açısının (α) bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüştür ve kesme kuvvetinin bulunabilmesi için aşağıdaki eşitlikleri önermiştir. Ayrıca sürtünme açısının bulunabilmesi için de kendi kullandığı numuneler için iki adet eşitlik önermiştir.

$$FC' = \frac{2 \sigma_s d w \cos(k) \cos(\phi - \alpha)}{n + 1 \quad 1 - \sin(k - \alpha + \phi)} \quad (3)$$

$$n = 11,3 - 0,18\alpha \quad (4)$$

$$\phi = 25,4 + 0,66\alpha \text{ (Beton)} \quad (5)$$

$$\phi = 22,9 + 0,32\alpha \text{ (Aoishi Tüf)} \quad (6)$$

Burada;

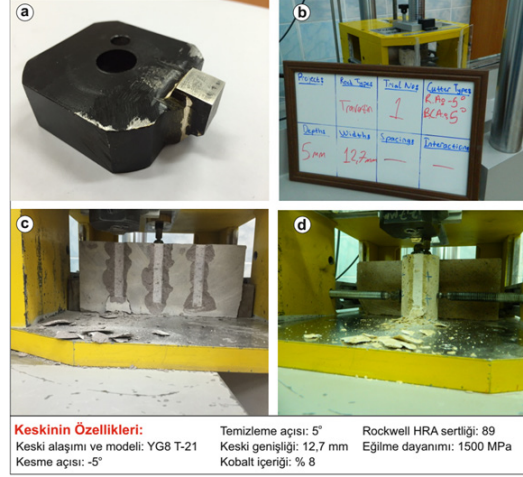
- FC' = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_s = Kayacın kesme dayanımı, MPa,
d = Kesme derinliği, mm,
w = Keski genişliği, mm,
k = Kayacın içsel sürtünme açısı, °,
n = Gerilme dağılım faktörü,
 α = Kesme açısı, °,
 ϕ = Kaya kesmedeki sürtünme açısı, °'dir.

Diğer yandan, Bilgin vd. (2012) tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılan Şekil 1'de görülen kompleks şekilli kama keski için Eşitlik 1.2'yi güncellemiş ve yeni bir eşitlik önermiştir.

3. Kaya Kesme Deneyleri

Çalışma kapsamında altı adet magmatik kayaç numunesi düşey kayaç kesme setinde (DKKS) kesme deneyine tabi tutulmuştur. DKKS Yaşar (2017) tarafından geliştirilmiştir ve sistemle ilgili detaylar çeşitli referanslardan takip edilebilir (Yaşar ve Yılmaz, 2017a & 2017b & 2017c). Bu kayaçlar kırmızı andezit (KA), gri andezit (GA), yeşil tüf (YT), gri tüf (GT), kahverengi tüf (KT) ve sarı tüftür (ST).

Kayaç numuneleri üzerinde negatif kesme açısına sahip bir basit kama keski ile kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te kaya kesme deneylerinde kullanılan keski ve kayaç numuneleri görülmektedir. Kesme deneyleri 23 cm x 20 cm x 10 cm boyutlarında olan blok numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyleri 5 mm kesme derinliğinden gerçekleştirilmiştir. Her kayaç numunesi için en az üç kesme deneyi gerçekleştirilmiştir ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Her kayaç için maksimum kesme kuvveti belirlenmiştir. Maksimum kesme kuvveti elde edilirken Barker (1964) tarafından önerilen yöntem izlenmiştir. Bunlara ilave olarak kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ve dolaylı çekme dayanımları, teorik kesme kuvvetlerinin bulunabilmesi için, ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenmiştir ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, bulunan dolaylı çekme dayanımı değerleri, teorik çalışmalarda ele alınan değer direkt çekme dayanımı olduğu için, direkt çekme dayanımı değerine Perras ve Diederichs (2014) tarafından önerilen yöntemle çevrilmiştir.



Şekil 5. (a) Karot kesme deneyinde kullanılan keski ve özellikleri (b) Deney öncesi hazırlık (c) Blok numune üzerinde kesme deneyi (d) Karot numunesi üzerinde kesme deneyi (Yaşar, 2017)

Tablo 1. Kullanılan kaya örneklerinin mekanik özellikleri (Yaşar, 2017).

Numune Adı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, σ_c , MPa	Dolaylı Çekme Dayanımı, σ_{bt} , MPa	Direkt Çekme Dayanımı, σ_t , MPa
Kırmızı andezit	72,85	7,91	6,33
Gri andezit	99,92	8,34	6,67
Yeşil Tüf	51,65	5,84	4,67
Gri Tüf	62,63	7,08	5,66
Kahverengi vitrik tüf	88,15	8,38	6,70
Sarı vitrik tüf	62,48	5,47	4,38

4. Sonuçların Değerlendirilmesi

Kaya kesme deneylerinden elde edilen maksimum kesme kuvveti, Evans ve Nishimatsu modelleri ile tahmin edilen kesme kuvveti değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Evans modelinde Eşitlik 2’den faydalanılarak hesaplama yapılmıştır ve kaya ile keski arasındaki değer hesaba katılmamıştır. Nishimatsu modelinde ise Eşitlik 3 yardımı ile kesme kuvveti hesaplanırken sürtünme açısı ve gerilme dağılım faktörü hesaplanırken sırası ile Eşitlik 6 ve 4 kullanılmıştır. Kayacın kohezyonu ve içsel sürtünme açısı, Nishimatsu tarafından da dolaylı yöntemle belirlenmiştir ve bu hesaplama ile ilgili bilgiler Nishimatsu (1993)’ten elde edilebilir.

Tablo 2. Gerçekleştirilen kesme deneyinin ve teorik çalışmaların sonuçları (Yaşar, 2017).

Kaya	d (mm)	w (mm)	α (°)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)	n	ϕ (°)	k (°)	FC’ Deney (N)	FC’ Evans (N)	FC’ Nishimatsu (N)
KA	5	12,7	-5	6,33	72,85	14,62	12,2	21,3	46,27	3645,42	2256,0	1898,04
GA	5	12,7	-5	6,67	99,92	16,67	12,2	21,3	53,09	9721,60	2377,2	5051,03
YT	5	12,7	-5	4,67	51,65	10,68	12,2	21,3	45,05	3341,15	1664,4	1239,69
GT	5	12,7	-5	5,66	62,63	12,95	12,2	21,3	45,05	4438,25	2017,2	1504,33
KT	5	12,7	-5	6,70	88,15	16,07	12,2	21,3	49,93	4677,52	2387,9	3105,14
ST	5	12,7	-5	4,38	62,45	10,76	12,2	21,3	51,98	3269,85	1561,0	2743,09

Deneysel ve teorik kesme kuvvetleri grafik üzerinde Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi Nishimatsu (1972) modeli ile sarı tuf, kahverengi tuf ve gri andezit numunelerindeki kesme kuvveti Evans (1958) modelinden daha gerçeğe yakın sonuçlar vermiştir. Diğer numunelerde ise Evans (1958) yaklaşımı gerçeğe daha yakın sonuçlar vermiştir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bir husus, Evans modelinin sürtünmeyi hesaba katmamasıdır ki sürtünme hesaba katıldığında bu tahmin sonuçları tamamen değişecektir. Evans (1965) kendi teorisini sürtünme katsayısını da işin içine katacak şekilde tekrar güncellemiştir. Roxborough (1973) tarafından yapılan düzeltme ile bu güncelleme birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

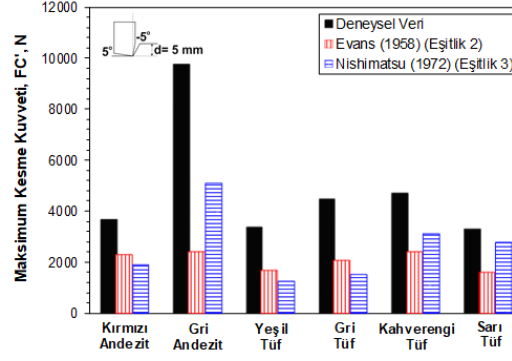
$$FC' = \frac{2 \sigma_t d w \sin \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \phi \right)}{1 - \sin \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \phi \right)} \quad (7)$$

Burada;

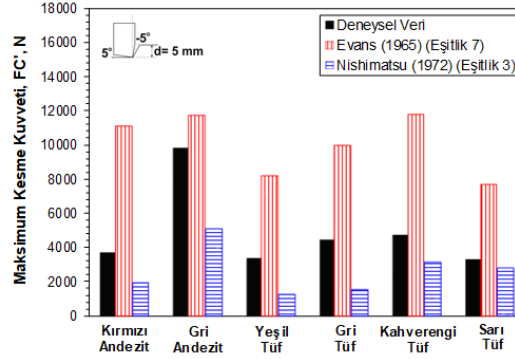
- FC' = Maksimum kesme kuvveti, N,
 σ_t = Kayacın çekme dayanımı, MPa,
d = Kesme derinliği, mm,
w = Keski genişliği, mm,
 α = Kesme açısı, °,
 ϕ = Kaya kesmedeki sürtünme açısı, °'dir.

Nishimatsu tarafından önerilen sürtünme açısı (ϕ), aslında görgül yöntemlerle bulunan bir sabittir. Eşitlik 7'de verilen sürtünme açısı ise doğrudan kaya ile keski arasında çeşitli sürtünme deneyleri yapılarak bulunan bir açı değeridir. Ancak, çeşitli çalışmalarda Nishimatsu tarafından önerilen açının yerine doğrudan sürtünme açısı koyulabileceği bildirilmiştir (Bilgin vd., 2014; Wang vd., 2017). Bu çalışmada keski ile kayaç arasındaki sürtünme katsayıları ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmadığından Eşitlik 6 ile hesaplanan sürtünme açısı ($21,3^\circ$) Evans modelinde kullanılmıştır. Şekil 7'de sürtünme açısının Evans modelinde de hesaba katıldığında elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Şekil 7'den de görülebileceği gibi Evans modeli gri andezit numunesi hariç diğer tüm kayaçlarda kesme kuvvetini 2 ile 3 kat arası fazla hesaplamıştır. Bu sonuca göre sürtünme hesaba katıldığında, Nishimatsu modelinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Buradan elde edilen bulgular geçmiş çalışmalar ile örtüşmektedir. Bilgin (1989) Evans modelinin dayanımı daha düşük kayaçlarda doğru sonuçlar verdiğini ve Nishimatsu modelinin ise dayanımı daha yüksek olan kayaçlarda gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini bildirmiştir. Ayrıca, Gökten (1990) çalışmasında yüksek dayanıma sahip kayaçların negatif kesme açısına sahip kesimler ile kesilmesinde çekme tipi yenilmenin görülmeyeceğini ve kesme yenilmesinin görülmesinin daha olağan olduğunu iddia etmiştir. Nishimatsu modelinde kayacın yenilmesinden sorumlu gerilme tipinin kesme gerilmesi olduğundan dolayı, negatif uç açılı bir keski ile bu kayaçların kesilmesinde bu modelin daha iyi sonuçlar vermesi olağan gözükmemektedir. Genel bir değerlendirme yapmak gerekirse, kaya kesmedeki hâkim gerilme tipi kayacın tipine, keski özelliklerine vs. bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bundan dolayı, kaya kesmedeki gerilme durumunu daha iyi yansıtabilecek kesme teorilerine gereksinim duyulmaktadır. Bu amaç için de kaya kesme deneylerinden sağlanan verinin önemi daha da artmaktadır.



Şekil 6. Deneysel ve teorik kuvvet değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi



Şekil 7. Deneysel ve teorik kuvvet değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi (sürtünme açısı her iki modelde de hesaba katıldığında)

5. Sonuçlar

Bu çalışmada negatif kesme açısına sahip bir keski ile kaya kesme deneyine tabi tutulan altı farklı magmatik kayaktan elde edilen deneysel kesme kuvveti değerleri ile Evans ve Nishimatsu tarafından önerilen modeller yardımı ile hesaplanan teorik kesme kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, sürtünme açısı hesaba katılmadığında bazı kayalarda Evans bazı kayalarda ise Nishimatsu modelinin daha gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak sürtünme açısı hesaba katıldığında, Nishimatsu modelinin gri andezit numunesi hariç tüm kayalarda çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuç olarak da daha fazla kaya kesme deneyi gerçekleştirilerek ve daha fazla deney verisi üretilerek kaya kesme teorilerinin geliştirilmesine gereksinim duyulduğu belirtilmiştir.

Kaynaklar

Barker, J.S., 1964. A Laboratory Investigation of Rock Cutting Using Large Picks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1, 519–534.

Bilgin, N., 1989. İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 192 s.

Bilgin, N., Demircin, M.A., Çopur, H., Balcı, C., Tunçdemir, H., Akçin, N., 2006. Dominant Rock Properties Affecting the Performance of Conical Picks and the Comparison of Some Experimental and Theoretical Results, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 43, 1, 139–156.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2014. Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries, CRC Press, 366 s.

Evans, I., 1958. Theoretical Aspects of Coal Ploughing, Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials, W.H. Walton, Ed., Butterworths, London, 451–468.

Evans, I., 1965. The Force Required to Cut Coal with Blunt Wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 2, 1–12.

Göktan, R.M., 1990. Effect of Cutter Pick Rake Angle on the Failure Pattern of High-Strength Rocks, *Mining Science and Technology*, 11, 281–285.

ISRM, 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM suggested Methods*. E.T. Brown, Ed., Pergamon Press, 211 s.

Mellor, M., 1977. *Mechanics of Cutting and Borin: Part IV: Dynamics and Energetics of Parallel Motion Tools*, CRREL Report 77-7, 96 s.

Menezes, P.L., Lovell, M.R, Avdeev, I.V., Lin, J.S., Higgs III, C.F., 2014. Studies on the Formation of Discontinuous Chips During Rock Cutting Using an Explicit Finite Element Model, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 635-648.

Nishimatsu, Y., 1972. The Mechanics of Rock Cutting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 9, 261-270.

Nishimatsu, Y., 1993. Theories of Rock Cutting, *Comprehensive Rock Engineering*, J.A. Hudson, Ed., Oxford, Pergamon Press, 647-662.

Perras, M.A. ve Diederichs, M.S., 2014. A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing, *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, 525-546.

Rostami, J., Ozdemir, L., Nilson, B., 1996. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models. In *Proceeding of the Annual Conference the Institution of Shaft Drilling Technology*, Las Vegas, pp. 1

Roxborough, F.F., 1973. The Cutting Rock with Picks, *Mining Engineer*, June, 445-454.

Yaşar, S., 2017. Kayaç kesilebilirliğinin tayini için düşey kayaç kesme setinin geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Yaşar, S. ve Yılmaz, A.O., 2017a. A Novel Mobile Testing Equipment for Rock Cuttability Assessment: Vertical Rock Cutting Rig (VRCR), *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 857-869.

Yaşar, S. ve Yılmaz, A.O., 2017b. Vertical rock cutting rig (VRCR) suggested for performance prediction of roadheaders, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, DOI: 10.1080/17480930.2017.1363482.

Yaşar, S. ve Yılmaz, A.O., 2017c. Rock Cutting Tests with a Simple-Shaped Chisel Pick to Provide Some Useful Data, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI: 10.1007/s00603-017-1303-2.

Wang, X., Liang, Y., Wang, Q., Zhang, Z., 2017. Empirical Models for Tool Forces Prediction of Drag-Typed Picks Based on Principal Component Regression and Ridge Regression Methods, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 62, 75-92.

Makale Gönderim Tarihi: 03.12.2017

Yayına Kabul Tarihi: 24.12.2017

Recovery of Chromite from Processing Plant Tailing by Vertical Ring and Pulsating High-Gradient Magnetic Separation

Gökhan ALTIN^{a*}, Serkan INAL^b, Ibrahim ALP^b & Mehmet Emin LEKİLİ^c

^a Niğtaş Mikronize Kalsit San. ve Tic. Ltd. Şti., 51100, NİĞDE

^b KTU, Department of Mining Engineering, 61080, TRABZON

^c Freelance Consultant

* Corresponding Author: gokhan_altin_9@hotmail.com

Abstract

Magnetic separation has been used widely since 1955 for processing a variety of minerals from iron ore in steel production to desulphurization of coal. The accumulation of fines and tailing during mineral processing operations and the increasing global demand for quality products motivated the use of the semi-continuous pilot wet high gradient magnetic separator. In this study the possibility of recover the chromites from the tailings of the chromite enrichment plant, by vertical ring and pulsating high gradient wet magnetic separator (VPHGMS) was investigated. Magnetic separation and concentration experiments were studied on pilot scale laboratory with 1-5 tons tailing materials. Tailings were fed first to hydrocyclone then the bottom fluid of the cyclone was fed to magnetic separator. Pre concentrate, obtained by magnetic separator, was beneficiated by shaking tables as a final enrichment step. On the experimental studies different currents (100-400 amperages) were studied to find out the effect of these parameters on the Cr₂O₃ grades and on the recovery yield. Therefore the parameters were evaluated in collaboration with particle size distributions, grades and the quantity of feeding and concentrate. According to experiments 300 amperage was determined as an optimific value. With reference to results 47% Cr₂O₃ concentrates were produced from approximately 3.40 % Cr₂O₃ tailings. Also the efficiency of chromite beneficiation for magnetic and shaking table tests was changed between 40-70 %.

Keywords: Chromites, tailing, recycling, magnetic separation, high-gradient, pulsating, vertical-ring

1.Introduction

Chromium has a wide usage area especially in chemical, refractory, metallurgical and casting industries but the main consumer of chromiums; metallurgy industry with very high share of mined chromite ore in the World around 90% and 80% of these metallurgical converted ferrochromites are using in stainless steel industry (Murthy et al., 2011). The main cause which makes chromium a unique metal is his feature that aid steel industry to produce stainless materials. Despite chromium was discovered first by French chemist Lois Nicholas Vauquelin in Siberia, the importance of this metal was realized by Harry Brearley in 1913 during the preparations of First World War due to same feature of this metal. Harry Brearley was realized during his investigation on samples for moulding artillery tube; all samples except few of them were rusted after that he was analyzed these stainless specimens and find out these steels contain 14% of chromium. This discovery paves the way of usage the chromium in producing of fork, knife and spoon (Das et al., 2012). Also chromium became important in every divisions of human life, especially in military defense industry, and the usage of this metal increases swiftly.

With the decreases of reserves of chromite ore which is the main available source of chromium, the importance of minimizing the losts during processing stages, beneficiation of low grade chromite ores and recovery from tailings become unavoidable. For these kinds of purposes many researchers were studied on magnetic separation possibility of chromite by wet high intensity magnetic separators (WHIMS), dry high-intensity rare-earth drum (RED) separators and dry high-intensity rare-earth roll (RER) separators to find out alternative methods to improve classical methods using for chromite enrichment commonly based on gravity separation such as shaking table, jig, spiral and Reichert cone (Agacayak et. al, 2004; Dobbins et al., 2007; Aslan and Kaya, 2009; Tripaty et. al, 2012; Das, 2015).

According to Livingston (1997) first observation of magnetism go long way back to as early as 550 BC; Euripides stone called the magnet does not simply attract the iron rings, it also impart to the rings a force enabling them to do the same thing as the stone itself which is realized by Socrates. However the practical significance of magnetism and magnetic separation was recognized only as late as middle of the 19th century and since end of the 19th century possibility of magnetic and less magnetic materials was proved (Svoboda and Fujita, 2003). Moreover the development of magnetic separators especially high gradient magnetic separators was declared by some researchers as a most important fact for mineral processing from technical and economical point of view (Silva and Luz, 2013). Nevertheless recent years with appreciable progress to understand the fundamentals of magnetism and development of permanent magnetic materials extend the usage of magnetic separation from coarse to colloidal and from strongly magnetic to diamagnetic materials (Svoboda and Fujita, 2003).

As well as all stages of mineral processing, the magnetic separation technology depends on many factors according to own rights such as particle size, specific assemblage of minerals, grade and corresponding magnetic susceptibility (Dobbins et al., 2007). Additionally WHIMS technology which was studied by researchers to beneficiate chromite ore is traditionally has demonstrated inefficiencies with finer feeds under 100 μ m (Dobbins et. all, 2007; Dobbins et. all, 2009). After first introducing of Slon Vertical-Ring and Pulsating High Gradient Magnetic Separator (VPHGMS) in 1988, many researchers were studied over fine iron ore minerals and obtained promising results (Dahe, 1993; Dahe, 2000; Zeng and Dahe, 2003; Dahe, 2003; Dobbins et al., 2007; Hearn and Dobbins, 2007; Dobbins et al., 2009; Chen et al., 2009; Umadevi et al., 2012; Chen et al., 2013; Silva and Luz, 2013).

In this study chromite processing plant tailings containing; chromite, olivine and serpentine were beneficiated by VPHGMS and followed by shaking tables. Due to close density of olivine and chromite ores, olivine was removed by VPHGMS as a non-magnetic part and then chromite was cleaned by shaking table from serpentine. During two phased enrichment processes imposed on firstly magnetic susceptibility then density differences of minerals (Table 1). According to the theoretical background vertical pulsating high gradient type magnetic separator was chosen as a magnetic separator due to particle size distribution of tailings which is under 500 μm with Cr_2O_3 grade accumulation under 200 μm . In this study from 200 to 400 amperages with constant ring velocity (4 rpm) and pulsation rate (304 rpm) were suited as working parameters. especially for magnetic separation step encouraging results were obtained on all particle sizes and as distinct from other magnetic separation methods high beneficiation rates and efficiencies for fine particles were also obtained.

Table 1. Magnetic susceptibilities of olivine, chromite and serpentine (Hunt et al.,1995).

Mineral	Magnetic susceptibility, k (μSI)	Density (gr/cm^3)
Olivine	1,600	4.32
Chromite	3,000-120,000	4.80
Serpentine	3,100-75,000	2.78

2.Slon Vertical Ring Pulsating Magnetic Separator

Magnetic separators were classified by many researchers depending on their different properties but most common and basic classification among these is classifying magnetic separators according to their magnetic field strengths and working with or without water such as low intensity, medium intensity, high intensity and dry or wet magnetic separators.

In this study, types of magnetic separators will not explore but at this point a briefly literature information of the evaluation stages of magnetic separation, particularly in terms of matrix usage could be necessary to better understanding of VPHGMS. The idea Frantz (Frantz, 1937) was told, inspired Jones (1960) to use matrix in magnetic separators and this was a tremendous change on high magnetic field separators and also extended the applicability of magnetic separators dramatically.(Svoboda and Fujita, 2003). Following this; vertical magnetic separator (VMS), developed in Czech Republic, solve the matrix blockage problem of high gradient magnetic separators via vertical rotating ring and reverse flush and finally ‘Slon’ vertical pulsating high gradient magnetic separator was introduced which is expose slurry within matrix by pulsation (Svoboda and Fujita, 2003). Slon vertical ring and pulsation high-gradient magnetic separator (VPHGMS) was developed in 1988 at Ganzhou Non-Ferrous Metallurgy Research Institute and following that the design was improved by designers to increase the reliability and beneficiation efficiency. VPHGMS was applied firstly in China on production or pilot-plant scales at many companies and promoted the progress of technology at these companies, mines and plants (Dahe, 1993). This novelty on magnetic separation technology excites attention of many researchers and companies. Also scientific and industrial works on VPHGMS was increased rapidly particularly for iron ores (Dahe, 1993; Dahe, 2000; Zeng and Dahe, 2003; Dahe, 2003; Dobbins et al., 2007; Hearn and Dobbins, 2007; Dobbins et al., 2009; Chen et al., 2009; Umadevi et al., 2012; Chen et al., 2013; Silva and Luz, 2013).

2.1. Advantages of VPHGMS

Magnetic separation is under control of competing forces which are acting on the particles and magnetic force. Competing forces mainly consist from gravity force, the inertial force, the hydrodynamic force and surface and inter-particle forces (Svoboda and Fujita, 2003). Particle collection capacity, matrix plugging and particle trapping issues which are interplay each other basically cause unbalance between competing forces and magnetic force in VHIMS.

In magnetic separation on VHIMS, the balance between hydrodynamic drag forces and magnetic attraction forces tend to the drag forces. To overcome capacity problems on WHIMS, increasing the magnetic force is an option to attract weakly magnetic particles but it induces a decrease on effective range, so more points of collection are required to collect fine particles effectively. However, even more grooved plates are using to obtain more collection points it's not possible to overcome the opposing physical forces within magnetic zone for particles around 100 μm (Hearn and Dobbins, 2007). Additionally depending on the particle size distribution hydrodynamic drag force became more important, for instance; same magnetic force effect on 10 times smaller particle and coarse particle which is the smaller particle has 1000 times more magnetic susceptibility than coarse particle (Svoboda and Fujita, 2003). On the other hand matrixes with more collection points are magnetizing and collecting multiple particles at each high-gradient location and also trapping the non-magnetic particles. When coarse particles held the non-magnetic fine particles and non-magnetic particles cannot flow to the non-magnetic launder, as a result of this, reduction in grade and recovery is become unavoidable (Dobbins, 2006).

Innovative features of VPHGMS which are distinguish this technology from other magnetic separators especially from VHIMS can be summarized under 3 titles which are vertical carousel, straightforward rod matrix system and pulsation mechanism. Although these features have a synergy effect on separation efficiency and each of them provides advantages to solve problems on magnetic separation.

Vertical Carousel

The vertical carousel which is opposed to traditional Jones-type WHIMS, allows magnetic flush which is opposed direction of the feed, to remove strongly magnetic and/or coarse particles without passing through the full depth of the matrix volume. Magnetic flushing also reduces any residual grip on the magnetic particles successfully in a location with low stray magnetic field (Dobbins et al., 2009). Hereby, removing a coarse particle by magnetic flush under favor of vertical carousel allows bettering treatment of fine particles and increasing the effective capacity of separator.

Pulsation

Agitating the slurry and keeping particles in a loose state in the separation zone by pulsation assist the performance of the separation minimizing entrapment. Pulsation mechanism creates more usable surface are for magnetic collection through the maximizing particle accumulation on all sides of rod matrix (Dobbins et al., 2009) (Figure 1).

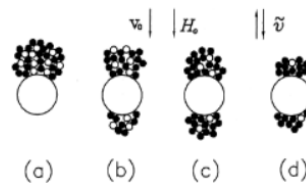


Figure 1. Particle build-up on a single wire in PHGMS: (a) no pulsation; (b) pulsation is weak; (c) pulsation is fair; (d) pulsation is strong (Dahe et al. 1998).

Matrix

Filamentary matrix of VPHGMS constructed of rods which are oriented perpendicular and in equidistant pattern to obtain optimum magnetic force. This pattern minimizing the risk of particle entrapment when compared to randomly positioned filaments (wool) or expanded metal sheets (Dobbins et al., 2009).

2.2. Design and Working Principles of Slon VPHGMS

VPHGMS enables to beneficiate fine weakly magnetic particles through the combined magnetic force field, pulsation in separation zone, gravity and vertical rotating ring which allows flushing magnetic fractions opposite to the feed direction. VPHGMS is a unique magnetic separator with less matrix blockage problems and more flexible and adaptable working conditions when compared to other high-gradient magnetic separators (Figure 2). VPHGMS has a separating zone filled with flowing water, which is adjustable according to purpose and requisite of work, to transmit the pulsation energy to the separation zone. The slurry is feeding into the matrix through feeding box and magnetic particles are attracting onto matrix surface while non-magnetic particles pass through the matrix and go out from tailings output. Particles are effecting combined action of pulsation, gravity, hydrodynamic drag and magnetic force during the process. Particles are threatening in a loose state in the matrix under pulsation mechanism which is assisting capturing magnetic particles more easily by matrix while non-magnetic particles are dragging out through the matrix. Also entrapment of particles is preventing by pulsation too. VPHGMS became a higher performance machine especially for fine weakly magnetic minerals by these innovative features particularly pulsation mechanism compared to other HGMS (Dahe, 1993, Chen et. all, 2013).

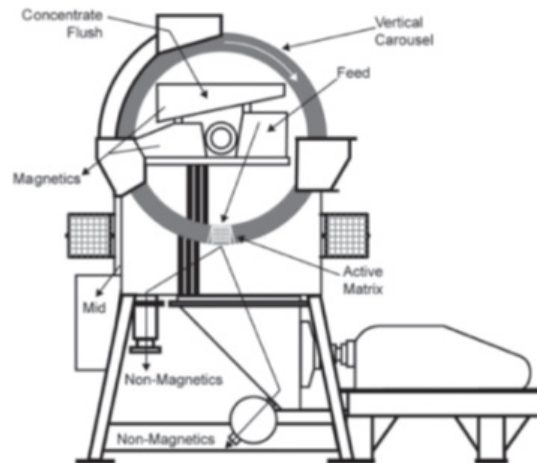


Figure 2. Schematic view of VPHGMS (Url 1).

3. Materials And Methods

3.1. Materials

In this study, Şetat Mining located in Orhaneli-Bursa concentration plant's tailings were used. At this plant chromite enrichment process is based on shaking tables as a gravity separation method but loss of the plant is very high in terms of feed grade which changes between 4.5 to 6 % Cr_2O_3 . Also grade of tailing change approximately between 2.60 to 5 % Cr_2O_3 depending on mainly to the feeding grade and efficiency of shaking tables and other factors such as particle size distribution, classifiers efficiency and especially olivine content of ore which is the unique problem of this facility. Excessive amount of olivine presence (around 25-30 %) as a gangue

mineral in the ore decrease shaking tables efficiencies regardless to particle size due to close density of olivine (3.2-4.5 gr/cm³) and chromite (4.5-5.09 gr/cm³). On the other hand losses of Cr₂O₃ dramatically increase on fine particles due to more similar acts of olivine and chromite minerals on shaking table (Table 2).

Table 2. Plants tailings representative grade depend on particle size

Particle Size (Micron)	Weight (gr)	Weight (%)	Cumulative Undersize (%)	Cr ₂ O ₃ Grade (%)	Cr ₂ O ₃ Distribution (%)
500	21.86	11.1	100	3.37	13.03
-500+355	24.72	12.64	88.82	2.66	11.63
-355+250	24.88	12.72	76.1	1.72	7.57
-250+180	25.85	13.22	63.46	1.79	8.19
-180+125	25.91	13.25	50.25	1.75	8.02
-125+90	19.55	10.00	37.00	2.29	7.92
-90+36	40.82	20.7	27.00	4.40	31.78
-36	11.99	6.13	6.13	5.57	11.82
Total	195.58	0.00	0.00	2.89	100.00

3.2 Method

In this study VPHGMS which is the best option for fine particles among magnetic separators was used to remove olivine from tailings and following that shaking table was used to remove serpentine. Tailings were fed to VPHGMS with % 25 solid rate and 0,4 Mpa was chosen as a water pressure. Since the tailings were fed from tailing storage area, grades of feeding were not constant and changed between 3-5 % Cr₂O₃. On the contrary, pulsating stroke (20 mm), wire diameter of rod matrix (1.8 mm) were chosen constant. Effect of pulsation and ring were not fully investigated but only some observations were obtained which were leads to choose constant parameters during studies on effect of amperages. The features of VPHGMS used in this study which was rented from Aksa Magnet were given Table 3.

Table 3. Technical features of Aksa Magnet YMS-10 VPHGMS

Ring Dia. (mm)	Ring Width (mm)	Ring Speed (rpm)	Feed Size (mm)	Feed Solid (%)	Capacity (t/h)	Magnetic Induction (T)	Pulsating Stroke (mm)	Pulsating Freq. (r/min)	Water Pres. (Mpa)
1000	300	2-4	-1,2	10-40	4-7	1.2	20	0-300	0.2-0.4

In this study amperages from 200 to 400 were investigated with constant pulsation frequency 304 (r/min) and ring 4 (rpm). In other words, magnetic (background) fields which are approximately 0.23, 0.28, 0.32 and 0.46 Tesla generated by Aksa Magnet YMS-10 were studied on VPHGMS for working condition of 200, 250, 300, 400 amperages respectively (Figure 3).

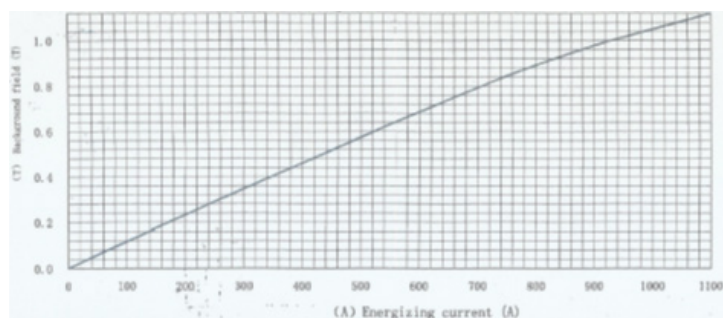


Figure 3. Relation between background field and amperages of VPHGMS

Concentrates of VPHGMS were feed directly to the shaking table to remove serpentine content and produced final concentrate (Figure 4). Shaking table working conditions were kept constant and magnetic concentrate were fed with approximately 15-20 % solid rate (Table 4).

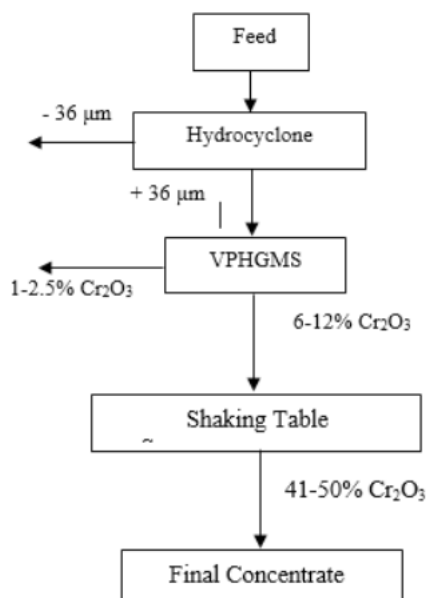


Figure 4. Experimental beneficiating flowsheet of plants tailings

Table 4. Shaking table working conditions

Shaking Table Properties	
Amplitude (mm)	2.20
Frequency (Stroke)	280
Transverse inclination (°)	4
Longitudinal inclination (°)	-0.2
Solid Rate %	15-20
Feeding Speed, kg/min	12.5

4. Result And Discussion

The presence of olivine mineral as a gangue in ore deposit effects negatively the gravity separation process and consider a feeding grade led to relatively high value of chromite loss during the concentration stage. In this industrial scale study, Cr₂O₃ content of tailings accumulated mostly

in fine sizes were first tried to beneficiate by only shaking table and the process was failed as expected. Because of the close density of olivine and chromite especially under 355 mm, grade of shaking table concentrate decrease dramatically and marketable concentrate couldn't produced by shaking table. By this primer test which was a demonstration of impossibility that producing a marketable concentrate, grade of Cr_2O_3 could increase maximum to 29.13% Cr_2O_3 (Table 5).

For this reason tailings of processing plant were fed first to hydrocyclone to get rid of very fine particles (under 36 micron) and then the underflow of hydrocyclone was fed to VPHGMS to remove olivine minerals as a non-magnetic part. Depending on the feeding rate and amperages, relatively high pre-concentrates were produced by VPHGMS which are vary approximately from 6 to 12% Cr_2O_3 . Also satisfactory beneficiation in fine particles were obtained which increase linearly while particle size decrease especially from 250 to 36 micron and distribution of Cr_2O_3 was accumulated under 250 micron (around 67%) (Table 6).

From this pre-concentrate marketable Cr_2O_3 concentrates were produced by shaking table under favor of removing olivine minerals via VPHGMS. In this study, from 6.31 to 12.12 % Cr_2O_3 grades with 55 to 88% recovery rates pre concentrates were obtained by VPHGMS depending on the feeding rates and amperages. It's obvious that with an increase of amperages recovery of VPHGMS increase while grade of pre concentrate decrease. The reason of low recovery while operating 200 amperages is insufficient magnetic field (around 0,23 T) to catch chromite particles due to relatively low magnetic susceptibility of chromite. On the other hand high recovery rates but low grades were obtained when operating on 400 amperages (around 0.46 T) due to catching even unliberated particles by magnetic separator. As a result of this marketable final concentrates couldn't produce by shaking table when relatively low grade VPHGMS concentrates were fed to shaking table (Table 7).

Table 5. Shaking table representative concentrate grades depends on particle size which fed from tailing

Particle Size (Micron)	Weight (gr)	Weight (%)	Cumulative Undersize (%)	Cr_2O_3 Grade (%)	Cr_2O_3 Distribution (%)
500	11.81	6.46	-	45.69	10.12
-500+355	19.11	10.45	93.54	48.24	17.29
-355+250	22.52	12.31	83.09	37.85	15.98
-250+180	38.93	21.29	70.78	22.85	16.68
-180+125	54.83	29.98	49.49	19.91	20.47
-125+90	24.39	13.34	19.51	25.71	11.76
-90+36	11.18	6.11	6.18	36.59	7.67
-36	0.12	0.07	0.07	14.59	0.03
Total	182.89	100	-	29.16	100.00

Table 6. VPHGMS concentrate (pre-concentrate) grades depends on particle size distribution

Particle Size (Micron)	Weight (gr)	Weight (%)	Cumulative Undersize (%)	Cr ₂ O ₃ Grade (%)	Cr ₂ O ₃ Distribution (%)
500	46.34	24.66	-	3.91	11.35
-500+355	20.75	11.04	75.34	5.35	6.95
-355+250	18.52	9.86	64.29	3.26	3.78
-250+180	18.75	9.98	54.43	8.03	9.43
-180+125	22.53	11.99	44.45	10.29	14.52
-125+90	18.10	9.63	32.46	13.25	15.02
-90+36	33.69	17.93	22.30	14.49	30.57
-36	9.20	4.90	4.90	14.59	8.41
Total	169.88	100.00	-	8.50	100.00

Table 7. Experiment parameters and analyzes of VPHGMS and shaking table

Magnetic Field (A)	Tailings Grade (%)	Feed Amount (kg)	VPHGMS Conc. Grade (%)	VPHGMS Tailings Grade (%)	VPHGMS Tailings Amount (kg)	Shaking Table Conc. Grade (%)	Shaking Table Conc. Amount (kg)	VGHGMS Recov. (%)	Shaking Table Recov. (%)	Overall Recov. (%)
200	3.4	2998	10.01	2.49	2433	50.16	37.5	55	33	18
250	4.00	4690	12.12	2.30	3551	42.35	95	74	29	21
300	3.4	3295	11.95	1.90	2520	47.08	78.5	83	40	33
300	3.65	3114	10.4	1.93	2296	47.57	77	75	43	32
300	3.65	3114	10.4	1.93	2296	47.57	77	75	43	32
300	4.15	780	6.72	1.55	388	44.36	19.4	81	33	27
300	3.60	780	6.31	1.46	436	42.36	19	77	37	29
400	3.02	3441	6.65	1.01	2073	41.70	86.5	88	40	35
400	3.65	2606	6.63	1.32	1462	42.36	60	80	34	27

Analyzes of shaking table concentrates (final concentrate) reveal that beneficiation of fine particles by gravity process also increase as expected when olivine minerals removed by VPHGMS (Table 8). Also 300 A was found as optimum amperage among studied amperages according to relation between grade and recovery (Figure 5).

Table 8. Shaking table representative concentrate fed from VPHGMS

Particle Size (Micron)	Weight (gr)	Weight (%)	Cumulative Undersize (%)	Cr ₂ O ₃ Grade (%)	Cr ₂ O ₃ Distribution (%)
500	46.34	24.66	-	3.91	11.35
-500+355	20.75	11.04	75.34	5.35	6.95
-355+250	18.52	9.86	64.29	3.26	3.78
-250+180	18.75	9.98	54.43	8.03	9.43
-180+125	22.53	11.99	44.45	10.29	14.52
-125+90	18.10	9.63	32.46	13.25	15.02
-90+36	33.69	17.93	22.30	14.49	30.57
-36	9.20	4.90	4.90	14.59	8.41
Total	169.88	100.00	-	8.50	100.00

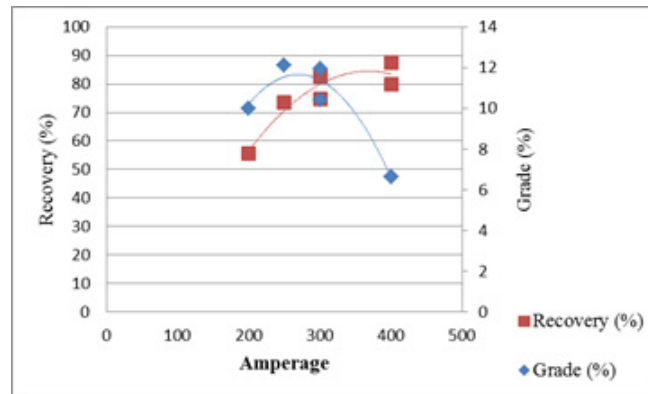


Figure 5. Effect of amperage on recovery and grade

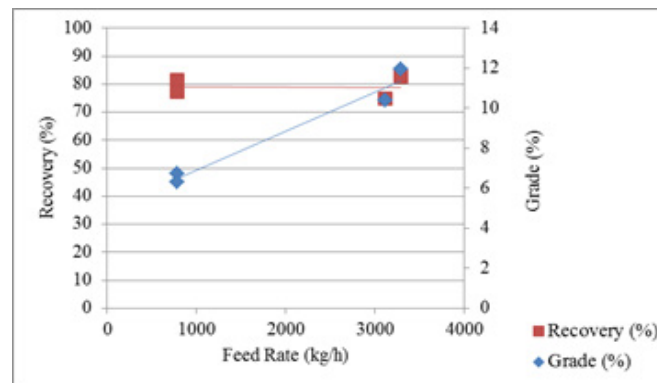


Figure 6. Effect of feed rate on recovery and grade

Beside these effect of feeding rate was investigated for 300 A. Results indicate that when feeding rate is less than 1000 kg/h, grade of the VPHGMS decrease dramatically. On the other hand feeding rate has no important effect on recovery among studied values. Even it could say the optimum feeding rate is a 3000 kg/h for this study, the need to comprehensive further studies to determination of optimum feeding rate is obvious (Figure 6).

5. Conclusions

Magnetic separation technologies have been used in recovery and concentration of different minerals including chromite minerals. Fine particle chromite ores and tailings of plants processed via high intensity magnetic separators by many researchers and VPHGMS were used to beneficiate especially iron ores but VPHGMS usage for enrichment of chromite ores and recovery of chromite tailings is limited.

In this industrial scale study, chromite tailings of typical chromite processing plant which have 2.60 to 5% Cr₂O₃ content were recovered by VPHGMS and pre concentrates were produced with relatively high grades (6-12% Cr₂O₃). Following that these pre concentrates cleaned substantially from olivine minerals were fed to shaking table and marketable chromite concentrates were obtained. Some important results of this study were specified below;

- In this study, pre concentrates have approximately 6-12% Cr₂O₃ content with 55-80% recovery of magnetic separation part were produced as pre concentrates from plants tailings with 2.6-5% Cr₂O₃. After that from these pre-concentrates bendable or direct sealable final concentrates have 41.70-50.16% Cr₂O₃ content with 29-43% recovery value were produced by shaking table.
- It's obvious that marketable chromite ore can produced from plants tailings with two steps which are VPHGMS and following that shaking table with approximately 30% overall recovery and 47% Cr₂O₃ content.
- When the recovery of Cr₂O₃ from tailings and grade of pre concentrate produced by VPHGMS were evaluated together in constant pulsation frequency 300 A (0.32 T) was found as an optimum amperage to beneficiate this chromite tailings.
- Results about feeding rate experiments show that under limits of VPHGMS feeding rates produced pre concentrates' grades are very low which cannot beneficiate in shaking table stage while recovery rate is very high. The main reason of this result is presence of too many free places on matrix of separator which cause to catch almost all particles even if they are unliberated particles with small chromite pieces.
- Further studies are needed to determine exact optimum working conditions of VPHGMS for using on chromite. Effect of pulsation, magnetic field strength, feeding rate and grade, water pressure and wire diameters of rod matrix have to investigate detailed to find out combined effect of vertical pulsating high gradient magnetic separator working parameters on chromite beneficiation.

Reference

- Agacayak, T., Zedef, V. & Aydogan, S., 2007. Beneficiation of low-grade chromite ores of abandoned mine at Topraktepe, Beyşehir, SW Turkey, *Acta Montanistica Slovaca* 12, 4, pp. 323-327.
- Aslan, N. and Kaya, H., 2009. Beneficiation of Chromite Concentration Waste by Multi-Gravity Separator and High Intensity Induced-Roll Magnetic Separator, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 34, Number 2B, pp. 285-297.
- Chen, L., Dahe, X. & Huang, H., 2009. Pulsating High Gradient Magnetic Separation of Fine Hematite from Tailings, *Minerals and Metallurgical Processing*, Vol. 26, Number 3, pp. 163-168.
- Chen, L., Qian, Z., Wen, S. & Huang S., 2013. High Gradient Magnetic Separation of Ultrafine Particles with Rod Matrix, *Mineral Processing & Extractive Metall. Rev.*, 34, pp. 340-347.

Dahe, X., 1994. New Development of the Slon Vertical Ring and Pulsation HGMS Separator, *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 5, pp. 211-222.

Dahe, X., 2000. A Large Scale Application of Slon Magnetic Separator in Meishan Iron Ore Mine, *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 11, No. 1-2, pp. 1-8.

Dahe, X., 2003. Slon Magnetic Separator Applied to Upgrading the Iron Concentrate, *Physical Separation in Science and Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 63–69.

Dahe, X., Liu, S., Chen, J., 1998. New Technology of Pulsating High Gradient Magnetic Separation, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 54, Issue 2, pp. 111-127.

Das, B., Arik, F., Ozturk, A. & Altay O., 2012. Krom madenciliği ve geçmişten günümüze insanlık tarihi üzerine etkileri, *Journal of Life Sciences*, Volume 1, Number 2, pp. 77-88.

Das, S.K., 2015. Quantitative mineralogical characterization of chrome ore beneficiation plant tailing and its beneficiated products, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 22, 4, pp. 335.

Dobbins, M., 2006. Pulsation Separation. *Industrial Minerals*, 465, pp. 72-75.

Dobbins, M., Domenico, J. & Dunn, P., 2007. A discussion of magnetic separation techniques for concentrating ilmenite and chromite ores, *The 6th International Heavy Minerals Conference ‘Back to Basics’*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 197-203.

Dobbins, M., Dunn, P. & Sherrell, I., 2009. Recent advances in magnetic separator designs and applications, *The 7th International Heavy Minerals Conference ‘What next’*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 63-69.

Hearn, S. B. & Dobbins, M. N., 2007. Slon Magnetic Separator: A New Approach for Recovering and Concentrating Iron Ore Fines, *Montreal Energy & Mines*, Montreal, April 29- May 2

Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. & Banerjee, S. K., 1995. Magnetic Properties of Rocks and Minerals, In: Ahrens T J (ed.) *A Handbook of Physical Constants*, vol. 3: Rock Physics and Phase Relations. Washington, D.C: American Geophysical Union, pp. 189-201.

Murthy, Y. R., Tripathy, S.K. & Kumar, C. R., 2011. Chrome ore beneficiation challenges & opportunities – A review, *Minerals Engineering* 24, pp. 375–380.

Silva, M. B. & Luz, J. A. M., 2013. Magnetic scavenging of ultrafine hematite from itabirites, *Esc. Minas, Ouro Preto*, 66(4), pp. 499-505.

Svoboda, J. & Fujita, T., 2003. Recent developments in magnetic methods of material separation, *Minerals Engineering* 16, pp. 75-792.

Tripaty, S.K., Murthy, Y.R. & Singh, V., 2012. Characterization and Separation Studies of Indian Chromite Beneficiation Plant Tailing, *International Journal of Mineral Processing*, Volume 122, pp. 47-53.

Umadevi, T., Singh, A. M., Abhishek, K., Suresh, B. & Sah, R., 2013. Recovery of Iron Bearing Minerals from Beneficiation Plant 2 Thickner Underflow of JSW Steel Limited, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 1, pp. 55-60.

URL-1: http://www.outotec.com/ImageVaultFiles/id_958/d_1/cf_2/OTE_SLon_vertically_pulsating_high-gradient_magnet.PDF

Zeng, W., & Dahe, X., 2003. The latest application of SLon vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator, Minerals Engineering 16, pp. 563-565.

Note:

This paper is an invited paper which was also published in Proceedings of International Black Sea Mining and Tunnelling Symposium 2016.

Makale Gönderim Tarihi: 11.12.2017

Yayına Kabul Tarihi: 13.01.2018

Ünlüpinar (Kelkit-Gümüşhane) Yöresindeki Kireçtaşlarının Doğal Yapı Taşı olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

*Investigation of Usability of Unlupinar (Kelkit-Gumushane) Limestones as Marketable Natural Stone*Fatma Sinem Özkan^{1*}¹ İkiler Mühendislik Ltd. Sti., Milas, Muğla*Sorumlu Yazar: f.sinem@gmail.com

Özet

Bu çalışma kapsamında, Ünlüpinar (Kelkit-Gümüşhane) yöresindeki Berdiga Formasyonu'na ait kireçtaşlarının doğal yapı taşı olarak kullanılabilirliği ve standartlara uygunluğu araştırılmıştır. Çalışmalar arazi, laboratuvar ve büro değerlendirmeleri olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanını da içine alan bölgenin 1/25000 ölçekli detay jeoloji haritası hazırlanmıştır. Araziden derlenen bloklardan karotlar alınarak, çalışmanın amacına uygun fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, TSE ve ASTM standartlarında verilen sınır değerlerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Değerlendirmeler, kireçtaşlarının fiziksel ve mekanik özellikleri açısından ilgili standartlarda belirtilen değerleri karşıladığını göstermektedir.

Anahtar kelime: Mermer, Kireçtaşı, Fiziko-Mekanik Özellikler, Gümüşhane, Ünlüpinar

Abstract

In this study, the usability and compliance with standards of limestone of Berdiga formation in Ünlüpinar (Kelkit-Gümüşhane) precinct were investigated. The study was carried out in three stages performed in field, laboratory and office. A detailed geological map including the working area has been drawn with the scale of 1/25000. The physico-mechanical tests were performed by getting core samples from the rock blocks from the working area. The data obtained with the tests were assessed comparing with the limit values in the TSE and ASTM standards. The assessments confirm that the physical and mechanical specifications of the tested limestone meet the values in standards.

Keywords: Marble, Limestone, Physico-mechanical Properties, Gumushane, Unlupinar

1.Giriş

Mermer, günümüzden yaklaşık 2000 yıl önce antik mermer işletmeciliğinin başladığı yer olan Marmara Adası'ndan adını almıştır. Sanatkârlar tarafından işlenerek insan hayatına giren mermer, uygarlığın ilerlemesine paralel olarak, tapınak, amfi, saray, hamam, köprü, sarnıç, cami, medrese, çeşme gibi işçiliklerde yapı taşı olmanın yanında abide ve heykelticilik gibi süsleme ve sanatsal tasarım amacıyla da kullanılmıştır (Gürsoy, 2005).

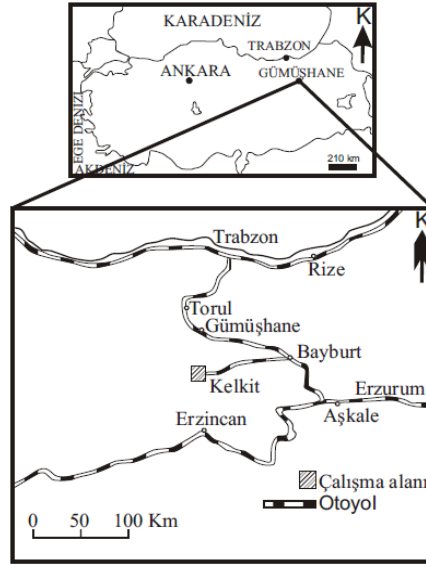
Doğal taşlar, tarih boyunca dayanıklılığı ve estetik görünümü nedeni ile değişik uygarlıklar tarafından anıtlarda, görkemli yapı malzemesi olarak kullanılmış olup; günümüzde genellikle zemin döşeme, iç ve dış cephe kaplama malzemesi olarak inşaat sektöründe, anıt yapılarında ve mezarlıklarda ve süs eşyası yapımında ve diğer alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca, mermer toz ve parçaları çimento, boya, seramik ve yapı malzemeleri sanayinde, mozaik çalışmalarında ve sanatsal eserlerin yapımında kullanılmaktadır. Mermer, kireçtaşı (CaCO_3) ve dolomitik kireçtaşlarının ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) sıcaklık ve basınç altında başkalaşıma uğrayarak yeniden kristalleşmesi ile oluşan metamorfik bir kayadır (Atabey, 2002; Pedley, 1990).

Ticari ve endüstriyel anlamda ise mermer tanımlaması çok geniş bir anlam taşımaktadır. İşlenebilen, cilalanabilen, parlayan ve boyutlandırılabilen veya dekoratif amaçlı kullanılan ve ticari değeri olan her türlü kayaç mermer olarak adlandırılmaktadır. Blok verebilen, kesilerek parlatılıp cilalanabilen, dayanıklı ve göze hoş gelen her türlü kayaç (mağmatik, metamorfik, sedimentar) mermer olarak tanımlanmakta ve değerlendirilmektedir. Bununla beraber mermerlerin değerlendirilmesinde jeolojik, mineralojik, yapısal ve jeolojik unsurlar ile teknolojik özellikler etkilidir (Görgülü, 1994). Günümüzde özellikle endüstriyel anlamda mermerin yerine doğal taş terimi de kullanılmaktadır.

Doğal taş madenciliğine ait teknolojide ve üretimde ileri seviyeye ulaşmış ülkeler mermer ve mermer türevlerine ait ürünlerin tanıtımı esnasında, söz konusu doğal taşın petrografik, teknolojik-mekanik özelliklerinin belirlenmesine büyük önem vermektedirler. Ancak bizim gibi gelişmekte olan veya az gelişmiş ülkelerde bu konudaki bilimsel çalışmalar henüz istenilen düzeye ulaşmamıştır. Bu nedenle ülkemiz doğal taşlarının; rezerv hesaplamaları, jeolojik, tekno-mekanik, mineralojik ve petrografik özelliklerinin belirlenmesi, doğal taş madencilik sektörünün gelişerek hak ettiği noktalara gelebilmesi için önem arz etmektedir (Kurtçu, 2010). İç ve dış cephe kaplamalarından, yer döşemesine, sanatsal yapılara ve mezar taşlarına kadar birçok yerlerde kullanılan mermerlerin uygun yerlerde kullanılabilmeleri için oluşum ve bulunuş şekillerinin yanı sıra fiziksel ve fiziko-mekanik özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir (Demir, 1991).

Bu çalışma kapsamında, Ünlüpınar (Kelkit-Gümüşhane) yöresindeki Berdiga Formasyonu'na ait kireçtaşlarının doğal yapı taşı olarak kullanılabilirlikleri araştırılmış ve doğal taş olarak ekonomik değere sahip olma durumu incelenmiştir. Gümüşhane ili Kelkit ilçesine bağlı Ünlüpınar beldesinde bulunan kireçtaşlarının mekanik ve fiziko-mekanik özelliklerinin standartlara göre değerlendirilmesi yolu ile ülkemiz ve dünya piyasasında mermer olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesidir.

İnceleme alanı Doğu Karadeniz Bölgesi, Gümüşhane İli, Kelkit ilçesine bağlı Ünlüpınar beldesi ve çevresini içeren H42-c₂ paftası içerisinde yer almaktadır. Şekil 1'de çalışma alanına ait yer bulduru haritası verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası

2. Yapılan Çalışmalar

Kireçtaşı ocağından araziye iyi temsil etmesine dikkat edilerek alınan blok numuneler deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere laboratuvara getirilmiştir. Arazi çalışmaları sırasında kireçtaşlarından alınan blok örnekler Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Karot Alma laboratuvarında bulunan silindirik karot alma ve taş kesme makineleri vasıtasıyla, silindirik numuneler elde edilmiştir (Şekil 2). Bu numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ve Maden Mühendisliği Bölüm laboratuvarında mevcut olan ekipmanlar kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.1. Su Muhtevası

Su muhtevası, kaya örneklerinin içerdiği su kütlelerinin kuru numune (etüvden alınan) kütlelerine olan yüzdesi olarak ifade edilir. Su muhtevası tayini amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda TSE (1987) tarafından belirtilen hususlar dikkate alınmaktadır. Deneysel prosedürüne göre, örnek kapları temizlenip kurutulduktan sonra tartılarak kütleleri (A) belirlenir. Her biri en az 50 gram ağırlığında ve örneği temsil eden en az beş adet düzgün şekilli olmayan numuneler seçilir. Örnekler metal kaplara konarak “nemli örnek+kap” kütleleri (B) hassas terazide tartılarak belirlenir. Kaplarında fırına konan örnekler 105 °C’de 24 saat bekletilerek kurutulur. Kurutma işleminden sonra “kuru örnek+kap” kütleleri (C) belirlenir.v



Şekil 2. a) Bloktan karot alımı, b) Karotun uç kısmının düzeltilmesi

$$\omega = \frac{M_w}{M_k} \times 100 \quad (1)$$

$$M_w = B - C \quad (2)$$

$$M_s = C - A \quad (3)$$

Burada, ω su muhtevasını (%), M_w gözeneklerdeki suyun kütlesi (gr), M_k ise kuru örnek kütlesi (gr) ifade etmektedir.

2.2. Kütlece ve Hacimce Su Emme

Bu deney, düzenli bir geometriye sahip kaya örneklerinin kütlelerine ve hacimlerine oranla, boşluklarının alabileceği su miktarının tayini amacıyla yapılır. Yöntem, şişebilen ve ıslanma-kuruma süreci sonucunda kolaylıkla dağılabilen kayalar için uygun değildir. Yapılan bu deney için, TSE (1987) tarafından önerilen koşullar esas alınmıştır. Deneyde karot örneklerinin kullanılması durumunda boy ve çapın birbirine dik iki ayrı yönde, prizmatik örneklerde ise her üç kenar kompas ile ölçülür ve örneklerin hacimleri hesaplanır. Hacimleri hesaplanan örnekler, saf su doldurulmuş beherde en az 12 saat bekletilir. 12 saat sonunda örnekler saf sudan çıkarılarak, suya doymuş yüzeyleri kağıt havlu ile kurulandıktan sonra, ıslak kütleleri hassas terazide tartılarak doymuş kütleleri tayin edilir. Doymuş kütlesi bulunmuş örnekler, 105 °C'ye ayarlanmış fırına yerleştirilerek en az 12, tercihen 24 saat boyunca kurumaya bırakılır. Fırından çıkan örneklerin kuru kütleleri hassas terazide tartılarak belirlenir. Kütlece ve hacimce su emme değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır:

$$M_a = \frac{M_d - M_k}{M_k} \times 100 \quad (4)$$

$$M_h = \frac{M_d - M_k}{V} \times 100 \quad (5)$$

Burada, M_d örneklerin suya doymuş kütlesi (gr), M_k fırında kurutulan örneklerin kütlesi (gr), V hacim (cm³), M_a kütlece su emme (%), M_h hacimce su emmedir (%).

2.3 Porozite

Porozite, bir kayacın içerisinde bulunan boşluk hacminin, kayacın tüm hacmine olan oranı olarak ifade edilir. Porozite değerinin artmasıyla kayacın basınç dayanımı ve su emme yeteneği olumsuz yönde etkilenmekle beraber, kayacın atmosferik şartlara olan dayanımını da azaltmaktadır. Bu durum kayacın ekonomikliğinin düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğu kadar ince kristalli mineraller tercih edilmektedir.

Deney düzenli bir geometriye sahip kaya örneklerinin gözenekliliğinin tayini amacıyla yapılır. Deney TSE (1987)'nin önerdiği hususlar dikkate alınarak yapılmıştır. İncelenen kaya türünü temsil edebilecek en az üç adet silindirik örneğin çapı ve boyu kompasla birbirine dik iki ayrı yönde ölçülür ve bu değerlerin ortalaması alınır. Her birinin kütlesi en az 50 gr olan veya çapları içerdikleri en büyük tane boyunun en az 10 katı büyüklüğündeki örnekler seçilmelidir. Örnek, 105 °C fırında en az 12 saat kurutulur ve havadan nem almadan soğuması için 30 dakika

süreyle desikatörde tutulduktan sonra tartılarak kuru kütlesi belirlenir (M_k). Örnek, su dolu bir beherin içinde 48 saat bekletilerek suya doygun hale getirilir, kurulanıp hassas terazide tartılır ve doygun kütlesi (M_d) belirlenir. Bu aşama, gözeneklere giren suyun buharlaşmasına engel olmak için mümkün olduğunca hızlı tamamlanmalı ve bu işlem sırasında örneklerden parçacıkların kırılıp kaybolmamasına özen gösterilmelidir.

$$V_b = \frac{M_d - M_k}{d_w} \quad (6)$$

$$n = \frac{V_b}{V_T} \times 100 \quad (7)$$

Burada, d_w suyun yoğunluğu (gr/cm^3), n porozite (%), V_b boşluk hacmi ve V_T toplam hacimdir (cm^3).

2.4. Schmidt Çekici Sertliği

Sertlik, kayaçların aşınmaya karşı gösterdiği dirençtir. Doğal taşların sertliğinin, kesilme, işlenme ve cilalanma konuları ile yakın ilgisi vardır. Sert doğal taşların kesilmesi, işlenmesi ve üretilmesi, yumuşak cinslere nazaran zor olmasına rağmen çok iyi cila kabul ederler. Sert mermerler kolay yıpranmadığı için en çok tercih edilen cinstir. Binalarda daha çok dış cephe kaplamada, kapı eşiklerinde ve taban döşemelerinde kullanılırlar. Schmidt çekici deneyi, kayaçların geri sıçrama sertlik değerinin tayini ve dolaylı olarak tek eksenli sıkışma dayanımlarının saptanması amacıyla yapılır. Deney yöntemi olarak, TSE (1987) tarafından izlenmesi önerilen yöntem esas alınmıştır.

Betonlarda N tipi, kayaçalarda ise 0,74 Nm çarpma enerjisine sahip L tipi Schmidt çekici kullanılması tercih edilir (ISRM, 2007). Çekiç, en az NX çapındaki karot örnekleri veya bir kenarı en az 6 cm olan blok örnekler üzerinde kullanılmalıdır. Karot veya bloğun yüzeyleri düzgün olmalı ve çatlak içermemelidir. Bu çalışmada, L tipi Schmidt sertlik çekici kullanılmıştır. Numunelerin sertliği ölçülmeden önce yüzeyleri temizlenip, zımpara taşı ile düzeltilmeli ve numunenin test sırasında titreme ve kaymasını önlemek için taban ünitesine sağlam olarak oturtulmalıdır. Schmidt çekici aşağıya doğru dik tutulur ve her numune yüzeyinde yirmi geri tepme sayısı okunur. Daha sonra değerler büyükten küçüğe doğru sıralanarak bu değerlerin küçük olan %50'si iptal edilir ve geri kalan sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak sertlik derecesi bulunur.

2.5. Ultrasonik Ses Dalgasının Boyuna Yayılma Hızı

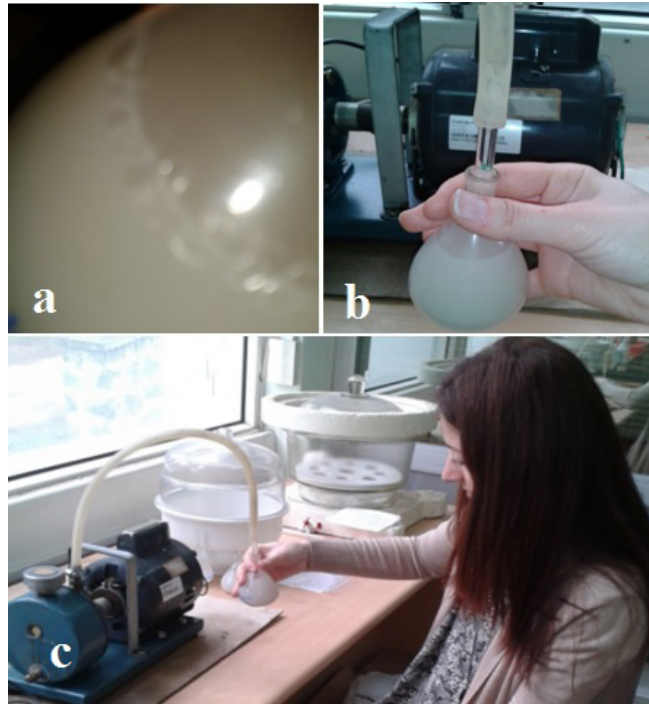
Ultrasonik teknikler uzun yıllardır madencilik biliminde ve jeoteknik uygulamalar da kullanılmaktadır. Bu yöntem, kayaçların dinamik özelliklerinin laboratuarda saptanmasında da tercih edilmektedir. Yöntemin, uygulanmasındaki kolaylığı ve malzemenin örselenmemesinden dolayı, jeoteknik mühendisliğinde gittikçe artarak kullanılmaya başlanmıştır. Ultrasonik ses dalgasının kayaçalardaki yayılma hızı, silindirik veya kübik olarak hazırlanan deney örnekleri üzerinde belirlenmektedir. Alt ve üst yüzeyleri hassas şekilde düzeltilmiş örnekler, alıcı ve verici uçlar arasına yerleştirilerek, P dalga hızının örneğin bir ucundan diğer ucuna geçmesi için gerekli net süreler belirlenir. Bulunan bu değerler kullanılarak ultrasonik ses dalgasının boyuna yayılma hızı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$V_p = L/t_p \quad (8)$$

Burada, V_p P dalgası hızı (m/sn), L örneğin boyu (m), t_p ise sırasıyla dalganın örneği geçme süresidir (sn).

2.6. Özgül Ağırlık

Numuneyi temsil edecek şekilde, değişik parçalardan kırılarak alınan numune, tamamı göz açıklığı 0,2 mm olan kare gözlü elekten geçirilecek şekilde öğütülür ve değişmez kütleyle kadar kurutulur (ISRM, 2007). Ardından örneklerden yarılanma metodu ile 8-10 gr alınır ve piknometreye konularak tartılır. İçinde deney numunesi bulunan piknometre hacminin ¼'üne kadar su ile doldurulur. Vakum pompası kullanıldığı takdirde vakum pompası ile hava alma işlemi piknometre sık sık çalkalanarak kolaylaştırılır ve işleme hava kabarcıkları çıkmayınca kadar devam edilir (Şekil 3). Kapağı kapatılarak üzeri kurulanır ve 0,01 gr hassasiyetle tartılır.



Şekil 3. a) Piknometre içinde oluşan hava kabarcıkları, b) Piknometre vakumlanırken çalkalama işlemi c) Piknometre ile özgül ağırlık deneyi

$$\rho = \frac{G_{pn} - G_p}{(G_{pn} - G_p) - (G_{pns} - G_{ps})} \quad (9)$$

Burada, ρ özgül ağırlık, G_{pn} piknometre + deney numunesi kütlesi (gr), G_p piknometre kütlesi (gr), G_{pns} piknometre + deney numunesi + su kütlesi (gr), G_{ps} su ile dolu piknometre kütlesidir (gr).

2.7. Yoğunluk ve Birim Hacim Ağırlık

Bu deney, düzenli bir geometriye sahip karot veya prizmatik kaya örneklerinin birim hacim ağırlığının tayini amacıyla yapılır. Bu deney için TSE (1987) tarafından önerilen yöntem esas alınmıştır. Düzgün bir geometrik şekle sahip biçimde hazırlanmış (silindirik) en az üç deney örneğinin çapı (D) ve boyu (L), kompasla birbirine dik iki ayrı yönde 0,1 mm duyarlılıkla ölçülür ve her bir örnek için bu değerlerin ortalaması alınır. Benzer şekilde prizmatik örneklerin

kullanılması halinde, bunların kısa ve uzun kenarları ile kalınlıkları birbirine dik yönde ikişer kez ölçülerek ortalamaları alınmalıdır. Silindirik karot örnekleri için boy ve çap değerleri, prizmatik örnekler için de üç ayrı yönde ölçülmüş değerler kullanılarak örneklerin hacimleri (V) hesaplanır. Örneklerin ağırlıkları hassas terazide tartılarak belirlenir. Kuru birim hacim ağırlık tayin edilecek ise, örnekler 105 °C'ye ayarlanmış fırında ve en az 12 saat kurutulduktan sonra soğumaları için 30 dakika süre ile desikatörde bekletilir. Daha sonra hassas terazi kullanılarak örneklerin kuru kütleleri (M_k) belirlenir. Doygun birim hacim ağırlıkları belirlenecek ise, örnekler saf su dolu bir kap içerisine yüzeyleri tamamen su ile kaplanacak şekilde konulur. 12 saat sonunda sudan çıkarılan örnekler hassas terazide tartılarak doygun kütleleri (M_d) bulunur. Aşağıda verilen formüller yardımıyla gerekli hesaplamalar yapılır:

$$\gamma_k = \frac{M_k \times g}{V_T} \quad (10)$$

$$\gamma_d = \frac{M_d \times g}{V_T} \quad (11)$$

Burada, γ_k kayanın kuru birim hacim ağırlığı (kN/m³), γ_d kayanın doygun birim hacim ağırlığı (kN/cm³), V_T toplam hacim (cm³) ve g yer çekimi ivmesidir (m/sn²).

2.8. Islanma-Kuruma Deneyi

Bu deney, ıslanma-kuruma çevrimi koşullarında aşınmaya karşı kayaların duraylılığının belirlenmesi amacı ile yapılan bir deneydir. Deneyin yapılmasıyla ilgili olarak, ASTM (1992a) standartlarında verilen yöntem esas alınmıştır. Bu prosedüre göre, hazırlanan silindirik örnekler 110 ± 5 °C'deki fırına yerleştirilir ve en az 12 saat süreyle kurutulduktan sonra, fırından çıkarılarak soğuma için desikatörde 30 dakika bekletilir. Desikatörden alınan örnekler hassas terazide tartılarak kütleleri belirlenir. Ağırlıkları belirlenen örnekler saf su ile dolu behere konularak, saf su içerisinde en az 12 saat bekletilir. Beher içindeki su seviyesi örneklerin üst seviyesini geçecek şekildedir. Beherden çıkarılan örnekler 110 ± 5 °C'de en az 12 saat kurumaya bırakılır. 12 saat sonra örnekler tekrar saf su ile dolu beherin içine konur. Her ıslanma-kuruma bir çevrime eşittir. Örnekler 80 defa ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulduktan sonra, 110 ± 5 °C'deki fırına yerleştirilir ve en az 12 saat kurutulduktan sonra fırından çıkarılarak, soğuma için desikatörde 30 dakika bekletilir. Desikatörden alınan örneklerin kütleleri hassas terazide belirlenir. Belirlenen sonuçlar kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla ıslanma-kuruma hesaplamaları yapılır:

$$A_k = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (12)$$

Burada, A_k kütle kaybı (%), A örneğin deney öncesi kuru kütlesi (gr) ve B örneğin deney sonrası kuru kütleleridir (gr).

2.9. Donma-Çözülme Deneyi

Bu deney, donma-çözülme çevrimi koşullarında, kayaçların aşınmaya karşı duraylılığının belirlenmesi amacıyla yapılan bir deneydir. Deneyin yapılmasıyla ilgili olarak ASTM (1992b) standartlarında verilen yöntem esas alınmıştır. Örnekler, 105 ± 5 °C'deki fırına yerleştirilir ve en az 4 saat kurutulduktan sonra fırından çıkarılarak desikatörde 30 dakika soğuma için bekletilir. Desikatörden alınan örnekler hassas terazide tartılarak kütleleri belirlenir. Kütleleri belirlenen örnekler saf su içerisinde en az 12 saat süresince örnek en az %50 doygunluğa sahip olana kadar bekletilir. Su ile doyurulmuş örnekler, sudan çıkarılıp soğutma hızı 4 saatte -18

°C'ye düşecek şekilde ayarlanan derin dondurucuya konulur. Ardından, -18 °C'de 12 saat süre ile bekletilen örnekler bu süre sonunda derin dondurucudan çıkarılarak, oda sıcaklığında içinde damıtık su bulunan kaba konulur ve tekrar en az 8 saat en fazla 12 saat süre ile suda çözülmeye bırakılır. Bu döngü bir donma-çözülme çevrimine eşittir. Bu çalışmada donma-çözülme işlemi Gümüşhane ilinin güney kısmı için önerilen çevrim sayısı dikkate alınarak 30 defa tekrarlanmıştır (Binal, 2009). 30. çevrim sonucunda örnekler 105 ± 5 °C'deki fırında 24 saat kurutularak deney sonu kuru kütlesi belirlenir. Belirlenen sonuçlar kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla donma-çözülme sonucu oluşan kütle kaybı hesaplamaları yapılmaktadır:

$$A_k = \frac{A - B}{A} * 100 \quad (13)$$

Burada; A_k kütle kaybı (%), A örneğin deney öncesi kuru kütlesi (gr), B örneğin deney sonrası kuru kütlesidir (gr).

2.10. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Bu deney, kaya malzemesi örneklerinin dayanımını belirlemek amacı ile uygulanır. Kaya kütlesi sınıflamalarında, ayrıca tasarımda yaygın biçimde kullanılan tek eksenli basınç dayanımının tayini için bu çalışmada TSE (1987) tarafından önerilen standartlar kullanılmıştır. Deneyde kullanılacak örnek sayısı, pratik gereksinimlere bağlı olmakla birlikte, ISRM (2007) tarafından her kayaç türünden en az beş örneğin deneye tabi tutulması önerilmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı, doğrudan yöntem ile silindirik şekilde hazırlanmış deney numunelerinin tek eksenli preste yüklenmesi ile belirlenmektedir. Deneyde boyu çapının 2-2,5 katı olan silindirik örnekler kullanılmıştır. Yük, basınç gerilmesi saniyede 0,17 kN/s olacak şekilde ve çarpmasız olarak deney numunesi kırılıncaya kadar uygulanır. Pres göstergesinden okunan en büyük yük tespit edilir. Örneklerin tek eksenli basınç dayanımları (σ_{ci}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$\sigma_{ci} = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Burada, σ_{ci} tek eksenli basınç dayanımı (MPa), F yenilme anında kaydedilen yük (N), A silindirik örneğin kesit alanıdır (cm²).

2.11. Dolaylı Çekme Dayanımı

Bu deney, disk şeklinde hazırlanmış kaya örneklerinin çapsal yükleme altında çekme dayanımlarının dolaylı yoldan tayini amacıyla yapılır. Bu yöntemle, silindirik kayaç örneklerinin uçlarından sabitlenerek çekilmesi şeklinde uygulanan doğrudan çekme deneyine göre, genellikle biraz daha yüksek çekme dayanımları elde edilmektedir. Deneyler TSE (1987) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır. Çekme dayanımı için yaygın olarak iki farklı deney yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler, doğrudan ve dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyleridir. Dolaylı çekme dayanımı testleri, doğrudan çekme testlerine nazaran daha pratik olması sebebi ile daha yaygındır (Kömürlü vd., 2017). Ünlüpınar yöresindeki kireçtaşlarının dolaylı çekme dayanımını bulmak için Brazilian deneyi yapılmıştır. Bu deney için silindir şeklinde dış yüzeyleri düzgün boy/çap oranı 0,5-1 arasında çapı 50 mm'den az olmayan disk numuneleri kullanılmıştır (Şekil 4). Bu çalışma kapsamında, toplam 8 adet numuneden elde edilen ortalama değer dolaylı çekme dayanımı olarak esas alınmıştır.



Şekil 4. a) Dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyinde kullanılan numuneler ve standart çene, b) Deney sonrasında numunenin görünümü

Dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) numunesi için önerilen yükleme hızı 200 N/s'dir. Örneğin yenildiği andaki maksimum yük yükleme ünitesinin göstergesinden okunur. Dolaylı çekme dayanımı aşağıdaki Eşitlik 15 yardımıyla hesaplanır.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DL} \quad (15)$$

Burada, σ_t örneğin çekme dayanımı (MPa), F örneğin yenilme anındaki yük değeri (kN), D mermer numunesinin çapı (cm) ve L numune boyudur (cm).

2.12. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı; standart boyutlardaki kayaçların belirli doğrultuda kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir. Doğal taşların kullanımı genellikle belirli boyut ve kalınlıklarda plakalar şeklinde olduğundan eğilme direnci son derece önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Çünkü plaka kalınlığı, plaka boyut ve destek noktaları arasındaki mesafe mermerin eğilme dayanımına göre tespit edilebilmektedir. Deney, TSE (1987) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır. Silindirik veya prizmatik numuneye üç noktada yük uygulayan düzenek kullanılarak, kırılma yükleri belirlenir. Yükleme düzeneğindeki alt iki mesnet arası açıklık (l) silindirik numuneler için 3L/5 olmalıdır. Numune çapı 2,22 cm ile 5,40 cm arasında ve en az 15 cm uzunluğunda olmalıdır. Deney yapılacak numune deney düzeneğine yerleştirilir ve numune üzerine düşey yük sabit bir yükleme hızı ile uygulanır. Kırılma yükü kaydedilir ve Eşitlik 18'e göre silindirik numunelerin eğilme dayanımı değerleri hesaplanır. Uygulanan çalışmayı gösteren fotoğraflar Şekil 5'te verilmiştir. Eşitlik 18 üç noktadan yükleme koşulları için geçerlidir.

$$\sigma_f = \frac{8F_c l}{\pi D^3} \quad (16)$$

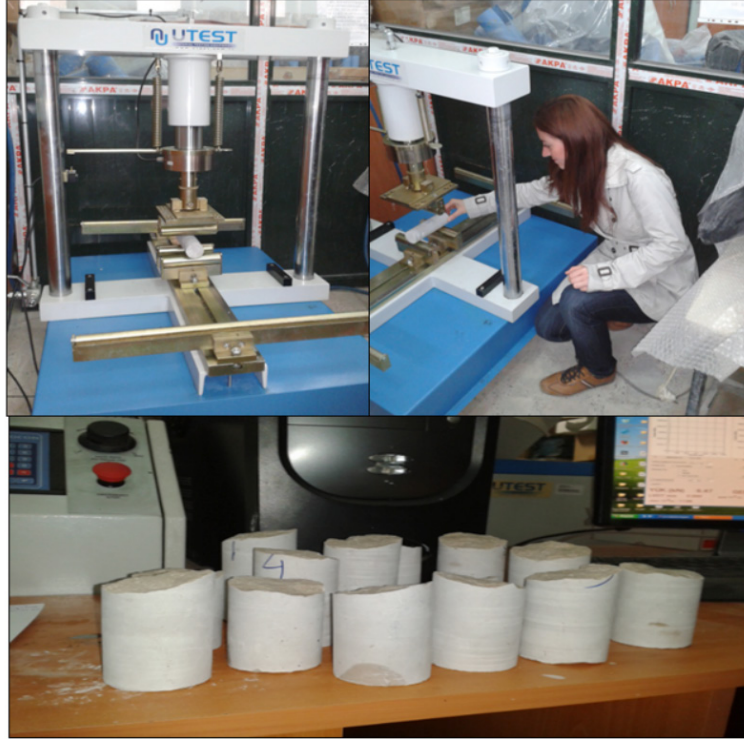
Burada, σ_f eğilme dayanımı (kg/cm^2), F_c kırılma anındaki düşey yük (kg), l alt iki mesnet arası mesafe (cm), D silindirik numune çapıdır (cm).

2.13. Yüzeysel Aşınma (Böhme) Dayanımı

Yüzeysel aşınma dayanımı, kayaçların yüzeyinde aşındırıcı maddeler ve sürtünmeler nedeni ile oluşan malzeme kaybına karşı gösterilen dirençtir. Kayaçların aşınma dayanımlarının belirlenmesi için TSE (1987)'ye uygun olarak kenar uzunluğu 71 mm ebadında küp numuneler

hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan Böhme yüzey aşındırma cihazı devir hızı ayarlanabilen, 750 mm çapında bir aşındırma diskinde, devir sayısını gösteren bir numarator ve her 22 devir tamamlandığında cihazı otomatik olarak durduracak tertibata sahip olmalıdır. Uygulanan testlerde devir hızı olarak 30 devir/dakika ve 294 N aşındırma kuvveti uygulanmıştır.

Numunenin disk yüzeyinde döndüğü şerit boyunca, aşındırmayı sağlamak için $20 \pm 0,5$ gr zımpara tozu serpilir. Deney numunesi sürtünme şeridine 294 N'luk bir kuvvet ile bastırılması sağlandıktan sonra cihaz çalıştırılıp disk harekete geçirilir. Diskin dönme hareketi sırasında sürtünme şeridi dışına çıkan zımpara tozları kıl fırça ile tekrar sürtünme şeridi üzerinde toplanır. Böhme yüzey aşındırma cihazı her yirmi iki devir sonunda disk otomatik olarak durur ve disk üzerindeki zımpara tozları ve aşınmadan dolayı deney numunesinden ayrılan kısımlar, uygun bir fırça ile temizlenir ve tekrar $20 \pm 0,5$ gr zımpara tozu sürtünme şeridi üzerine serpilmektedir. Her periyotta yeniden zımpara tozu konulur ve küp numune düşey eksen etrafında 90° çevrilir. Her örnek için 22 devirlik 20 aşınma periyodu yani 440 devir uygulanır. İşlem sonunda sert bir kıl fırça ile iyice temizlenen örnek kalınlık ölçümlerine hazır hale getirilir.



Şekil 5. Eğilme dayanımı deney düzeneği ve örneklerin deney sonucundaki görünümü

Deneyde aşınma kaybı aşınan numune kalınlığındaki azalmanın ölçülmesi yolu ile tayin edilir. Bunun için deney uygulanmış numunelerin her birinin 9 farklı yerdeki kalınlıkları 0,01 mm hassasiyetle ölçülür ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak deney sonrası kalınlık bulunur. Aşınma kaybı, kalınlık azalması cinsinden aşağıdaki eşitlikler yardımı ile belirlenebilir:

$$d = d_0 - d_1 \quad (17)$$

veya

$$\Delta_d = \frac{V_0 - V_1}{a} \quad (18)$$

Aşınma kaybı hacim azalması cinsinden belirtilecek ise:

$$d_v = (d_0 - d_1) \times 50 \quad (19)$$

Veya

$$\Delta_v = \left(\frac{V_0 - V_1}{a} \right) \times 50 \quad (20)$$

Elde edilen sonuçlar $0.01 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ hassasiyeti ile belirtilir. Burada, Δ_d numunenin Böhme yüzey aşınma kaybı değeri (cm), d_0 numunenin deneyden önceki ortalama kalınlığı (cm), d_1 numunenin deneyden sonraki ortalama kalınlığı (cm), Δ_v numunenin Böhme hacimsel aşınma kaybı değeri ($\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$), V_0 numunenin deneyden önceki hacmi (cm^3), V_1 numunenin deneyden sonraki hacmi (cm^3), a ise numunenin aşınan yüzey alanıdır (cm^2). Böhme aşınma deneyinin yapılışı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. a) Döner yüzey üzerine aşındırıcı toz dökülmesi, b) Dönmekte olan diske temas halindeki numunenin aşındırılması

2.2.14. Suda Dağılmaya Karşı Duraylılık (Slake Durability) İndeksi

Bu deneyde amaç, kaya örneğinin standart iki çevrim süresince kurumaya ve ıslanmaya bırakılması durumunda parçalanma, kütle kaybı ve zayıflamaya karşı gösterdiği direncin belirlenmesidir. Deney sırasında ISRM (2007)'nin önerdiği yöntemler kullanılmıştır. Her biri 40-60 gr olan, toplam 450-550 gr kütleyle sahip 10 adet parçaya test uygulanır. Seçilen bu örneklerin köşelerinin birbirine çarparak mekanik parçalanmaya neden olmaması için mümkün olduğunca küresele yakın şekle sahip olması istenir. Hazırlanan örnekler öncelikle $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik sabit sıcaklıkta 6 saat, tercihen 12 saat kurumaya bırakılır. Kuruma sonunda kuru kütleleri bulunan örnekler soğutulduktan sonra tambura konularak deneye başlanır (Şekil 7).



Şekil 7. Suda dağılmaya karşı duraylılık deney düzeneği

Tambur şeffaf hazne içine yerleştirilir ve tamburun dönme ekseninin 2 cm altında bulunan kırmızı seviyeye kadar saf su doldurulur. Deneye hazır hale gelen tambur dakikada 20 devir yapacak şekilde 10 dakika süre ile döndürülür. 10 dakika sonunda tambur hazneden alınarak örnekler tekrar 105 °C sıcaklıktaki fırına yerleştirilir ve 12 saat süreyle yeniden kurumaya bırakılır. Ardından, örneklerin tekrar kuru kütleleri tartılarak kütle kaybı hesaplanır. Yapılan işlemler dört çevrim olacak şekilde yinelenerek tamburda en son kalan malzemenin kütlelerinin deneyin başlangıcındaki malzeme kütlelerine oranı hesaplanır. Elde edilen birinci ve ikinci çevrim sonrası suda dağılma indekslerine bağlı olarak kayaçların suda dağılmaya karşı duraylılık sınıflaması Tablo 4'te verildiği gibi yapılır. Birinci ve ikinci suda dağılma indeksleri aşağıdaki eşitliklerde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$I_{d1} = 100 \times (B / A) \quad (21)$$

$$I_{d2} = 100 \times (C / A) \quad (22)$$

Burada, A deney öncesi kuru kütle (gr), B birinci çevrim sonrası kuru kütle (gr), C ikinci çevrim sonrası kuru kütle (gr), I_{d1} birinci çevrim suda dağılma indeksi (%), I_{d2} ikinci çevrim sonrası suda dağılma indeksidir (%).

3. Bulgular

Su muhtevası, kütlece ve hacimce su emme ve porozite tayini için TSE (1987)'de belirtilen hususlar dikkate alınmıştır. Bu başlık altındaki deney sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kireçtaşlarının ortalama su muhtevası değeri %0,051, kütlece su emme oranı %0,158, hacimce su emme oranı %0,424 ve porozite değeri %0,42 olarak belirlenmiştir. ASTM C97'ye göre kütlece su emme oranı (%0,2) sınır değerini yapılan deneysel çalışmalarda bir örneğin sağlamadığı görülmüştür. Araziden alınan ve standartlara uygun bir şekilde hazırlanan örnekler hacim ağırlık deneyine tabii tutulmuştur. Bu deney için TSE (1987) tarafından önerilen yöntem esas alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ortalama doğal birim hacim ağırlık değerinin 26,389 kN/m³, kuru birim hacim ağırlık değerinin 26,369 kN/m³ ve doymuş birim hacim ağırlık değerinin 26,409 kN/m³ olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Su içeriği, kütlece ve hacimce su emme ve porozite deneylerinin sonuçları

Örnek No	Boy L (mm)	Çap D (mm)	Hacim V (cm ³)	Örnek Kütle M (gr)	Suya Doygun Kütle M _d (gr)	Kuru Kütle M _k (gr)	Su İçeriği ω w (%)	Kütlece Su Emme Oranı M _a (%)	Hacimce Su Emme Oranı M _h (%)	Porozite n (%)
1	106,19	50	208,50	557,88	558,52	557,53	0,063	0,178	0,475	0,47
2	104,9	50	205,97	552,74	553,38	552,44	0,054	0,170	0,456	0,46
3	107,12	50	210,33	565,74	566,33	565,45	0,051	0,156	0,418	0,42
4	105,37	50	206,89	557,38	558,05	557,14	0,043	0,163	0,440	0,44
5	105,53	50	207,21	558,47	559,08	558,24	0,041	0,150	0,405	0,41
6	104,25	50	204,69	549,75	550,32	549,38	0,067	0,171	0,459	0,46
7	104,29	50	204,77	548,17	548,75	547,95	0,040	0,146	0,391	0,39
8	103,87	50	203,95	548,94	549,52	548,69	0,046	0,151	0,407	0,41
9	104,76	50	205,70	553,54	554,16	553,23	0,056	0,168	0,452	0,45
10	104,53	50	205,24	551,69	552,33	551,52	0,031	0,147	0,395	0,39
11	104,56	50	205,30	551,89	552,47	551,55	0,062	0,167	0,448	0,45
12	104,78	50	205,74	554,06	554,49	553,86	0,036	0,114	0,306	0,31
13	107,14	50	210,37	565,91	566,51	565,56	0,062	0,168	0,452	0,45
14	104,74	50	205,66	553,55	554,13	553,29	0,047	0,152	0,408	0,41
15	105,86	50	207,86	558,86	559,49	558,54	0,057	0,170	0,457	0,46
16	105,67	50	207,48	559,51	560,04	559,25	0,046	0,141	0,381	0,38
17	104,12	50	204,44	551,02	551,55	550,83	0,034	0,131	0,352	0,35
18	105,69	50	207,52	559,05	559,49	558,84	0,038	0,116	0,313	0,31
19	108,69	50	213,41	572,69	573,27	572,36	0,058	0,159	0,426	0,43
20	109,82	50	215,63	579,08	579,7	578,71	0,064	0,171	0,459	0,46
21	104,57	50	205,32	552,9	553,54	552,58	0,058	0,174	0,468	0,47
22	105,04	50	206,25	554,84	555,62	554,43	0,074	0,215	0,577	0,58
23	106,9	50	209,9	563,55	563,97	563,34	0,037	0,112	0,3	0,3
24	102,47	50	201,2	543,07	543,7	542,86	0,039	0,155	0,417	0,42
25	102,49	50	201,24	542,85	543,5	542,57	0,052	0,171	0,462	0,46
26	102,58	50	201,42	541,72	542,25	541,52	0,037	0,135	0,362	0,36
27	102,54	50	201,34	540,34	540,85	540,1	0,044	0,139	0,373	0,37
28	101,69	50	199,67	537,57	538,26	537,23	0,063	0,192	0,516	0,52
29	101,52	50	199,33	537,81	538,38	537,59	0,041	0,147	0,396	0,4
30	102,1	50	200,47	539,78	540,41	539,36	0,078	0,195	0,524	0,52
31	100	50	196,35	529,27	529,76	529	0,051	0,144	0,387	0,39
32	99,4	50	195,17	525,96	526,49	525,67	0,055	0,156	0,42	0,42
33	99,5	50	195,37	521,22	521,91	520,98	0,046	0,179	0,476	0,48
Ortalama Değer							0,051	0,158	0,424	0,42
En Küçük Değer							0,031	0,112	0,3	0,3
En Büyük Değer							0,078	0,215	0,577	0,58
Standart Sapma							0,012	0,023	0,061	0,061

Tablo 2. Yoğunluk ve birim hacim ağırlık testi sonuçları (Ort.: Ortalama, E.D.D.: En düşük değer, E.B.D.: En büyük değer, S.S.: Standart sapma)

Örnek No	Doğal Yoğunluk ρ_n (gr/cm ³)	Doygun Yoğunluk ρ_d (gr/cm ³)	Kuru Yoğunluk ρ_k (gr/cm ³)	Doğal Birim Hacim Ağırlık γ_n (kN/m ³)	Doygun Birim Hacim Ağırlık γ_d (kN/cm ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlık γ_k (kN/cm ³)
1	2,676	2,679	2,674	26,248	26,278	26,232
2	2,684	2,687	2,682	26,326	26,356	26,312
3	2,690	2,693	2,688	26,387	26,414	26,373
4	2,694	2,697	2,693	26,429	26,460	26,417
5	2,695	2,698	2,694	26,440	26,469	26,429
6	2,686	2,688	2,684	26,347	26,374	26,329
7	2,677	2,680	2,676	26,261	26,289	26,250
8	2,692	2,694	2,690	26,404	26,432	26,392
9	2,691	2,694	2,690	26,399	26,429	26,385
10	2,688	2,691	2,687	26,369	26,400	26,361
11	2,688	2,691	2,687	26,371	26,399	26,355
12	2,693	2,695	2,692	26,419	26,440	26,410
13	2,690	2,693	2,688	26,390	26,418	26,373
14	2,692	2,694	2,690	26,405	26,432	26,392
15	2,689	2,692	2,687	26,376	26,406	26,361
16	2,697	2,699	2,695	26,454	26,479	26,442
17	2,695	2,698	2,694	26,441	26,466	26,432
18	2,694	2,696	2,693	26,427	26,448	26,418
19	2,683	2,686	2,682	26,325	26,352	26,310
20	2,686	2,688	2,684	26,345	26,373	26,328
21	2,693	2,696	2,691	26,417	26,447	26,401
22	2,690	2,694	2,688	26,391	26,428	26,371
23	2,685	2,687	2,684	26,339	26,358	26,329
24	2,699	2,702	2,698	26,479	26,510	26,469
25	2,698	2,701	2,696	26,463	26,495	26,449
26	2,690	2,692	2,689	26,385	26,410	26,375
27	2,684	2,686	2,683	26,328	26,353	26,316
28	2,692	2,696	2,691	26,412	26,446	26,395
29	2,698	2,701	2,697	26,468	26,496	26,395
30	2,693	2,696	2,690	26,414	26,445	26,393
31	2,696	2,698	2,694	26,443	26,468	26,430
32	2,695	2,698	2,693	26,437	26,463	26,422
33	2,668	2,671	2,667	26,172	26,207	26,160
Ort.	2,690	2,692	2,688	26,385	26,413	26,372
E.D.D	2,668	2,671	2,667	26,172	26,207	26,160
E.B.D.	2,699	2,702	2,698	26,479	26,510	26,469
S.S.	0,0068	0,0068	0,0067	0,0668	0,0663	0,0672

Özgül ağırlık deneylerinde ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemler esas alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ortalama özgül ağırlık değerinin 2,64 olduğu belirlenmiştir. Özgül ağırlık deneyinin yapılması sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Özgül ağırlık deneyinin yapılması sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları

Piknometre Kütlesi G_p (gr)	Piknometre ve Örnek Kütlesi G_{pn} (gr)	Piknometre, Su ve Örnek Kütlesi G_{pns} (gr)	Piknometre ve Su Kütlesi G_{ps} (gr)	Özgül Ağırlık ρ
48,64	56,89	154,45	149,34	2,63
48,65	56,9	154,18	149,05	2,64
48,53	56,83	153,31	148,13	2,66
Ortalama Değer				2,64
En Küçük Değer				2,63
En Büyük Değer				2,66
Standart Sapma				0,0152

Suda dağılma deneyinde amaç, kayaç örneğinin standart iki çevrim süresince kurumaya ve ıslanmaya bırakılması durumunda, parçalanmaya ve zayıflamaya karşı gösterdiği direncin belirlenmesidir. Deney sırasında ISRM (2007)'nin önerdiği yöntem esas alınmıştır. Suda dağılmaya karşı duraylılık sınıflaması ve deneylerden elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. Suda dağılmaya karşı duraylılığı yüksek olan kayalar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, bu tür kayaçların değerlendirilmesi için ikiden daha fazla, tercihen 4 çevrim yapılarak, bu çevrimlerden elde edilen I_d değerlerinin esas alınması önerilmiştir (Gamble, 1971; Ulusay vd., 1995; Gökçeoğlu vd., 2000). Bu öneri henüz standartlarda yer almamış olsa da, deneysel çalışmalarda dikkate alınmıştır.

Tablo 4. Suda dağılmaya karşı duraylılık sınıflaması (ISRM, 2007).

I_{d1} (%)	I_{d2} (%)	Sınıfı
<60	0-30	Çok Düşük
60-85	30-60	Düşük
85-95	60-85	Orta
95-98	85-95	Orta-Yüksek
98-99	95-98	Yüksek
>99	>98	Çok Yüksek

Tablo 5. Mermerlerin suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi değerleri ve dağılma dayanımı sınıflaması

Örnek No	Örnek Kütlesi A (gr)	Kalan Örnek Kütlesi (gr)				I_{d1} E/A %	I_{d2} E/A %	Suda Dağılmaya Karşı Duraylılık Sınıflaması
		1.Çevrim B (gr)	2.Çevrim C (gr)	3.Çevrim D (gr)	4.Çevrim E (gr)			
1	489,06	487,6	487	486,47	485,92	99,70	99,36	Çok Yüksek
I_{d1} : Birinci çevrim suda dağılmaya karşı dayanım indeksi								
I_{d2} : Dördüncü çevrim suda dağılmaya karşı dayanım indeksi								

Aşınmaya karşı kayaçların duraylılığının belirlenmesi amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneylerin her biri için en az 5 tane silindirik örnek gereklidir. Islanma-kuruma koşullarında deneyin yapılmasıyla ilgili olarak, ASTM (1992a) standardında önerilen yöntem esas alınmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler ve deney sonuçları Tablo 6’da verilmiştir. Donma-çözülme çevrimi koşullarında, aşınmaya karşı kayaçların duraylılığının belirlenmesi amacıyla yapılan deneyde ise ASTM (1992b) standartları kullanılmıştır. Donma çözülme deneyinin yapılması sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

İnceleme alanından alınan doğal haldeki numunelerin, ultrasonik hız deneyi için yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ve deney sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ortalama Schmidt çekici geri tepme sayısının 43,12 Schmidt çekici sertliği olduğu belirlenmiştir (Tablo 9). Brown (1981) tarafından yapılan sınıflamaya göre kireçtaşlarının “sert kaya” sınıfında olduğu saptanmıştır (Tablo 10).

Tek eksenli basınç deneyi, kayaç malzemesi örneklerinin dayanım ve kaya kütlesi sınıflamalarında, ayrıca tasarımda kullanılmak amacıyla yapılır. Yapılan deneyler sonucunda kireçtaşlarına ait tek eksenli basınç dayanım değerinin ortalama 65,007 MPa olduğu belirlenmiştir (Tablo 11).

Tablo 6. Kireçtaşlarına ait ıslanma-kuruma deneyinden elde edilen veriler ve tek eksenli basınç dayanım değerleri

Örnek No	En D (cm)	Boy L (cm)	Deney Öncesi Kuru Kütle (gr)	Deney Sonrası Kuru Kütle (gr)	Islanma-Kuruma Sonrası Kütle Kaybı (gr)	Islanma-Kuruma Sonrası Kütle Kaybı (%)
1	5	10,49	552,44	551,79	0,65	0,12
2	5	10,54	557,14	556,27	0,87	0,16
3	5	10,46	551,55	550,55	1	0,18
4	5	10,46	552,58	551,84	0,74	0,13
5	5	10,15	537,59	536,43	1,16	0,22
6	5	9,94	525,67	525,11	0,56	0,11
Islanma-Kuruma Sonrası Ağırlık Kaybı (%)						0,15
Deney Öncesi Ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı : 65,007 MPa						
Deney Sonrası Ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı : 57,750 MPa						

Tablo 7. Kireçtaşlarına ait donma-çözülme deneyinin yapılması sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları ile tek eksenli basınç dayanım değerleri

Örnek No	En D (cm)	Boy L (cm)	Deney Öncesi Kuru Kütle (gr)	Deney Sonu Kuru Kütle (gr)	Donma-Çözülme Sonrası Kütle Kaybı (gr)	Donma-Çözülme Sonrası Kütle Kaybı (%)
1	5	10,71	565,45	564,85	0,60	0,11
2	5	10,55	558,24	557,66	0,58	0,10
3	5	10,43	547,95	547,35	0,60	0,11
4	5	10,71	565,56	564,97	0,59	0,10
5	5	10,87	572,36	571,8	0,56	0,10
6	5	10,5	554,43	553,77	0,66	0,12
Donma-Çözülme Deneyi Sonrası Ağırlık Kaybı (%)						0,11
Deney Öncesi Tek Eksenli Basınç Direnci : 65,007 MPa						
Deney Sonrası Tek Eksenli Basınç Direnci :-						

Tablo 8. Ultrasonik hız deney verileri

Örnek No	Boy L (mm)	Süre T (µsn)	Sonik Hız V_p (m/sn)
1	106,19	17,4	6102,9
2	104,9	16,9	6207,1
3	107,12	16,9	6338,5
4	105,37	16,9	6234,9
5	105,53	17,4	6064,9
6	104,25	16,9	6168,6
7	104,29	16,4	6359,1
8	103,87	16,9	6146,2
9	104,76	16,9	6198,8
10	104,53	16,4	6373,8
11	104,56	16,9	6187,0
12	104,78	16,4	6389,0
13	107,14	17,4	6157,5
14	104,74	16,9	6197,6
15	105,86	16,9	6263,9
16	105,67	16,9	6252,7
17	104,12	16,4	6348,8
18	105,69	16,9	6253,8
19	108,69	17,4	6246,6
20	109,82	17,9	6135,2
21	104,57	16,9	6187,6
22	105,04	16,9	6215,4
23	106,9	16,9	6325,4
24	102,47	16,4	6248,2
25	102,49	16,4	6249,4
26	102,58	16,4	6254,9
27	102,54	16,4	6252,4
28	101,69	16,4	6200,6
29	101,52	15,9	6384,9
30	102,1	16,4	6225,6
31	100	15,9	6289,3
32	99,4	15,9	6251,6
33	99,5	15,4	6461,0
Ortalama V_p (m/sn)			6248
En Küçük Değer			6064,9
En Büyük Değer			6461
Standart Sapma			88,166

Tablo 9. Kireçtaşlarına ait geri tepme sayısı

Örnek No	Geri Tepme Değerleri	Ortalama Schmidt Çekici Geri Tepme Sayısı (R)
1	43-42-43-46-45-44-44-44-43-46	44
2	42-40-40-43-40-42-41-41-40-40	41
3	44-40-41-43-42-40-40-43-41-44	42
4	41-42-40-40-40-40-41-43-42-42	41
5	40-41-38-38-40-38-38-40-36-40	39
6	40-43-41-40-42-42-47-45-44-42	43
7	42-43-43-44-46-44-45-44-44-45	44
8	44-44-46-44-44-44-44-43-44-44	44
9	46-44-44-45-44-45-44-44-45-44	45
10	43-43-43-45-43-44-43-44-43-44	44
11	42-45-42-42-41-46-43-42-40-43	43
12	48-48-46-47-46-46-47-45-47-47	47
13	41-41-40-41-40-40-42-43-42-43	41
14	45-43-47-44-44-45-44-44-44-43	44
15	46-45-45-45-47-47-46-46-45-45	46
16	44-45-45-45-44-44-44-46-44-43	44
17	47-45-46-45-45-44-42-45-43-42	44
18	40-41-40-46-42-40-44-42-44-40	42
19	46-43-40-41-43-40-40-41-40-40	41
20	46-41-43-42-43-43-42-42-43-44	43
21	42-46-43-45-44-44-46-44-40-48	44
22	40-45-40-42-42-44-42-44-42-44	43
23	45-45-46-44-44-45-43-43-44-44	44
24	45-43-44-45-44-43-41-43-43-43	43
25	42-43-44-42-44-43-41-44-46-42	43
26	41-43-41-45-42-45-43-43-42-43	43
27	45-44-45-44-44-45-43-43-43-45	44
28	43-44-44-43-44-43-43-43-43-43	43
29	42-40-41-43-44-41-43-41-46-43	42
30	42-41-41-40-41-41-41-41-44-44	42
31	42-43-42-42-42-43-43-44-43-42	43
32	43-44-43-42-44-42-44-46-46-44	44
33	43-44-42-44-43-43-42-42-44-41	43
Ortalama (R)		43,12
En Küçük Değer		39
En Büyük Değer		47
Standart Sapma		1,536

Tablo 10. Kireçtaşlarının Schmidt çekici geri tepme sayısına göre değerlendirilmesi, (Brown, 1981).

Kaya Sınıfı	Schmidt Çekici geri tepme sayısı	Ortalama Schmidt çekici geri tepme sayısı (R)
Yumuşak	0-10	43,12
Az yumuşak	10-20	
Az sert	20-40	
Sert	40-50	
Çok sert	50-60	

Tablo 11. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları

Örnek No	Boy L (mm)	Çap D (mm)	Kesit Alanı A (m ²)	Yenilme Yüğü F (KN)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı σ_{ci} (MPa)
1	104,25	50,0	0,0019635	88,2	44,920
2	100	50,0	0,0019635	125,1	63,713
3	103,87	50,0	0,0019635	161,6	82,302
4	104,74	50,0	0,0019635	143,2	72,931
5	109,82	50,0	0,0019635	120,1	61,166
Ortalama Değer					65,007
En Küçük Değer					44,920
En Büyük Değer					82,302
Standart Sapma					13,980

Tablo 11’de görüldüğü üzere, tek eksenli basınç dayanımı TS 1910 (≥ 50 MPa), TS 2513 (≥ 50 MPa), TS 10449 (döşeme için > 50 MPa) ve TS 11137 (taşımaya için ≥ 49 MPa) standartlarında belirtilen sınır değerlerini bir örneğin sağlamadığı görülmüştür. Dolaylı çekme (Brazilian) deneyi, disk şeklinde hazırlanmış kaya örneklerinin çapsal yükleme altında çekilme dayanımlarının dolaylı yoldan tayini amacıyla yapılır. Deneylerde TSE (1987) tarafından önerilen yöntemlerden yararlanılmıştır. Dolaylı çekme deneyinin yapılması sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları Tablo 12’de verilmiştir. Buna göre, kireçtaşlarına ait ortalama çekme dayanımı değerinin 8,61 MPa olduğu saptanmıştır.

Üç noktadan eğilme dayanımı deneyinin yapılması sırasında elde edilen kırılma yükleri, numune boyutları, mesnetler arası mesafe ve hesaplanan eğilme dayanımı değerleri Tablo 13’te verilmiştir. Buna göre, kireçtaşlarına ait ortalama eğilme dayanımı değerinin 15,494 MPa olduğu belirlenmiştir. Aşınma dayanımı, mermerlerin yüzeyinde aşındırıcı maddeler ile oluşturulan aşınmaya karşı gösterdiği dirençtir. TSE (1987)’ye göre yapılan yüzeysel aşınma deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 14’te verilmiştir. Kireçtaşlarının ortalama yüzeysel aşınma dayanımı değeri 7,5 cm³/50cm² olarak belirlenmiştir.

Tablo 12. Dolaylı çekme deneyi sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları

Örnek No	Çap D (mm)	Boy L (mm)	Yenilme Yüğü F (kN)	Çekilme Dayanımı σ_t (MPa)
1	50	45,24	30,94	8,71
2	50	26,9	18,63	8,82
3	50	39,86	28,47	9,09
4	50	43,4	29,78	8,74
5	50	46,93	20,65	5,60
6	50	32,43	22,39	8,79
7	50	28,24	22,13	9,98
8	50	33,85	24,52	9,22
Ortalama Değer				8,62
En Küçük Değer				5,60
En Büyük Değer				9,98
Standart Sapma				1,290

Tablo 13. Eğilme dayanımı deneyi sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları

Örnek No	Çap D (cm)	Boy L (cm)	Mesnet mesafesi L (cm)	Kırılma Yüğü P (kN)	Eğilme Dayanımı σ_f (MPa)
1	5	17	10,5	6,54	13,988
2	5	17	10,5	7,31	15,635
3	5	17	10,5	6,84	14,630
4	5	17	10,5	6,97	14,908
5	5	15	10,5	8,12	17,367
6	5	15	10,5	8,42	18,009
7	5	15	10,5	6,51	13,924
Ortalama Eğilme Dayanımı					15,494
En Küçük Değer					13,924
En Büyük Değer					18,009
Standart Değer					1,616

Tablo 14. Aşınma kaybı deneyi sırasında elde edilen veriler ve deney sonuçları

Örnek No	İlk boy d_0 (cm)	Son Boy d_1 (cm)	Hacim kayıp ΔV (cm ³)	Böhme Yüzeysel Aşınma Direnci (cm ³ /50 cm ²)
1	7,09	6,92	8,5	8,5
2	7,09	6,95	7	7
3	7,04	6,87	8,5	8,5
4	7,09	6,95	7	7
5	7,09	6,96	6,5	6,5
Ortalama Böhme Aşınma Değeri				7,5
En Küçük Değer				6,5
En Büyük Değer				8,5
Standart Sapma				0,935

Standartlar doğal taşların kalite değerlerini, kullanım yerlerini ve kullanım yerine uygun olup olmadıklarını belirlemede etkin rol oynarlar. Standartlara uygun olan doğal taşlar ticari olarak

alınıp satılabilirken, standartlara uygun olmayan doğal taşlar ise piyasadan çıkartılmakta veya yaygın kullanım olanağı bulamamaktadır. Zira standartlara uygun kayaçlar kullanım yerlerinde uzun ömürlü olarak kalmakta, renk, desen, fiziksel ve mekanik etkilere karşı dayanıklı olmakta ve daha az bakım onarım maliyeti oluşmaktadır. Standartlara uyan kayaçların alım-satımında üstünlük doğmakta, pazar payının sürekliliği sağlanmakta, görünüm benzerliklerine rağmen düşük kalitedeki diğer kayaçlarla gereksiz rekabet önlenilmektedir. Bu yolla daha kaliteli ve dayanımı yüksek olan doğal taşlar renk, desen gibi benzerliklerinden dolayı standart dışı olan doğal taşlardan ayrılmaktadır (Büyüksağış ve Gürcan, 2005).

Türk Standartları Enstitüsü (TSE) Türkiye'deki doğal taşlar için Amerikan Standartları (ASTM)'nda verilen sınırlamaları kullanarak mevcut düzenlemeleri getirmiştir. Ancak, TSE ile ASTM standartlarının beklentileri aynı grup kayaçlar için birbirine uymamakta ve farklılıklar göstermektedir.

Kaplama olarak kullanılan doğal kayaçların sahip olmaları gereken fiziksel ve mekanik özelliklerinin sınır değerlerini tanımlayan TS 1910, kayaçların doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için sahip olmaları gereken fiziksel ve mekanik özelliklerinin sınır değerlerini tanımlayan TS 2513, mermer ve kalsiyum karbonat bileşimli kayaçların doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için sahip olmaları gereken fiziksel ve mekanik özelliklerinin sınır değerlerini tanımlayan TS 10449, sedimanter kökenli doğal taşlara ait Türk Standartları'nda istenilen değerler TS 11137 ve kayaların doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için sahip olmaları gereken fiziksel ve mekanik özelliklerinin sınır değerlerini tanımlayan ASTM (C97, C170, C99, C241) standartlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır. İncelenen kireçtaşlarının TSE standartlarına göre fiziksel ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 15 ve 16'da, ASTM standartlarına göre 17'de topluca verilmiştir.

Tablo 15 ve Tablo 16'daki veriler göz önünde bulundurulduğunda Ünlüpinar kireçtaşlarının doğal yapı taşı, kaplama, ve taşıma olarak Türk Standartlarına göre uygun olduğu belirlenmiştir. ASTM doğal taş standartlarına göre kireçtaşlarının sınır değerler içinde olduğu belirlenmiştir. TSE'de doğal taşlar oluşumlarına göre değerlendirilerek daha sağlıklı bir yaklaşım getirilirken ASTM'de ise gruplandırmalara ve genellemelere gidilmiştir. TSE mevcut doğal taşların mevcut değerlerini gerçekçi yansıtırken ASTM'de ise istenen değerler o gruba ait yüksek değerlere karşılık gelmekte bir kayaç sınıfından oldukça üstünde bir değer beklenilmektedir. ABD'nin oldukça büyük bir doğal taş ithalatçısı ülke olduğu dikkate alındığında ise yapılarının uzun ömürlü olabilmesi için ülke dışından gelen doğal taşların standart değerlerinin yüksek olmasını istediği düşünülebilir (Büyüksağış ve Gürcan, 2005).

Tablo 15. Kireçtaşlarının fiziksel özellikleri ve Türk Standartları'nda istenilen değerler açısından uygunluğu

Kayacın Fiziksel Özellikleri	Bulunan Değer	TS Değerleri			
		TS 1910	TS 2513	TS 10449	TS 11137
Yoğunluk, gr/cm ³	2,69	Kaplama ≥ 2,55	≥ 2,55		≥ 2,16
Kütlece Su Emme, %	0,158	Doğal Taş ≤ 0,75	Yapı Taş ≤ 1,80	Mermer ≤ 0,4	≤ 4
Porozite, %	0,42	Doğal Taş ≤ 2			
Özgül Ağırlık	2,64		Yapı Taşı ≥ 2,55		
Donma-Çözülme, %	0,11	Doğal Taş < 5	Yapı Taşı < 5	Mermer < 1	
Sonik Hız (m/sn)	6248				
Islanma-Kuruma (%)	0,15				

Tablo 16. Kireçtaşlarının mekanik özelliklerinin Türk Standartlarına göre değerlendirilmesi

Kayacın Mekanik Özellikleri	Bulunan Değer	TS Değerleri			
		TS 1910	TS 2513	TS 10449	TS 11137
Tek Eksenli Basınç Dayanımı, MPa	65,007	≥ 50	≥ 50	Döşeme >50 Kaplama >30	Taşıma ≥ 49 Kaplama >29,4
Dolaylı Çekme Dayanımı, MPa	8,62				
Eğilme Dayanımı, MPa	15,494	≥ 5	≥ 5	Mermer >6	≥ 2,94
Yüzeysel Aşınma (Böhme) Dayanımı, cm ³ /50cm ²	7,5	Döşeme ≤ 15 Kaplama ≤ 10	Döşeme ≤ 15 Kaplama ≤ 10	Döşeme ≤ 15 Kaplama ≤ 25	Taşıma ≤ 15 Kaplama ≤ 25
Suda Dağılmaya Karşı Duraylılık İndeksi, (%)	99,7				

Tablo 17. Kireçtaşlarının ASTM doğal taş standartlarında istenilen değerlere göre değerlendirilmesi

Fiziko-Mekanik Özellikler	Sınır Değerler	Sınıflandırma	ASTM Test Metodu	Ünlüpınar Kireçtaşları
Kütlece Su Emme (Maksimum, %)	0,2	I, II, III, IV	C97	0,158
Yoğunluk (Minimum, gr/cm ³)	2,595 2,800 2,690 2,305	I II III IV	C97	2,69
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Minimum, MPa)	52	I, II, III, IV	C170	65,007
Eğilme Dayanımı (Minimum, MPa)	7	I, II, III, IV	C99	15,494
Böhme Yüzeysel Aşınma Dayanımı (Maksimum, cm ³ /50cm ²)	10	I, II, III, IV	C241	7,50
I: Kireçtaşı-mermer, II: Dolomit, III: Serpantin, IV: Traverten				

4. Sonuçlar

Gümüşhane ili Kelkit ilçesine bağlı Ünlüpınar beldesinde bulunan kireçtaşlarının mekanik ve fiziko-mekanik özelliklerinin standartlara göre değerlendirilmesi yolu ile ülkemiz ve dünya piyasasında mermer olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Ünlüpınar (Gümüşhane) yöresinden alınan kireçtaşlarının, TS 1910'a göre kaplama olarak kullanılan doğal kayaçların sahip olması gereken kütlece su emme oranı (<0,75) sınır değeri, yoğunluk ($\geq 2,55$ gr/cm³) sınır değeri, porozite (<2) sınır değeri ve don sonrası ağırlık kaybı (<5) sınır değerini sağlayarak standart için gerekli fiziksel özellikleri taşıdığı belirlenmiştir.
2. Ünlüpınar (Gümüşhane) yöresinden alınan kireçtaşlarının, TS 2513'e göre kayaçların doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için gerekli yoğunluk değeri ($\geq 2,55$ gr/cm³), kütlece su emme sınır değeri ($\leq 1,80$), özgül ağırlık sınır değeri ($\geq 2,55$) ve don sonrası ağırlık kaybı sınır değerini (≤ 5) sağlayarak standart için gerekli fiziksel özellikleri taşıdığı belirlenmiştir.
3. Ünlüpınar (Gümüşhane) bölgesinden alınan kireçtaşlarının, TS 10449'a göre kayaçların doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için gerekli olan kütlece su emme oranı miktarı (<0,4) sınır değerini ve don sonrası ağırlık kaybının (<1) sınır değerini sağlayarak standart için gerekli fiziksel özellikleri taşıdığı belirlenmiştir.
4. TS 11137'ye göre sahip olması gereken yoğunluk ($\geq 2,16$) sınır değerini ve kütlece su emme oranı (≤ 4) sınır değerini sağlayarak standart için gerekli fiziksel özellikleri taşıdığı belirlenmiştir. TS 11137'ye göre kireçtaşlarının sahip olmaları gereken tek eksenli basınç dayanımı (taşınma için ≥ 49 MPa, kaplama için $\geq 29,4$ MPa), eğilme dayanımı ($\geq 2,94$ MPa) ve yüzeysel aşınma (Böhme) dayanımı (taşınma için ≤ 15 MPa, kaplama için ≤ 25 MPa) sınır değerlerini sağladığı belirlenmiştir.

5. TS 1910'a göre kaplama olarak kullanılan doğal kayaçların sahip olmaları gereken tek eksenli basınç dayanımı (≥ 50 MPa) sınır değerini, eğilme dayanımı (≥ 5 MPa) sınır değerini ve yüzeysel aşınma (Böhme) dayanımı (≤ 15 cm³/50²) sınır değerlerini taşıdığı belirlenerek standart için gerekli mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

6. TS 2513'e göre kayaçların doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için gerekli tek eksenli basınç dayanımı (≥ 50 MPa) sınır değerini, eğilme dayanımı (≥ 5 MPa) sınır değerini ve yüzeysel aşınma (Böhme) dayanımı (döşeme için ≤ 15 cm³/50cm², kaplama için ≤ 10 cm³/50cm²) sınır değerini taşıdığı belirlenmiştir.

7. TS 10449'a göre kayaçların doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için gerekli tek eksenli basınç dayanımı (kaplama için >30 MPa, döşeme için >50 MPa) sınır değerini taşıdığı, eğilme direnci (>6 MPa) sınır değerini taşıdığı ve yüzeysel aşınma (Böhme) dayanımı (döşeme için ≤ 15 cm³/50cm², kaplama için ≤ 25 cm³/50cm²) sınır değerlerini taşıdığı belirlenerek standart için gerekli mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

8. ASTM (C97, C170, C99, C241)'ye göre tek eksenli basınç dayanımı (>52 MPa) sınır değerini, eğilme dayanımı (>7 MPa) sınır değerini, yüzeysel aşınma (Böhme) dayanımı (<10 cm³/50cm²) sınır değerini taşıdığı belirlenmiştir. Ayrıca kütlece su emme ($<0,2$) sınır değerini ve yoğunluk ($>2,595$ gr/cm³) sınır değerini de taşıdığı görülmektedir.

9. Gümüşhane-Ünlüpınar yöresi kireçtaşları, sonik hız ölçümlerine göre ayrışma derecesi olarak taze ve çok yüksek ultrasonik hız sınıfına dahildir. Ayrıca, ortalama Schmidt çekici geri tepme sayısına göre Ünlüpınar kireçtaşları "sert" kaya sınıfında bulunmaktadır.

10. Değerlendirmenin olumlu olarak sonuçlanması neticesinde gelinen bu aşamada, doğal taş yatırım kararı öncesinde, detaylı pazar araştırması yapılması, benzer taşların ekonomik durumu ve talebin değerlendirilmesi, aynı zamanda madencilik faaliyetleri için gerekli maliyetlerin ilgili kişiler ile ortak çalışmalar kapsamında incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

Alp, İ., Yılmaz, A.O., Arslan, M., Kolaylı, H. ve Er, M., 2005. Physical and Mechanical Properties of Gümüşhane and Bayburt (Turkey) Travertine and Onix Marble, Proceeding of 1st International Symposium on Travertine, September, Denizli, 224- 230.

Anon, 1979. Classification of Rocks and Soils for Engineering Geological Mapping, Part 1-Rock and Soil Materials. Bull. Int. Ass. Eng. Geo, 19, 364-371.

Arıkan, M., 1968. Mermer ve Mermercilik, Ankara Basım ve Ciltevi, Ankara.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1992a. Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions (ASTM D5313-92), Annual Book of ASTM Standards, Construction: Soil and Rock, ASTM Publication, 189-190.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1992b. Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Freezing and Thawing Conditions (ASTM D5312-92), Annual Book of ASTM Standards, Construction: Soil and Rock, ASTM Publication, 1344-1346.

ASTM C 99, 1987. Standard Test Method for Modulus of Rupture of Dimension Stone, Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 170, 1990. Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone, Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 241, 1990. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Stone Subjected to Foot Traffic, Annual Book of ASTM Standards.

ASTM C 97, 1996. Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone, Annual Book of ASTM Standards.

Atabey, E., 2002. Çatlak Sırt Tipi Laminallı Traverten-Tufa Çökellerinin Oluşumu, Mikroskobik Özellikleri Ve Diyajenezi, Kırşehir İç Anadolu, MTA Dergisi, 123-124.

Babacan, A.E., Ersoy, H. ve Gelişli, K., 2012. Kayaçların Fiziksel, Mekanik ve Elastik Özelliklerinin Ultrasonik Hız Tekniği ve Zaman-Frekans Analiziyle Belirlenmesi: Bej Kireçtaşları (KD Türkiye) Üzerine Örnek Bir Çalışma, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 36, 63-73.

Binal, A., 2009. A New Laboratory Rock Test Based On Freze-Thaw Using A Steel Chamber, Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology, 42, 2, 179-198.

Brown, E. T., 1981. Suggested Methods of Rock Characterization Testing and Monitoring, International Society for Rock Mechanics, Portugal, 53.

Büyüksağış İ.S. ve Gürcan S., 2005. ASTM ve TSE Doğal Taş Standartlarının Karşılaştırılması, Madencilik, 44, 1, 33-41.

Chafetz, H.S. and Folk, R.L., 1984. Travertines: Depositional Morphology and The Bacterially Constructed Constituents, Jour. Sedimentary Petrology, 54, 1 289-316.

Demirer, T., 1991. Kozağaç Köyü Oruçoğlu Mermer Sahasının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, A. Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Gamble, J.C., 1971. Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks, PhD Thesis, University of Illinois (unpublished).

Gökçeoğlu, C., Ulusay, R. and Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey with particular emphasis on the influence of the drying and wetting cycles, Engineering Geology, 57, 215-237.

Görgülü, K., 1994. Bazı Mermer Ocaklarında (Isparta-Burdur-Sivas) İşletme Sistemlerinin İncelenmesinin ve Öncelikli Kaya Madde/Kütle Özellikleri ile İlişkilendirilmesi Araştırmaları, Yüksek Lisans Tezi, C.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 95 s.

Gürsoy, S., 2005. Muğla İlinde Mermercilik Sektörünün Gelişimi ve İl Ekonomisine Katkıları.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A.

Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, 628 p.

Kömürlü, E., Kesimal, A., Durmuş Demir, A., 2017. Dog bone shaped specimen testing method to evaluate tensile strength of rock materials. Geomechanics and Engineering, 12, 883-898.

Kurtçu, H., 2010. Babadat (Sivrihisar-Eskişehir) Kireçtaşlarının Jeolojik ve Fizikomekanik Özellikleri ile Mermer Olarak Değerlendirme Olanakları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 93 s.

Pedley, H.M., 1990. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. Sedimentary Geology, 68, 143-154.

T.S.E., 1977. Doğal Yapı Taşları, TS 2513 ICS 91.100.15, Ankara.

T.S.E., 1977. Kaplama Olarak Kullanılan Doğal Taşlar, TS 1910 UDK 691.215, Ankara.

T.S.E., 1987. Tabii Yapı Taşları Muayene ve Deney Metotları, TS 699, UDK 6912, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

T.S.E., 1992. Mermer–Kalsiyum Karbonata Esaslı–Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanımı, TS 10449, Ankara.

T.S.E., 1993. Kireçtaşı Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan, 11137 TSE, Ankara

TUMMER, 2006. Doğaltaş Sektöründeki Gelişmeler ve Türkiye Doğaltaş Sektör Profili, Ankara.

Tüdeş, Ş., 2001. Gümüşhane Kenti ve Yakın Çevresinin Yerleşime Uygunluk Açısından Araştırılması, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 203.

Ulusay, R., Arıkan, F., Yoleri, M., F., and Çağlan, D., 1995. Engineering Geological Characterization of Coal Mine Waste Material and An Evaluation in the Context of Back-Analysis of Spoil Pile Instabilities in a Strip Mine, SW Turkey, Engineering Geology, 40, 77-101.