

Kömür Çevre Kayaçları Dayanım Özelliklerinin Cerchar Aşınma İndeksine Olan Etkileri

The Effects of Strength Properties of Coal Measures Rocks on Cerchar Abrasivity Index

OLGAY YARALI^{1*}

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

Geliş (received) : 12 Nisan (April) 2016

Kabul (accepted) : 27 Temmuz (July) 2016

ÖZ

Bu çalışmada, Zonguldak Taşkömür Havzası kömür çevre kayaçlarının dayanımlarının Cerchar aşınma indeksine (CAI) olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, 29 kömür çevre kayacı üzerinde Cerchar aşınma (CAI), tek eksenli basınç, Brazilian çekme dayanımı deneyleri ile üç eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlara göre her bir kaya malzemesinin yenilme zarfları çizilmiştir. ISRM'nin (1983) önerdiği hesaplama yöntemi ile içsel sürtünme açısı (ϕ) ve görünür kohezyon (c) değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra, CAI ve dayanım deney sonuçları, regresyon analizi ve istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, CAI ve tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, içsel sürtünme açısı ve görünür kohezyon arasında pozitif doğrusal ilişkiler bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Brazilian çekme dayanımı, Cerchar aşınma indeksi, görünür kohezyon, içsel sürtünme açısı, tek eksenli basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı.

ABSTRACT

In this study, the effects of strength of coal measures rocks in Zonguldak Hard Coal Basin on Cerchar abrasivity index (CAI) were investigated. For this purpose, CAI, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, and triaxial strength tests were carried out on 29 sedimentary rock samples. Failure envelope of each rock materials based on the results obtained from triaxial strength tests were drawn. The internal friction angle (ϕ) and apparent cohesion (c) parameters were calculated for each rock sample using the calculation method suggested by ISRM's (1983). Then, relationships among CAI and strength test values were evaluated using regression analysis and statistical methods. As a result, positive linear relationships were found between CAI and uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, internal friction angle, and apparent cohesion.

Keywords: Brazilian tensile strength, Cerchar abrasivity index, apparent cohesion, internal friction angle, uniaxial compressive strength, triaxial compressive strength.

*O. Yaralı

e-posta: oyarali67@gmail.com

GİRİŞ

Kayaçların aşındırıcılık özelliği delinebilirliğini ve kazılabilirliğini etkilediğinden, kazılan m³ kayaç başına ne kadar keski tüketileceğinin belirlenmesi önem teşkil etmektedir. Keski ucu aşınmasının; makinanın ilerleme hızına, uygulanan kuvvetlere ve enerji sarfiyatına olumsuz etkileri olmaktadır. Körelmiş keski ile daha fazla kesme kuvveti harcanmakta ve daha az ilerleme kaydedilmektedir (Fowell ve Johnson, 1991). Mühendislik uygulamalarında keski masraflarının tüm kazı maliyetinin 1/3'üne vardığı durumlar rapor edilmiştir (Bilgin, 1982). Bu nedenle, bir kazı sistemi tasarlanmadan önce, kazı yapılacak formasyonların mekanik ve petrografik özelliklerinin bilinmesi ve ne kadar keski harcanacağı tahmin edilerek makina tipinin amaca uygun olarak seçilmesi gerekmektedir (Bilgin, 1989; Fowell ve Johnson, 1991; Hamzaban vd., 2014).

Bir mekanik kazıda, keski tüketiminin fazla olması sadece keski tüketim maliyetlerini değil, onarım ve keski değişirme sürelerinin artmasından dolayı oluşan kazı maliyetlerini de olumsuz etkileyecektir (Fowell ve Abu Bakar, 2007; Hamzaban vd., 2014).

Kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesine yönelik birçok deney yöntemi önerilmiş olmasına rağmen mühendislik uygulamalarında kabul görmüş deney yöntemi oldukça az sayıdadır. Literatüre bakıldığında, birçok mekanize kazı makinesi üreticisi ile araştırmacının makine performans analizlerinde Cerchar ve Schimazek aşınma indeksleri ile Norveç aşınma indeksi (Abrasion Value, AV) deney yöntemlerini kullandıkları görülmektedir.

Literatürde birçok araştırmacı mekanize kazı makinelerinde kullanılan keski üzerindeki aşınmaya etki eden parametreleri incelemişlerdir ve aşınmaya etki eden başlıca parametreler; kayacın dayanımı ve sertliği, mineral bileşimi, mineral tanelerinin boyutu, kazıcı uç geometrisi, keskinin kesme derinliği ve kesme hızı, keski oluşturdukları darbe yükleri, kesme tipi, keski hareket şekli, keskiye veya kayaç yüzeyine uygulanan soğutma sıvısı, etkin kesme veya ufalanma, keski kalitesi, tungsten karbürün metalürjik yapısı ve kazı şartları ile işletme faktörü olarak belirlemişlerdir (Schimazek ve Knatz, 1970; Suana ve Peters, 1982; West, 1986; West, 1989; Al-Ameen ve Waller, 1994; Deketh, 1995; Plinninger vd., 2003; Mathier ve Gisiger, 2003; Plinninger vd., 2004; Yaralı vd., 2008; Lassnig vd., 2008; Thuro ve Kasling, 2009; Kahraman vd., 2010; Ghasemi, 2010; Deliormanlı, 2012).

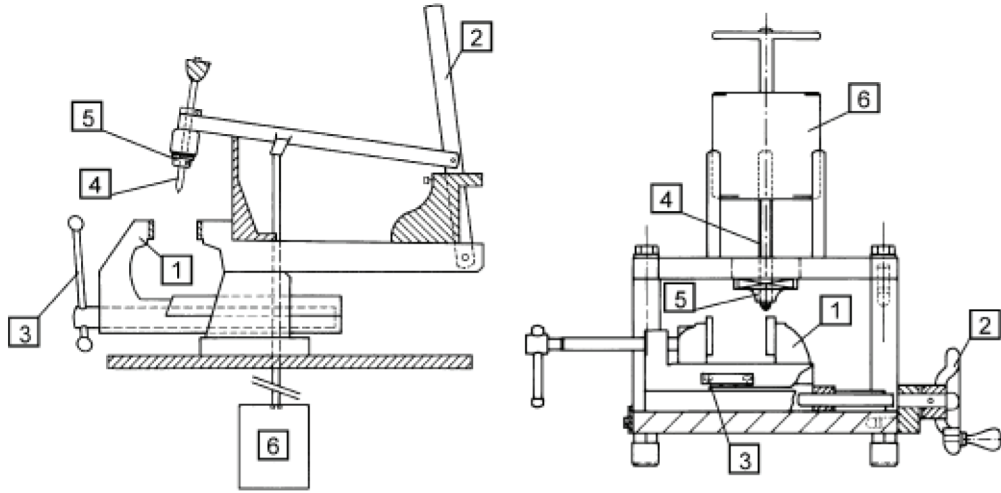
Cerchar aşınma indeksi deneyi ilk olarak Fransa'da Cerchar Araştırma Enstitüsü (Research Institute Cerchar of the Charbonnages de France)'nde 1971 yılında bulunmuş ve sonuçlar Valantin (1973) tarafından yayınlanmıştır. Bu deney yöntemi keski aşınması ve sarfiyatının tespiti için kullanılmaktadır.

Cerchar aşınma indeksi (CAI) deneyi, birinci nesil (klasik) deney aleti (Şekil 1a) için 1±0.5 saniye, ikinci nesil (West) deney aleti (Şekil 1b) için 10±2 saniye boyunca ve 70 N'luk statik yük altında, 2000 N/mm² çekme dayanımına sahip standart krom vanadyum alaşımılı soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş Rockwell Sertliği 55±1 olan ve 90° tepe açılı konik bir ucun taze kırılmış bir kayaç yüzeyinde 10 mm çekilmesi şeklinde gerçekleştirilen deney yöntemi olarak tarif edilmektedir (Cerchar, 1986).

Cerchar aşınma indeksi deneyi için önerilmiş 3 farklı deney yöntemi önerisi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, 1986 yılında Cerchar Enstitüsü'nün önerdiği NF P94-430-1 no'lu yöntem (AFNOR, 2000), ikincisi ASTM D7625-10 (2010) tarafından önerilen yöntem ve sonuncusu da ISRM (2015), tarafından önerilen yöntemdir. Günümüzde Cerchar aşınma indeksi deneyi için kullanılmakta olan çeşitli sınıflandırma sistemleri bulunmaktadır. ISRM (2015), tarafından önerilen Cerchar aşınma indeksine göre aşındırıcılık sınıflaması Çizelge 1'de verilmiştir.

Birçok araştırmacı kayaçların petrografik özelliklerinin (kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin miktarı, kuvars ortalama tane boyutu kayacın çimentolanma derecesi ve çimento türü, vb.), fiziksel (porozite, yoğunluk) ve mekanik özelliklerinin (dayanım, sertlik) Cerchar aşınma indeksi (CAI) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çizelge 2'de kayaç özellikleri ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki ilişkiler özetlenmiştir.

Literatüre bakıldığında çeşitli araştırmacılar tarafından Cerchar aşınma indeksi ile kayacın dayanımı (tek eksenli basınç ve çekme), indeks özellikleri (P-dalga hızı), petrografik özellikleri ve gevreklik ölçütleriyle arasındaki ilişkilerin araştırılmış olduğu görülmektedir (Çizelge 2). Gevreklik kayaçların önemli mekanik özelliklerinden olup aynı zamanda kazı mekaniği açısından da önemli bir yer teşkil etmektedir. Literatürdeki çalışmalar gözden geçirildiğinde, tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı ile CAI arasındaki ilişkileri inceleyen çalışmalarda ya sadece mermer örnekleri kullanılmış ya da sedimanter kökenli 7-8 örnek ile araştırmalar yapılmıştır. Kömür çevre kayacı olarak bu yoğunluktaki örnek sayısı ile yapılan araş-



a) Cerchar deney aleti (Cerchar 1986):
1-mengene, 2-3 el manivelası, 4-çelik uç,
5-ucu sıkma tertibatı, 6-ağırlık.

b) West deney aleti (West 1986):
1-mengene, 2-el çarkı, 3-mengene kızağı, 4-konik uç, 5-uç yuvası, 6-ağırlık.

Şekil 1. CAI belirlemek için kullanılan deney aletleri (Plinninger vd., 2003).
Figure 1. Testing devices to determine the CAI (Plinninger et al., 2003).

Çizelge 1. CAI sınıflaması (ISRM, 2015).
Table 1. Classification of CAI (ISRM, 2015).

CAI Değeri	Sınıfı
0.1 – 0.4	Aşırı düşük
0.5 – 0.9	Çok düşük
1.0 – 1.9	Düşük
2.0 – 2.9	Orta aşındırıcı
3.0 – 3.9	Yüksek
4.0 – 4.9	Çok Yüksek
≥ 5	Aşırı yüksek

tırmaya rastlanılmamıştır. Bu araştırma, bu alandaki açığı kapatmayı amaçlamıştır.

Ayrıca, bu çalışmada kayacın içsel dayanım parametreleri olan içsel sürtünme açısı ve görünür kohezyon değerleri ile CAI arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Literatürde, kayacın içsel dayanım parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı ile CAI arasında yapılmış bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma bu alanda yapılan ilk araştırma niteliğindedir.

Bu çalışmanın asıl amacı kömür çevre kayaçlarının mekanik özelliklerinin Cerchar aşınma indeksine olan

etkilerini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda, CAI değeri ile incelenen büyüklükler karşılaştırılarak daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen farklı sonuçların hangisiyle örtüştüğü incelenmeye çalışılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) bağlı farklı Müesseselerden alınan kömür çevre kayaç örnekleri üzerinde Cerchar aşınma indeksi, tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian çekme dayanımı

Çizelge 2. Kayaç özellikleri ile CAI arasındaki korelasyonlar.

Table 2. Correlations of CAI with rock properties.

Parametre	Araştırmacı	CAI ile korelasyon
	Jaeger (1988)	CAI ile teke eksenli basınç dayanımı arasında pozitif lineer bir ilişki (Deneyler oldukça sert ve kuvars içeren beton karışı üzerinde yapılmıştır).
	Al-Ameen ve Waller (1994)	$CAI = -1.38 + 0.05(\sigma_c) - 0.0001(\sigma_c)^2$
Tek eksenli basınç dayanımı, (σ_c)	Kahraman vd. (2010)	$\sigma_c = -366 - 0.9(VBP) + 155.8(d) + 10.7(Vp) + 16.7CAI$
	Gharahbangh vd. (2011)	$CAI_{42-HRC-Pürüzlü}$ ve $CAI_{54-HRC-Pürüzlü}$ ile tek eksenli basınç dayanımı arasında pozitif lineer bir ilişki
	Deliormanlı (2012)	$\sigma_c = 54.457(CAI) + 18.26$
	Dipova (2012)	$\sigma_c = 30.07(CAI) + 32.89$
	Altındağ vd. (2009)	$\sigma_c = 58.8(CAI)^{0.486}$ (sedimanter kökenli kayalar için)
	Deliormanlı (2012)	$\sigma_t = 7.72(CAI) + 2.87$
Brazilian, (σ_t)	Dipova (2012)	$\sigma_t = 2.99(CAI) + 3.35$
	Altındağ vd. (2009)	$\sigma_t = 2.302Ln(CAI) + 6.28$ (sedimanter kökenli kayalar için)
Gevreklilik ölçütü (B_3)	Altındağ vd. (2009)	$CAI = 0.128(B_3)^{0.882}$ $R = 0.61$ (sedimanter kökenli kayalar için)
P-dalga hızı (Vp)	Khandelwal ve Ranjith (2010)	$CAI = 0.0009(Vp) + 1.9375$
Kuvars içeriği (Q, %)	West (1986, 1989)	CAI ile kuvars içeriği arasında pozitif lineer ilişki
	Yaralı vd., (2008)	$CAI = 0.0309(Q) - 0.0795$
	Sauna ve Peters (1982)	CAI ile eşdeğer kuvars içeriği arasında pozitif lineer ilişki
	Plinninger vd. (2003)	1. CAI ile eşdeğer kuvars içeriği arasında pozitif lineer ilişki 2. CAI ile Q_{eqv} x Young Modülü (E) arasında pozitif lineer ilişki
	Fowell ve Abu Bakar (2007)	$CAI_{düz} = 0.127(Q_{eqv}) - 7.45(\text{tane boyutu}) + 2.008$
Eşdeğer kuvars içeriği (Q_{eqv} , %)	Yaralı vd. (2008)	$CAI = 0.0313(Q_{eqv}) - 0.1619$
	Gharahbangh vd. (2011)	1. $CAI_{42-HRC-Pürüzlü}$ ve $CAI_{54-HRC-Pürüzlü}$ ile eşdeğer kuvars içeriği Q_{eqv} arasında pozitif lineer ilişki 2. $CAI_{42-HRC-Pürüzlü} = -0.127 + 0.0148(\sigma_c) + 0.0411(Q_{eqv})$ 3. $CAI_{42-HRC-Pürüzlü} = 0.005917(\sigma_c)^{1.14} \cdot (Q_{eqv})^{0.208}$ 4. $CAI_{54-HRC-Pürüzlü} = 0.127 + 0.0103(\sigma_c) + 0.0261(Q_{eqv})$ 5. $CAI_{54-HRC-Pürüzlü} = 0.0151(\sigma_c)^{0.788} \cdot (Q_{eqv})^{0.377}$
	Rostami vd., (2005)	$CAI_{55-HRC-Pürüzlü} = 0.056(\sigma_c)^{0.431} \cdot (Q_{eqv})^{0.448}$

VBP: Hacimsel blok oranı, d. Yoğunluk, Q: Kuvars içeriği, Q_{eqv} : Eşdeğer kuvars içeriği, n: Porozite

ve üç eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çizelge 3'te örneklerin alım yerleri ve isimleri gösterilmiştir.

Cerchar Aşınma İndeksi

CAI deneylerinde West deney aleti kullanılmış ve ISRM (2015)'in önerdiği yöntem izlenmiştir. Her sefe-

rinde 2000 MPa çekme dayanımına sahip HRC54-56 sertliğindeki yeni uçlar kullanılmış ve her bir kayaç için beş çizim yapılmıştır. Uçlardaki aşınma 35x büyütme bioküler mikroskop altında incelenerek uçtaki aşınma yüzeyinin çapı (d) 0.1 (1/10) mm hassasiyetinde yatay konumda ölçülmüş ve ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçları ve ISRM (2015)'e göre aşındırıcılık sınıflaması Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Örnek alım yerleri.

Table 3. Locations of the rocks tested.

No	Örneklerin Alındığı Müessesese	Yer	Örnek Adı
1	TTK Üzülmaz	-170 /505 Desandre	Orta taneli kumtaşı
2		-205 Doğu Lağ. B14 kredili	İri taneli kumtaşı
3		-170 Acun Geçiş 3.5 Kuzey Lağ.	Orta taneli kumtaşı
4		+56 Kurul Doğu Lağımı	Orta taneli kumtaşı
5		-170 Sulu Tv. Taşı Güney Kanadı	Orta taneli kumtaşı
6		-170 Acun Batı Tv. 4. Kuzey Lağ.	İri taneli silttaşı
7		-170 Sulu Tv. Taşı Güney Kanadı	İri taneli silttaşı
8		-170 Nasifoğlu Tb. Taşı Kuzey	İri taneli silttaşı
9		-156 Sulu Doğu Taban 2. Güney	İri taneli silttaşı
10		-250 Kuzey Lağımı	Çamurtaşı
11		-170 Nasifoğlu Tv. Taşı	Çamurtaşı
12	TTK Karadon	-460/41405 Gelik Kuzey Lağımı	İri taneli kumtaşı
13		-460 Gelik Güney Lağımı	Orta taneli kumtaşı
14		-360 Gelik Hazırlık Galerisi	Orta taneli kumtaşı
15		-360 Sulu Tb.	İri taneli kumtaşı
16		-460/42510 Kuzey Lağımı	İri taneli kumtaşı
17		-360 Gelik Hazırlık Galerisi	İri taneli silttaşı
18		TTK Kozlu	-560/112056361 Lağımı
19	-560/112056360 Lağımı		Orta taneli kumtaşı
20	-560/112056359 Lağımı		Orta taneli kumtaşı
21	-560/112056357 Lağımı		İri taneli kumtaşı
22	-560/112056361 Lağımı		İri taneli kumtaşı
23	-560/112056361 Lağımı		İri taneli kumtaşı
24	TTK Amasra	-250 Taşlı Damar Üst Tb. Yolu	İri taneli silttaşı
25		-250 Taşlı Damar Alt Tb. Yolu	İri taneli silttaşı
26	TTK Karadon	Gelik Ocağı	İnce taneli kumtaşı
27	TTK Karadon	Gelik Ocağı	İri taneli kumtaşı
28	TTK Karadon	Gelik Ocağı	İri taneli Silttaşı
29	TTK Karadon	Gelik Ocağı	İri taneli Silttaşı

Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Bu deney, silindirik bir şekle sahip kayaç malzemesi örneklerinin tek eksenli basınç dayanımının tayini amacıyla yapılmaktadır. Deneysel çalışmalarda ISRM (1979) tarafından önerilen yöntem izlenmiştir. Önerilen standartta yükseklik/çap oranı (H/D) 2.5-3.0 olması istenirken, kaya bloklarının kalınlıkları yeterli olmadığı için H/D oranı 2.0 olacak şekilde örnekler

hazırlanmıştır. Her kaya tipi için deney 5 kez tekrarlanmıştır. Deneyler, 350MN/mm kapasiteli hidrolik preste ve ortalama 0.5 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır. Deney sonuçlarından kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı Eşitlik 1'den bulunmuştur. Çizelge 4'te deney sonuçları ile dayanım sınıflaması verilmiştir.

$$\sigma_c = 4000 * F/\pi D^2$$

(1)

Çizelge 4. Deney sonuçları.

Table 4. Summary of the test values.

No	Örnek Adı	CAI	Sınıflama	σ_c (MPa)	Dayanım Sınıfı	σ_t (MPa)	Görünür kohezyon (c) (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ_p)
1	Orta taneli kumtaşı	2.45± 0.78	Orta	95.60 ± 7.19	Yüksek	7.93 ± 0.72	20.37	62.89
2	İri taneli kumtaşı	3.05± 0.84	Yüksek	91.40 ± 11.52	Yüksek	8.34± 0.67	22.64	71.00
3	Orta taneli kumtaşı	1.60± 0.34	Düşük	87.36 ± 20.76	Yüksek	8.71 ± 1.40	12.95	57.29
4	Orta taneli kumtaşı	1.50± 0.36	Düşük	77.05 ± 3.02	Yüksek	6.28 ± 0.91	14.80	61.90
5	Orta taneli kumtaşı	1.50± 0.34	Düşük	84.20 ± 16.40	Yüksek	8.60 ± 1.10	15.57	58.00
6	İri taneli silttaşı	1.15± 0.62	Düşük	61.51 ± 22.76	Yüksek	8.63 ± 1.76	11.75	46.90
7	İri taneli silttaşı	1.00± 0.32	Düşük	73.20 ± 9.20	Yüksek	8.20 ± 0.40	13.35	42.37
8	İri taneli silttaşı	1.25± 0.64	Düşük	70.10 ± 11.80	Yüksek	7.30 ± 0.50	8.82	51.70
9	İri taneli silttaşı	0.80± 0.24	Çok düşük	62.50 ± 6.86	Yüksek	7.18 ± 0.82	8.87	52.70
10	Çamurtaşı	0.80± 0.25	Çok düşük	44.65 ± 11.62	Orta	5.89 ± 2.65	--	--
11	Çamurtaşı	0.70± 0.32	Çok düşük	47.81 ± 9.10	Orta	5.45 ± 2.10	6.48	49.20
12	İri taneli kumtaşı	2.40± 0.77	Orta	106.30 ± 13.61	Yüksek	7.42 ± 0.90	17.24	58.30
13	Orta taneli kumtaşı	2.30± 0.68	Orta	103.40 ± 12.01	Yüksek	7.29± 1.18	20.28	60.86
14	Orta taneli kumtaşı	1.65± 0.44	Düşük	89.79 ± 9.16	Yüksek	8.98± 1.22	19.31	52.08
15	İri taneli kumtaşı	1.72± 0.46	Düşük	78.65 ± 7.26	Yüksek	7.84 ± 0.86	19.85	53.03
16	İri taneli kumtaşı	3.10± 0.94	Yüksek	118.70 ± 18.20	Yüksek	9.89± 0.40	23.12	67.50
17	İri taneli silttaşı	0.70± 0.54	Çok düşük	69.50 ± 9.70	Yüksek	7.20 ± 0.90	11.50	51.25
18	İri taneli kumtaşı	2.92± 0.83	Orta	86.20 ± 5.36	Yüksek	8.32 ± 1.08	20.46	65.10
19	Orta taneli kumtaşı	2.22± 0.55	Orta	77.30 ± 1.64	Orta	7.06± 0.91	20.64	64.10
20	Orta taneli kumtaşı	1.50± 0.48	Düşük	89.20 ± 10.50	Yüksek	8.20 ± 0.52	16.04	50.37
21	İri taneli kumtaşı	2.60± 0.64	Orta	109.40 ± 14.70	Yüksek	9.94± 0.40	21.66	69.40
22	İri taneli kumtaşı	2.30± 0.68	Orta	78.10 ± 10.60	Yüksek	8.70 ± 1.04	19.29	60.86
23	İri taneli kumtaşı	2.44± 0.74	Orta	98.64 ± 9.21	Yüksek	9.48 ± 1.54	--	--
24	İri taneli silttaşı	0.50± 0.18	Çok düşük	58.31 ± 3.12	Orta	7.03 ± 1.36	--	--
25	İri taneli silttaşı	1.20± 0.24	Düşük	64.81 ± 6.78	Yüksek	6.84± 1.64	--	--
26	İnce taneli kumtaşı	1.10± 0.28	Düşük	72.14 ± 6.16	Yüksek	6.21 ± 0.63	--	--
27	İri taneli kumtaşı	2.67± 0.78	Orta	85.56 ± 8.41	Yüksek	8.32 ± 0.46	--	--
28	İri taneli silttaşı	0.55± 0.24	Çok düşük	56.37 ± 3.12	Orta	6.05 ± 1.05	--	--
29	İri taneli silttaşı	0.80± 0.38	Çok düşük	58.72 ± 5.83	Orta	5.65 ± 1.20	--	--

Burada;

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, (MPa); F: Yenilme anında kaydedilen yük, (kN)

A: Silindirik örneğin kesit alanı ($= \pi \cdot (D/2)^2$); D: Örnek çapı, (mm)'dir.

Brazilian Çekme Dayanımı Deneyi

Bu deney, disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yükleme altında çekme dayanımlarının dolaylı olarak tespiti için, ISRM (1978) tarafından önerilen bir dayanım deney yöntemidir. Yapılan deneylerde H/D oranı 0.5 olacak şekilde örnekler hazırlanmış, örneklerin alt ve üst yüzeyleri kabaca düzeltilmiştir. Her bir kaya örneği için 10'ar adet deney yapılmıştır. Örneklerin yenilmesi 20-35 saniye arasında gerçekleştirilmiştir. Brazilian çekme dayanımı değeri Eşitlik 2'den hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

$$\sigma_t = 0.636 F / D \cdot t \quad (2)$$

Burada;

σ_t : Brazilian çekme dayanımı, (MPa); t: Örnek kalınlığı (mm).

Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Bu deney yönteminde, silindirik kaya örneklerinin farklı yanal (çevresel) basınç altındaki eksenel dayanımları ölçülür. Amaç, kaya örneğinin eksenel basınç dayanımını, yanal basıncın bir işlevi olarak belirlemektir.

Üç eksenli basınç dayanımı deneyi çok önemli bir deneydir, kaya malzemesinin yenilme zarflarının belirlenmesinde, içsel sürtünme açısı (ϕ) ve görünür kohezyonun (c) bulunmasında kullanılır. Bu deney kaya yapılarının duraylılık analizleri için vazgeçilmez olup, diğer deneylere kıyasla zahmetli, pahalı ve uzun zaman gerektirir (ISRM, 1983).

Kaya örneğine yanal (çevresel) basınç uygulamak için özel hücreler kullanılır. Ayrıca, yanal basınç pompası da gerekir. Laboratuarda, bir deney için H/D oranı 2-3 ve çapları NX karot boyutundan (yaklaşık 54 mm) az olmayan silindirik kaya örnekleri kullanılır. Deneylerde kullanılan örneklerin hazırlanmasına ilişkin bilgi ISRM'de (1983) yer almaktadır.

Dayanım doğruları, ordinat (eksenel gerilme eksen) üzerindeki b_i değerleri, eğim açısının tanjantı m_i ve

geçerli oldukları yanal basınç (P) aralıklarında belirlenirler. Deney sonuçları, yanal basıncın absis ve eksenel gerilmenin de ordinat olarak alındığı iki boyutlu asal gerilme diyagramında gösterilir (Şekil 2). Yenilme zarfını oluşturan doğru parçasının genel denklemleri Eşitlik 3 ve 4'te verilmiştir (ISRM, 1983).

$$\sigma_1 = m_i \sigma_3 + b_i \quad (3)$$

veya

$$\sigma_1 = m_i P + b_i \quad (4)$$

Bu eşitliklerde; σ_1 ve σ_3 sırası ile, deneyde elde edilen eksenel dayanım ve uygulanan yanal basınçtır. m_i ve b_i parametrelerini kullanarak malzemenin içsel sürtünme açısı (ϕ_i) (Eşitlik 5) ve görünür kohezyon (c_i) (Eşitlik 6) hesaplanır.

$$\phi_i = \arcsin \frac{m_i - 1}{m_i + 1} \quad (5)$$

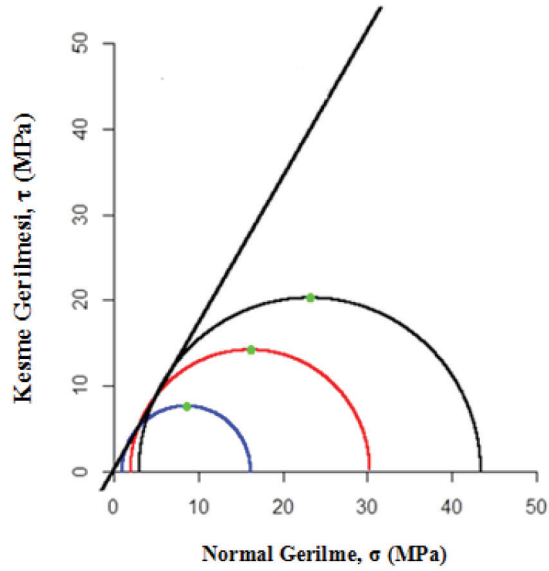
$$c_i = b_i \frac{1 - \sin \phi_i}{2 \cos \phi_i} \quad (6)$$

Deneylerde, 350MN/mm katılıktaki preste Hoek hücresi kullanılmış olup (Şekil 3), yükleme yöntemi olarak I. tip "ayrı" deney yöntemi uygulanmıştır. Deneylerde yaklaşık 10 cm yüksekliğindeki örnekler kullanılmıştır. İncelenen kaya örneklerine örneklerin tek eksenli basınç değerlerine göre 4-6-8-10-12 MPa değerinde en az üç farklı yanal basınçlar uygulanmıştır. Her bir yanal basınç değeri için bir örnek kullanılmıştır. Farklı yanal basınçlardan elde edilen eksenel basınç değerleri kullanılarak ISRM'nin (1983) önerdiği şekilde grafikler çizilerek dayanım zarfları bulunmuştur. Üç eksenli basınç dayanım deney sonuçlarına göre içsel dayanım parametreleri Çizelge 4'te verilmiştir.

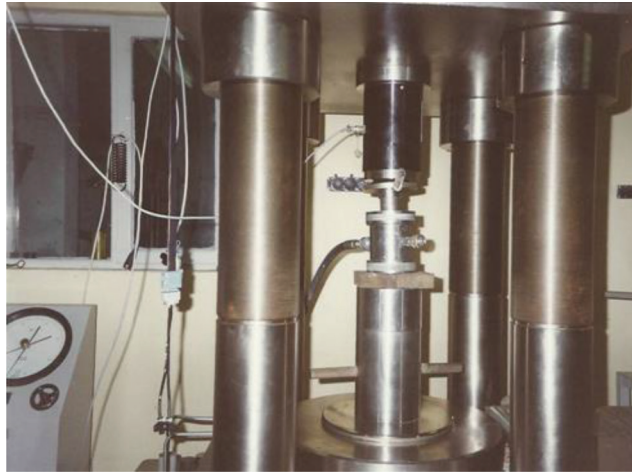
Kayaçların Gevreklik Özellikleri İle Cerchar Aşınma İndeksi Arasındaki İlişkiler

Gevreklik kayaçların önemli mekanik özelliklerindedir. Gevreklik aynı zamanda kazı mekaniği açısından da önemli bir yer teşkil etmektedir. Kayaçlar kazı mekaniği açısından incelendiğinde iki tür kazı profiline sahiptirler; gevrek ve sünek profil. Gevrekliğin kesin bir tanımı yapılmamış olmasıyla birlikte genellikle kayaçların tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımları vasıtasıyla bulunabilmektedir ve çeşitli gevreklik ölçütleri önerilmiştir (Çopur vd., 2003).

Bu çalışmada kayaçların gevreklik durumları ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki ilişkiler de ince-



Şekil 2. Yenilme zarfı.
Figure 2. Failure envelope.



Şekil 3. Deneilerde kullanılan Hoek hücresi.
Figure 3. Hoek cell used in tests.

lenmiştir. Literatürde kabul görmüş 2 temel gevreklik ölçütü (B_1 , B_2) ile Altındağ (2002) tarafından geliştirilmiş gevreklik ölçütü (B_3) kullanılmıştır (Eşitlik 7-9). Altındağ vd. (2009), 110 kayaca ait kayaçların gevreklik özellikleri ile Cerchar aşınma indeks değerleri arasındaki ilişkileri istatistiksel olarak incelemişlerdir. Cerchar aşınma indeksiyle ilgili en uygun ilişkiyi B_3 gevreklik ölçütü ile bulmuşlardır ($R=0.694$). Ayrıca, Yaralı ve Soyer (2011)'in önerdiği kayacın gevreklik değerini veren görgül bağıntısı (Eşitlik 10) kullanılarak gevreklik ile CAI arsındaki ilişki de değerlendirilmiştir.

$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (\text{Hucka ve Das, 1974}) \quad (7)$$

$$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (\text{Hucka ve Das, 1974}) \quad (8)$$

$$B_3 = \frac{\sigma_c * \sigma_t}{2} \quad (\text{Altındağ, 2002}) \quad (9)$$

$$B_4 = (\sigma_c * \sigma_t)^{0.72} \quad (10)$$

Burada; B_1 , B_2 , B_3 ve B_4 gevreklik ölçütüdür.

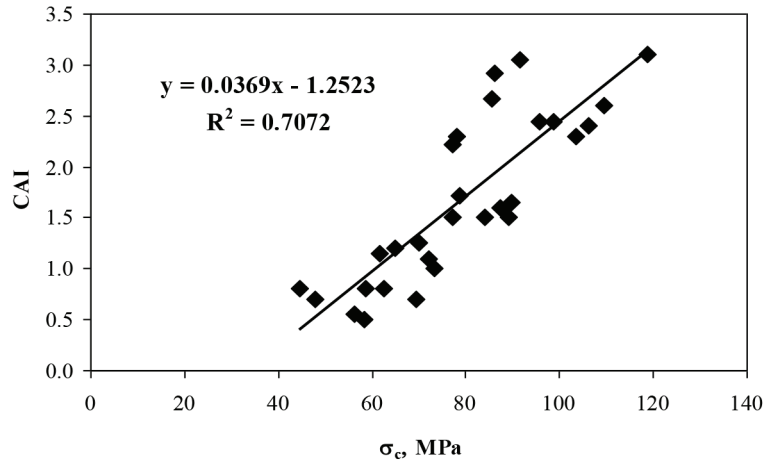
BULGULAR

29 adet kömür çevre kayacı üzerinde yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge 4'e göre tek eksenli basınç dayanımı orta-yüksek dayanım sınıfında olan kömür çevre kayalarının CAI değerlerinin genel olarak düşük-orta aşındırıcılık sınıfında olduğu görülmektedir. 21 kayaç için üç eksenli basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Deney verilerine göre çizilen yenilme zarflarından elde edilen denklemlerdeki katsayılar kullanılarak Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'dan kaya malzemesinin içsel sürtünme açıları ve görünür kohezyon değerleri bulunmuştur ve Çizelge 4'te verilmiştir. Elde edilen deneysel verilere basit regresyon analizi yapılmış ve büyüklükler birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 4-7). Çizelge 5'te deneylerden

elde edilen verilerin basit regresyon modeliyle korelasyonu gösterilmiştir. Deney sonuçları kayaç tiplerine göre gruplandırılarak (kumtaşı ve silttaşı-çamurtaşı), Şekil 8 ve 9'da görünür kohezyonun, Şekil 10 ve 11'de içsel sürtünme açısının CAI'ya olan etkileri gösterilmiştir.

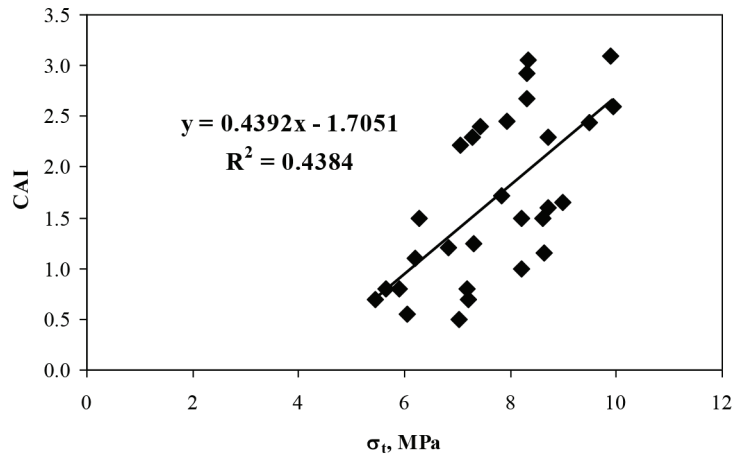
SONUÇLAR

Bu çalışmada, Zonguldak Bölgesi kömür çevre kayalarının tek eksenli basınç, Brazilian dolaylı çekme ve üç eksenli basınç dayanımları ile aşındırıcılıkları laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Kayaçların aşındırıcılıkları Cerchar aşınma indeks deneyi ile saptanmıştır. Üç eksenli basınç dayanım deneyleri 350MN/mm katlıktaki preste Hoek hücresi kullanılarak 4-6-8-10-12 MPa değerinde en az üç farklı yanal basınç uygulanmıştır. Her bir yanal basınç değeri için bir



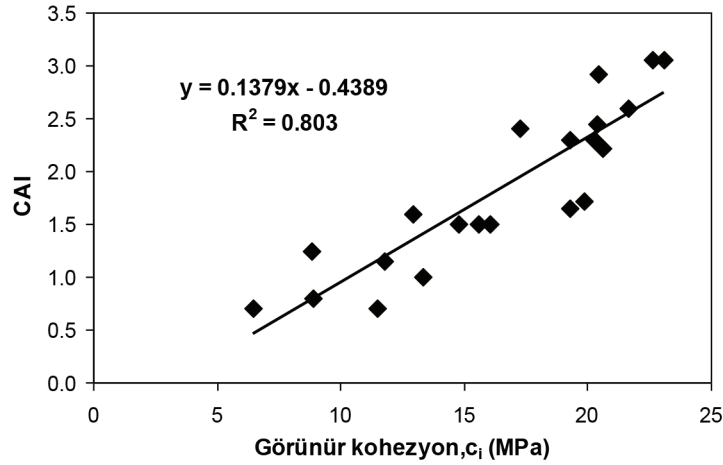
Şekil 4. CAI ile tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) arasındaki ilişki.

Figure 4. Relationship between CAI and uniaxial compressive strength (σ_c).

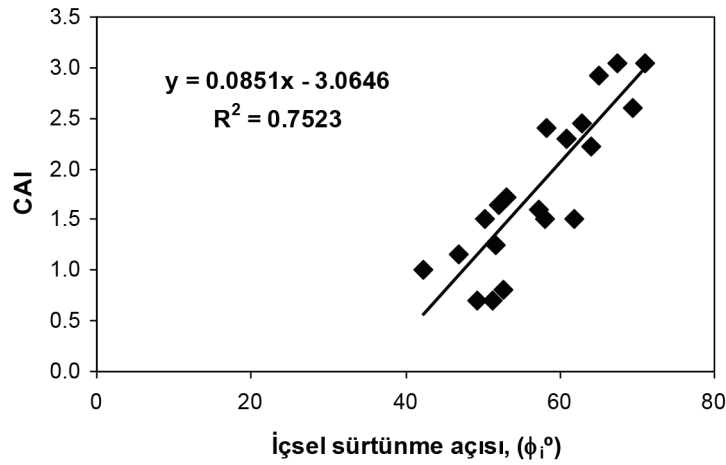


Şekil 5. CAI ile Brazilian çekme dayanımı (σ_t) arasındaki ilişki.

Figure 5. Relationship between CAI and Brazilian tensile strength (σ_t).



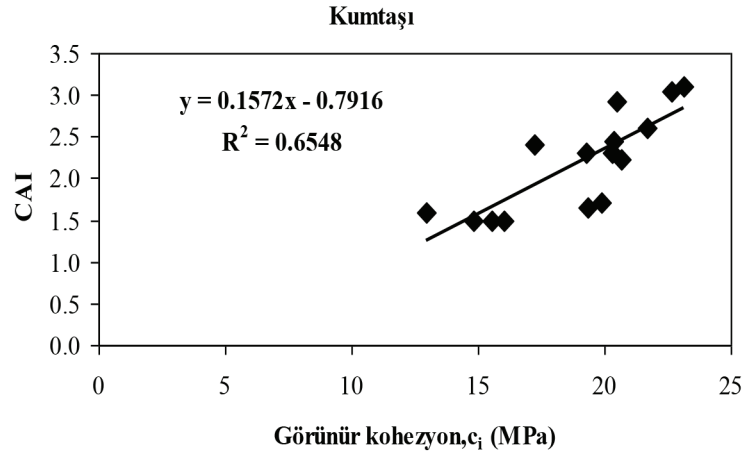
Şekil 6. Görünür kohezyon (c_i) ile CAI arasındaki ilişki.
Figure 6. Relationship between apparent cohesion (c_i) and CAI.



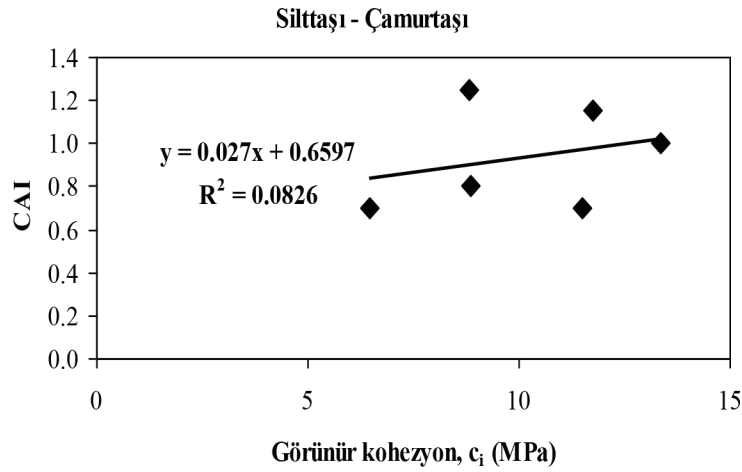
Şekil 7. İçsel sürtünme açısı (ϕ_i) ile CAI arasındaki ilişki.
Figure 7. Relationship between internal friction angle (ϕ_i) and CAI.

Çizelge 5. Deneysel verilerin basit regresyon modeliyle korelasyonu.
Table 5. Variation of experimental values with simple regression model.

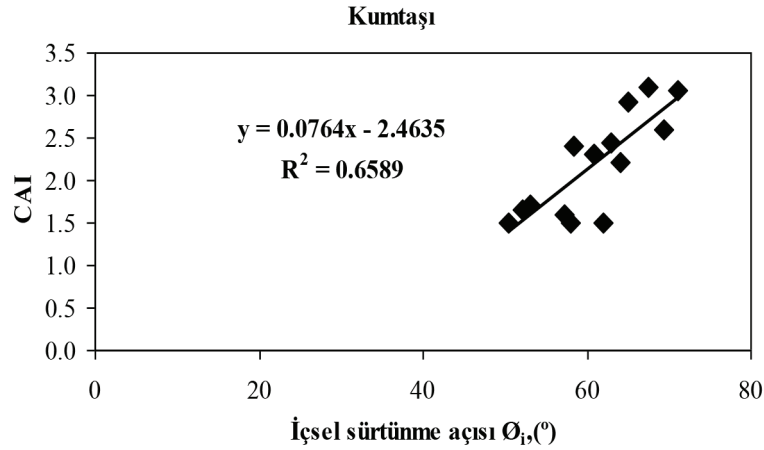
Değişkenler	Lineer Model	R ²
σ_c, CAI	$CAI = 0.0369(\sigma_c) - 1.253$	0.707
σ_t, CAI	$CAI = 0.4392(\sigma_t) - 1.705$	0.438
B_1, CAI	$CAI = 0.281(B_1) - 1.216$	0.331
B_2, CAI	$CAI = 18.329(B_2) - 13.339$	0.349
B_3, CAI	$CAI = 0.0059(B_3) - 0.171$	0.666
B_4, CAI	$CAI = 0.025(B_4) - 0.868$	0.673
c_i, CAI	$CAI = 0.1379(c_i) - 0.439$	0.803
ϕ_i, CAI	$CAI = 0.0851(\phi_i) - 3.065$	0.752



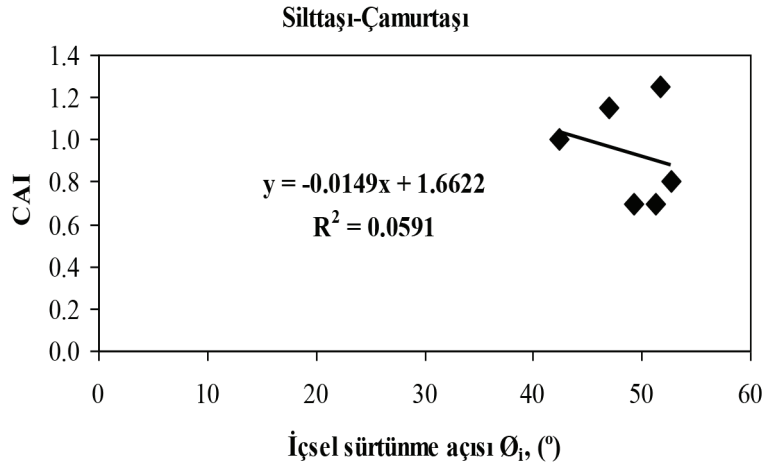
Şekil 8 Kumtaşı için görünür kohezyon (c_i) ile CAI arasındaki ilişki.
Figure 8. Relationship between apparent cohesion (c_i) and CAI for sandstone.



Şekil 9 Silttaşı-çamurtaşı için görünür kohezyon (c_i) ile CAI arasındaki ilişki.
Figure 9. Relationship between apparent cohesion (c_i) and CAI for siltstone-mudstone.



Şekil 10. Kumtaşı için içsel sürtünme açısı (ϕ_i) ile CAI arasındaki ilişki.
Figure 10. Relationship between internal friction angle (ϕ_i) and CAI for sandstone.



Şekil 11. Silttaşı-çamurtaşı için içsel sürtünme açısı (ϕ_i) ile CAI arasındaki ilişki.

Figure 11. Relationship between internal friction angle (ϕ_i) and CAI for siltstone-mudstone.

örnek kullanılmıştır. Farklı yanal basınçlardan elde edilen aksel basınç değerleri kullanılarak ISRM'nin (1983) önerdiği şekilde grafikler çizilmiş ve dayanım zarfları bulunmuştur. Deney verilerine göre çizilen yenilme zarflarından elde edilen denklemlerdeki katsayılar kullanılarak Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'dan kaya malzemesinin içsel sürtünme açıları ve görünür kohezyon değerleri bulunmuştur.

Kayaçların tek eksenli basınç, Brazilian çekme dayanımı ile içsel dayanım parametrelerinin (içsel sürtünme açısı ve görünür kohezyon) Cerchar aşınma indeksine olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, kayaçların gevreklik durumu dört farklı görgül bağıntıdan (B_1 , B_2 , B_3 ve B_4) hesaplanmış ve CAI ile olan etkileri de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Kumtaşlarının CAI değerlerinin 1.10 - 3.10 arasında, düşük-yüksek aşındırıcılık sınıfında olduğu iri ve orta taneli kumtaşlarında aşınma değerlerinin daha fazla olduğu bulunmuştur. Silttaşlarının CAI değerlerinin 0.55 - 1.25 yani düşük aşındırıcılık sınıfında yer aldığı saptanmıştır.

Kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarına bakıldığında genel olarak yüksek dayanım sınıfında yer aldığı görülmektedir. Sadece çamurtaşı ve bazı silttaşlarının dayanımlarının, kumtaşlarının dayanımlarına göre biraz daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Kayacın tek eksenli basınç dayanımının CAI üzerine etkisinin Brazilian dolaylı çekme dayanımına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir (sırasıyla $R^2 = 0.71$ ve $R^2 = 0.44$). Bu araştırmanın sonuçları ile

önceki araştırmacıların (Jaeger, 1988; Altındağ vd., 2009; Gharahbangh vd., 2011; Deliormanlı, 2012; Dipova, 2012) sonuçları karşılaştırıldığında sonuçlar arasında benzerlikler görülmektedir.

Dört farklı görgül bağıntıdan hesaplanan gevreklik değerleri (B_1 , B_2 , B_3 ve B_4) ile CAI arasında pozitif doğrusal ilişkiler bulunmasına rağmen en iyi korelasyon katsayıları B_3 ve B_4 için bulunmuştur (sırasıyla $R^2 = 0.666$ ve $R^2 = 0.673$). Bu sonuç, Altındağ vd. (2009) sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.

İçsel dayanım parametreleri (görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısı) ile CAI arasında pozitif doğrusal ilişkiler bulunmuştur (sırasıyla $R^2 = 0.80$ ve $R^2 = 0.75$). Kayaç tiplerine göre gruplandırılarak incelendiğinde, kumtaşlarında görünür kohezyonun CAI üzerine etkisinin ($R^2 = 0.65$) olduğu, silttaşları ve çamurtaşı için ise görünür kohezyonun CAI üzerine etkisinin ($R^2 = 0.08$) hiç etkisini olmadığı belirlenmiştir. Benzer durum içsel sürtünme açısı için de geçerli olduğu saptanmıştır (sırasıyla $R^2 = 0.66$ ve $R^2 = 0.06$). Bu durum, kayacın çimentolanma derecesi, tanelerin yuvarlaklılık - köşellilik durumu, tanelerin yönlenmesi, aşındırıcı mineral içeriğinin kayaç aşındırıcılığına daha fazla etkisi olabileceği durumunu ön plana çıkarmaktadır.

Sonuç olarak, kayacın dayanım parametrelerinin (tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, görünür kohezyonu ve içsel sürtünme açısı) Cerchar aşınma indeksine, dolayısıyla kayacın aşındırıcılığına doğrudan ve önemli derecede etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Katkı Belirtme

Yazar, bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a (Proje No: 110M437) ve Bülent Ecevit Üniversitesi Rektörlüğü'ne (Proje No: 2012-17-11-04) teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- AFNOR, (Organization of the French Standardization System) 2000. Determination du pouvoir abrasif d'une roche-Partie 1: Essai de raclure avec une pointe (NF P 94-430-1), Paris.
- Al-Ameen, Sl., and Waller, MD., 1994. The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasivity index. *Engineering Geology*, 4 (36), 293-301.
- Altındag, R., 2002. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blasthole drills. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102, 61-66.
- Altındağ, R., Şengün, N., Sarç, S., Mutlutürk, M., Güney, A. 2009. Evaluating the relations between brittleness and Cerchar abrasion index of rocks, Eurock 2009, ISRM Regional Sym. Croatia, 195-200.
- ASTM (American Society for Testing and Materials) 2010. Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method, Designation: D7625-10.
- Bilgin, N., 1982. Zonguldak kömür havzasındaki formasyonların jeomekanik özelliklerinin burju davranışlarına etkisi. Türkiye 3. Kömür Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Zonguldak, 95-111.
- Bilgin, N., 1989. İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Cerchar, 1986. Centre d'Etudes et des Recherches des Charbonages de France. The CERCHAR abrasivity index, Verneuil, France.
- Çopur, H., Bilgin, N., Tunçdemir, H., and Balcı, C., 2003. A set of indices based on indentation tests for assessment of rock cutting performance and rock properties, *Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 103 (9), 589-600.
- Deketh, HJR. 1995. Wear of Rock Cutting Tools. Laboratory Experiments on The Abrasivity of Rock. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Delioranlı, A.H., 2012. Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones. *Construction and Building Materials*. 30, 16-21.
- Dipova, N., 2012. Investigation of the relationships between abrasiveness and strength properties of weak limestone along a tunnel route. *Journal of Geological Engineering*, 36, 23-34.
- Fowell, RJ., and Johnson, ST., 1991. Cuttability assessment applied to drag tool tunnelling machines. *Proceedings of the 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Aachen, Germany, AA Balkema Publication Rotterdam.
- Fowell, RJ., and Abu Bakar, MZ., 2007. A review of the Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods. *Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Ribeiro e Sousa, Olalla and Grossmann (eds), Taylor & Francis Group, London.
- Gharahbagh, EA., Rostami, J., Ghasemi, AR., and Tonon, F., 2011. Review of rock abrasion testing. *Proceedings of the 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Y. Wang and F. Tonon (eds.), Shannon & Wilson Group, USA.
- Ghasemi, AR., 2010. Study of Cerchar abrasivity index and potential modifications for more consistent measurement of rock abrasion. M.Sc. Dissertation, Pennsylvania State University, USA. (unpublish).
- Hamzaban, MT., Memarian, H., Rostami, J., Ghasemi, AR., and Monfared, H., 2014. Study of rock-pin interaction in Cerchar abrasivity test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 72, 100-108.
- Hucka, V., and Das, B., 1974. Brittleness determination of rocks by different methods, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstract*, 11, 389-392.
- ISRM, 1978. Suggested method for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstract*, 15, 99-103.

- ISRM, 1979. Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstract*, 16, 135-140.
- ISRM, 1983. Suggested method for determining the strength of rock materials in triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstract*, 20, 285-290.
- ISRM, 2015. Suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar abrasivity test. *The ISRM Suggested Method for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, R. Ulusay [edt], Springer, USA, 101-106.
- Jaeger, W., 1988. An investigation into the abrasive capacity of rock. *Geotechnical Engineering and Engineering Geology*, 52, 99-104.
- Kahraman, S., Alber, M., Fener, M., and Günaydin, O., 2010. The usability of Cerchar abrasivity index for the prediction of UCS and E of Misis Fault Breccia: Regression and Artificial Neural Networks Analysis. *Expert Systems with Applications*, 37 (12), 8750-8756.
- Khandelwal, M., and Ranjith, P.G., 2010. Correlating index properties of rocks with P-wave measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 71 (1), 1-5.
- Lassnig, K., Latal, C., and Klima, K., 2008. Impact of grain size on the Cerchar abrasiveness test. *Geomechanics and Tunneling*, 1 (1), 71-76.
- Mathier, J.F., and Gisiger, J.P., 2003. Abrasivity of Icelandic basalts. In *Technology Roadmap for Rock Mechanics*, Proceeding of the 10th International Congress on Rock Mechanics, Johannes, The South African.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., and Spaun, G., 2003. Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar abrasiveness index (CAI). Technical Note, *International Journal of Rock Mechanics Mining Science*, 40, 259-263.
- Plinninger, R., Kasling, H., and Thuro, K., 2004. Wear prediction in hardrock excavation using the Cerchar abrasiveness index (CAI) value. *Proceedings of the 53rd ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 & Geomechanics Colloquy*, Salzburg, Austria, W. Schubert (ed.), AA Balkema Publ. Rotterdam.
- Rostami, J., Özdemir, L., Bruland, A., and Dahl, F., 2005. Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, J.D. Hutton and W.D. Rogstad (eds.), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Incorporated, USA.
- Schimazek, J., and Knatz, H., 1970. Der einfluss des gesteinsaufbaus auf die schnittgeschwindigkeit und den meisselverschleiß von strecken vortriebs maschinen. *Gluckauf*, 22, 274-278.
- Suana, M., and Peters, T., 1982. The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography. *Rock Mechanics*, 15 (1), 1-6.
- Thuro, K., and Kasling, H., 2009. Classification of the abrasiveness of soil and rock. *Geomechanics and Tunneling*, 2 (2), 179-188.
- Valantin, A., 1973. Examen des différents procédés classiques de détermination de la nocivité des roches vis-à-vis de l'abattage mécanique. *Exposé Présenté Aux Journées d'information Techniques de Creusement*, les 28-29 Novembre 1973, Luxembourg, 133-140.
- West, G., 1986. A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 4, 73-78.
- West, G., 1989. Rock abrasiveness testing for tunneling. Technical Note, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 26 (2), 151-160.
- Yaralı, O., Yasar, E., Bacak, G., and Ranjith, P.G., 2008. A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks. *International Journal of Coal Geology*, 74 (1), 53-66.
- Yaralı, O., and Soyer, E., 2011. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. *Scientific Research and Essays*, 6 (5), 1077-1088.