



Kayaçların Mekanik Özelliklerinin Cerchar Aşınma İndeksine Olan Etkilerinin Araştırılması

Investigation of the Effect into Mechanical Properties of Rocks on Cerchar Abrasivity Index

Olgay Yaralı

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

Öz

Bu çalışmada, Zonguldak Taşkömür Havzası kömür çevre kayaçlarının aşındırıcılıkları ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla, 29 kömür çevre kayacı üzerinde Cerchar aşınma (CAI), indeks (Shore sertlik ve nokta yükü dayanımı) ve dayanım (tek eksenli basınç ve Brazilian dolaylı çekme) deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, CAI ve dayanım, indeks deney sonuçları regresyon analizi ve istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, CAI ve tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, Shore sertlik ve nokta yükü dayanımı arasında pozitif doğrusal ilişkiler bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Brazilian çekme dayanımı, Cerchar aşınma indeksi, Kömür çevre kayaçları, Nokta yükü dayanımı, Shore sertlik indeksi, Tek eksenli basınç dayanımı

Abstract

In this study, the relationships between abrasiveness and some mechanical properties of coal measures rocks in Zonguldak Hard Coal Basin were investigated. For this purpose, Cerchar abrasivity (CAI), index (Shore scleroscope hardness, and point load strength) and strength (uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength) tests were carried out on 29 sedimentary rock samples. Then, relationships among CAI and strength, index test values were evaluated using regression analysis and statistical methods. As a result, positive linear relationships were found among CAI and uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Shore scleroscope hardness, and axial point load strength.

Keywords: Cerchar abrasivity index, Coal measures rocks, Uniaxial compressive strength, Point load strength, Shore scleroscope hardness

1. Giriş

Günümüzde gerek madencilik gerekse inşaat sektöründe yeraltı ve yerüstü yapıların kazısında hızlı ilerleme ve ekonomiklik önem kazanmıştır. Bu amaçla, ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olan ve çoğunlukla ithal edilen kazı makinalarının, kazı amacına göre seçilmesi çok önem kazanmaktadır. Makinanın yanlış seçimi veya keski tüketiminin yanlış belirlenmesi kazı maliyetlerinin artmasına hatta proje sürelerinin uzamasına neden olmaktadır (Bilgin 1982).

Kayaçların aşındırıcılık özelliği delinebilirliği-kazılabilirliği etkilediğinden, kazılan m³ kayaç başına keskinin

aşınmasının belirlenmesi gereklidir. Keski ucu aşınmasının; makinanın ilerleme hızına, uygulanan kuvvetlere ve enerji sarfiyatına olumsuz etkileri olacaktır. Körelmiş keskinin ile daha fazla kesme kuvveti harcanmakta ve daha az ilerleme kaydedilmektedir (Fowell ve Johnson 1991). Mekanik kazı sistemlerinde, kayaçla devamlı temasta olan herhangi bir keski, bir süre sonra aşınmakta ve kullanılmaz hale gelmektedir. Keski masraflarının tüm kazı maliyetinin 1/3'üne vardığı durumlara da rastlanmaktadır (Bilgin 1982). Bu nedenle, bir kazı sistemi tasarımı yapılmadan, kazı yapılacak formasyonların mekanik ve petrografik özelliklerinin bilinmesi ve ne kadar keski harcanacağı tahmin edilerek makina tipinin iyi tespit edilmesi gerekmektedir (Bilgin 1989, Fowell ve Johnson 1991, Hamzaban vd. 2014).

Bir mekanik kazıda, keski tüketiminin fazla olması sadece keski tüketim maliyetlerini değil, onarım ve keskinin değiştirme sürelerinin artmasından dolayı oluşan kazı

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: oyarali67@gmail.com

maliyetlerini de olumsuz etkileyecektir (Fowell ve Abu Bakar 2007, Hamzaban vd. 2014).

Kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesine yönelik birçok deney yöntemi önerilmiş olmasına rağmen 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 deney sonuçlarını kullandıkları görülmektedir (Rostami vd. 2005, Thuro ve Kasling 2009, Kahraman vd. 2010, Deliormanlı 2012, Yasar vd. 2015, Su 2016).

Literatürde birçok araştırmacı (Schimazek ve Knatz 1970, Suana ve Peters 1982, West 1986, Al-Ameen ve Waller 1994, Deketh 1995, Plinninger vd. 2003, Mathier ve Gisiger 2003, Plinninger vd. 2004, Yaralı et al 2008, Lassnig vd. 2008, Thuro ve Kasling 2009, Kahraman et al. 2010, Deliormanlı 2012) madencilik ve tünelticilik uygulamalarında kullanılan keskinlerdeki aşınmaya etki eden parametreler üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır ve aşınmaya etkili olan başlıca parametreler; kayacın dayanımı ve sertliği, mineral bileşimi, mineral tanelerinin boyutu, kazıcı uç geometrisi, keskinin kesme derinliği ve kesme hızı, keskinin oluşturdukları darbe yükleri, kesme tipi veya keskinin hareket şekli, keskiye veya kayaç yüzeyine uygulanan soğutma sıvısı, etkin kesme veya ufalanma, keskinin kalitesi, tungsten karbürün metalurjik yapısı ve kazı şartları ve işletme faktörüdür.

Cerchar Aşınma İndeksi 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 indeks deneyi için önerilmiş üç tane deney yöntemi önerisi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, 1986 yılında Cerchar Enstitüsü'nün önerdiği NF P94-430-1 nolu yöntem (AFNOR 2000), ikincisi ASTM D7625-10 (2010) tarafından önerilen yöntem ve sonuncusu da ISRM (2015), tarafından önerilen yöntemdir. Günümüzde Cerchar aşınma indeks deneyi için kullanılmakta olan çeşitli sınıflandırma sistemleri bulunmaktadır. ISRM (2015), tarafından önerilen Cerchar aşınma indeksine göre aşındırıcılık sınıflaması Çizelge 1'de verilmiştir.

Bir çok araştırmacı kayaçların petrografik özellikleri (kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin miktarı, kuvars ortalama tane boyutu kayacın çimentolanma derecesi ve çimento türü, vb.), fiziksel (porozite, yoğunluk) ve mekanik

özellikleri (dayanım, sertlik) ile Cerchar aşınma indeksi (CAI) arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Çizelge 2'de kayaç özellikleri ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki ilişkiler özetlenmiştir.

Cerchar aşınma indeks deneyi basit ve tekrarlanabilirliği yüksek bir deney yöntemi olmasına rağmen bir çok parametre bu deney yöntemini ve sonuçları etkilemektedir. Bu parametreler; farklı deney aleti kullanımı (Şekil 1), farklı metalurjik özellikte ve sertlikte uç kullanımı, örnek yüzeyinin pürüzlü veya düzgün kullanımı, aynı yönde veya farklı yönlerde çizme işleminin yapılması, Cerchar aşınma indeks deneyinde kullanılmış ve aşınmış ucun mikroskop altında farklı konumlarda (yatay ve düşey konumda) değerlendirilmesi (Şekil 2), çizme mesafesi, uçlara uygulanan kuvvettir.

Sınırlı sayıda araştırmacı Cerchar deneyini etkileyen parametreler üzerinde araştırmalar yapmıştır ve Çizelge 3'de özetlenmiştir.

Bu çalışmanın iki amacı vardır. Birincisi, Zonguldak Taşkömür Havzası'nda yürütülen mekanize kazı çalışmalarında (HEMA A.Ş. Amasra Taşkömür İşletmesi'nde ana galerilerin kollu galeri açma makinalarıyla açılması işi, Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) Üzümez ve Amasra Müesseselerinde dik ve kalın damarların üretiminde mekanize kazı yöntemi uygulamaları) kullanılan makinaların performansını ve keski tüketimini belirlemeye yönelik deneylerden bahsederek, uygulamacılara veya mühendislere Havza kömür çevre kayaçlarının mekanik ve aşındırıcılık özellikleri hakkında bilgi vermektir. İkincisi ise mekanize kazı makinalarında kullanılan keskinlerin tahmini tüketimlerinin belirlenmesinde kullanılan Cerchar aşınma indeksi (CAI) deney yöntemini tanıtmak ve kayaçların mekanik özelliklerinin CAI'ya olan etkilerini ortaya koymaktır.

Çizelge 1. Cerchar aşınma indeks sınıflaması (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

2. Gereç ve Yöntem

Bu çalışmada, Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) bağlı farklı Müesseselerden alınan kömür çevre kayaç örnekler üzerinde Cerchar aşınma indeks, tek eksenli basınç dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, nokta yükü dayanımı indeks deneyleri ile Shore sertlik indeks deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4'de örneklerin isimleri ile alındığı yerler gösterilmiştir.

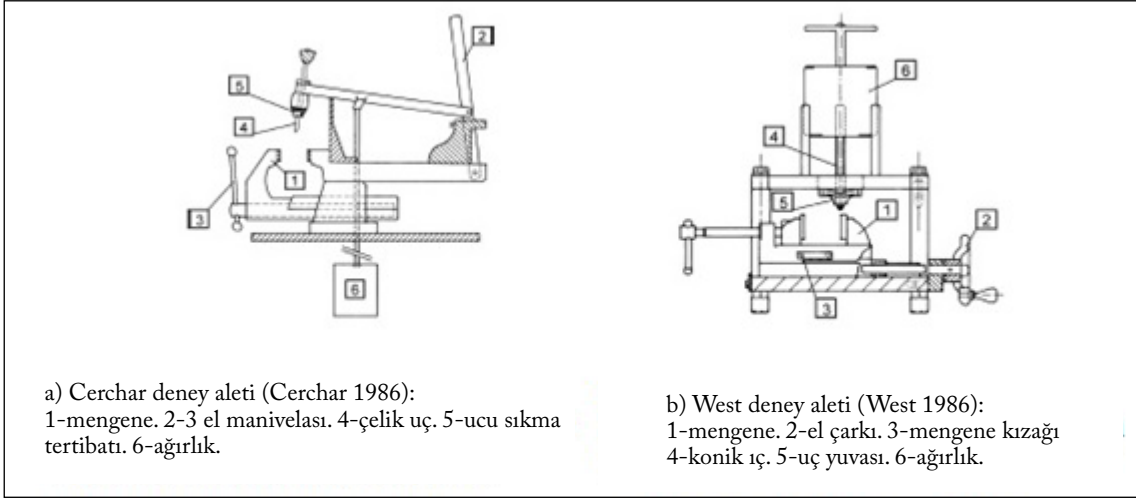
2.1. Cerchar aşınma indeksi

ISRM (2015) göre Cerchar aşınma indeksi (CAI) deneyi, birinci nesil (klasik) deney aleti (Şekil 1a) için 1 ± 0.5 saniye, ikinci nesil (West) deney aleti (Şekil 1ba) için 10 ± 2 saniye boyunca ve 70 N'luk statik yük altında, 2000 N/mm^2 çekme dayanımına sahip standart krom vanadyum alaşımli soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş Rockwell Sertliği 55 ± 1 olan ve 90° tepe açılı konik bir ucun taze kırılmış bir kayaç

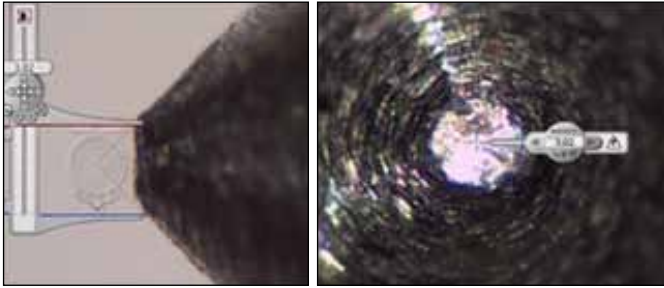
Çizelge 2. Kayaç özellikleri ile CAI arasındaki korelasyonlar.

Parametre	Araştırmacı	CAI ile korelasyon
Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c	Jaeger (1988)	CAI ile tek eksenli basınç dayanımı arasında pozitif lineer bir ilişki (Deneyler oldukça sert ve kuvars içeren beton karışı üzerinde yapılmıştır).
	Al-Ameen ve Waller (1994)	$CAI = -1.38 + 0.05(\sigma_c) - 0.0001(\sigma_c)^2$ R=0.76
	Kahraman vd. (2010)	$\sigma_c = -366 - 0.9(VBP) + 155.8(d) + 10.7(Vp) + 16.7CAI$ R=0.84
	Gharahbangh vd. (2011)	$CAI_{42-HRC-Pürüzlü}$ ve $CAI_{54-HRC-Pürüzlü}$ ile tek eksenli basınç dayanımı arasında pozitif lineer bir ilişki
	Deliormanlı (2012)	$\sigma_c = 54.457(CAI) + 18.26$ R=0.90
	Dipova (2012)	$\sigma_c = 30.07(CAI) + 32.89$ R=0.61
Brazilian çekme dayanımı, (σ_t)	Dipova (2012)	$\sigma_t = 2.99(CAI) + 3.35$ R=0.70
	Deliormanlı (2012)	$\sigma_t = 7.72(CAI) + 2.87$ R=0.89
P-dalga hızı (V_p)	Khandelwal ve Ranjith (2010)	$CAI = 0.0009(V_p) + 1.9375$ R=0.82
Porozite (n)	Alber (2008)	$CAI = 0.01310 + 0.0094(n)$
Kuvars içeriği (Q_c , %)	West (1986, 1989) Yaralı vd. (2008)	CAI ile kuvars içeriği arasında pozitif lineer ilişki $CAI = 0.0309(Q_c) - 0.0795$ R=0.62
Eşdeğer kuvars içeriği (Q_{eqv} , %)	Sauna ve Peters (1982) Plinninger vd. (2003)	CAI ile eşdeğer kuvars içeriği arasında pozitif lineer ilişki 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) Yaralı vd. (2008) Gharahbangh vd. (2011)	$CAI_{düz} = 0.127(Q_{eqv}) - 7.45(\text{tane boyutu}) + 2.008$ $CAI = 0.0313(Q_{eqv}) - 0.1619$ R=0.89
	Rostami vd. (2005)	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. $CAI_{54-HRC-Pürüzlü} = 0.0151(\sigma_c)^{0.788} \cdot (Q_{eqv})^{0.377}$ $CAI_{55-HRC-Pürüzlü} = 0.056(\sigma_c)^{0.431} \cdot (Q_{eqv})^{0.448}$
Delme oranı indeksi (DRI)	Yaralı vd. (2008)	$CAI = -4.6786(DRI) + 74.929$ R=0.54
	Yaralı vd. (2014)	$CAI = -4.7424(DRI) + 75.35$ R=0.56
	Yasar vd. (2015)	$CAI = -2.092 \ln(DRI) + 9.83$ R=0.77

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



Şekil 1. Cerchar aşınma indeks deney aletleri (Plinninger vd. 2003).



Şekil 2. Aşınmış uçların bioküler mikroskop altında yatay (sol taraftaki), düşey (sağ taraftaki) konumda ölçümleri (Duru 2014).

yüzeyinde 10 mm çekilmesi şeklinde gerçekleştirilen deney yöntemi olarak tarif edilmektedir.

CAI deneylerinde ISRM (2015)'in önerdiği yöntem izlenmiştir. Her seferinde yeni uçlar kullanılmış, 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 5'de verilmiştir.

2.2. 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, 200 ton kapasiteli hidrolik preste ve ortalama 0.5 MPa/s yükleme hızında

yapılmıştır. Deney sonuçlarından kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı Eşitlik 4'den bulunmuştur. Çizelge 3'de deney sonuçları ile değerlendirilmesi verilmiştir. Deney sonuçları ve dayanım sınıfı Çizelge 5'de verilmiştir.

$$\sigma_c = 4000 * F/\pi D^2 \quad (4)$$

Burada;

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

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

2.3. 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 5'den hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 5'de verilmiştir.

$$\sigma_t = 0.636 F / D * t \quad (5)$$

Burada;

σ_t : Brazilian çekme dayanımı, (MPa)

F: Örneğin yenilme anında uygulanan yük, (kN)

D: Örnek çapı, (mm)

t: Örnek kalınlığı, (mm)

Çizelge 3. Cerchar aşınma indeks deneyini etkileyen parametreler.

Parametre	Araştırmacı	CAI üzerine etkisi
Deney aleti	Plinninger vd. (2003) Rostami vd. (2005) Ghasami (2010) Yaralı vd. (2013) ASTM (2010) ISRM (2015)	Bütün araştırmacılar, her iki deney aletinden (klasik ve West) alınan ortalama CAI değerleri arasında fark olmadığını bulmuşlardır. Klasik deney aletinin West deney aletine göre yaklaşık %1 daha fazla değer verdiğini saptamışlardır. Her iki deney aletini kullanmayı önermektedir. Her iki deney aletini kullanmayı önermektedir.
Uç sertliği	Michalakopoulos vd. (2006) Rostami vd. (2005) Stanford ve Hagan (2009) Yaralı vd. (2013) Duru (2014) ISRM (2015) ASTM (2010) ISRM (2015)	$CAI_{HRC-55} = 0.110914 + 0.587356 * CAI_{HRC-40}$ $CAI_{HRC-55} = 0.725 * CAI_{HRC-40}$ $CAI = 5.80 - 0.0766 * (Uç\ sertliği, HRC)$ Varyasyon katsayısı değişimlerine göre CAI deneyinde HRC40 altında, HRC56'nın üstündeki sertliğindeki uçların kullanımının uygun olmayacağı, genel eğilime bakıldığında mevcut uygulamanın HRC54-56 sertliğinde yapılan CAI deneylerinin tekrarlanabilirliği açısından problem yaratmayacağı sonucunu bulmuşlardır. Ayrıca, uç sertliği arttıkça ortalama CAI değerlerinin hem klasik hem de West aletinde düştüğünü saptamışlardır. Varyasyon katsayısı değişimlerine göre, klasik deney aletinde en uygun uç sertliği HRC40-42, HRC44-46, HRC48-50 olduğu, West aletinde ise en uygun sertlikteki uç HRC44-46 olduğunu bulmuştur. Farklı sertlikteki uçlarla CAI deneyi yapılması durumunda HRC55 sertliğine göre düzeltme yapılması gerektiğini vurgulamıştır (Eşitlik 1). $CAI = 0.145CAI_{(x)} / (1 - 0.0107x)$ (1) Burada; $CAI_{(x)}$: HRCx sertliğindeki uç kullanılarak ölçülen CAI değeri. Her iki standart da en uygun uç sertliği olarak HRC54±1 kullanmayı önermektedir.
Örnek yüzeyi (düzgün veya pürüzlü)	West (1989) Suana ve Peters (1982) Al-Ameen ve Waller (1994) Plinninger vd. (2003) Rostami vd. (2005) Thuro ve Käsling (2009) Ghasami vd. (2011) Yaralı vd. (2013)	Düz yüzey önermiştir. Düz yüzey önermişlerdir. Bu araştırmacılar deneylerini hem düzgün hem de pürüzlü yüzeylerde yapmışlar fakat deney sonuçlarının hemen hemen aynı olduğunu bulmuşlardır. Daha sert kayac örneklerinde, pürüzlü yüzeylerden elde edilen CAI değerlerinin düz yüzeylerden elde edilen CAI değerlerine göre yaklaşık 0.5 daha yüksek olduğunu bulmuşlardır (Eşitlik 2). $CAI_{Pürüzlü} = 0.99CAI_{Düz} + 0.48$ (2) Kayaç daha sert ve aşındırıcı oldukça düz ve pürüzlü yüzeyler arasındaki ölçüm farkının arttığı sonucuna varmışlardır. Al-Ameen ve Waller (1994) ile Plinninger vd. (2003) ile benzer sonuçlar bulmuşlardır. Düz yüzeyler ve pürüzlü yüzeyler üzerinde yapılan CAI deney sonuçlarının hemen hemen aynı olduğunu bulmuşlardır. Pürüzlü yüzeylerden elde edilen CAI değerlerinin düz yüzeylerden elde edilen CAI değerlerine göre %18 ile %23 arasında fazla olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 3. Devam

Parametre	Araştırmacı	CAI üzerine etkisi
	Duru (2014)	6 farklı sertlikteki uçlar kullanarak elde edilen CAI değerlerinin düz yüzeylerden elde edilen CAI değerlerine göre yaklaşık ortalama olarak %20 daha fazla olduğu bulunmuştur. ASTM (2010) ve ISRM (2015), genel olarak pürüzlü yüzeye sahip örnekler üzerinde deney yapmayı önermiştir. ASTM (2010) pürüzlü yüzeye sahip örneklerin yüzeylerinin makul oranda pürüzlü olmasını önerirken, ISRM (2015), Brazilian deneylerinden elde edilen pürüzlü yüzeye sahip örnekler kullanılmasını önermiştir. ASTM (2010)' göre düz yüzeye sahip örneklerden elde edilen CAI değerleri Eşitlik 1'e göre normalize edilmelidir. ISRM (2015)'e göre ise düz yüzey üzerinde okunan uç yüzeyinin aşınmasına Eşitlik 3'ye göre düzenlenerek kullanılmasını önermiştir. $d=1.14 d_{düz}^{0.3}$ (3) Burada; d: ucun aşınmış yüzeyinin çapı
Çizime işleminin yönü ve sayısı	Cerchar (1986) Stanford ve Hagan (2009) ASTM (2010) ISRM (2015)	İnce taneli ve homojen örnekler için birbirine paralel 2-3 çizimin yeterli olacağını, tane boyutu 1 mm'den daha büyük örneklerde 5 veya daha fazla çizim yapılmasını önermiştir. Yedi çizim yapılmasını, en büyük ve en küçük ölçüm değerini çıkararak ortalama CAI bulunmasını önermiştir. Beş çizim önermiş, tabakalanma veya farklı renkleri için 3 adet aynı yönde, 2 veya daha fazla çizimi de önceki üç çizime dik yönde yapılmasını önermiştir. 5 çizimi aynı yönde ve kenar etkisinden kaçınmak için örnek kenarından en az 5 mm uzakta, çizikler arası 5 mm olacak şekilde yapılmasını önermiştir.
Örnek boyutları	ASTM (2010) Yaralı vd. (2013) ISRM (2015)	Karot veya düzensiz şeklideki örneklerin çaplarının ve boyunun 50 mm olmasını önermiştir. Yaklaşık 54 mm çaplı, 25 mm kalınlığındaki NX karot örnekler kullanılmasını önermişlerdir. Karot veya düzensiz şekildeki örnek kullanılabilceğini belirtmiştir.
Uçtaki aşınmanın ölçümü	ASTM (2010) ISRM (2015) Yaralı vd. (2013)	Her iki standart mikroskop altında yandan ölçümü önermiştir. Deneysel çalışmalarda, yatay ve düşey okumalar arasında önemli bir fark bulunmuşlardır. Ancak düşey okuma sonuçları yatay okuma sonuçlarına göre %1 daha fazla olduğu belirlenmiştir.
Mikroskop	Plinninger vd. (2003) ASTM (2010) ISRM (2015) Yaralı vd. (2013)	50x büyütmeli mikroskop kullanılmasını, Minimum 30x büyütmeli mikroskop kullanılmasını, 25x büyütmeli optik ve dijital mikroskop kullanılmasını, Minimum 35x büyütmeli dijital mikroskop kullanılmasını, önermişlerdir.

Çizelge 3. Devam

Parametre	Araştırmacı	CAI üzerine etkisi
Çizme mesafesi	Cerchar (1986) Al-Ameen ve Waller (1994) Pinninger vd. (2003) Ghasami (2010) Yaralı vd. (2013)	Çizme mesafesi 10 mm olarak tarif edilmiştir. Çeşitli çizme mesafeleri (1, 2, 3, 5, 7 ve 10 mm) kullanarak CAI deneyleri yapılmıştır. Bu araştırmacılar, ucun ilk baştaki yatay hareketi sonucunda ucun uç kısmında yatay bir alanda aşınmanın başladığını ve aşınmanın büyük bir kısmının ilk 4 mm içerisinde gerçekleştiğini vurgulamışlardır. Geriye kalan aşınmanın da aşındırıcı mineral içeriğine ve mineralleri bir arada tutan kayacın matrisine bağlı olduğunu da belirtmişlerdir. Çizme mesafesinin ilk milimetrelerinde aşınmanın %70'inin gerçekleştiğini gözlemişlerdir. CAI'nın yaklaşık %85'inin ilk 2 mm içerisinde ve geriye kalan sadece %15'lik kısmın ise son 8 mm'lik çizme mesafesinde olduğunu bulmuşlardır. Ancak aşınmanın 10 mm'den sonra da devam ettiğini, fakat önemsiz olduğunu vurgulamışlardır. Çok aşındırıcı ve sert kayaçlarda 10 mm'lik çizme mesafesinin yeterli olmayacağını savunmuşlardır. İlk 4 mm'de aşınmanın %70 – 75'inin gerçekleştiği ve aşınmanın 14-16 mm'den sonra sabitlenme eğilimi gösterdiği, bu sebeple, CAI deneylerinde 15 mm'lik çizme mesafesinin daha uygun olacağı belirlenmiştir.

2.4. Shore sertlik indeksi deneyi

Bu deneyde amaç, düzgün şekilli (prizmatik veya silindirik) kaya örneklerinin Shore sertliğinin ölçülmesidir. Deneyler Altındağ ve Güney (2006)'ya göre karot örnekleri (54 mm çaplı, 30 mm kalınlığında) üzerinde 20 okuma yapılmış ve okumaların ortalaması Shore sertliği olarak bulunmuştur. Deney sonuçları Çizelge 5'de verilmiştir.

2.5. Nokta yükü dayanımı indeksi deneyi

Bu deney, kayaçların dayanımlarına göre sınıflandırılmasında ISRM tarafından önerilen indeks bir dayanım deneyidir. Kaya malzemesinin önemli dayanım parametrelerinden tek eksenli basınç ve çekme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerinin dolaylı olarak belirlenmesinde ve kayacın dayanım anizotropi indeksinin bulunmasında kullanılır (ISRM 1985). Bu çalışmada, nokta yükleme deneyleri çapsal (karot eksenine dik yönde yükleme) olarak yapılmış olup H (yükseklik)/D (çap) oranı 1'den büyük olan örnekler üzerinde ve her bir kayaç için 10 kez tekrarlanmıştır. Nokta yükü dayanımı indeksi Eşitlik 6'dan yararlanılarak bulunmaktadır. Deney sonuçları Çizelge 5'de verilmiştir.

$$I_{s(50)} = F / D_e^2 \quad (6)$$

Burada ;

Çapsal deneylerde $D_e^2 = D^2$ olmaktadır.

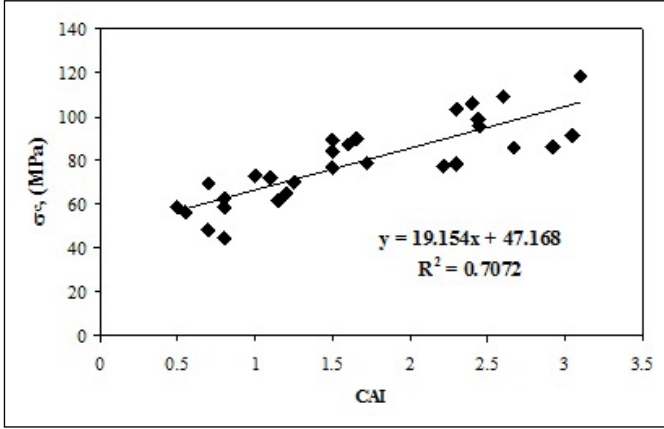
$I_{s(50)}$ = Düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi, (MPa);
F = Kırılma yükü. (kN); D= Karot çapı (mm), D_e = Eşdeğer karot çapı (mm²)dir.

3. Bulgular

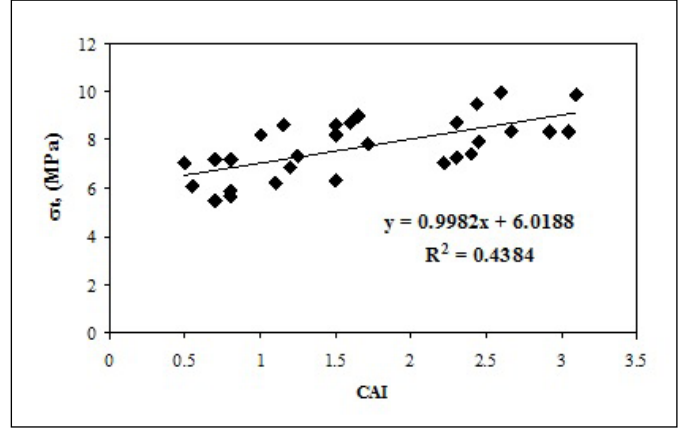
29 adet kömür çevre kayacı üzerinde yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5'e göre tek eksenli basınç dayanımı orta- yüksek dayanım sınıfında olan kömür çevre kayaçlarının CAI değerlerinin genel olarak düşük-orta aşındırıcılık sınıfında olduğu görülmektedir. Elde edilen deneysel veriler basit regrasyon analizi ile birbirleriyle karşılaştırılmıştır ve Çizelge 6'da gösterilmiştir. Bu kısımda sadece CAI ile kayaçların dayanım ve indeks değerleri arasındaki değişimleri grafik olarak verilmiştir. Şekil 3'de CAI ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki, Şekil 4'de de CAI ile Brazilian çekme dayanımı arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Her iki durumda da kayaçların dayanımlarının kayaç aşındırıcılığı üzerinde etkisi görülmektedir.

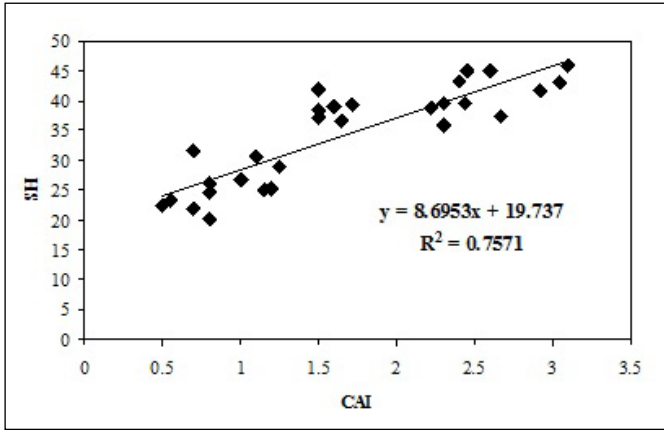
Şekil 5'de CAI ile Shore sertlik indeksi arasında doğrusal bir ilişki söz konusu olup korelasyon katsayısı değeri



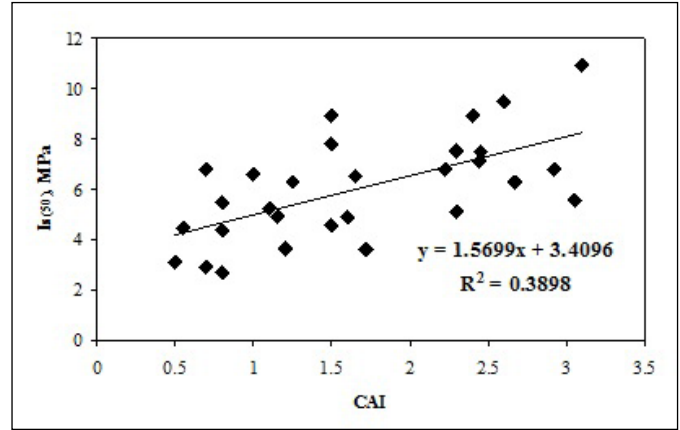
Şekil 3. CAI ile tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) arasındaki ilişki.



Şekil 4. CAI ile Brazilian çekme basınç dayanımı (σ_t) arasındaki ilişki.



Şekil 5. CAI ile Shore sertlik indeksi (SH) arasındaki ilişki.



Şekil 6. CAI ile nokta yükü dayanımı ($I_{s(50)}$) arasındaki ilişki.

($R^2=0.757$), CAI ile karşılaştırılan diğer büyüklüklere göre daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, örnek yüzeyinin sertliğinin kayaç aşındırıcılığı üzerinde daha fazla etkisini göstermektedir. Şekil 6'da da CAI ile nokta yükü dayanımı doğrusal bir ilişki olmasına rağmen düşük korelasyon katsayısı vardır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Zonguldak Bölgesi kömür çevre kayaçlarının dayanım ve indeks özelliklerinin Cerchar aşınma indeksine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, Zonguldak taşkömürü havzasından TTK'ya bağlı farklı Müessese'lerden alınan 29 farklı kayaç üzerinde dayanım (tek eksenli basınç, Brazilian çekme dayanımı) ve indeks deneyleri (Shore sertlik ve nokta yükü dayanımı) ile kayaçların aşındırıcılıklarını belirlemek için Cerchar aşınma indeks deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar önceki araştırmacıların (Jaeger 1988, Gharahbangh vd. 2011, Deliormanlı

2012 ve Dipova 2012) benzer çalışmalarıyla karşılaştırıldığında sonuçlar arasında paralellik görülmektedir. Kumtaşların CAI değerlerinin 1.10 - 3.10 arasında, düşük -yüksek aşındırıcılık sınıfında olduğu iri ve orta taneli kumtaşlarında aşınma değerleri daha fazla olduğu bulunmuştur. Silttaşlarının CAI değerlerinin 0.55 - 1.25 yani düşük aşındırıcılık sınıfında yer aldığı saptanmıştır. Bunun nedeni, kumtaşlarının çimentolanma derecesinin silttaşlarına göre daha yüksek olması ve çimento türünün silis olmasından kaynaklanmaktadır. Kumtaşlarında yapılacak mekanize kazılarda silttaşlarına göre daha fazla keski tüketimi beklenecektir.

- 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 az düşük bulunmuştur. Kumtaşlarında yapılacak kazı ve delme çalışmaları için daha güçlü makineler seçilmesi gerekecektir.

Çizelge 4. Örnek alım yerleri.

No	Örneklerin Alındığı Müessese	Yer	Örnek Adı
1	TTK Üzümez	-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	İri taneli kumtaşı
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

- Shore sertlik değerleriyle CAI arasında doğrusal artan bir ilişki elde edilmiştir ($R^2=0.76$). Bu durum incelenen kayaçların çimentolanma derecelerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da, kayacın aşındırıcılığına kayaç yüzeyinin sertliğinin de etkisini göstermektedir.
- İncelenen kayaçlarının tek eksenli basınç dayanımları (σ_c) ile aşındırıcılıkları ve sertlikleri (SH) arasında doğrusal ilişkiler bulunmuştur (sırasıyla $R^2=0.707$, $R^2=0.757$). Literatüre göre kazı makinası seçiminde temel parametre

kayacın tek eksenli basınç dayanımı kabul edilmektedir. Bazı araştırmalar makine seçiminde ve keski tüketimi tahmininde kayacın dayanımının yeterli olacağını savunmaktadır. Bu araştırma sonucunda kayaçların dayanımı, sertlikleri ve aşındırıcılıkları arasında doğrusal ilişkilerin olduğu bulunmuştur. Bu da mekanize bir kazı makinası seçilirken sadece dayanım veya sadece sertlik değil birçok parametrenin bir arada değerlendirilerek seçim yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 5. Deney sonuçları.

No	Örnek Adı	CAI	Sınıflama	σ_c (MPa)	Dayanım Sınıfı	σ_t (MPa)	Shore Sertlik (SH)	$I_s^{(50)}$ MPa
1	Orta taneli kumtaşı	2.45± 0.78	Orta	95.60 ± 7.19	Yüksek	7.93 ± 0.72	45.00± 2.52	7.49± 0.54
2	İri taneli kumtaşı	3.05± 0.84	Yüksek	91.40 ± 11.52	Yüksek	8.34± 0.67	42.97± 1.79	5.57± 0.98
3	Orta taneli kumtaşı	1.60± 0.34	Düşük	87.36 ± 20.76	Yüksek	8.71 ± 1.40	38.95± 2.33	4.87± 0.89
4	Orta taneli kumtaşı	1.50± 0.36	Düşük	77.05 ± 3.02	Yüksek	6.28 ± 0.91	38.36± 1.71	4.54± 0.70
5	Orta taneli kumtaşı	1.50± 0.34	Düşük	84.20 ± 16.40	Yüksek	8.60 ± 1.10	37.17± 1.90	8.94± 0.99
6	İri taneli siltaşı	1.15± 0.62	Düşük	61.51 ± 22.76	Yüksek	8.63 ± 1.76	24.95± 2.85	4.94± 0.88
7	İri taneli siltaşı	1.00± 0.32	Düşük	73.20 ± 9.20	Yüksek	8.20 ± 0.40	26.8± 2.12	6.63± 0.52
8	İri taneli siltaşı	1.25± 0.64	Düşük	70.10 ± 11.80	Yüksek	7.30 ± 0.50	28.8± 3.40	6.29± 0.52
9	İri taneli siltaşı	0.80± 0.24	Çok düşük	62.50 ± 6.86	Yüksek	7.18 ± 0.82	24.55± 2.61	5.48± 0.61
10	Çamurtaşı	0.80± 0.25	Çok düşük	44.65 ± 11.62	Orta	5.89 ± 2.65	20.15± 2.95	2.69± 0.57
11	Çamurtaşı	0.70± 0.32	Çok düşük	47.81 ± 9.10	Orta	5.45 ± 2.10	21.95± 2.82	2.90± 0.52
12	İri taneli kumtaşı	2.40± 0.77	Orta	106.30 ± 13.61	Yüksek	7.42 ± 0.90	43.3± 2.12	8.94± 1.37
13	Orta taneli kumtaşı	2.30± 0.68	Orta	103.40 ± 12.01	Yüksek	7.29± 1.18	39.60± 3.53	7.54± 1.42
14	Orta taneli kumtaşı	1.65± 0.44	Düşük	89.79 ± 9.16	Yüksek	8.98± 1.22	36.58± 2.60	6.51± 1.52
15	İri taneli kumtaşı	1.72± 0.46	Düşük	78.65 ± 7.26	Yüksek	7.84 ± 0.86	39.36± 3.53	3.62± 1.79
16	İri taneli kumtaşı	3.10± 0.94	Yüksek	118.70 ± 18.20	Yüksek	9.89± 0.40	45.85± 2.60	10.94± 1.45
17	İri taneli siltaşı	0.70± 0.54	Çok düşük	69.50 ± 9.70	Yüksek	7.20 ± 0.90	31.65± 5.66	6.78± 0.87
18	İri taneli kumtaşı	2.92± 0.83	Orta	86.20 ± 5.36	Yüksek	8.32 ± 1.08	41.65± 11.31	6.82± 0.86
19	Orta taneli kumtaşı	2.22± 0.55	Orta	77.30 ± 1.64	Orta	7.06± 0.91	38.85± 4.24	6.82± 0.86
20	Orta taneli kumtaşı	1.50± 0.48	Düşük	89.20 ± 10.50	Yüksek	8.20 ± 0.52	41.95± 9.31	7.81± 0.61
21	İri taneli kumtaşı	2.60± 0.64	Orta	109.40 ± 14.70	Yüksek	9.94± 0.40	44.95± 9.19	9.49± 1.06
22	İri taneli kumtaşı	2.30± 0.68	Orta	78.10 ± 10.60	Yüksek	8.70 ± 1.04	35.76± 6.12	5.10± 1.79
23	İri taneli kumtaşı	2.44± 0.74	Orta	98.64 ± 9.21	Yüksek	9.48 ± 1.54	39.60± 5.00	7.10± 0.61
24	İri taneli siltaşı	0.50± 0.18	Çok düşük	58.31 ± 3.12	Orta	7.03 ± 1.36	22.55± 2.39	3.12± 0.18
25	İri taneli siltaşı	1.20± 0.24	Düşük	64.81 ± 6.78	Yüksek	6.84± 1.64	25.10± 2.17	3.66± 0.35
26	İnce taneli kumtaşı	1.10± 0.28	Düşük	72.14 ± 6.16	Yüksek	6.21 ± 0.63	30.61± 4.62	5.25± 0.61
27	İri taneli kumtaşı	2.67± 0.78	Orta	85.56 ± 8.41	Yüksek	8.32 ± 0.46	37.41±1.14	6.30± 0.52
28	İri taneli siltaşı	0.55± 0.24	Çok düşük	56.37 ± 3.12	Orta	6.05 ± 1.05	23.25± 2.07	4.45± 0.49
29	İri taneli siltaşı	0.80± 0.38	Çok düşük	58.72 ± 5.83	Orta	5.65 ± 1.20	26.15± 2.78	4.38± 0.48

Çizelge 6. Deneysel verilerin basit regrasyon modeliyle korelasyonu.

Değişkenler	Linear Model	R ²
CAI, σ_c	$\sigma_c = 19.154CAI + 47.168$	0.707
CAI, σ_t	$\sigma_t = 0.9982CAI + 6.0188$	0.438
CAI, SH	$SH = 8.6953CAI + 19.737$	0.757
CAI, $I_{S(50)}$	$I_{S(50)} = 1.5699CAI + 3.4096$	0.390
σ_c, σ_t	$\sigma_c = 11.233 \sigma_t - 7.1655$	0.553
SH, σ_c	$\sigma_c = 2.1005SH + 7.1983$	0.849
$I_{S(50)}, \sigma_c$	$\sigma_c = 7.6079I_{S(50)} + 33.28$	0.706
SH, σ_t	$\sigma_t = 0.0982SH + 4.3211$	0.424
$I_{S(50)}, \sigma_t$	$\sigma_t = 0.3953I_{S(50)} + 5.302$	0.444

5. Teşekkür

Yazar, bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a (Proje No: 110M437) ve Bülent Ecevit Üniversitesi Rektörlüğü'ne (Proje No: 2002-45-03-191, 2012-17-11-04) teşekkürlerini sunar.

6. Kaynaklar

- AFNOR, 2000.** Determination du pouvoir abrasive d'une roche- Partie 1: Essai de rayure avec une pointe (NF P 94-430-1), Paris.
- Al-Ameen, SI., Waller, MD. 1994.** The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasivity index. *Eng. Geo.*, 4(36):293-301.
- Alber, M. 2008.** Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 23:351-359.
- Altındag, R., Güney, A., 2006.** ISRM suggested method for determining the Shore hardness value for rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43: 19-22
- ASTM, 2010.** Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method, D7625-10.
- Bilgin, N. 1982.** Zonguldak kömür havzasındaki formasyonların jeomekanik özelliklerinin burğu davranışlarına etkisi. *Türkiye 3. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, s. 95-111, Zonguldak.
- Bilgin, N. 1989.** İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 192 s.
- Cerchar, 1986.** Centre d'Etudes et des Recherches des Charbonages de France. The CERCHAR abrasiveness index, France, 20 pp.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, PD., Nilsen, B, Grov, E. 2012.** Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method, *Tunnell. Undergr. Space Technol.*, 28: 150-158.
- Deketh, HJR. 1995.** Wear of rock cutting tools. Laboratory experiments on the abrasivity of rock. 1st ed. Rotterdam, A.A. Balkema, 144 pp.
- Deliormanlı, AH. 2012.** Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones. *Constr. Build. Mater.*, 30:16-21.
- Dipova, N. 2012.** Investigation of the relationships between abrasiveness and strength properties of weak limestone along a tunnel route. *J. Geol. Eng.*, 36:23-34.
- Duru, H. 2014.** Cerchar aşınma indeksine etki eden parametrelerin değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, 91 s.
- Fowell, RJ., Johnson, ST. 1991.** Cuttability assessment applied to drag tool tunnelling machines. *Proc. 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Vol. 2, Publ. Rotterdam, AA Balkema, pp. 985-990, Aachen, Germany.
- Fowell, RJ., Abu Bakar, MZ. 2007.** A review of the Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods. *In Proc. of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, pp. 155-160, Lisbon, Portugal.
- Gharahbagh, EA., Rostami, J., Ghasemi, AR., Tonon, F. 2011.** Review of rock abrasion testing. *In: Proc. of the 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, pp. 11-141, 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. 110 pp.
- Hamzaban, MT., Memarian, H., Rostami, J., Ghasemi, AR., Monfared, H. 2014.** Study of rock-pin interaction in Cerchar abrasivity test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 72:100-108.
- ISRM, 1978.** Suggested method for determining tensile strength of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 15: 99-103.
- ISRM, 1979.** Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16: 135-140.
- ISRM, 1985.** Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 22:51-60.
- 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, pp.101-106.
- Jaeger, W. 1988.** An investigation into the abrasive capacity of rock. *Mem. Cent. Eng. Geol. Neth.*, 52:99-104.

- Kahraman, S., Alber, M., Fener, M., 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 Syst. Appl.*, 37(12):8750-8756.
- Khandelwal, M., Ranjith, P.G. 2010.** Correlating index properties of rocks with P-wave measurements. *J. Appl. Geoph.*, 71 (1):1-5.
- Lassnig, K., Latal, C., Klima, K. 2008.** Impact of grain size on the Cerchar abrasiveness test. *Geomech. Tunnell.*, 1(1):71-76.
- Mathier, J.F., Gisiger, J.P. 2003.** Abrasivity of Icelandic basalts. *In Technology Roadmap for Rock Mechanics, Proceeding of the 10th International Congress on Rock Mechanics*, pp: 809-812. Johannes, : The South African.
- Michalakopoulos, T.N., Anonostou, V.G., Bassanou, M.E., Panagioutou, G.N. 2006.** The influence of steel styli hardness on Cerchar abrasiveness index value. *Int. J. Rock Mech. Min.*, 43:321-327.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., Spaun, G. 2003.** Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar abrasiveness index (CAI). Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40:259-263.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K. 2004.** Wear prediction in hardrock excavation using the Cerchar abrasiveness index (CAI) value. *Proc. ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy*, pp:599-504, Essen, Germany.
- Rostami, J., Özdemir, L., Bruland, A., Dahl, F. 2005.** Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. In: *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, pp: 738-751, Seattle, WA, USA.
- Schimazek, J., Knatz, H. 1970.** Der einfluss des gesteinsaufbaus auf die schnittgeschwindigkeit und den meisselverschleiß von strecken vortriebs maschinen. *Gluckauf*, 22:274-278.
- Stanford, J., Hagan, P. 2009.** An assessment of the impact of stylus metallurgy on Cerchar abrasiveness index. *Coal Operators' Conference*, pp: 348-355, Australia.
- Su O (2016)** Performance evaluation of button bits in coal measure rocks by using multiple regression analyses. *Rock Mech. Rock Eng.*, 49:541-553.
- Suana, M., Peters, T. 1982.** The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography. *Rock Mech.*, 15(1):1-6.
- Thuro, K., Kasling, H. 2009.** Classification of the abrasiveness of soil and rock. *Geomech. Tunnell.*, 2(2):179-188.
- Valantin, A. 1973.** Examen des differens procedes classiques de determination de la nocivite des roches vis-à-vis de l'attaque mecanique, 133-140.
- West, G. 1986.** A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments. *Int. J. Min. Geol. Eng.*, 4:73-78.
- West, G. 1989.** Rock abrasiveness testing for tunneling. Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 26 (2):151-160.
- Yaralı, O., Yasar, E., Bacak, G., Ranjith, P.G. 2008.** A study of rock abrasivity and tool wear in coal measure rocks. *Int. J. Coal Geol.*, 74(1):53-66.
- Yaralı, O., Akçin, N.A., Bacak, G., Su, O. 2008.** Mekanik Kazıda Kayaçların Petrografik Özellikleri ile Delinebilirlik ve Aşındırıcılık Özellikleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi. TÜBİTAK Projesi, Proje No: 104M437, Final Raporu. Zonguldak.
- Yaralı, O., Aydın, H., Duru, H., Özarslan, A. 2013.** Cerchar aşınma indeksi için standart bir deney yönteminin geliştirilmesi, TÜBİTAK Projesi, Proje No: 110M579, Final Raporu. Zonguldak.
- Yaralı, O., Duru, H., Sakiz, U. 2014.** Evaluation of the relationships among drilling rate index (DRI), mechanical properties, Cerchar abrasivity index and specific energy for rocks. *Aachen Sixth International Mining Symposium*, pp:205-220, Germany.
- Yasar, S., Capik, M., Yilmaz, A.O. 2015.** Cuttability assessment using the Drilling Rate Index (DRI), *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 74:1349-1361.