



Orijinal Araştırma / Original Research

KAYAÇLARIN AŞINDIRICILIKLARININ ÜÇ FARKLI DENEY YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

DETERMINATION OF ABRASIVENESS OF ROCKS WITH THREE DIFFERENT TEST METHODS

Olgay Yaralı^{a,*}, Hamit Aydın^a, Utku Sakı^a, Haşim Duru^a, Servet Bulut^a,

^a Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 2 Ekim / October 2017
Kabul Tarihi / Accepted : 8 Aralık / December 2017

ÖZ

Anahtar Sözcükler:
Aşınma,
Cerchar aşınma indeksi,
Norveç aşınma indeksi,
Schimazek aşınma indeksi.

Mekanik kazı makinelerinden beklenen yararları ulaşabilmek için bu makinelerin kazılacak kayaçların özelliklerine uygun olarak seçilmeleri gerekmektedir. Yüksek aşındırıcılık özelliğine sahip kayaçlar, kısa zamanda keskinin körlenmesine neden olmaktadır. Bu durum, bir yandan keski tüketimini artırmakta, diğer yandan kazı verimini düşürmekte ve dolayısı ile kazı maliyetinin artmasına yol açmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Zonguldak Bölgesi magmatik ve sedimanter olmak üzere 9 farklı kayaç türü üzerinde Cerchar aşınma indeksi (CAI), Norveç aşınma (AV) indeksi deneyleri ile Schimazek aşınma (F) indekslerine göre aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Üç farklı aşınma deney yönteminden elde edilen sonuçlar basit regresyon analiziyle birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Schimazek aşınma indeksi deneyi ile Cerchar aşınma indeksi ve Norveç aşınma indeksi deneyi arasında doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre incelenen kayaçların aşındırıcı ve oldukça fazla aşındırıcı oldukları bulunmuştur.

ABSTRACT

Keywords:
Abrasive,
Cerchar abrasivity index,
Abrasion Value,
Schimazek wear index

In order to achieve the expected benefits from mechanical excavation machines, these machines must be selected in accordance with the characteristics of the excavated rocks. Highly abrasive Rocks cause fast cutter wear in short time. This increases the chisel consumption in excavation and reduces the efficiency, and thus increases in excavation cost.

In this study, Cerchar abrasiveness index (CAI), abrasion value (AV) and Schimazek wear index (F) tests were carried out on 9 igneous and sedimentary rocks samples from Zonguldak Region. The results then evaluated with regression analysis to determine the relationship between different abrasion index values. According to the test results, rocks were classified as abrasive and extremely abrasive. The statistical analysis showed strong linear relationships between Schimazek wear index - Cerchar abrasiveness index, and Schimazek wear index - abrasion value.

* Sorumlu yazar: oyarali67@gmail.com * <https://orcid.org/0000-0003-4965-0330>
** haydin69@hotmail.com * <https://orcid.org/0000-0003-2165-5869>
*** utkusakiz@beun.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0002-7246-0714>
**** hasimduru@beun.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0002-2001-3816>
**** servet.bulut@hotmail.com * <https://orcid.org/0000-0002-5142-5653>

GİRİŞ

Ülkemizde ve Dünya’da madencilik ve inşaat uygulamalarında, özellikle tünel ve galeri açma işlerinde mekanize kazı araçlarının (elektro hidrolik deliciler, jumbolar, kollu galeri açma makineleri, tam cephe galeri açma makineleri vb.) kullanımı gittikçe artmaktadır. Dolayısıyla, ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olan ve hemen hemen tümüyle ithal edilen kazı makinelerinin, kayaç özelliklerine göre seçilmesi önemli olmaktadır. Makine seçimini ve performansı, kazı makinasının özelliklerine ve kazılacak kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır (Fowell ve Johnson, 1982; Farmer ve Garrity, 1987; Bilgin, 1989; Rostami ve Özdemir, 1994; Thuro ve Plinninger, 1999; Alvarez vd, 2003; Bilgin vd., 2005; Yaralı, 2010; Çopur vd, 2011; Ersoy ve Balcı, 2013). Ülkemizde kazı makinası (TBM, jumbo, kollu galeri açma makinası, vb.) performansını belirlemeye yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır (Balcı, 2004; Akün ve

Karpuz, 2005; Kahraman vd, 2006; Balcı vd, 2007; Çopur vd, 2011; Bilgin vd, 2012; Özaydın vd, 2013; Kahraman ve Kahraman 2013; Çapık vd, 2013; Su vd, 2013; Yaralı ve Soyer, 2013; Ateş vd, 2014; Çopur vd, 2014; Ökten vd., 2014).

Ancak ilk yatırım maliyeti ve kesici uç tüketiminin çok yüksek olan ve hemen tümüyle ithal edilen bu makinelerin, kayaç özelliklerine uygun şekilde seçilmesi çok önemlidir. Çünkü mekanize kazıda iyi performans elde etmek için kazı yapılacak kayaç formasyonun fiziksel, mekanik ve indeks özelliklerinin yanında mineralojik-petrografik özelliklerinin de bilinmesi ve ne kadar keski harcanacağı tahmin edilerek makina tipinin iyi tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun tersi yönünde makinenin yanlış seçimi ve keski tüketiminin yanlış belirlenmesi kazı maliyetlerinin artmasına neden olacaktır (Bilgin, 1989; Bilgin vd., 2005; Bilgin vd., 2010; Yaralı, 2010; Bilgin vd., 2012). Makine seçimini ve performansını etkileyen faktörler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Kazı makinelerinin performansını etkileyen bazı parametreler (Çopur vd, 1997, Bulut’dan, 2017)

Makine Özelliklerine Bağlı Parametreler	Jeolojik Parametreler	İşletmeye Bağlı Parametreler
<p><u>Makine Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Makinenin tipi • Makinenin ağırlığı ve boyutları • Pasa toplama ve taşıma kapasitesi • Makinenin yaşı • Makinenin kurulu toplam gücü 	<p><u>Kaya Kütlesi Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kaya kalite değeri (RQD) • Kaya kütlesi sınıflama sistemi (RMR) • Jeolojik süreksizlikler • Hidrojeolojik durum 	<ul style="list-style-type: none"> • İş organizasyonu • Lojistik destek • Havalandırma • Nakliyat • Ekipman temini • Kalifiye işçilik • Finansman
<p><u>Kesici Kafa Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kesici kafanın tipi ve boyutu • Kesici kafanın gücü • Keskinin dağılımı ve sayısı • Keski tipi ve özellikleri 	<p><u>Kayacın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kaya kesme parametreleri (<i>Spesifik enerji, kesme kuvvetleri</i>) • Dayanım özellikleri (<i>Basınç ve çekme dayanımı, kohezyon, elastik değeri</i>) • Yüzey sertliği (<i>Shore ve Schmidt çekici değeri</i>) • Fiziksel özellikler (<i>Porozite, yoğunluk, su içeriği, nem oranı vb.</i>) • Petrografik özellikler (<i>aşındırıcı mineral içeriği, kuvars içeriği, kuvars tane boyutu, mineral tane boyutu, çimento türü, çimentolanma derecesi, tane yönlenmesi</i>) • Aşındırıcılığı (<i>Cerchar aşınma indeksi</i>) 	

Mekanize kazı makinalarının seçilmesinden önce, gerekli olan kesme veya delme enerjisi ile keski tüketimi miktarına bağlı olan kazı performansının önceden doğru tahmin edilmesi kritik aşamadır. Kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesi ve keski tüketimini önceden tahmin etmek amacıyla birkaç deney yöntemi geliştirilmiştir (Özdemir ve Nilsen, 1999; Büchi vd, 1995; Dahl, 2003). Bu deneyler;

1. Cerchar aşınma indeks deneyi (CAI)
2. Norveç aşınma indeks deneyi (AV)
3. Keski ömrü indeks deneyi (CLI)
4. Uç aşınma indeks deneyi (BWI)
5. LCPC aşınma deneyi (ABR)

Bu deneyler için özel ekipmanlar gerekmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen değerlere bağlı olarak, kayaca uygun mekanize kazı makinası tipi ve makina performansı (ilerleme oranı, keski ve enerji tüketim miktarı) belirlenebilmektedir. Ülkemizde ve Dünya'da son yıllarda özellikle Avrupa'da (Almanya, İngiltere, Fransa vb.), Avustralya ve Kuzey Amerika'da Cerchar aşınma indeks, Norveç aşınma deneyi, keski ömrü indeks deneyi, uç aşınma indeks deneyleri kayaçların aşındırıcılıklarının ve keski ömrünün doğru olarak belirlenmesinde kullanılan yaygın deney yöntemleri haline gelmiştir. Bu deney yöntemleri tam cephe ve kollu galeri açma makinaları için kullanılan tahmin modellerinde önemli bir rol oynamaktadır (Bilgin vd, 1988; Wijik, 1992; Özdemir ve Nilsen, 1999; Rostami vd, 2005; Kasling ve Thuro, 2010).

Bu çalışmanın amacı, Zonguldak Bölgesi'nde yerüstü mühendislik yapılarında karşılaşılan kireçtaşı ve andezit kayaç türlerinin aşındırıcılık değerlerinin ve sınıfının, farklı aşınma deneyleri ile belirlemektir. Bu amaçla, Zonguldak Bölgesi'nin değişik yerlerinden 4 adet kireçtaşı, 5 adet de andezit örnekleri üzerinde 3 farklı aşınma deney yöntemi (Cerchar aşınma indeksi, Norveç aşınma indeksi, Schimazek aşınma indeksi) ile aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Schimazek aşınma indeksi belirlemek için incelenen kayaçların dolaylı çekme dayanımları (Brazilian) ile petrografik analizler (ortalama aşındırıcı mineral tane boyutu, eşdeğer kuvars içeriği) yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar basit regresyon analiziyle değerlendirilmiş ve bu üç farklı deney yöntemleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

1. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ

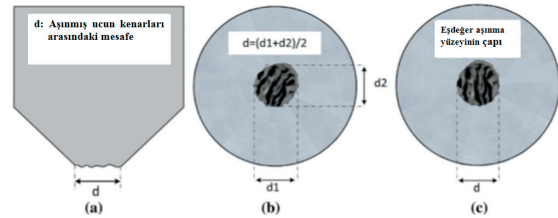
1.1. Cerchar Aşınma İndeks Deneyi (CAI)

Cerchar aşınma indeks deneyi kayaçların aşındırıcılıklarının ve keski ömrünün doğru olarak belirlenmesinde kullanılan yaygın bir deney yöntemi haline gelmiştir. Ayrıca, Cerchar aşınma indeks deneyi tam cephe ve kollu galeri açma makinaları için kullanılan tahmin modellerinde de önemli bir rol oynamaktadır. (Özdemir vd, 1991; Wijik, 1992; Rostami vd, 1994; Rostami vd, 1996; Bilgin vd, 2005; Kasling ve Thuro, 2010).

Cerchar aşınma indeksi deneyi kömür madenciliği uygulamaları için 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, kayaçların aşındırıcılığının belirlenmesinde ve mekanize kazı makinalarının keski tüketiminin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Plinninger vd, 2003; Plinninger vd, 2004; Rostami vd, 2005; Yaralı ve Duru, 2016).

ISRM (2015), Cerchar aşınma indeks deneyini, birinci nesil (klasik) deney aleti için $1 \pm 0,5$ saniye, ikinci nesil (West) deney aleti için 10 ± 2 saniye boyunca ve 70 N'luk statik yük altında, 2000 N/mm² çekme dayanımına sahip standart krom vanadyum alaşımli soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş Rockwell Sertliği HRC55 \pm 1 olan ve 90° tepe açılı konik bir ucun taze kırılmış bir kayaç yüzeyinde 10 mm çekilmesi şeklinde gerçekleştirilen deney yöntemi olarak tarif etmiştir.

Bu deney her seferinde yeni uçlar kullanılarak farklı yönlerde en az beş kez tekrarlanır. Bu deney iki deney aletinden biri kullanılarak yapılır. Cerchar aşınma indeks deneyinde kullanılan konik uç, mikroskop altında incelenerek uçtaki aşınma yüzeyinin çapı (d) 0.1 (1/10) mm hassasiyetinde yatay ve düşey konumda ölçülür (Şekil 1). Tespit edilen aşınma miktarı kayacın aşındırıcılığı olarak kabul edilir. ISRM (2015) göre CAI için aşındırıcılık sınıflaması Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Yatay okuma (a), düşey okuma (b,c) (ISRM, 2015)

Çizelge 2. Pürüzlü yüzeyler için Cerchar aşınma indeks sınıflaması (ISRM, 2015)

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

1.2. Schimazek Aşınma İndeks Deneyi (F)

Schimazek aşınma indeksi (F) bir disk keski kullanılarak sedimanter kayalar üzerinde yapılan aşınma deneyleri sonucunda bulunmuştur (Schimazek ve Knatz, 1970).

Kayaçların çekme dayanımı ve petrografik özelliklerinden yararlanarak aşınma numuneleri St50 çeliğinden imal edilmiş, uçları konik, 90°, 0.3 mm'ye kadar köreltilmiş keskinle ve 45 N'luk baskı kuvvetiyle 16 m Archimed Spirali ile çizilir. Uçlarda meydana gelen ağırlık kaybı aşınma indeksinin fonksiyonu olarak kabul edilmektedir. Aşınma indeksi, numunelerin çekme dayanımı ve petrografik özelliklerinden elde edilir. Kayaçtaki kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin miktarı, bunların boyutları ve kayacın çekme dayanımı arttıkça aşınma da artacağına göre, aşınma indeksi bu parametrelerin çarpımıyla Eşitlik 1'den elde edilmektedir.

$$F = Q_{eqv} \cdot d_{ort} \cdot \sigma_t \quad (1)$$

Burada;

F = Schimazek aşınma indeksi, N/mm

Q_{eqv} = Eşdeğer kuvars yüzdesi, %

d_{ort} = Ortalama aşındırıcı mineral tane boyutu, mm

σ_t = Dolaylı çekme dayanımı, MPa

Sert keskinle yapılan mekanize kazıda, Schimazek aşınma indeksi 0.5 N/mm'nin üzerinde olan kayalar çok aşındırıcı olduklarından kesilemezler. Ancak, arında çok çatlağın ve kırığın var olması durumunda, bu kazılabilirlik kriterinin 1 N/mm'ye kadar çıkması mümkündür. Ayrıca, disk tipi keskinle yapılan kazıda Schimazek aşınma indeksi değeri 2.7 N/mm'ye kadar olan kayaların kazısının yapılabileceği de saptanmıştır (Bilgin, 1989). Çizelge 3'de Schimazek aşındırıcılık sınıflaması verilmiştir.

Çizelge 3. Schimazek aşındırıcılık sınıflaması (Schimazek ve Knatz, 1970)

Schimazek aşınma indeksi (F), N/mm	Sınıfı
< 0.01	Hiç aşındırıcı değil
0.01 – 0.05	Çok az aşındırıcı
0.05 – 0.1	Hafif aşındırıcı
0.1 – 0.5	Orta aşındırıcı
0.5 – 1.0	Aşındırıcı
1.0 – 2.0	Çok aşındırıcı
2.0 – 4.0	Çok fazla aşındırıcı
> 4.0	Oldukça fazla aşındırıcı

Ewendt (1989), Almanya'da Saar Kömür Havzası'nda yaptığı aşınma deneyleri sonucunda F ile CAI arasında Eşitlik 2'deki gibi bir ilişki bulunmuştur (Tamrock'dan 1999).

$$CAI = 0.6 + 3.32 \cdot F \quad (2)$$

Yaralı ve Akçın (2005) Zonguldak kömür çevre kayaları üzerinde yaptığı aşınma deneyleri sonucunda Schimazek ve Cerchar aşınma indeksleri arasında Eşitlik 3'deki gibi doğrusal bir ilişki saptamıştır.

$$CAI = 0.8735 + 0.3958 \cdot F \quad R^2 = 0.865 \quad (3)$$

Burada;

CAI = Cerchar aşınma indeksi

F = Schimazek aşınma indeksi

Yaralı (2010), yaptığı çalışmada bu indeks deney yöntemi arasındaki ilişkileri 16 kayaç için araştırmış ve bu indeks deneyleri arasında doğrusal ilişkiler elde etmiştir

Majeed ve Ebu Bakar (2016), Pakistan bölgesine ait 46 adet sedimanter ve magmatik kayaç üzerinde yaptıkları aşındırıcılık deneylerinde CAI ile Schimazek aşınma indeksi (F) deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve bu iki aşınma indeksi deney sonuçları arasında Eşitlik 4'de gösterildiği gibi üstel bir ilişki bulmuşlardır.

$$CAI = 2.77 \cdot (F)^{0.31} \quad R^2 = 0.73 \quad (4)$$

1.3 Norveç Aşınma İndeks Deneyi (AV)

Kayaçların delinebilirliğinin tahmini için kullanılan yöntem, 1960'ların başında Norveç Teknoloji Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Bölümünde geliştirilmiştir (Lien, 1961). Bu deney metodu kırılarak toz haline getirilmiş (<1 mm) kaya

örneklerinin zamana bağlı olarak tungsten karbid uç üzerindeki aşınmanın ölçüsüdür (Dah, 2003).

1980'lerin başından beri, Norveç Teknoloji Enstitüsü (NTNU) İnşaat ve Yapı Mühendisliği Bölümünün geliştirdiği metoda göre deney yöntemi genel olarak sert kayalarda TBM aşınma performansını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Dahl vd, 2012).

Dahl vd (2012), 60 farklı türdeki kayaç üzerinde hem CAI hem de Norveç aşınma indeks deneyleri yapmışlardır. AV değerlerinin 0.5 ile 72 arasında değişirken, CAI değerlerinin 2.3 ile 6.9 arasında değiştiklerini bulmuşlardır. Bu iki deney arasında da korelasyon katsayısı (R^2) 0.4641 olan doğrusal bir ilişki yakalamışlardır.

Bu deneyde, 1mm'den daha az boyuttaki parçalanmış taş tozu 10 kg ağırlıkla yüklenmiş tungsten karbid ucun altından geçer. Aşınma miktarı deri çelik disk tablanın 100 devirden sonra deney ucunun miligram cinsinden ağırlık kaybı olarak belirlenir. 100 devir 5 dakikalık deney süresi demektir. Bu deneyde kısaca, parçalanmış taş tozuna sürtünen tungsten karbid ucun zamana bağlı olarak aşınmasını ölçer. Norveç aşınma indeks deneyinin ana hatları Şekil 2'de, bu çalışmada kullanılan deney aleti ise Şekil 3'de gösterilmiştir (Dahl, 2003).

Norveç aşınma indeks deneyi (AV), çelik uçla Norveç aşınma deneyi (AVS), uç aşınma indeks (BWI) ve keski ömrü indeks (CLI) deneylerine ait sınıflama aralığı Çizelge 4'de verilmiştir.

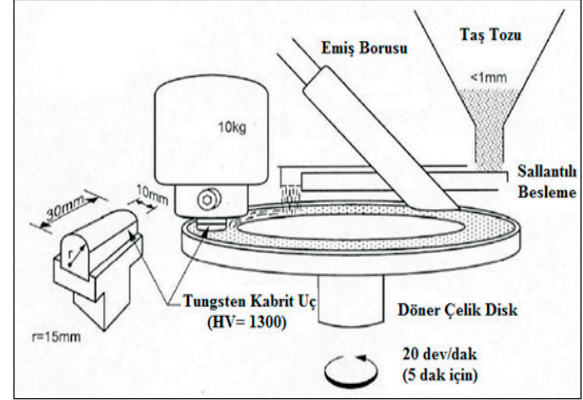
Çizelge 4. Aşınma indeks deneylerinin sınıflaması (Dahl, 2003)

Sınıf	AV	AVS	BWI	CLI
Oldukça düşük	<1	<1	≤10	<5
Çok düşük	2-3	2-3	11-20	5.0-5.9
Düşük	4-10	4-12	21-30	6.0-7.9
Orta	11-27	13-25	31-44	8.0-14.9
Yüksek	28-41	26-35	45-55	15.0-34
Çok yüksek	42-58	36-44	56-69	35-74
Oldukça yüksek	>58	>44	≥70	≥75

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında Zonguldak Bölgesi'nin farklı yerlerinden getirilen kayaç örnekleri Çizelge 5'de gösterilmiştir. Gerek örneklerin araziden alınmasında gerekse laboratuvarında deneylerin

yapılmasında Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) önerileri dikkat edilmiştir. Brazilian dolaylı çekme dayanımı ve Cerchar aşınma indeksi deneylerinde örnek çapı yaklaşık 54 mm olan karot örnekler kullanılmıştır.



Şekil 2. Norveç aşınma indeks deneyi ana hatları (Dahl, 2003)



Şekil 3. Norveç aşınma indeks deneyi düzeneği

Schimazek aşınma indeks deneyi Eşitlik 1'de yer alan büyüklükler, tek eksenli dolaylı çekme dayanım sonuçlarına ve petrografik analiz verilerine göre hesaplanarak bulunmuştur. Ayrıca, bu çalışmada Eşitlik 1'deki eşdeğer kuvars içerikleri ve aşındırıcı minerallerin ortalama tane boyutları örnek verilerek nasıl bulunduğu gösterilmiştir.

Brazilian çekme dayanımı deneyi için disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yüklemeye 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 gerçekleşmiştir. Brazilian çekme dayanımı değeri Eşitlik 5'den hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Kayaç örneklerinin alım yerleri

No	Örnek Adı	Alındığı Yer
1	Kireçtaşı	Zonguldak-Kdz. Ereğli 15. km
2	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 24. km
3	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	Zongulda-Kdz. Ereğli 25. km
4	Plaket kireçtaşı	Zonguldak-Kdz. Ereğli 47. km
5	Andezit (Bozuşmuş)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 33. km
6	Andezit (Koyu Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 34. km
7	Andezit (Açık Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 35. km
8	Andezit (Açık Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 42. km
9	Andezit (Açık Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 43. km

$$\sigma_t = 0.636 * \frac{F}{D * t} \quad (5)$$

Burada;

σ_t = Brazilian çekme dayanımı, MPa

F = Yenilme yükü, N

t = Örnek kalınlığı, mm

Schormair vd (2006)'ya göre kayaçların Rosival aşındırıcılık katsayısı Çizelge 6'da gösterilmiştir. Çizelge 6'daki katsayılar ile kayaçlara karşılık gelen aşındırıcı mineral oranları çarpılarak (içeriğinde herhangi bir mineral olmadığı durumlarda Q_{eqv} değeri sıfır (0) olarak alınmıştır.), kayaçların toplam eşdeğer kuvars içerikleri (Q_{eqv}) saptanmıştır ve bu hesaplamanın bir örneği Çizelge 7'de gösterilmiştir. Kayaçlar içerisinde bulunan aşındırıcı minerallerin ortalama tane boyutları (d_{ort}) da belirlenmiştir. Çizelge 8'de aşındırıcı mineral ortalama tane boyutunun örnek hesaplaması görülmektedir. Çizelge 9'da ise kayaçların petrografik analiz sonuçlarına göre bulunan petrografik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6. Kayaçların Rosival aşındırıcılık katsayısı değerleri (Schormair vd, 2006)

Mineral	Rosival aşındırıcılık katsayısı (%)
Feldspat	32
Piroksen	43
Kuvars	100
Pirit ve biotit	55
Kalsit/ kil	4
Mika	4
Plajiolklas	25
Potasyum feldspat	25

Çizelge 7. Eşdeğer kuvars içeriğinin örnek hesaplanması (Bulut, 2017)

5-Andezit (Bozuşmuş)			
Mineral Adı	Aşındırıcı Mineral Oranı (%)	Rosival Katsayısı	Q_{eqv} (%)
Kuvars		100	0
Feldspat	50	33	16.5
Piroksen	20	43	8.6
Kalsit		4	0
Kil ve Opak	10	4	0.4
Mika	20	4	0.8
Pirit ve biotit		55	0
Plajiolklas		25	0
Potasyum feldspat		29	0
Toplam Eşdeğer Kuvars İçeriği			26.30

Cerchar aşınma indeks deneyinde, kayaçların aşındırıcılıkları belirlemek için West tam otomatik Cerchar aşınma indeks deney aleti kullanılmıştır (Şekil 4). Kayaç örnekleri üzerindeki çizme işlemi, her defasında yeni bir uçla ve ISRM (2015)'e göre yapılmıştır. Her bir kayaç örneği için üç farklı örnek üzerinde 5 kez çizme işlemi yapılmış ve ortalama sonuçlar kayacın aşındırıcılığı olarak değerlendirilmiştir. Deneylerde HRC55±1 sertliğindeki uçlar kullanılmıştır.

Çizelge 8. Aşındırıcı mineral ortalama tane boyutunun örnek hesaplanması (Bulut, 2017).

5-Andezit (Bozuşmuş)			
Mineral Adı	Mineralojik Bileşim (%)	Tane Boyutu (mm)	d_{ort} (mm)
Kuars	-		0
Feldspat	50	0.7	0.35
Piroksen	20	0.4	0.08
Kalsit			0
Kil ve Opak	10	0.2	0.02
Mika	20	1	0.20
Toplam Aşındırıcı Mineral Tane Boyutu			0.65

Çizelge 9. İncelenen Kayaçların petrografik değerleri

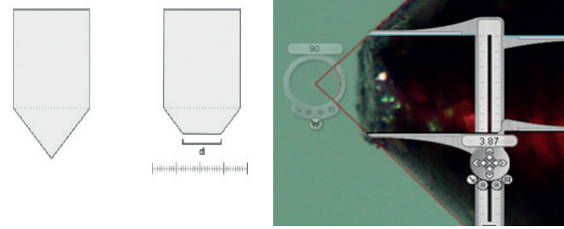
Kayaç No	d_{ort} (mm)	Q_{eqv} (%)
1	0.0178	5.92
2	0.0928	6.88
3	0.074	6.88
4	0.0928	7.84
5	0.65	26.30
6	1.43	23.85
7	0.79	26.75
8	0.92	29.65
9	1.215	29.65

d_{ort} = Aşındırıcı mineral ortalama tane boyutu,
 Q_{eqv} = Eşdeğer kuvars içeriği,

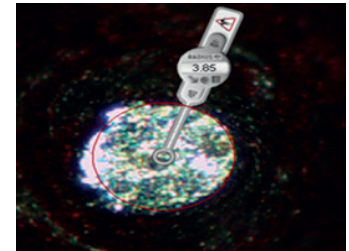
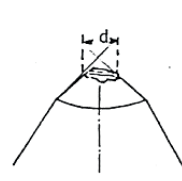


Şekil 4. West tam otomatik Cerchar aşınma indeks deney aleti

Aşınmış uçlar, BEÜ Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Uygulama Laboratuvarı'nda bilgisayar destekli 35 büyütmeli bioküler mikroskop altında farklı konumlarda (yatay ve düşey) ölçülmüştür (Şekil 5).



a. Yatay konumdaki ucun görünümü.



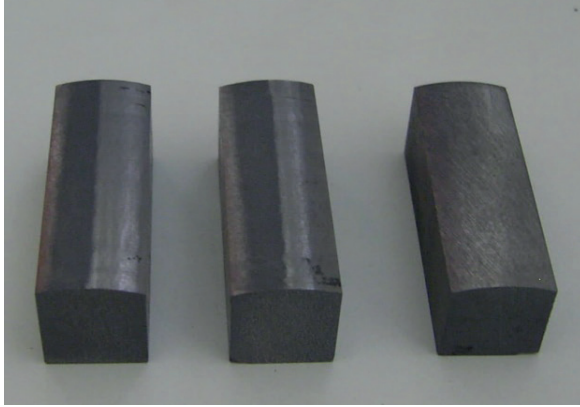
b. düşey konumdaki ucun görünümü.

Şekil 5. Cerchar aşınma indeks deneyinde aşınmış ucun mikroskop altında ölçümü

Ayrıca deneye başlamadan önce çelik uçlar yine bu mikroskopla bakılarak deney standardını (90° uç açısı durumu) sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Uygun olan uçlarla deney tekrarlanmıştır. 1/10 mm'lik aşınma yüzeyi bir birim Cerchar aşınma indeksi olarak kabul edilmiştir. Böylece, kayaçlara ait Cerchar aşınma indeks değeri 5 çizimin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur.

Norveç aşınma indeks deneyinin yapılmasında Dahl (2003) tarafından önerilen deney yöntemi izlenmiştir ve Şekil 3'de gösterilen deney aleti kullanılmıştır. Bu deney için boyut küçültme üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak karot örnekleri 10 mm açıklığa ayarlanmış çeneli kırıcıdan geçirilmiştir. Daha sonra malzeme, 3-4 mm aralığındaki konik kırıcıya beslenmiş ve elek altı 1 mm boyutlu elekte elle elenmiştir. < 1 mm olan malzeme bir tepsiye konularak bir tarafta bekletilmiştir. > 1 mm olan malzeme merdaneli kırıcıya beslenmiştir. Merdaneli kırıcıdan alınan malzeme yine 1 mm'lik elek aralığındaki elekte elenmiş elek üstü tekrar merdaneli kırıcıya beslenmiştir. Bu işlem beslenen malzemenin % 99'u – 1 mm'ye ininceye kadar tekrarlanmıştır.

Norveç aşınma deneyinde her kayaç örneği için deney en az iki kez tekrar edilmiştir. Her deneyde yeni uç kullanılmıştır. Şekil 6'da aşınmış ve kullanılmamış uçların resimleri gösterilmektedir.



Şekil 6. Norveç aşınma indeks deneyinde kullanılan aşınmış ve kullanılmamış uçlar

3. BULGULAR

9 farklı kayaç türü üzerinde yapılan üç farklı aşınma deney yönteminden elde edilen sonuçlar ile aşındırıcılık sınıflamaları Çizelge 10'da verilmiştir. Şekil 7'de üç farklı deney yöntemine göre kayaçların aşındırıcılıkların sütunsal olarak dağılımı gösterilmiştir.

Cerchar aşınma indeks deney sonuçlarının 0.96 ile 3.19, Schimazek aşınma indeks deney sonuçlarının 0.010 ile 2.954 arasında, Norveç aşınma indeks deney sonuçlarının ise 0.70 ile 6.80 arasında değiştiği belirlenmişlerdir.

Özellikle Norveç aşınma indeks deney yönteminde kullanılan uçtaki kütle kaybına göre kayaçların aşındırıcılıkları bulunduğu için, aşınma değerleri sayısal olarak diğer deney yöntemlerine göre daha büyük görülmektedir.

Schimazek aşınma indeksi ile hem Cerchar aşınma indeksi hem de Norveç aşınma indeks deney sonuçları arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Şekil 8, 9 ve 10). Bu üç aşınma deney yönteminin birbirleriyle karşılaştırıldığında doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Eşitlik 6'da Schimazek aşınma indeksi ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki, Eşitlik 7'de Schimazek aşınma indeksi ile Norveç aşınma indeksi arasındaki, Eşitlik 8'de ise Norveç aşınma indeksi ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki ilişkiler verilmiştir.

$$CAI = 0.5029 * F + 1.3342 \quad (6)$$

$$AV = 1.8089 * F + 0.8667 \quad (7)$$

$$CAI = 0.2803 * AV + 1.0858 \quad (8)$$

Literatüre bakıldığında bu üç indeks deneyi ile yapılmış araştırma sayısı oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Majeed ve Ebu Bakar (2016) çalışmalarında, Cerchar aşınma indeksi ile Schimazek aşınma indeksi ile arasında üstel ilişki bulmuş olmalarına rağmen, bu çalışma sonucunda üç aşınma indeksi arasında bulunan doğrusal ilişkiler literatürde daha önce yapılmış benzer çalışmalarla (Ewendt, 1989; Yaralı, 2005; Yaralı, 2010; Dahl vd, 2012) paralellik göstermektedir.

Deneylerden elde edilen sonuçlarıyla yapılan regresyon çözümlenmesi sonuçlarına göre seçilen bütün modellerde t ve f testleri %95 güvenirlilikte istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar bulunmuştur. Seçilen doğrusal modeller için yapılan hata analizi model hatalarının %95 güven aralığı dahilinde rastsal hatalar olduğunu göstermiş olup, veri sayısının da azlığı dikkate alındığında seçilen doğrusal modelin istatistiksel olarak kullanılabileceğini saptanmıştır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

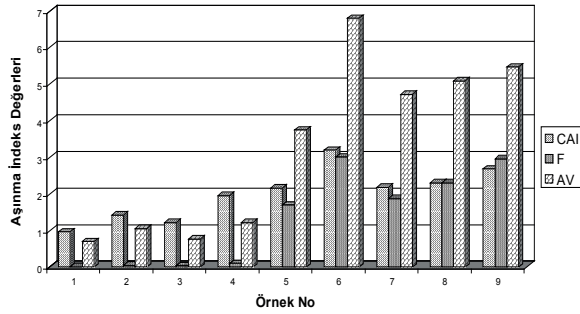
Bu üç deney yöntemine göre kayaçların aşındırıcılık değerleri bulunmuş ve aşındırıcılık sınıflaması yapılmıştır. Deney yöntemlerinin farklı olmasına rağmen sınıflama aralıkları aynı düzeyde oldukları görülmektedir. Bu durum, üç aşınma deney yönteminin birbirleriyle karşılaştırıldığında aralarında doğrusal ilişkiler göstererek kendini göstermiştir.

Her deney yönteminin tercih edildiği uygulama alanı mevcuttur. Örneğin sert kayaç için tünel açma makinalarının (hard rock TBM) performans tahmininde Norveç aşınma indeks deneyi tercih edilirken, Almanya'daki kolları galeri açma makinalarının performans değerlendirilmesinde Schimazek aşınma indeksi tercih edilmektedir.

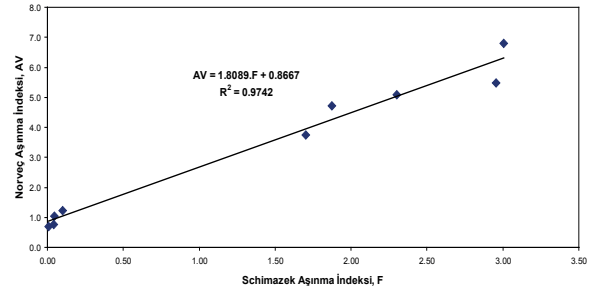
Bu çalışma sonucunda incelenen kayaçlar açısından bakıldığında, her üç yöntemde performans değerlendirilmesinde kullanılabileceği yönünde bir sonuç elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu üç yöntemden hangisini seçeceği projedeki tasarımcının kullanılacak mekanize kazı makinasına göre tercihine bağlı olmaktadır.

Çizelge 10. İncelenen kayaların üç farklı aşınma indeks deney sonuçları ile aşındırıcılık sınıflaması

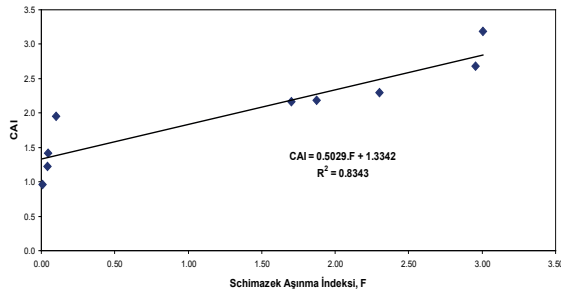
No	Örnek	Cerchar, CAI	Sınıfı	Schimazek, F	Sınıfı	Norveç, AV	Sınıfı
1	Kireçtaşı	0.96	Düşük	0.010	Çok az aşındırıcı	0.70	Oldukça düşük
2	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	1.42	Düşük	0.047	Çok az aşındırıcı	1.05	Oldukça düşük
3	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	1.22	Düşük	0.043	Çok az aşındırıcı	0.77	Oldukça düşük
4	Plaket kireçtaşı	1.95	Orta aşındırıcı	0.099	Hafif aşındırıcı	1.22	Düşük
5	Andezit (Bozuşmuş)	2.16	Orta aşındırıcı	1.703	Çok aşındırıcı	3.75	Çok düşük
6	Andezit (Koyu Renk)	3.19	Yüksek	3.005	Çok fazla aşındırıcı	6.80	Çok düşük
7	Andezit (Açık Renk)	2.18	Orta aşındırıcı	1.874	Çok aşındırıcı	4.72	Düşük
8	Andezit (Açık Renk)	2.30	Orta aşındırıcı	2.300	Çok fazla aşındırıcı	5.09	Düşük
9	Andezit (Açık Renk)	2.68	Orta aşındırıcı	2.954	Çok fazla aşındırıcı	5.47	Düşük



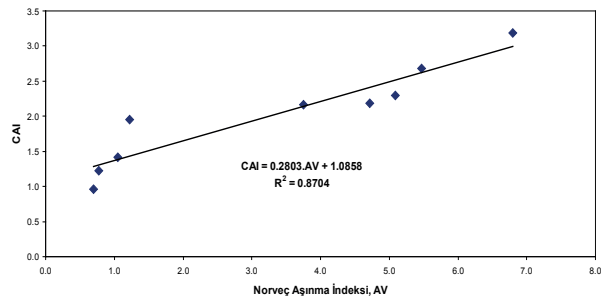
Şekil 7. Üç farklı aşınma indeks deney sonuçlarının dağılımı (F: Schimazek, CAI: Cerchar, AV: Norveç aşınma indeksleri)



Şekil 9. Schimazek aşınma indeksi (F) ile Norveç aşınma indeksi (AV) arasındaki ilişki



Şekil 8. Schimazek aşınma indeksi (F) ile Cerchar aşınma indeksi (CAI) arasındaki ilişki



Şekil 10. Norveç aşınma indeksi (AV) ile Cerchar aşınma indeksi (CAI) arasındaki ilişki

Sonuç olarak, Zonguldak Bölgesi'ne ait 9 farklı kayaç üzerinde yapılan üç farklı aşınma deney yöntemine göre kireçtaşlarının aşındırıcılıklarının andezit örneklerine göre daha az olduğu saptanmıştır. Ancak, kireçtaşı gibi kayaçların içerisinde çok az miktarda aşındırıcı mineral olmamasına rağmen termal aşındırıcılık özelliklerinden dolayı keski sarfiyatının fazla olacağı beklenmektedir. Andezit kayaçları içinde yapılacak delme ve mekanize kazı çalışmalarında ise keski tüketiminin daha fazla olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Akün, M.E., Karpuz, C., 2005. Drillability Studies of Surface Set Diamond Drilling in Zonguldak Region Sandstones from Turkey. Technical Note, International Journal of Rock Mechanics Mining Science, 42, 473-479.

Alvarez, J.T., Alvarez, M.M., Diez, R.R., 2003. Experimental Results a Low-Power Roadheader Driving a Gallery with Different Types of Rock at The Face. Tunneling and Underground Space Technology, 18, 395-404.

Ateş, U., Bilgin, U., Çopur, H., 2014. Estimating Torque, Thrust ve Other Design Parameters of Different Type Tbm's with Some Criticism to TBMS Used İn Turkish Tunneling Projects. Tunneling and Underground Space Technology, 40,46-63.

Balci, C., Bilgin, N., Çopur, H., Tumaç, D., Akgül, M., 2007. Tünel Açma Makinelerinin Tam Boyutlu Kesme Deneyi ile Performans Tahmini., 1. Maden Makinaları Sempozyumu, TMMOB, Maden Mühendisleri Odası Yayını, Kütahya,61-70.

Balci, C., 2004. Mekanize Kazı Makinalarının Seçiminde Küçük Boyutlu Kazı İle Tam Boyutlu Kazı Deneylerinin Karşılaştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yayınlanmamış.

Bilgin, N., 1989. İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği. Birsan Yayınevi, İstanbul,s.92.

Bilgin, N., Balci, C., Çopur, H., 2005. Tünel Açma Makinelerinin Seçim ve Tasarım İlkeleri Ve Performans Tahmin Yöntemleri. 2. İş Makineleri Sempozyumu ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 29-30 Eylül-1 Ekim, İstanbul, 227-240.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2012. Effect of Replacing Disc Cutters With Chisel Tools on Performance of a

TBM in Difficult Ground Conditions. Tunneling and Underground Space Technology, 27,41-51.

Bulut, S., 2017. Kayaçların Aşındırıcılıklarının Farklı Deney Yöntemleriyle Belirlenmesi. Diploma Çalışması, BEÜ Maden Müh. Bölümü, Zonguldak, Yayınlanmamış.

Büchi, E., Mathier, J.F., Wyss, Ch., 1995. Gesteinsabrasivität – ein Bedeutender Kostenfaktor Beim Mechanischen Abbau von Fest- und Lockergesteinen. Tunnel, 5, 38-43.

Çapik, M., Yılmaz A.O., Kolaylı H., 2013. A Comparative Study on the Energy Demand of Turkey: Coal or Natural Gas. Energy Exoloration & Exploitation, 31,119-138.

Çopur, H., Rostami, J., Özdemir, L., Bilgin, N., 1997. Studies on Performance Prediction of Roadheaders Based on Field Data in Mining and Tunneling Projects. Fourth International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Volume 1, Brisbane, Queensland, 1- 7.

Çopur, H., Balci, C., Tumaç, D., Bilgin, N., 2011. Field and Laboratory Studies on Natural Stones Leading to Empirical Performance Prediction of Chain Saw Machines. International Journal of Rock Mechanic & Minining Science, 48(2),269-282.

Çopur, H., Aydın, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumaç, D., Dayan, C., 2014. Predicting performance of EPB TBMs by using a Stochastic Model Implemented into a Deterministic Model. Tunneling and Underground Space Technology, 42,1-14.

Dahl, F., 2003. DRI Standards". NTNU, Angleggsdrift, Trondheim. s.21.

Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grøvn, E., 2012. Classifications of Properties Influencing The Drillability of Rocks, Based on the NTNU/SINTEF Test Method. Tunneling and Underground Space Technology,28 ,150-158.

Ersoy, C., Balci, C., 2013. Kollu Galeri Açma Makinelerinin Seçim Kriterleri ve Amasra Havzasına Uygulanması. 4. Maden Makinaları Sempozyumu, 23-24 Mayıs 2013, İzmir, Türkiye, 11-20.

Farmer, I.W.,Garrity, P., 1987. Prediction of Roadheader Cutting Performance from Fracture Toughness Considerations. In: Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, Montreal, Canada, 1, 621-624.

Fowell, R.J., Johnson, S.T., 1982. Rock Classification and Assessment for Rapid Excavation.. Proc. of the Symp. on Strata Mech., Newcastle Upon Tyne, 241-244.

- ISRM, 1978. Suggested Method for Determining Tensile Strength of Rock Materials. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science & Geomech. Abstr.*, 15, 99-103.
- 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, In: R. Ulusay (Eds), Springer, DOI:10.1007-978-3-319-07713-0 101-106.
- Kahraman, S., Ipek, M., Guleryuz, U., Gunaydin, O., 2006. Pozantı-Ankara Otoyol Tüneli'nde Bir Jumbo Matkap Performansının Tahmini. *ITA-AITES World Tunnel Congress & 32nd ITA General Assembly*, 22-27 April, Seoul, Korea, 132-141.
- Kahraman, S., Kahraman, E., 2013. Kollu Galeri Açma Makinelerinin Dolaylı Testler Kullanılarak Performans Tahmini. 3. Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Sempozyumu, Editörler: Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., İstanbul, 65-73.
- Kasling, H., Thuro, K., 2010. Determining Rock Abrasivity in the Laboratory. In: Z. Labiouse and D. Mathier (Eds) *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering -Proc EUROCK 2010* Taylor & Francis, London, 425-429.
- Lien, R., 1961. An Indirect Test Method for Estimating the Drillability of Rocks. *Dotorate Dissertation*, NTH Department of Geology, Norway (in Norway).
- Majeed Y., Abu Bakar M. Z., 2016. Statistical Evaluation of CERCHAR Abrasivity Index (CAI) Measurement Methods and Dependence on Petrographic and Mechanical Properties of Selected Rocks of Pakistan. *Bull Eng Geol Environ*, 75, 1341-1360.
- Ökten, G., Çınar, M., Çopur, H., Bilgin, N., 2014. İstanbul-Selimpaşa Atıksu Tüneli'nin Kazısı Sırasında EPB TBM'in Kazı Odasında Meydana Gelen Grizu Patlamasının Nedenleri, Sonuçları ve Alınan Önlemler. *Tünel*, Sayı: 2 (Ocak-Şubat), 14-19.
- Özaydın, Y.T., Avunduk, E., Çopur, H., 2013. Büyükçekmece Atıksu Tüneli Kazılarında EPB TBM Performansı. 3. Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Sempozyumu, N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı (Eds), İstanbul, 151-157.
- Özdemir, L., Gertsch, L., Neil, D., Fiant, J., 1991. Performance Predictions for Mechanical Excavation in Yucca Mountain Tuffs. *EMI-Report. SAND 91-1035*, s.18.
- Özdemir, L., Nilsen, B., 1999. "Recommended Laboratory Rock Testing for TBM Projects. *AUA News*, 14(2), 21-14.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., Spaun, G., 2003. Testing Conditions and Geomechanical Properties Influencing The Cerchar Abrasiveness Index (CAI) Value. *Technical Note, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 40, 259-263.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., 2004. Wear Prediction in Hardrock Excavation Using The Cerchar Abrasiveness Index (CAI) Value. *Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy*, Essen, 599-564.
- Rostami, J., Özdemir, L., 1994. Roadheader Performance Optimization for Mining and Civil Construction. *13th Annual Technical Conference, Institute of Shaft Drilling Technology, Las Vegas, USA*, 1-17.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, M.D., 1994. Performance Prediction, a Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining. *Mining Engineer*, 11, 1263-1267.
- Rostami, J., Özdemir, L., Nilsen, B., 1996. Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. In *Proc. 16th Int. ISDT Symposium*, Las Vegas, USA, 1-11.
- 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. *Rapid Excavation and Tunnelling Conference.*, Seattle, WA, USA, 15-14.
- Schimazek, J., Knatz, H., 1970. Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meisseverschleiß von strecken vortriebsmaschinen. *Glückauf*, 106, 274 - 278.
- Schormair, N., Thuro, K., Plinninger, R., 2006. The Influence of Anisotropy on Hard Rock Drilling and Cutting. *The Geological Society, IAEG-491*, 1-11.
- Su, O., Yaralı, O., Akçin, N.A., 2013. Comparison of Drilling Performance of Chisel and Button Bits on the Electro Hydraulic Driller. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI 10.1007/S00603-012-0358-3; 46(3), 1577-1586.
- Tamrock, 1999. *Rock Excavation Handbook*. M. Heiniö (Ed.), Sandvik Tamrock Corporation, s. 305.
- Thuro, K., Plinninger, R. J., 1999. Roadheader Excavation Performance, Geological and Geotechnical Influences. *9th ISRM Congress*, 25-28 August, Paris, 1241-1244.
- Wijk, G., 1992. A Model of Tunnel Boring Machine Performance. *Geotechnical and Geological Engineering*, Chapman & Hall, 10, 19-21.

Valantin, A., 1973. Examen des Differens Procedes Classiques de Determination de la nocivite des Roches. vis-à-vis de l'attaque Mecanique, 133–140.

Yaralı, O., Akçın, N.A., 2005. Zonguldak Taşkömür Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Araştırılması. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı. 9-12 Haziran, İzmir, 243-253.

Yaralı, O., 2005. Zonguldak Taşkömür Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Araştırılması. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı, 9-12 Haziran, İzmir, s.243-251.

Yaralı, O., 2010. Zonguldak Bölgesi Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Belirlenmesi. Türkiye 17. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, s. 203-215.

Yaralı, O., Soyer, E., 2013. Assessment of Relationships Between Drilling Rate Index and Mechanical Properties of Rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 46-53.

Yaralı, O., Duru, H., 2016. Investigation into Effect of Scratch Length and Surface Condition on Cerchar Abrasivity Index. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, 111-120.