

Kayaçlar İçin Spesifik Enerji İle Delme Oranı İndeksi (DRI), Mekanik Özellikleri, Cerchar Aşınma İndeksi Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi

Investigation of Specific Energy the Relationships among Drilling Rate Index (DRI), Mechanical Properties, Cerchar Abrasivity Index for Rocks

Olgay Yaralı^{1*}, Haşim Duru¹, Utku Sakız¹, Hamit Aydın¹

¹*Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye*

* Sorumlu yazar: oyarali67@gmail.com,

Özet

Bu çalışmada, 32 farklı kayaç (sedimanter, magmatic ve metamorfik) türü üzerinde basit regresyon analizi kullanarak delme oranı indeks değerleri (DRI) ile mekanik özellikler (tek eksenli basınç dayanım, dolaylı çekme dayanımı), Cerchar aşınma indeks değerleri (CAI) ve spesifik enerji (SEcal) arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Kayaçların mekanik özellikleri laboratuarda kayaçlar üzerinde yapılan deneylerden belirlenmiştir. Sievers minyatür delme deneyi ve kırıl-ganlık deneyleri yapılmış ve delme oranı indeksi bulunmuştur. Ayrıca, her bir kayacın spesifik enerji değeri görgül bir eşitlikten hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda da Delme Katsayısı (CD) olarak yeni bir jeoteknik delme indeksi tanımlanmıştır. İncelenen büyüklükler (UCS, BTS, CAI, SEcal, CD) birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Spesifik enerji, Cerchar aşınma indeksi, delme oranı indeksi

Abstract

In this study, the relationships among drilling rate index (DRI) values, mechanical properties (uniaxial compressive strength, UCS and tensile strength, BTS), Cerchar abrasivity index (CAI) and specific energy (SEcal) were investigated by using simple regression analyses for 32 different rock types (sedimentary, magmatic and metamorphic). Mechanical properties of rocks were determined on rock samples in laboratory. Sievers' J-miniature drill test and the brittleness test were carried out and DRI values were found. In addition, specific energy was calculated by using an empirical equation for each rock. In the end of this study, a new geotechnical drill index is defined as Coefficient of Drilling (CD). The magnitudes (UCS, BTS, CAI, SEcal, CD) were then compared with each other.

Keywords: *Specific energy, Cerchar abrasivity indeks, drilling rate index*

1. Giriş

Ehem inşaat mühendisliği hem de maden mühendisliğindeki kayak ve zemin kazılarında jumbo delicilerinin, üstten darbeli delicilerin, döner delicilerin kollu galeri açma makineler ile tam cephe galeri/tünel açma makinelerinin kullanımı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Bu sebeple, laboratuvar ve arazi uygulamalarından alınan temel veriler makine seçimi, tasarımı ve performans tahmini için hayati öneme sahiptir.

Kayacın delinebilirliği bir delme matkabının kayaç içinde ilerleme yapabilme hızı olarak tanımlanmaktadır (Tamrock, 1987). Başka bir tanım ise, delinebilirlik delme teknikleri ile kayaç içinde yapılan ilerleme sırasında kayaç gösterdiği dirençtir (Adebayo ve ark., 2010). Dönmeli ve darbeli delik delme ekipmanları kayaç kazılarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Delinebilirlik kavramı, özellikle mekanik kazı makinelerinin yeraltı yapılarında yaygın olarak kullanılmaya başlamasıyla giderek önem kazanmıştır. Tam cephe ve kollu galeri açma makinelerinin kullanılmaya başlanmasıyla kayaç kazı projelerinin planlaması ve maliyetlerinin tahmin edilmesinde önceden performans tahminine ilişkin bilgilere sahip olunması çok önemlidir (Kahraman, 2002).

Kayaların kazılabilirliği çeşitli şekillerde tanımlamak mümkündür. Örneğin belli koşullar altında kayaçın en büyük verimle en az güç kullanarak, en hızlı şekilde yerinden koparılması kazılabilirlik olarak tanımlanmaktadır (Balcı, 2004).

Makine seçimini ve performansını etkileyen faktörleri ayrıntılı olarak incelediğimizde üç ana grupta toplamak mümkün olmaktadır. Bunlar; makine ile ilgili faktörler, formasyonun jeolojik ve jeoteknik özellikleri ile işletme faktörleridir (Balcı ve ark., 2007). İlk iki faktöre ait özellikler Çizelge 1’de gösterilmiştir. İşletme faktörü ise; ekipman temin hızı, teknik personel kalitesi, iş yeri organizasyonu gibi etkenlerden oluşmaktadır.

Makine Özelliklerine Bağlı Parametreler	Jeolojik Parametreler
Makine Özellikleri <ul style="list-style-type: none">● Makine Tipi● Makinenin ağırlığı ve boyutları● Pasa toplama ve taşıma kapasitesi● Makinenin kurulu toplam gücü	Kaya Kütlesi Özellikleri <ul style="list-style-type: none">● Kaya kalite değeri (RQD)● Kaya kütlesi puanı (RMR)● Jeolojik süreksizlikler● Hidrojeolojik durum
Kesici Kafa Özellikleri <ul style="list-style-type: none">● Kesici kafanın tipi ve boyutu● Kesici kafanın gücü● Kesicilerin dizilimi ve sayısı● Keski tipi ve özellikleri	Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri <ul style="list-style-type: none">● Kesme parametreleri (Spesifik enerji, kesme kuvvetleri)● Dayanım özellikleri (basınç ve çekme dayanımı, kohezyon elastisite değeri)● Kaya dokusu (Porozite, kuvars içeriği, mikro çatlaklar ve tane boyu)● Aşındırıcılık (Cerchar değeri)● Sismik özellikler (P ve S değeri)● Diğer özellikler (yoğunluk, nem oranı vb.)

Çizelge 1. Kazı makinelerinin performansını etkileyen faktörler (Balcı ve ark., 2007).

Kazı işlemine başlamadan önce bu işlemin nasıl bir keski ve ne tip bir makine tarafından yapılabileceği ve makine performansının ne olacağı belirlenmelidir. Bunun için laboratuvarında indeks deneyleri yapılarak kayaçın kazılabilirliği ve delinebilirliği hakkında bilgi edinilmelidir. Birçok

araştırmacı kayacın delinebilirliğini ve kazılabilirliğini belirlenmede tek eksenli basınç dayanımının daha etkin olduğunu ileri sürmüşler, ancak tek eksenli çekme dayanımı, porozite ve petrografik özelliklerinin de önemli rol oynadığı da belirtmişlerdir (Fowell ve McFeat-Smith, 1976; Poole ve Farmer, 1976; Aleman, 1981; Howarth ve ark., 1986; Karpuz ve ark., 1990; Akçin ve ark., 1994; Bilgin ve ark., 1996; Thuro, 1996; Huang ve Wang, 1997; Kahraman, 1999, Kahraman ve ark., 2003a,b; Tanaino, 2005; Akun ve Karpuz, 2005; Peila ve Pelizza, 2009; Adebayo ve ark., 2010).

Yukarıda bahsedilen deneylerin haricinde arazide ve laboratuarda yapılan; Schmidt çekici sertlik deneyi, nokta yükü dayanımı indeks deneyi, Shore sertlik deneyi, delme oranı indeksi (DRI), koni batırma deneyi, kayaç dayanım katsayısı deneyi gibi deneylerinde delme ve kazı performansını belirlemede birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır (McFeat-Smith ve Fowell 1997; Howarth ve ark., 1986; Kavscek ve ark., 1988; Nilsen ve Özdemir 1993; Kahraman ve ark., 2003a,b; Adebayo ve ark., 2010; Yaralı ve Soyer, 2013).

Kazı makinelerinin performans tahminleri için araştırmacılar bir çok model ve yöntem geliştirmiş olmasına rağmen literatürde ve uygulamada en çok kabul gören iki model öne çıkmıştır. Bunlar; Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (NTNU) ve Colarodo Madencilik Okulu (CSM) tarafından geliştirilmiştir (Çizelge 2).

CSM Modeli	NTNU Modeli
<ul style="list-style-type: none">● Tek eksenli basınç dayanımı (deformasyon deneyi ile)● Dolaylı çekme dayanımı● Yoğunluk● Punch deneyi● Cerchar deneyi● Petrografik analizler<ol style="list-style-type: none">1. Sert minerallerin tipi ve içeriği2. Tanelerin konumu ve yönelimi3. Taneler arasındaki bağ4. Mikroçatlaklar ve boşluklar5. Diğer mikroskobik özellikler	<ul style="list-style-type: none">● Sievers minyatür delme deneyi (SJ)● Kırılma deneyi (S20)● Norveç aşınma deneyi (AV)● Petrografik analizler<ol style="list-style-type: none">1. Sert minerallerin tipi ve içeriği2. Tanelerin konumu ve yönelimi3. Taneler arasındaki bağ4. Mikroçatlaklar ve boşluklar5. Diğer mikroskobik özellikler

Çizelge 2. Modellerde kullanılan deneyler (Özdemir ve Nilsen, 1999).

Aşındırıcılık, delme hızını özellikle delici ucun aşınmasını en çok etkileyen önemli parametrelere biridir. Madencilik ve tünelcilik uygulamalarında delici uçların aşınması jeoteknik mühendislik ölçümlerini ve sert kayaç kazısı maliyetlerinde genellikle baskın bir faktördür (Plinninger, 2008). Cerchar aşınma indeksi (CAI) kayaçların aşındırıcılıklarının tanımlanmasında kullanılan en yaygın deney yöntemidir. CAI değeri delme matkabı veya keski ömrüyle doğrudan ilgilidir. Delici matkapla, kalem ucu keski ve TBM'lerde kullanılan disk keski-lerdeki aşınma oranlarına bağlı olarak kayaçların aşındırıcılık sınıflamalarını (Çizelge 3) tanımlanabilmektedir (Plinninger ve Restner, 2008).

Bu çalışmada laboratuarda 32 farklı kayaç üzerinde yapılan delme oranı indeksi deneyi, tek eksenli basınç dayanımı, tek eksenli dolaylı çekme (Brazilian), Cerchar aşınma indeksi deneyleri yapılmıştır. Her bir kayaç örneğinin spesifik enerjileri Bilgin ve ark., (1996) tarafından

önerilen görgül bağıntı kullanılarak belirlenmiştir. Basit regrasyon analizi yapılarak elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

Laboratuar deneyleri için Türkiye'deki farklı tünel ve madencilik sahalarından ayrıca, Norveç'den 2 farklı kayaç türü (sedimenter, magmatic ve metamorfik) örneği üzerinde deneyler yapılmıştır. Araziden alınan kayaç örneklerinin sağlam, çatlaksız ve süreksizlik içermemesine dikkat edilmiştir. Çizelge 4'de örnek alım yerleri ile alınan örneklerin isimleri verilmiştir.

Aşındırıcılık	Delici matkaplar (45 mmØ)	Kalem ucu keskiler	Disk keskiler (17"Ø)
	Keski ömrü [m/matkap]	Keski tüketimi [keski/m ³]	Disk keski ömrü [km/disk]
Çok az	> 2000	< 0.01	> 2000
Az	1500 – 2000	0.01 – 0.05	1500 – 2000
Orta	1000 – 1500	0.05 – 0.15	1000 – 1500
Yüksek	500 – 1000	0.15 – 0.30	500 – 1000
Çok yüksek	200 – 500	0.3 – 0.5	200 – 500
Oldukça yüksek	< 200	> 0.5	< 200

Çizelge 3. Kayaçların aşındırıcılığı ve delici matkap, kalem ucu keskiler ve disk keskiler için keski ömrü (Thuro ve Plinninger, 2007).

No	Örnek Adı	Yer
1	Kuarsit	Norveç-Trondheim
2	Kireçtaşı	Norveç-Trondheim
3	Diyabaz (açık gri)	Dorukan Tüneli
4	Diyabaz (koyu gri)	Dorukan Tüneli
5	Granodiorit	Dorukan Tüneli
6	Litik Arenit Kumtaşı	TTK Kozlu Müessesesi döküm sahası
7	Silttaşı	TTK Kozlu Müessesesi döküm sahası
8	Kireçtaşı (Mikritik)	ZKÜ yeni kapı girişi inşaat alanı
9	Siyenit (Porfirik)	Devrek-Yenice
10	Dolomit	Devrek
11	Porfirik bazaltik andezit	Zonguldak – Kdz. Ereğli 34. km
12	Porfirik bazaltik andezit	Zonguldak – Kdz. Ereğli 35. km
13	Bazaltik andezit (Açık Renk)	Zonguldak – Kdz. Ereğli 42. km
14	Dolerit	Devrek-Yenice
15	Alkali granit	Devrek-Yenice
16	Bazalt	Hasan Dağı etekleri
17	Andezitik bazalt	Zong.-Kdz. Ereğli 26. km
18	Porfirik andezit	Zong.-Kdz. Ereğli 37.km (Sütunlu bazaltlar)
19	Traki andezit	Kdz. Ereğli- Alaplı arası Taşocağı
20	Bazaltik andezit	Kdz. Ereğli- Devrek 11.km Yazıcılar Köyü
21	Dolomitik kireçtaşı	Kdz. Ereğli- Devrek 11.km Yazıcılar Köyü
22	Bazaltik andezit	Amasra
23	Kireçtaşı	Hema Madencilik yeni kuyu yeri
24	Silttaşı (Çok ince taneli)	Türkali-Göbü arası
25	Silttaşı (Kaba taneli)	Zong.-Devrek 18.km, Beycuma yol kavşağı
26	Porfirik bazaltik andezit	Zong.-Devrek 18.km, Beycuma yol kavşağı
27	Granit	Yenice- Kayabaşı mevki
28	Dolomitik kireçtaşı	Zong. Filyos arası
29	Dolomit	Zong. Filyos arası
30	Bazaltik andezit	Zong. – Yenice arası 50. km
31	Marn	Zong. – Devrek Karaman Mevkii
32	Kumtaşı (İnce taneli)	TTK Armutçuk Müessesesi döküm sahası

Çizelge 4. Örnek alım yerleri.

2.1 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi (UCS)

Bu deney boy-çap oranı 2.0-2.5 olan sağlam kayak örnekleri üzerinde 1.0 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır. Deneyler, ISRM (1979)'in önerdiği şekilde her bir kayaç örneği için 5 kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması kullanılmıştır.

2.2 Brazilian Tensile Strength (BTS)

Brazilian çekme dayanımı deneyleri kalınlık/çap oranı 0.5 olan karot örnekleriyle ve 200 N/s yükleme hızında uygulanmıştır. Deneyler, ISRM (1978)'in önerdiği şekilde her bir kayaç örneği için 10 kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması kullanılmıştır.

2.3 Delme Oranı İndeks Deneyi (DRI)

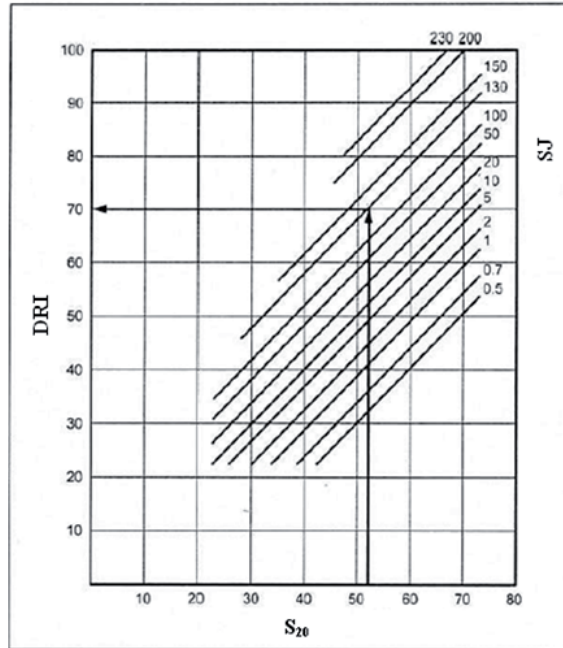
Delme oranı indeksi (DRI) 1943 yılında İsviçre’de N. von Matern ve A. Hjelmer tarafından geliştirilmiştir. Bu deney yöntemi birkaç değişiklikten sonra standart hale gelmiş ve 1950’li yılların sonundan itibaren kayaçların delinebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu deney yöntemindeki deney aletlerinin orijinali Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi SINTEF Kayaç ve Zemin Mekanikliği Laboratuvarında (Norwegian University of Science and Technology (NTNU) SINTEF Rock and Soil Mechanics) bulunmaktadır. Bu deney yöntemi özellikle sert kayaç kazısında kullanılan tam cephe galeri açma makinelerinin (hard rock TBM) ve kayaçların darbeli delme yöntemlerinin performans tahmin modellerinde kullanılmaktadır (NTNU, 1998; Nilsen 2003).

DRI iki temel laboratuvar deneyine bağlı olarak bulunmaktadır. Birincisi; kırılma deneyi (brittleness test) $S_{(20)}$, ve diğeri ise Sievers minyatür delme değeri deneyi (Sievers miniature drill-test value), SJ ’dir. Delme oranı indeksi kayaç yüzey sertliği için düzeltilmiş kırılma değeri olarak da tanımlanabilir (Dahl, 2003). Çizelge 5’de DRI’ya ait sınıflama verilmiştir. Delme oranı indeksi Şekil 1’de verilen diyagram kullanılarak bulunur.

Sınıf	DRI
Oldukça düşük	≤ 25
Çok düşük	26–32
Düşük	33–42
Orta	43–57
Yüksek	58–69
Çok yüksek	70–82
Oldukça yüksek	≥ 83

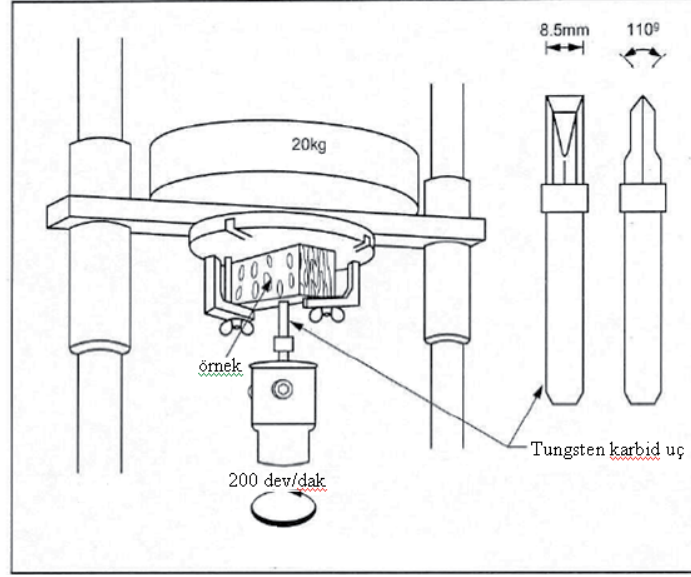
Çizelge 5. DRI’nın sınıflaması (Dahl, 2003).



Şekil 1. DRI belirleme diyagramı (Dahl, 2003).

2.3.1 Sievers Minyatür Delme Deneyi

Bu deney kayacın yüzey sertliğinin veya delmeye karşı direncin bir ölçüsünü verir. Bu deney yöntemi 1950'li yıllarda H. Sievers tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2'de bu deney yönteminin genel hatları gösterilmektedir. Şekil 3'de Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Maden Mekanizasyonu Araştırma Laboratuvarında bulunan kırılgenlik deney aletinin resmi verilmiştir.



Şekil 2. Sievers minyatür delme deneyi düzeni (Dahl, 2003).

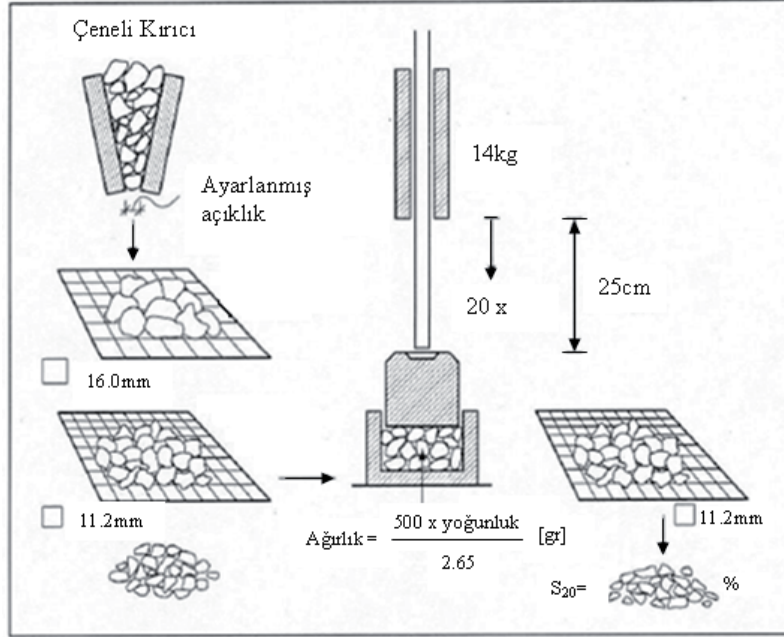


Şekil 3. Sievers minyatür delme deney aleti.

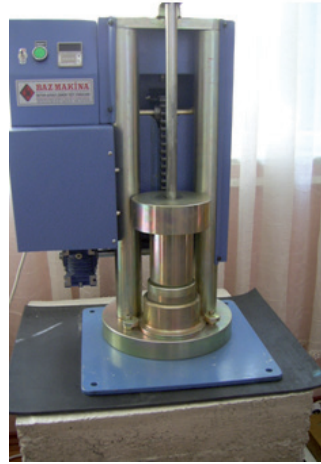
Bu çalışmada Sievers minyatür delme deneyi (SJ) için 54 mm çaplı 30 mm kalınlığındaki kayaç örnekleri kullanılmıştır. Her bir kayaç örneği yüzeyinde delme işi 5 ile 7 kez tekrarlanmıştır. Delik boyları bir elektronik kumpas ile ölçülerek elde edilen değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Deneyler Dahl (2003)'e göre yapılmıştır.

2.3.2 Kırılmalık Deneyi (S20)

Bu deneyde, kayaç örneklerinin kırılmaya karşı dirençleri belirlenmektedir. Şekil 4’de bu deney yönteminin genel hatları gösterilmektedir. Şekil 5’de Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Maden Mekanizasyonu Araştırma Laboratuarında bulunan kırılmalık deney aletinin resmi verilmiştir.



Şekil 4. Kırılmalık deney düzeneği (Dahl, 2003).



Şekil 5. Kırılmalık deney aleti.

Her bir kayacın kırılmalık değeri için Dahl (2003)’e göre aynı koşullarda 3–5 kez tekrar edilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması kullanılmıştır.

2.4 Cerchar Aşınma İndeksi (CAI)

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.

Deneylerde, Rockwell sertliği 54, çekme dayanımı 2000 MPa, konik açısı 90°olan konik uçlar kullanılmıştır. Kayaç örnekleri üzerindeki çizme işlemi, her defasında yeni bir uçla aynı yönlerde 5 kez tekrarlanarak yapılmıştır. Konik uçların uç kısımlarında oluşan aşınma yüzeyinin çapı ışık yansımali 35X büyütmeli mikrometre ölçekli bioküler mikroskop altında ölçülmüştür. 1/10 mm'lik aşınma yüzeyi bir birim Cerchar aşınma indeksi olarak kabul edilmiştir. Böylece, kayaçlara ait Cerchar aşınma indeksi değeri 5 çizimin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Deneyler Alber ve ark., (2014)'e göre yapılmıştır. Deneylerde West deney aparatı kullanılmıştır (Şekil 6). Cerchar aşınma indeksine göre aşındırıcılık sınıflaması Çizelge 6'da verilmiştir.

Ort. CAI	Sınıflaması
0.1 – 0.4	Oldukça az
0.5 – 0.9	Çok az
1.0 – 1.9	Az
2.0 – 2.9	Orta
3.0 – 3.9	Yüksek
4.0–4.9	Çok yüksek
≥ 5	Oldukça yüksek

Çizelge 6. Cerchar aşınma indeksi sınıflaması (Alber ve ark., 2015).



Şekil 6. West deney aparatı.

2.5 Spesifik Enerji (SE)

Spesifik enerji kesme veya delme sistemlerinin verimliliğini belirlemedeki en önemli faktörlerden biridir ve kayacın birim hacminin kazı veya delme işi olarak tanımlanır. Spesifik enerji birim metre maliyetiyle doğrudan ilgilidir (Thuro ve Spaun, 1996). Bu çalışmada, her bir kayacın spesifik enerji değeri Bilgin ve ark., (1996) tarafından önerilen görgül bağıntı kullanılarak bulunmuştur (Eşitlik 1).

$$SE_{cal} = 0.0826 \cdot UCS + 1.424$$

Burada;

$$SE_{cal} : \text{Hesaplanmış spesifik enerji (kWh/m}^3\text{)}$$

$$UCS : \text{Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)}$$

3. Sonuçların Değerlendirilmesi

32 farklı kayaç türü (sedimanter, magmatik ve metamorfik) türü üzerinde laboratuarda yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 7'de verilmiştir.

No	Kayaç Adı	UCS (MPa)	BTS (MPa)	CAI	SE _{cal} (kWh/m ³)	SJ	S20	DRI
1	Kuarsit	164.77±12.29	17.07 ± 2.35	4.90	15.03	2.42 ± 0.16	52.45±0.49	45
2	Kireçtaşı	78.24 ± 10.52	10.34 ± 2.46	1.75	7.89	60.80 ± 4.75	47.37±0.23	58
3	Diyabaz (açık gri)	117.89 ± 8.55	8.15 ± 2.26	3.05	11.16	50.43 ± 6.85	37.35±2.06	48
4	Diyabaz (koyu gri)	98.39 ± 7.92	7.89 ± 2.82	1.40	9.55	87.72 ± 1.61	49.94±0.24	61
5	Granodiorit	64.55 ± 10.43	6.14 ± 1.99	5.90	6.76	13.20 ± 1.50	65.63±2.74	66
6	Litik Arenit Kumtaşı	75.63 ± 22.53	6.69 ± 1.18	2.50	7.67	96.90 ± 1.29	54.71±3.48	69
7	Silttaşı	67.64 ± 9.15	6.19 ± 2.84	1.55	7.01	133.39 ± 7.27	46.57±1.52	65
8	Kireçtaşı (Mikritik)	82.51 ± 13.84	6.78 ± 1.63	2.30	8.24	67.84 ± 1.05	57.70±1.56	68
9	Siyenit (Porfirik)	182.10 ± 8.47	8.34 ± 1.17	3.80	16.47	56.91 ± 1.39	42.27±2.29	51
10	Dolomit	91.38 ± 6.49	7.70 ± 2.85	1.95	8.97	89.73 ± 1.30	69.47±2.91	76
11	Porfirik bazaltik andezit	110.86 ± 4.32	8.30 ± 2.16	3.10	10.58	102.57 ± 0.57	40.79±2.43	55
12	Porfirik bazaltik andezit	76.45 ± 4.15	7.62 ± 1.66	2.50	7.74	103.68 ± 0.42	50.87±3.54	65
13	Bazaltik andezit	132.48 ± 6.54	8.76 ± 2.65	3.10	12.37	80.46 ± 0.36	42.53±1.88	52
14	Dolerit	175.5 ± 10.85	16.50 ± 3.56	4.15	15.92	55.72 ± 2.12	26.58±2.44	35
15	Alkali granit	141.56 ± 8.48	11.75 ± 2.85	4.15	13.12	3.10 ± 0.26	44.20±1.38	39
16	Bazalt	120.73 ± 3.45	10.78 ± 3.45	2.20	11.40	36.98 ± 4.70	41.33±2.06	46
17	Andezitik bazalt	77.80 ± 18.05	9.42 ± 3.49	2.60	7.85	119.71 ± 1.88	48.00±2.45	64
18	Porfirik andezit	82.93 ± 10.73	5.17 ± 0.85	1.55	8.27	91.53 ± 1.47	55.26±1.33	69
19	Traki andezit	104.53±23.54	5.75 ±0.86	4.60	10.06	39.07 ± 2.94	60.49±1.74	60
20	Bazaltik andezit	92.53 ± 12.82	11.20 ± 2.11	3.80	9.07	91.73 ± 3.31	53.39±2.69	63
21	Dolomitik kireçtaşı	51.37 ± 11.40	5.66 ± 0.87	1.15	5.67	32.18 ± 0.46	57.24±0.70	63
22	Bazaltik andezit	28.61 ± 5.76	2.57 ± 0.61	2.55	3.79	103.68 ± 0.25	74.43±1.00	86
23	Kireçtaşı	78.99 ± 17.91	9.08 ± 1.94	1.15	7.95	75.03 ± 0.86	57.11±1.44	68
24	Silttaşı (Çok ince taneli)	75.75 ± 22.53	11.18 ± 0.99	0.45	7.68	76.51 ± 0.29	63.65±0.32	74
25	Silttaşı (Kaba taneli)	81.03 ± 16.19	7.54 ± 1.48	0.25	8.12	94.30 ± 0.45	63.90±2.17	74
26	Porfirik bazaltik andezit	65.72 ± 11.53	5.85 ± 1.87	3.20	6.85	28.84 ± 1.51	66.52±1.26	71
27	Granit	101.16±16.99	8.32 ± 1.90	5.10	9.78	4.63 ± 0.27	55.51±1.48	56
28	Dolomitik kireçtaşı	31.57 ± 10.21	4.36 ± 0.99	1.45	4.03	91.68 ± 0.77	62.12±1.85	73
29	Dolomit	31.70 ± 4.38	7.45 ± 1.13	1.95	4.04	84.10 ± 1.48	63.59±1.89	75
30	Bazaltik andezit	143.14±16.32	12.38 ± 2.58	4.00	13.25	41.96 ± 2.71	43.61±2.33	50
31	Marn	89.60 ± 14.46	7.03 ± 1.68	1.4	8.82	85.28 ± 1.46	63.83±1.49	72
32	Kumtaşı (İnce taneli)	69.02 ± 12.39	4.08 ± 0.82	2.15	7.13	122.93 ± 0.88	63.50±0.89	80

Çizelge 7. Deney sonuçları.

SJ : Sievers minyatür delme deneyi, S20 :Kırılgenlik deneyi, DRI : Delme oranı indeksi, UCS: Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

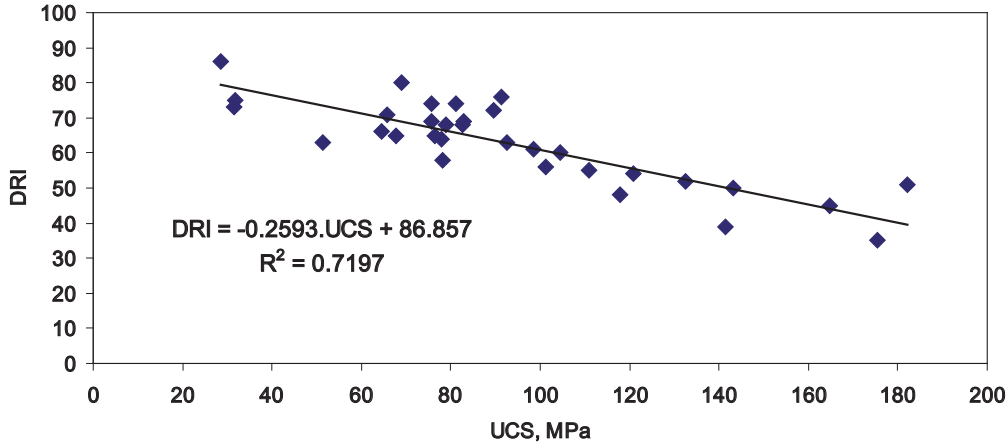
BTS : Brazilian çekme dayanımı, CAI: Cerchar aşınma indeksi, SE_{cal}: Hesaplanmış spesifik enerji. Çizelge 7 incelendiğinde, kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarının 31 – 165 MPa, Brazilian çekme dayanımlarının 2.57 – 17.07 MPa, Cerchar aşınma indekslerinin 0.25 – 5.90, Spesifik

enerjilerinin ise 5.67 – 16.47 kWh/m³ değiştiği bulunmuştur. DRI değerleri ise, sedimanter kayaçlar için yüksek – çok yüksek, magmatik kayaçlar için orta – yüksek, metamorfik kayaçlar için ise çok yüksek– orta delinebilirlik sınıfında yer aldığı görülmektedir.

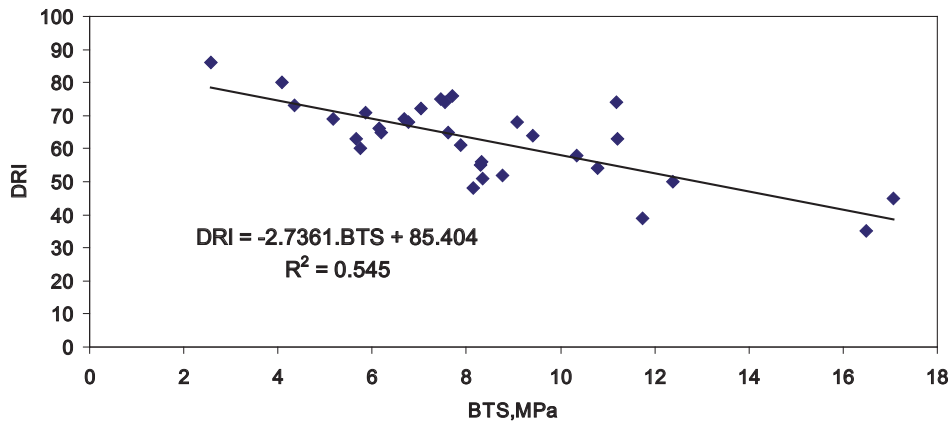
Delme oranı indeksi (DRI) ile tek eksenli basınç dayanımı arasında azalan doğrusal bir ilişki bulunmuştur (Şekil 7). Yani kayacın dayanımı arttıkça kayacı delmek zorlaştığı görülmektedir. Benzer durum Brazilian çekme dayanımıyla DRI arasında da söz konusudur (Şekil 8)

Cerchar aşınma indeksi (CAI) ile delme oranı indeksi arasında zayıf bir ilişki varken ($R^2= 0.31$, Şekil 9), kayaç aşındırıcılığının kayacın tek eksenli basınç dayanımı ile çarpılması durumundaki büyüklük ile DRI arasında daha anlamlı olan azalan doğrusal bir ilişki saptanmıştır ($R^2= 0.68$, Şekil 10). Bu durum, kayaç aşındırıcılığın ve dayanımının birlikte delinebilirlik üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.

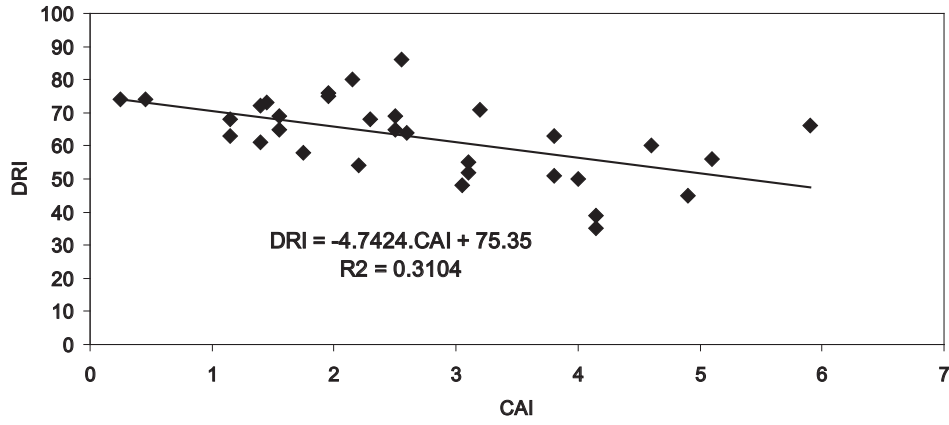
Delme oranı indeksi ile hesaplanmış spesifik enerji (SE_{cal}) değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre, bu iki büyüklük arasında korelasyon katsayısı 0.72 olan mükemmel logaritmik bir ilişki bulunmuştur (Şekil 11).



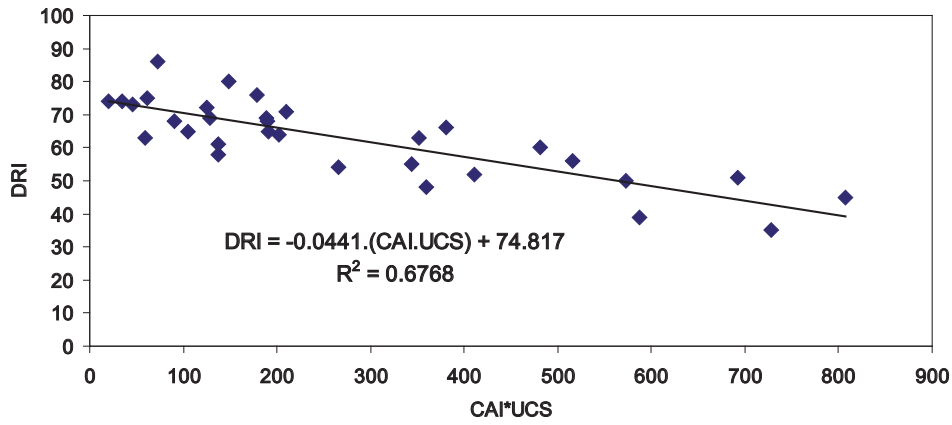
Şekil 7. Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ile DRI arasındaki ilişki.



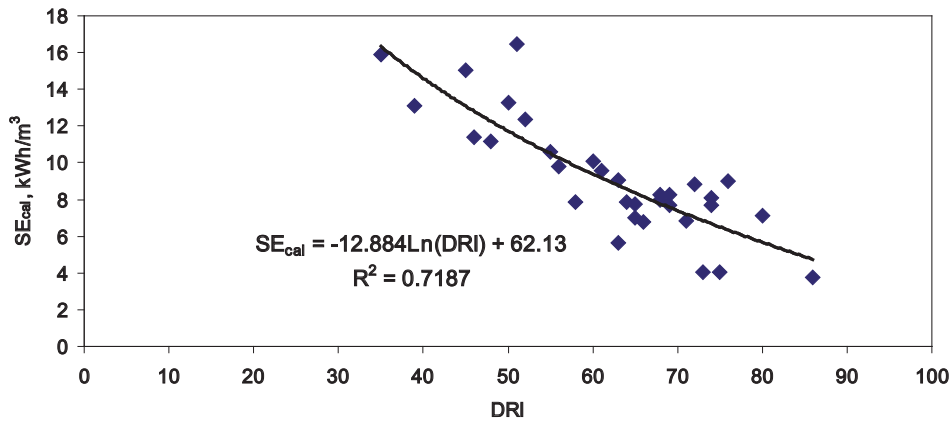
Şekil 8. Brazilian çekme dayanımı (BTS) ile DRI arasındaki ilişki.



Şekil 9. Cerchar aşınma indeksi (CAI) ile DRI arasındaki ilişki.



Şekil 10. Cerchar aşınma indeksi (CAI) ve tek eksenli basınç dayanımı (UCS) çarpımı ile DRI arasındaki ilişki.

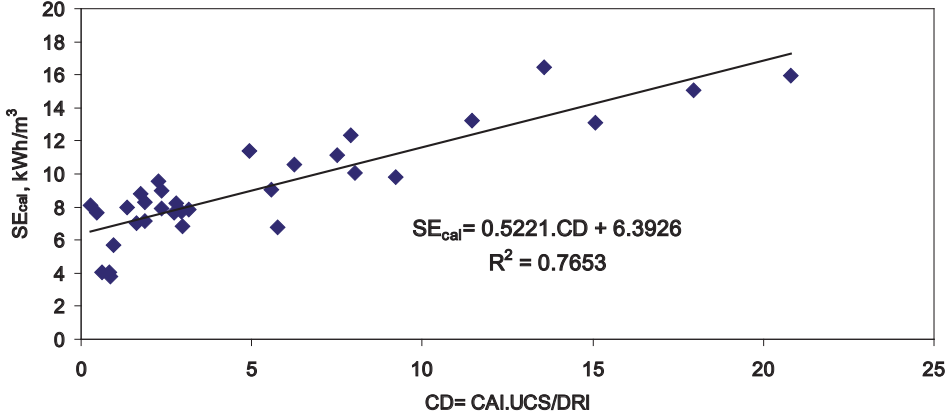


Şekil 11. Delme oranı indeksi (DRI) ile hesaplanmış spesifik enerji (SE_{cal}) arasındaki ilişki.

Bu çalışmada, kayaçların delinebilirliği için yapılan tahmin modellerinde kullanılmak üzere Delme Katsayısı (CD) olarak tanımlanmış yeni bir jeoteknik delme indeksi tanımlanmıştır (Eşitlik 2).

$$CD = \frac{UCS * CAI}{DRI} \quad (2)$$

Kayaçlar için geliştirilen bu parametre, kayacın tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve Cerchar aşınma indeksi (CAI) ile doğru orantılı, delme oranı indeksi (DRI) ile ters orantılıdır. Delme Katsayısı ile hesaplanmış spesifik enerji arasında Şekil 12'de gösterildiği gibi artan doğrusal bir ilişki bulunmuştur.



Şekil 12. Delme Katsayısı (CD) ile hesaplanmış spesifik enerji (SE_{cal}) arasındaki ilişki.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 32 farklı kökendeki kayaçlar üzerinde dayanım, aşınma ve delinebilirlik deneyleri yapılmıştır. Her bir kayaç için Bilgin et al. (1996) tarafından önerilen görgül bağıntı kullanılarak spesifik enerjileri hesaplanmıştır. Deneylerden bulunan sonuçlar EXCEL programı kullanılarak basit regresyon analizleriyle birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın sonuçları, literatürde benzer araştırma yapan araştırmacıların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında uyumluluk göstermektedir (Tamrock, 1988; NTNU, 1988; Bruland ve ark., 1995; Thuro, 1996; Plinninger ve ark., 2002; Bilgin ve Kahraman, 2003; Altındag, 2004; Plinninger, 2008; Yenice ve ark., 2009; Adebayo ve ark., 2010; Dahl ve ark., 2010; Dahl ve ark., 2012; Yaralı ve Soyer, 2013).

Kayacın dayanımı, kayaçların delinebilirliğine ve kazılabilirliğine etkileyen başlıca parametre olmasına rağmen, tek başına yeterli değildir. Kayacın dayanımının sağlam olup olmaması da birim kazı miktarını kazmak için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanan spesifik enerjiyi de doğrudan etkilemektedir. Kayaçların aşındırıcılıkları Cerchar aşınma indeksi deneyi ile bulunmuştur. Kayaç aşındırıcılığı kazılabilirliği ve delinebilirliği doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma sonucunda, Hem tek eksenli basınç dayanımı hem de Cerchar aşınma indeksi değerlerinin çarpımı kayacın delinebilirlik durumunu gösteren delme oranı indeksi ile doğrudan ilişkisi olduğu bulunmuştur.

Bu çalışma sonucunda tek eksenli basınç dayanımına, Cerchar aşınma indeksine ve delme oranı indeksine bağlı olarak Delme Katsayısı (CD) olarak tanımlanan yeni bir jeoteknik delme indeksi tanımlanmıştır. Bu büyüklük ile spesifik enerji ile karşılaştırıldığında artan doğrusal bir saptanmıştır. Bu durum, makine seçimi ve performans analizi yapacak mühendise ve araştırmacılara yeni bir bakış açısı kazandıracak ve daha gerçekçi tahmin modellerinin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a (Proje No: 110M437 ve 110M579), Bülent Ecevit Üniversitesi Rektörlüğüne, Prof Dr. Bjorn NİLSEN'e (NTNU), Filip DAHL'a (SINTEF, Lab. Müdürü, Norveç), Prof Dr. Nuh BİLGİN'e (İTÜ), Prof Dr. Nuri Ali AKÇIN'a (ZKÜ) sonsuz teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

Adebayo, B., Opafunso, Z. O., Akande, J.M., 2010. Drillability and strength characteristics of selected rocks in Nigeria. *AU Journal*. 14(1), 56–60

Akçın, N.A., Muftuoglu, Y.V., Bas, N., 1994. Prediction of drilling performance for electro-hydraulic percussive drills. In: *Proceedings of the Third International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, Balkema, Istanbul, Turkey, 483–488.

Akun, M.E., Karpuz, C., 2005. Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak Region sandstones from Turkey. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 42, 473–479.

Aleman, V.P., 1981. A strata strength index for boom type roadheaders. *Tunnel and Tunnelling*. 13, 52–55.

Alber, M., Yaralı, O., Dahl, F., Bruland, A., Kasling, H., Michalakopoulos, T.N., Cardu, M., Hagan, P., Aydın, H., Özaraslan, A., 2014. ISRM Suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar abrasivity test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 47, 261–266.

Altındağ, R., 2004. Evaluation of drill cuttings in prediction of penetration rate by using coarseness index and mean particle size in percussive drilling. *Geotechnical and Geological Engineering*. 22, 417–425.

Balcı, C., 2004. Mekanize Kazı Makinalarının Seçiminde Küçük Boyutlu Kazı İle Tam Boyutlu Kazı Deneylerinin Karşılaştırılması, Doktora Tezi (yayınlanmamış), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Balcı, 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, MMO, Kütahya, 61–70.

Bilgin, N., Yazıcı, S., Eskikaya, S., 1996. A model to predict the performance of roadheaders and impact hammers in tunnel drivages, In: *Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering*, Torino, 2, 715–720.

Bilgin N., Kahraman S., 2003. Drillability prediction in rotary blast hole drilling. In: *International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET 2003*, 395–496.

Bruland A., Dahlo, T.S., Nilsen, B., 1995. Tunnelling performance estimation based on drillability testing. In: *Proceedings 8Th International Congress on Rock Mechanics*. Sep. 25–30, Tokyo, Japan, 123–126.

- Dahl, F., 2003. DRI, BWI, CLI Standards. NTNU, Angleggsdrift, Trondheim, Norway.
- Dahl, F., Bruland, A., Grov, E., Nilsen, B., 2010. Trademarking the NTNU/SINTEF drillability test indices. *Tunnels & Tunnelling International*. June, 44–46.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grov, E., 2012. Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 28, 150–158.
- Fowell, R.J., McFeat–Smith I., 1976. Factors influencing the cutting performance of a selective tunnelling machine, *Tunnelling'76*. In: Institution of Mining and Metallurgy, London, 3–11.
- Howarth, D.F., Adamson, W.R., Berndt, J.R., 1986. Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 23, 171–175.
- Huang, S.L., Wang, Z.W., 1997. The mechanics of diamond core drilling of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 34, 6–12.
- ISRM, 1978. Suggested method for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 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 Sciences*. 16, 135–140.
- Kahraman, S., 1999. Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 36, 981–989.
- Kahraman, S., 2002. Correlation of TBM and drilling machine performances with rock brittleness. *Engineering Geology*. 65, 269–283.
- Kahraman, S., Bilgin, N., Feridunoglu, C., 2003a. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 40 (5), 711–723.
- Kahraman, S., Gunaydin, O., Fener, M., Bilgin, N., 2003b. Correlation between Los Angeles abrasion loss and uniaxial compressive strength. In: *Proceedings of International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones*, Istanbul, Turkey, 577–581.
- Karpuz, C., Pasamehmetoglu, A.G., Dincer, T., Muftuoglu, Y., 1990. Drillability studies on the rotary blasthole drilling of lignite overburden series, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 4, 89–93.
- Kovscek, P.D., Taylor, C.D., Thimons, E.D., 1988. Evaluation of Water–Jet Assisted Drilling with Handheld Drills. U.S. Dept. of the Interior, USBM RI–9174, USA.
- McFeat–Smith, I., Fowel, R.J., 1997. Correlation of rock properties and the cutting performance of tunnelling machines. In: *Proceedings of a Conference on Rock Engineering*, The University of Newcastle upon Tyne, 581–602.

Nilsen, B., Ozdemir, L., 1993. Hard rock tunnel boring prediction and field performance. In: Proceedings of The Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Boston, MA, 833–852.

Nilsen, B., 2003. Investigation and testing for Norwegian hard rock TBM performance prediction. In: Bilgin N (ed) Türkiye Yeraltı Kaynaklarının Bugünü ve Geleceği, ITU Miming Faculty 50th Year Symp., Istanbul, Turkey, 89–96.

NTNU–Anleggsdrift, 1988. Hard Rock Tunnel Boring. Norwegian University of Science and Technology, Dept. of Civil and Transport Engineering, Report 1B–98.

Özdemir, L., Nilsen, B., 1999. Recommended laboratory rock testing for TBM projects. AUA News, 14(2): 21–35.

Peila, D., Pelizza, S., 2009. Ground probing and treatments in rock TBM tunnel to overcome limiting conditions. Journal of Mining Science. 45(6), 602–619.

Plinninger, R.J., Spaun, G., Thuro, K., 2002. Predicting tool wear in drill and blast. Tunnels & Tunnelling International 4/2002, 38–41.

Plinninger, R. J., 2008. Abrasiveness assessment for hard rock drilling. Geomechanik und Tunnelbau. 1, 39–46.

Plinninger, R.J., Restner, U., 2008. Abrasiveness testing, quo vadis? – A commented overview of abrasivity testing methods. Geomechanik und Tunnelbau. 1, 61–70.

Sievers, H., 1950. Die bestimmung des Bohrwiderstandes von Geesteinen, Glückauf. 37/38, 776–784.

Tamrock, 1988. Surface Drilling and Blasting. Finland.

Tanaino, A.S., 2005. Rock classification by drillability Part I: analysis of the available classifications. Journal of Mining Science. 41, 541–549.

Thuro, K., 1996. Drillability prediction in hard rock tunneling. In: Conference on Prediction in Geology, Vrije Universiteit, Amsterdam, 22–24 February, 103–108.

Thuro, K., Spaun, G., 1996. Introducing the destruction work as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill and blast tunneling. In: Eurock'96 Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, Torino, 2, 707–720.

Thuro, K., Plinninger, R.J. 2007. Geologisch–geotechnische Grundlagen der Gebirgslösung im Fels., In: Eichler, K. et. al. (Hrsg.): Fels– und Tunnelbau II, Kontakt und Studium, Band 684, Renningen–Malmsheim (Expert), 112–160.

Valantin, A., 1973. An Examination of the Various Conventional Procedures to Determine the Resistance of Rock to Mechanized Winning. Development and Exploratory Techniques in Coal Mines, Commission of the European Commercial Shearing Co. Youngstown, 15–84.

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.

Yenice, H., Ozfırat, M.K., Kahraman, B., Ozdogan, M.V., 2009. Examination of drilling rate index (DRI) of rocks. In: *Proceedings of 3rd Balkan Mining Congress*, 1–3 October, Izmir, Turkey, 321–328.