

## Kayaçların Equotip Sertlik İndeksi ile Mekanik Özellikleri ve Delinebilirliği Arasındaki İlişkiler

Okan SU\*<sup>1</sup>, Moe MOMAYEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bülent Ecevit Üniversitesi, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, 67500, Zonguldak

<sup>2</sup>Arizona Üniversitesi, Maden ve Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 85721, Tucson, AZ, USA

(Alınış / Received: 10.12.2016, Kabul / Accepted: 17.02.2017,  
Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2017)

**Anahtar Kelimeler**  
Equotip Sertlik  
İndeksi,  
Delme Oranı  
İndeksi,  
Delinebilirlik,  
Jumbo Delici

**Özet:** Yeraltı maden galerileri veya tünel kazısı sırasında uygun delici makine ve uç seçimi, makine performansını ve birim maliyetleri etkileyen önemli faktörlerdir. Bu seçim kayacın delinebilirlik, sertlik ve diğer mekanik özelliklerinin doğru olarak ölçülmesiyle yapılabilir. Bu makalede, öncelikle yurt içi ve yurt dışından alınan blok numuneler ISRM standartlarına göre uygun boyutlarda hazırlanmıştır. Daha sonra, laboratuvarında Equotip ve Shore sertliği ile mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, her bir numunenin delinebilirliğini sınıflandırmak üzere delme oranı indeksi ölçülmüştür. Bu bağlamda Equotip sertlik indeksi ile Shore indeksi, mekanik özellikleri ve delme oranı indeksi arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Basit regresyon analizlerinden dayanımı 19 MPa'nın üzerinde ve delme oranı indeksi 70'in altında olan kayalarda Equotip sertlik indeksinin delinebilirliğin tahmininde güvenilir olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

## Correlation Between Equotip Hardness Index, Mechanical Properties and Drillability of Rocks

**Keywords**  
Equotip Hardness  
Index,  
Drilling Rate  
Index,  
Drillability,  
Jumbo drill

**Abstract:** Selection of a jumbo drill and appropriate bit type are important factors affecting machine performance and unit costs when excavating a mine roadway or tunnel. The selection process can be optimized if the drillability, hardness and other mechanical properties of rocks are accurately measured. In this article, block samples collected at various locations around the world were initially prepared according to ISRM standards. Next, the Equotip hardness, Shore hardness, and mechanical properties were determined. In addition, the drilling rate index of the samples was measured and each sample was categorized based on its drillability. The relationship between Equotip hardness index, Shore index, drilling rate index, and other mechanical properties were analyzed. Simple regression statistics revealed that Equotip hardness index test could be reliably used to predict the drillability of rocks that have a compressive strength higher than 19 MPa and a drilling rate index lower than 70.

\*Sorumlu yazar: okansu@beun.edu.tr

## 1. Giriş

Madencilik çalışmaları kapsamında yeraltında cevhere ulaşmak için farklı kesitlerde tabanyolu ve galeriler, taşıma amaçlı metro tünelleri; yeryüzünde ise karayolu, demiryolu, derivasyon vb. amaçlı tüneller açılmaktadır. Üretime veya faaliyete bir an önce geçebilmek için bu tünellerin en kısa zamanda, güvenli, ekonomik ve hızlı bir şekilde açılması hedeflenir. Ancak, kayaç yapısı, jeolojik ve hidrojeolojik koşullar ilerleme hızlarını etkiler. Bunun yanı sıra üretim yönteminin (klasik veya mekanize) de etkisi oldukça fazladır. Mekanize sistemlerle kazı yapıldığında genellikle üretim hızı ve miktarı artmakta, ancak ilk yatırım maliyetleri de yükselmektedir. Klasik delme-patlatma yönteminde ise maliyetler çok yüksek olmamakla birlikte ilerleme hızları nispeten daha düşüktür. Bunun nedeni, kazının kesintili devam etmesindedir. Yüksek üretim miktarlarına ulaşmak ve duraylı tünellerin açılmasını sağlamak için mekanize kazı sistemlerinden faydalanmak oldukça yararlı olmaktadır.

Mekanize sistemlerin uygulandığı koşullarda makinelerden yararlanır. Bu sistemlerin tahkimat mekanizmaları genellikle ayna geometrisine ve jeolojik koşullara göre değişir. Kazı sistemleri (kesici kafa) ise tüm makinalarda farklılık gösterir. Klasik delme-patlatma yönteminde ise en önemli donanım delik delmede kullanılan makinedir. Bu bağlamda uygulandığı yere ve kesite göre martoperferatör veya jumbo delik deliciler yaygın olarak kullanılan makinelerdendir. Genellikle B14 ve üzerindeki kesitlerde jumbo deliciler uygulanabilmektedir. Kesit arttıkça 2 ve 3 kollu makineler de kullanılır. Bu makinelerin ilerleme hızlarının tayin edilmesi için öncelikle kayacın delinebilirlik özellikleri, ayrıca mekanik ve petrografik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla yaygın olarak yapılan deneylerden bir tanesi kayacın sertlik

özelliklerinin belirlenmesidir. Sertlik, dıştan gelen bir mekanik etkiye karşı kayacın göstermiş olduğu dirençtir. Kaya yüzeyi üzerinde belirli bir baskı altında ucun ardışık olarak sıçraması ve geri sıçrama yüksekliğinin ölçülmesi ile sertlik belirlenir. Sıçrama yüksekliği kaya yüzeyinin elastik özelliği hakkında da bilgi verir [1]. Yani, sertlik hem kayacın delinebilirliğinin ve hem de dayanımının tahmin edilmesinde kullanılabilen bir indeks özelliğidir.

Sertliğin ölçülmesi kayaçlar için her ne kadar zor olsa da halen uygulanan üç yöntem bulunmaktadır. Bunlar batma deneyleri (Brinell, Rockwell C, Vickers, Knoop), dinamik veya geri zıplama sertlik deneyleri (Shore, Schmidt) ile çizme sertlik deneyleri (Mohs) dir [2,3]. Bu deneyler içerisinde geri zıplama sertlik deneyleri olan Shore ve Schmidt, madencilik ve inşaat endüstrisinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Ancak, Shore sertlik indeksi deney aletinin günümüzde üretiminin oldukça azalması araştırmacı ve mühendisleri yeni deney aletlerinin geliştirilmesine sevk etmektedir. Bu amaçla uygulaması yaygınlaşan deney yöntemlerinden birisi Equotip sertlik indeksidir. Bu deney her ne kadar metallerin sertlik tayininde kullanılsa da artık günümüzde kayaçların yüzey sertliğini ölçmek üzere de uygulanmaya başlanmıştır. Equotip sertlik ölçerin çalışma mekanizmasının Shore skeloroskobuna benzemesi, deneyin kayaçlar üzerinde uygulanabilirliğini daha da geçerli kılmaktadır.

### 1.1. Shore sertlik indeksi

Shore sertlik indeksi kayaçların sertliklerinin tahmin edilmesinde uygulanan oldukça basit ve ucuz bir deney yöntemidir. Deney; ilk olarak metallerin sertliğini belirlemek amacıyla 1907 yılında Albert F. Shore tarafından Amerika'da dizayn edilmiş olan Shore skeloroskobu ile yürütülmüştür. 1930'lu

yıllarda ise skeloroskop kayaçların sertliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır [4]. Shore skeloroskopları C ve D model olmak üzere iki çeşittir. C modelde 5,94 mm çap ve 2,3 gr ağırlığında uç kullanılırken, D modelde ise 7,94 mm çapında ve 36 gr ağırlığında elmas uç kullanılır [5]. D model Brinell ve Rockwell sertlik indekslerini de ölçebilmektedir.

Shore sertlik deney aletinde elmas veya tungsten karpitten üretilmiş bir ucun düzeltilmiş bir yüzey üzerine belirli bir yükseklikten serbest olarak düşürülmesi ve daha sonra ucun geri sıçrama yüksekliğine kayacın sertliği belirlenir. ISRM [2]'e göre deneyin uygulanması için en az 1 cm kalınlığındaki örneklerin minimum 10 cm<sup>2</sup>'lik parlatılmış yüzey alanına sahip olması gerekmektedir. Altındağ ve Güney [6] ise numune hacminin en az 80 cm<sup>3</sup> olması gerektiğini önermiştir. ASTM [7]'e göre en az 15 mm kalınlıkla olmak şartı ile NX veya daha büyük boyutlarındaki karot numuneleri de deney için kullanılabilir. Ayrıca, numuneleri sıcaklık değerlerinin sonuçları etkileyebileceği ve bu nedenle hepsinin aynı sıcaklık değerlerinde olması gerektiği önerilmektedir. Çünkü 0°C ve daha düşük sıcaklıktaki kayaçların çok yüksek geri sıçrama değerleri sergileyeceği belirtilmektedir [7].

Shore skeloroskobuna yerleştirilen örnek üzerinde en az 5 mm aralıklarla 20 okuma yapılır ve bu değerlerin aritmetik ortalaması kayacın Shore sertlik indeksini verir. Elde edilen değer aynı zamanda yüzeyin elastiklik özelliğinin de bir ölçüsüdür.

Birçok araştırmacı günümüze dek Shore sertlik indeksini çok çeşitli çalışmalarda kullanmışlardır. Szlavın [8] kayacın Shore sertlik indeksi ile diğer mekanik özellikleri arasında önemli ilişkiler bulmuş, ancak kayacın kazılabilirliği ve mekanik özellikleri arasında anlamlı

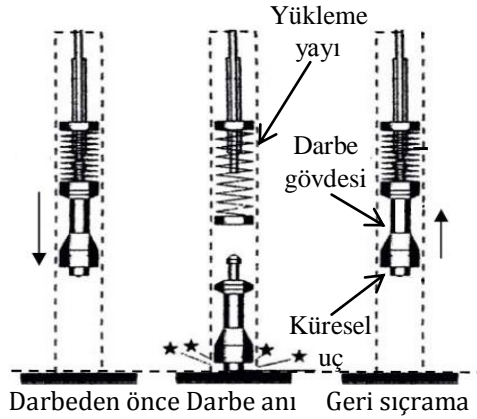
ilişkiler elde edememiştir. Rabia ve Brook [9] Shore sertlik deneyinde numune yüksekliği, hacmi ve kenar etkisi gibi parametreleri araştırmıştır. Arthur [10] oldukça detaylı laboratuvar çalışmaları yürütmüş ve burada kayaçların sertliği, dayanımı ve aşındırıcılığını birlikte değerlendirerek tünellerde kullanılan kazı sistemlerinin performans değerlendirmesini incelemiştir. Koncagül vd. [11] kayacın Shore sertlik ve bazı yapısal özelliklerinden yararlanarak tek eksenli basınç dayanımını elde etmeye çalışmıştır. Altındağ [12] kayaçların sıcaklığı arttıkça Shore sertliklerinin de arttığını ortaya koymuştur. Yaşar ve Erdoğan [13] ile Shalabi vd. [14] kayaçların bazı sertlik indeks değerlerini kullanarak fizikomekanik ve diğer mühendislik özelliklerini tahmin etmeye çalışmıştır. Yurdakul ve Akdaş [15] doğal taşların fiziko-mekanik özellikleri ve Shore sertlik indeksinden yararlanarak yürüttükleri istatistiksel analizlerde, geniş çaplı dairesel testerelerin kesilmesi sırasında harcadıkları spesifik enerjiyi tahmin etmeye çalışmıştır. Sengun [16] karbonatlı kayaçların sıcaklığındaki değişimin kayacın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu bağlamda Shore sertliğinin özellikle 200°C üzerinde azaldığını belirlemiştir. Klawitter vd. [17] kömürün Shore sertliğinin kömürün litotipine bağlı olarak etkilendiğini ortaya koymuştur. Tumac ve Hojjati [18] darbeli kırıcıların performansının tahmin edilmesi için geliştirdiği modelde Shore sertlik indeksinden yararlanmıştır. Dogruoz vd. [19] bire bir ölçekli kesme setinde yürüttüğü kesme deneyleri sırasında harcanan spesifik enerji değerleri ile Shore sertlik indeksi arasındaki ilişkileri ortaya koymuştur.

## 1.2. Equotip sertlik indeksi

Equotip sertlik indeksi yaygın olarak metallerin yüzey sertliklerini test etmek üzere geliştirilmiştir. Portatif olarak

taşınabilen, hem bilgisayar destekli hem de dahili hafızası ile çalıştırılabilen sertlik ölçerin üzerindeki LCD ekrandan sertlik değerleri okunmaktadır.

3 mm çapa sahip küresel şekilli tungsten karbid bir uç kullanılarak ölçümler yapılmaktadır. Uçlar C, D, DC ve DL olarak sınıflandırılır. Deney aletinin ölçüm prensibi Leeb geri sekme yöntemini esas aldığı için okunan veriler Leeb sertlik değerleri olarak da ifade edilmektedir. Shore skeloroskobunda olduğu gibi bir yay mekanizması ile kayaç yüzeyine darbe uygulanır. Darbe öncesi ve sonrası kayaçta depolanan enerjiye bağlı olarak yayın geri sıçrama hızının ölçülmesine dayanmaktadır. Deney aletinin iç yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir [20].



Şekil 1. Equotip sertlik ölçerin iç yapısı [20].

Deneyde kullanılacak numune yüzeylerinin pürüzsüz ve iyice parlatılmış olması gerekir. Deney yöntemi henüz kayaçlar için standart hale getirilmemiştir. Bu yüzden deneyde kullanılan belirli bir numune boyutu yoktur. Ancak uygulanan darbe şiddeti çok yüksek olmadığı için NX karot boyutlarında ve 25-30 mm kalınlığında örnekler üzerinde yürütülebilir. Her numune yüzeyinde en az 15 okuma yapılır ve aritmetik ortalaması Equotip sertlik değerini verir.

Sertlik ölçer aletin içerisindeki yay mekanizması vasıtasıyla 3 mm çapındaki tungsten karbid uç, kayaç yüzeyinde 0,011 Nm'lik darbe uygular. Yay vasıtasıyla hareket ettirilen cismin darbe hızı ( $V_i$ ) ve geri sekme hızlarının ( $V_r$ ) karşılaştırılmasına göre sertlik değeri hesaplanır. Bu bağlamda Eşitlik 1'de verilen formülden sertlik değerleri "Leeb Hardness (HL)" okunur. Geri sekme hızı yumuşak numunelerde daha yavaş, sert numunelerde daha hızlıdır.

$$HL = \frac{V_r}{V_i} \cdot 1000 \quad (1)$$

Burada; HL Equotip sertlik indeksi değeri,  $V_r$  darbe sonrası geri sıçrama hızı,  $V_i$  darbe hızıdır.

Equotip sertlik ölçer kullanılarak çeşitli araştırmacılar farklı çalışmalar yapmıştır. Verwaal ve Mulder [21] bu deney aletini kayaçlar üzerine uygulayan ilk araştırmacılardanıdır. Bu bağlamda kendileri kayacın basınç dayanımını laboratuvar ortamında tahmin etmeye çalışmışlardır. Meulenkamp ve Grima [22] Equotip sertliğini yapay sinir ağlarına uygulayarak kayacın basınç dayanımını tahmin etmeye çalışmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Kayaçların delinebilirlik, sertlik ve mekanik özelliklerini belirlemek üzere Zonguldak Taşkömürü Havzası'ndaki (ZTH) yeraltı galerileri ve karayolu tünellerinden blok örnekler alınmıştır. Bunun yanı sıra daha önce yurt dışı araştırma çalışmaları sırasında Amerika'da Tucson (Arizona) şehrinde yapılan deneysel çalışmalardan da bazı örnekler kullanılmıştır. Bu örnekler Tucson'un 15 mil güneyindeki Mission bakır madeninden, 65 mil kuzeyinde bulunan Ray bakır madeninden ve 30 mil batısındaki Coyote dağı eteklerinden alınmıştır. Örnekler alınırken anizotropi etkisini ortadan kaldırmak için çatlak ve süreksizlik içermemesine dikkat edilmiştir (Tablo 1).

**Tablo 1.** Numunelerin alındığı yerler.

Kod	Kayaç Türü	Lokasyon	Ülke
S1	Kiltaşı	Kazpınarı madeni, Bartın	Türkiye
S2	Kumtaşı	Üzülmaz karayolu tüneli, Zonguldak	
S3	Kumtaşı (İnce taneli)	TTK Karadon Müessesesi, Zonguldak	
S4	Kireçtaşı (Killi)	Karayolu çalışması, Bartın	
S5	Kireçtaşı	Mithatpaşa karayolu tüneli, Zonguldak	
S6	Konglomera	TTK Kozlu Müessesesi, Zonguldak	
S7	Silttaşı	Balıkesir	
S8	Kumtaşı	Balıkesir	
S9	Mermer	Mermer ocağı, Eflani, Karabük	
S10	Kireçtaşı	Karayolu çalışması, Zonguldak	
S11	Silttaşı	Aslankaya karayolu tüneli, Zonguldak	
S12	Bej mermer	Mermer ocağı, Çakraz, Bartın	
S13	Granit porfir	Mission madeni, Tucson	Amerika
S14	Granit	Mission madeni, Tucson	
S15	Tonalit	Coyote dağı, Tucson	
S16	Granit	Coyote dağı, Tucson	
S17	Milonit	Ray madeni, Tucson	
S18	Granit	Ray madeni, Tucson	
S19	Granodiyorit	Ray madeni, Tucson	

Araziden alınan blok numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiş, delinebilirlik ve sertlik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra henüz madencilik sektöründe uygulaması çok yaygınlaşmamış olan Equotip sertliğinin kayacın mekanik ve delinebilirlik özellikleri ile olan ilişkileri istatistiksel açıdan araştırılmıştır.

### 2.1. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Türkiye’de ve Amerika’da yapılan laboratuvar çalışmaları kapsamında tüm örneklerin tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri yapılmış ve ayrıca Young modülleri belirlenmiştir. Bu amaçla 54 mm çapında ve 108 mm boyunda ve ayrıca 54 mm çapında ve 27 mm kalınlıkta silindirik örnekler ISRM standartlarına göre hazırlanmıştır (Şekil 2-3). Kayaçların mekanik özellikleri belirlendikten sonra Altındağ [23,24] tarafından önerilen Eşitlik 2’deki ampirik bağıntıdan yararlanılarak kırılma değeri hesaplanmıştır.

$$B = \frac{\sigma_c \cdot \sigma_t}{2} \quad (2)$$

Burada; B kırılma,  $\sigma_c$  tek eksenli basınç (MPa),  $\sigma_t$  dolaylı çekme dayanımıdır (MPa).



**Şekil 2.** Tek eksenli basınç dayanımı ve deformasyon deney örnekleri



**Şekil 3.** Brazilian dolaylı çekme dayanımı deneyi için hazırlanan örnekler

### 2.2. Delme oranı indeksinin belirlenmesi

Kayaçların delinebilirliklerinin önceden tahmininde kullanılan delme oranı indeksi (DRI) deneyi araziden alınan örneklere uygulanmıştır.

Deney yöntemine göre kayacın kırılma değeri ( $S_{20}$ ) ve Sievers minyatür delme deney (SJ) sonuçlarından elde edilen DRI verileri birlikte değerlendirilerek çeşitli kazı makinelerinin (jumbo delici, galeri açma makinesi, tünel açma makinesi, vb.) performans tahmini ve maliyet analizleri yapılır [25]. Çünkü deliklerin delinmesi patlatma maliyetinin en önemli kısmıdır.

Çizelge 1’de sunulan sahalardan alınan numuneler laboratuvara getirildikten sonra kırılma deneyi ( $S_{20}$ ) için -16 mm/+11,2 mm elek aralığında yaklaşık 500 gr’lık numuneler hazırlanmıştır. Deney yöntemine göre 14 kg ağırlığındaki çekiç, 25 cm yükseklikten 20 defa numune üzerine düşürüldükten sonra 11,2 mm’lik elekten eilenmiştir. Elek altına geçen malzeme miktarının, deney başlangıcında tartılan malzeme miktarına ağırlığına oranından numunenin kırılma değeri hesaplanmıştır [26]. Ayrıca, NX boyutlarında ve 27 mm kalınlığında ince karot örnekleri hazırlanmıştır. Daha sonra 110° tepe açısına sahip tungsten

karbür uç ile numunenin beş farklı noktasında 1 dk’lık delme sürelerinde ucun batma derinliği ölçülmüştür. Elde edilen değerler kayacın Sievers minyatür delme değeri (SJ) olarak kayıt edilmiştir. Kırılma ve SJ delme deneyleri Zonguldak Taşkömürü Havzası’ndan alınan numuneler üzerinde yapılmış ve her kayaç türü için üç kere tekrarlanarak ortalamaları hesaplanmıştır.

### 2.3. Shore ve Equotip sertlik indekslerinin belirlenmesi

Kayaçların delinebilirlik özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra laboratuvarında kayaçların sertlik indeks değerleri de belirlenmiştir. Her iki deney aletinin çalışma prensibinin birbirine oldukça benzerdir. Bu bağlamda hem Türkiye ve hem de Amerika’dan alınan örneklerin Shore ve Equotip sertlikleri belirlenmiştir. Deneyler her kayaç birimi için üç defa tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan D model Shore skeleroskopu ve Equotip sertlik ölçer Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Shore skeleroskopu ve Equotip sertlik ölçerin genel görünümü

### 3. Bulgular

Arazide delme ve ilerleme hızlarının belirlenmesi ve makina performansının tahmin edilmesi için delinebilirliğe etki eden parametrelerin iyi bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada

da yurt içi ve yurt dışından alınan örneklerin mekanik, delinebilirlik ve sertlik indeksleri belirlenmiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.

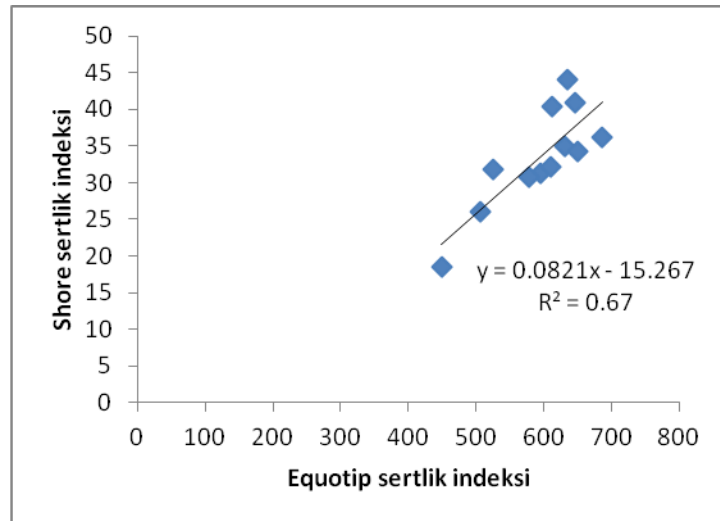
**Tablo 2.** Deneysel çalışmaların sonuçları.

Kod	$\gamma$	$\sigma_c$	$\sigma_t$	E	S <sub>20</sub>	SJ	DRI	B	HL	SH
S1	2.62	25,0	4,0	-	51	84	64	50	449	18.6
S2	2.63	75,0	18,3	-	30	94	43	685	612	40.4
S3	2.61	71,0	12,8	18.9	38	78	48	455	595	31.3
S4	2.66	43,0	12,0	-	39	64	48	258	686	36.2
S5	2.67	56,0	8,8	7.5	52	92	64	246	525	31.9
S6	2.48	44,0	7,0	-	52	58	53	130	610	32.1
S7	2.37	81,0	11,8	14.8	35	80	47	478	577	30.8
S8	2.43	57,5	8,4	8.5	42	92	54	242	645	41.2
S9	2.65	68,4	8,7	24.4	46	62	55	297	635	44.3
S10	2.63	70,0	7,2	22.9	44	58	53	252	630	35.1
S11	2.62	47,0	5,1	-	65	99	69	94	506	26.3
S12	2.68	71,0	12,0	21.5	41	55	51	426	650	34.2
S13	2.56	112,3	15,3	59.6	-	-	-	859	925	-
S14	2.53	98,0	10,8	48.4	-	-	-	527	891	-
S15	2.56	134,9	7,1	38.3	-	-	-	481	817	-
S16	2.44	117,8	8,6	46.2	-	-	-	505	858	-
S17	2.63	125,7	13,5	73.9	-	-	-	846	870	-
S18	2.52	91,8	11,5	54.9	-	-	-	527	850	-
S19	2.59	93,0	7,5	21.2	-	-	-	350	834	-

Burada;  $\gamma$  kayacın yoğunluğu ( $gr/cm^3$ ),  $\sigma_c$  kayacın tek eksenli basınç dayanımı (MPa),  $\sigma_t$  kayacın dolaylı çekme dayanımı (MPa), E Young modülü (MPa), S<sub>20</sub> kırılma dayanımı, SJ Sievers minyatür delme değeri, DRI delme oranı indeksi, HL Equotip sertlik değeri, SH Shore sertlik indeksidir.

Çizelge 2'de verilen sonuçlar derlenerek istatistiksel analizler yapılmıştır. Buna göre öncelikli olarak Shore sertlik indeksi ile Equotip sertlik indeksi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu bağlamda yurt içinden alınan örneklerin Shore değerleri ile Equotip sertlik değerleri arasında Şekil 5'de sunulan lineer bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

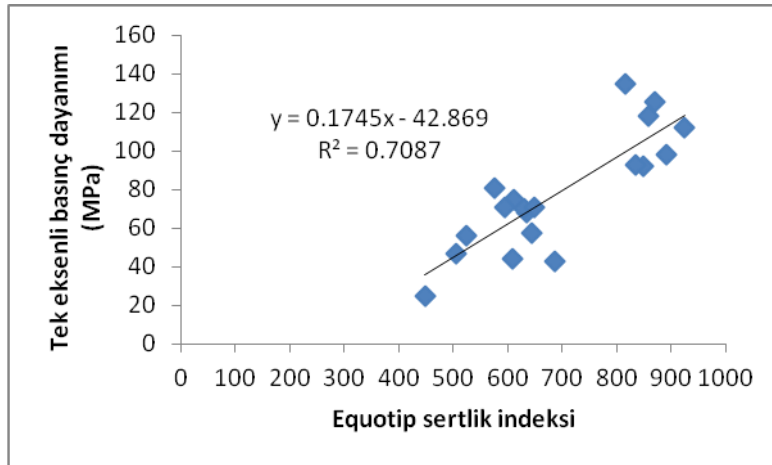
Equotip sertliğinde kullanılan ucun çapının küçük olması ve kayaç yüzeyindeki minerallerin sertlikleri arasında farklılık olması sonuçları oldukça etkilemektedir. Bu nedenle Equotip sertliği ölçülürken kayacın içerisindeki mineral dağılımlarının net olarak incelenmesi ve ölçümlerin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir.



**Şekil 5.** Shore sertlik indeksi ile Equotip sertlik indeksi arasındaki ilişki

Shore sertlik indeksi ile kayacın dayanım özellikleri hızlı bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Bu bağlamda Equotip sertliği ile benzer bir tahmin yapılabilmeyeceği araştırılmıştır. Buna göre yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kayacın tek eksenli basınç dayanımı ile Equotip sertlik indeksi arasında lineer bir ilişki olduğu tespit edilmiştir (Şekil

6). Yani, kayaçların basınç dayanımı arttıkça Equotip sertlik indeksi de artmaktadır. Ancak, Equotip sertlik deneyinde ucun geri sıçrama hızı yumuşak kayaçlarda yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle Equotip sertliği 400 veya dayanımı 19 MPa'dan büyük olan kayaçlarda daha gerçeğe yakın sonuçlar elde edilecektir.



Şekil 6. Tek eksenli basınç dayanımı ile Equotip sertlik indeksi arasındaki ilişki

Kayaçların mekanik özelliklerini gösteren en önemli parametrelerden bir tanesi de Young modülüdür. Kayaçların sertlikleri, yapısında bulunan minerallerin elastiklik özelliklerini yansıtmaktadır. Bu bağlamda araziden alınan blok örneklerin bazılarında 110 mm'den daha uzun silindirik numuneler hazırlanmış ve bu numunelerin tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonrası çizilen eksenel gerilme - eksenel deformasyon grafiklerinin eğiminden Young modülleri hesaplanmıştır. Buna göre kayacın Young modülü ile Equotip

sertliği arasında korelasyon katsayısı 0,86 olan doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Şekil 7). Dolayısı ile kayacın yüzey sertliğinin kayacın elastik özelliği ile yakından ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6-7'deki sonuçlar irdelendiğinde Equotip sertliği ile kayacın basınç dayanımı ve delinebilirlik özellikleri arasında Tablo 3'te verildiği gibi bir sınıflama elde edilmiştir. Ancak veri sayısı artırılarak çizelgede verilen aralıkların hassasiyetleri teyit edilmelidir.

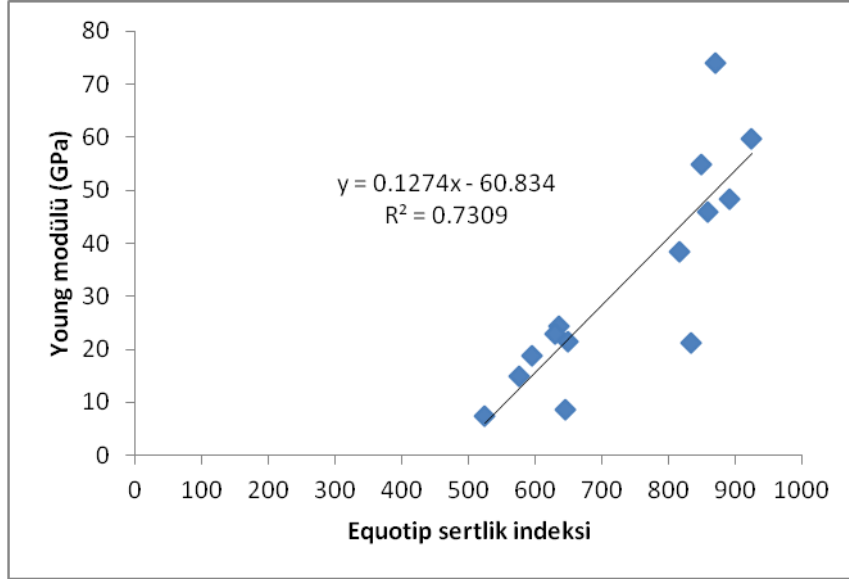
Tablo 3. Kayaçların delinebilirlik-sertlik sınıflaması.

Sertlik	$\sigma_c$	HL	DRI	Delinebilirlik
Çok yumuşak	<19	< 399*	>70	Çok kolay
Yumuşak	20-49	400-549	53-69	Orta derecede kolay
Sert	50-69	550-649	43-52	Zor
Orta sert	70-100	650-799	26-42	Orta derecede zor
Çok sert	>100	>800	<25	Çok zor

\* Dikkate alınmaması önerilir.

$\sigma_c$  tek eksenli basınç dayanımı(MPa), HL Equotip sertlik indeksi, DRI delme oranı indeksidir.

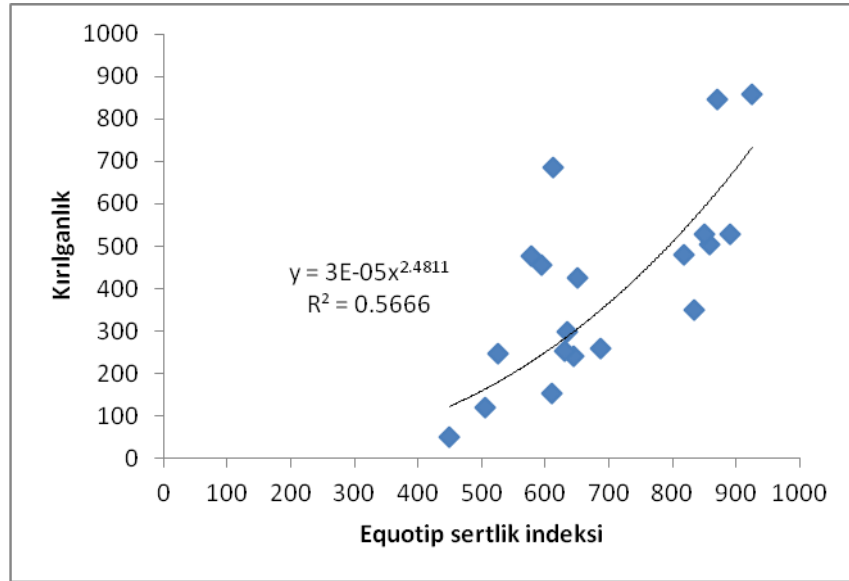




Şekil 7. Young modülü ile Equotip sertlik indeksi arasındaki ilişki

Diğer taraftan kayacın basınç ve çekme dayanımının bir ölçütü olarak Eşitlik 2’de verilen ampirik bağıntıdan kırılma ve

Equotip sertlik indeksi arasındaki Şekil 8’de verildiği gibi üstel bir ilişkinin olduğu görülmüştür.



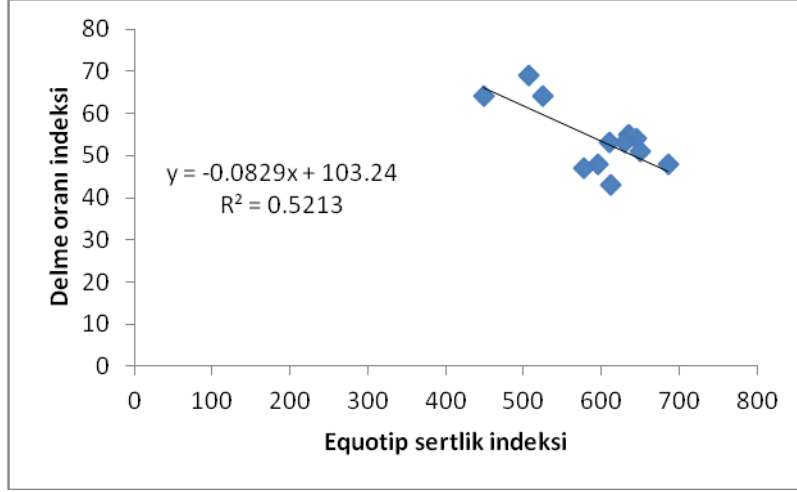
Şekil 8. Kırılma ile Equotip sertlik indeksi arasındaki ilişki

Laboratuvarda yürütülen deneysel çalışmaların sonucunda yurt içinden alınan örneklerin delme oranı indeksi ve Equotip sertlikleri arasındaki ilişki istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde Şekil 9’da sunulduğu gibi negatif yönlü

doğrusal bir değişimin olduğu bulunmuştur. Buna göre Equotip sertlik değeri düşük olan kayaçların daha kolay delinebilir olduğu belirlenmiştir. Dahl [27] tarafından yapılan sınıflamaya göre delme oranı indeks değeri 70’den

büyük olan kayaçların oldukça kolay delinebilir olduğu bilinmektedir. Bu kayaçların dayanım değerleri düşük olduğu için Equotip sertlik indeksinde

hatalı sonuçlar gözlemlenebilecektir. Bu nedenle DRI değeri 70'den büyük kayaçlarda Equotip sertlik değerinin uygulanabilirliği azalmaktadır.



Şekil 9. Delme oranı indeksi ile Equotip sertlik indeksi arasındaki ilişki

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Gerek kazı mekaniği ve gerekse de kaya mekaniği deneylerinde bazen kayaçların mekanik, elastiklik ve delinebilirlik özelliklerini hızlı ve basit bir deney yöntemiyle tahmin etmek önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada Equotip sertlik deneyinin kayaçlarda uygulanabilirliği incelenmiştir.

Yurt içi ve yurt dışından alınan örnekler üzerinde yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında Equotip sertlik deneyinin kayaçların yukarıda belirtilen özelliklerinin önceden tahmin edilmesinde uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur. Yapılan basit regresyon analizlerinde elde edilen yüksek korelasyon katsayıları Equotip sertliği ile diğer kayaç özelliklerinin yakından ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak kayacın elastiklik özelliğinin düşük olduğu hallerde uç tarafından harcanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı kayaç yüzeyinde absorbe edilmekte ve bu

nedenle ucun geri sıçrama hızında yavaşlama olmaktadır. Dolayısı ile deney yöntemi yumuşak kayaçlarda hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle Equotip sertlik deneyinin basınç dayanımı 19 MPa'ın altında olduğu ve delme oranı indeksi değerinin 70'den büyük olduğu kayaçlarda uygulanmasının oldukça sınırlı olduğu dikkate alınmalıdır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde daha çok Schmidt çekici ile Equotip sertlik indeksi ilişkilendirilmiştir. Aoki ve Matsukura [28] kumtaşı bloklarındaki ince aşınmış katmanların dayanımını değerlendirmek üzere Schmidt ve Equotip sertlik ölçerle arazide ölçümler yapmış ve Equotip sertliğinin Schmidt'ten daha güvenilir olduğunu ileri sürmüştür. Bu çalışmada ise Shore sertlik indeksi ile Equotip sertlik indeksi karşılaştırılmış ve korelasyon katsayısı 0,82 olduğu belirlenmiştir.

Diğer taraftan Kawasaki vd. [29] karot örnekleri üzerinde Equotip sertlik, basınç

dayanımı ve elastik dalga deneyleri yapmıştır. Ancak yapılan çalışmalar sonucunda Equotip sertliği ile kayacın tek eksenli basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısının düşük olduğu ilişkiler bulmuşlardır. Bu çalışmada ise korelasyon katsayısı 0,86 çıkmıştır. Hack ve Huisman [30] ise kayacın yerinde dayanımını tahmin etmek üzere Equotip sertlik ölçer kullanmış ve bu anlamda “basit ortalamalar” yöntemi kullanarak sonuçların yorumlanmasının daha anlamlı olacağını vurgulamışlardır.

Diğer taraftan çalışmada elde edilen özgün sonuçlardan bazıları kayaçların kırılma özelliği ve delme oranı indeksinin Equotip sertlik indeksi ile olan ilişkileridir. Sertlik indeksleri ve kırılma delinebilirliğin önceden tahmin edilmesinde oldukça sağlıklı sonuçlar vermektedir. Bu durum bu çalışmada da ortaya çıkmış ve delme oranı indeksi ile Equotip sertlik indeksi arasında korelasyon katsayısı 0,72 olan negatif yönlü doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Literatürde yapılmış benzer bir çalışma henüz bulunmamaktadır.

Yukarıda verilen korelasyon katsayıları her ne kadar yüksek olsa da deney yapılan kayaç sayısı sınırlıdır. Bu nedenle verilen ilişkilerdeki korelasyon katsayılarının daha fazla kayaç üzerinde t ve F testleri ile desteklenen regresyon modelleri ile sonuçlarının güvenilirliğinin artırılması anlamlı olacaktır.

#### **Teşekkür**

Yazar, bu çalışmayı destekleyen Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (Proje No: 2014-29011448-02), YÖK Doktora Sonrası Araştırma Destek Programına ve delme oranı indeksi deneylerinde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Utku Sakız'a (BEÜ) teşekkürlerini sunar.

#### **Kaynakça**

- [1] Altindag, R., Guney, A. 2005. Effect of the Specimen Size on the Determination of Consistent Shore Hardness Values, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt. 42, No. 1, s.153-160. DOI:10.1016/j.ijrmms.2004.08.002
- [2] ISRM. 1978. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Cilt. 15, No. 3, s. 89-97. DOI: 10.1016/0148-9062(78)90002-5
- [3] Su, O. 2003. Kömürün Dayanım Özellikleri ile Öğütülebilirliği Arasındaki İlişkilerin Araştırılması. Y. Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 100s, Zonguldak.
- [4] Holmgeirsdottir, T., Thomas, PR. 1998. Use of the D-762 Shore Hardness Scleroscope for Testing Small Rock Volumes, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt. 35, s. 85-92. DOI:10.1016/S0148-9062(97)00317-3
- [5] ASTM E448-82. 2012. Standard Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials, 5 s.
- [6] Altindag, R., Guney, A. 2006. ISRM Suggested Method for Determining the Shore Hardness Value for Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt. 43, s. 19-22. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.04.004
- [7] ASTM D5873-05. 2012. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method, 4 s.
- [8] Szlavin, J. 1974. Relationships between Some Physical Properties of Rock Determined by Laboratory Tests, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &

- Geomechanics Abstracts, Cilt. 12, No. 2, s.57-66. DOI: 10.1016/0148-9062(74)92649-7
- [9] Rabia, H., Brook, N. 1979. Shore Hardness of Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Cilt. 16, s.335-336. DOI:10.1016/0148-9062(79)90245-6
- [10] Arthur, C.D. 1996. The Determination of Rock Material Properties to Predict the Performance of Machine Excavation in Tunnels, Quarterly Journal of Engineering Geology, Cilt. 29, s. 67-81. DOI:10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.05
- [11] Koncagül, E.C., Santi, P.M. 1999. Predicting the Unconfined Compressive Strength of the Breathitt Shale Using Slake Durability, Shore Hardness and Rock Structural Properties, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt. 36, No. 2, s.139-153. DOI:10.1016/S01489062(98)00174-0
- [12] Altindag, R. 2002. Effects of Specimen Volume and Temperature on Measurements of Shore Hardness, Rock Mechanics and Rock Engineering, Cilt. 35, No. 2, s.109-113. DOI: 10.1007/s006030200014
- [13] Yaşar, E., Erdoğan, Y. 2004. Estimation of Rock Physicomechanical Properties Using Hardness Methods, Engineering Geology, Cilt. 71, No. (3-4), s. 281-288. DOI:10.1016/S0013-7952(03)00141-8
- [14] Shalabi, F.I., Cording, E.J., Al-Hattamleh, O.H. 2007. Estimation of rock Engineering Properties Using Hardness Tests, Engineering Geology, Cilt. 90, No. 3-4, s. 138-147. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.12.006
- [15] Yurdakul, M., Akdaş, H. 2012. Prediction of Specific Cutting Energy for Large Diameter Circular Saws During Natural Stone Cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt. 53, s. 38-44. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.03.008
- [16] Sengun, N. 2014. Influence of Thermal Damage on the Physical and Mechanical Properties of Carbonate Rocks, Arabian Journal of Geoscience, Cilt. 7, s. 5543-5551. DOI: 10.1007/s12517-013-1177-x
- [17] Klawitter, M., Joan, E., Sarah, C. 2015. A Study of Hardness and Fracture Propagation in Coal, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Cilt. 76, s. 236-242. DOI:10.1016/j.ijrmms.2015.02.006
- [18] Tumac, D., Hojjati, S. 2016. Predicting Performance of Impact Hammers from Rock Quality Designation and Compressive Strength Properties in Various Rock Masses, Tunnelling and Underground Space Technology, Cilt. 59, s. 38-47. DOI: 10.1016/j.tust.2016.06.008
- [19] Dogruoz, C., Bolukbasi, N., Rostami, J. 2016. An Experimental Study of Cutting Performances of Worn Picks, Rock Mechanics and Rock Engineering, Cilt. 49, No. 1, s. 213-224. DOI:10.1007/s00603-015-0734-x
- [20] Aoki, H., Matsukura, Y. 2007. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. Bulletin of Engineering Geology and Environment, Cilt. 67, s.23-29. DOI: 10.1007/s10064-007-0116-z
- [21] Verwaal, W., Mulder, A. 1993. Estimating Rock Strength with the Equotip hardness tester, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Cilt. 30, No. 6, s. 659-662. DOI: 10.1016/0148-9062(93)91226-9

- [22] Meulenkamp, F., Grima, M.A. 1999. Application of Neural Networks for the Prediction of the Unconfined Compressive Strength (UCS) from Equotip Hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Cilt. 36, No. 1, s. 29-39. DOI: 10.1016/S0148-9062(98)00173-9
- [23] Altindag, R. 2002. The Evaluation of Rock Brittleness Concept on Rotary Blast Hole Drills, *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, Cilt. 102, No. 1, s. 61-66.
- [24] Altindag, R. 2003. Correlation of Specific Energy with Rock Brittleness Concepts on Rock Cutting, *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, Cilt. 103, No. 3, s.163-172.
- [25] Dahl, F., Grøv, E., Breivik, T. 2007. Development of a New Direct Test Method for Estimating Cutter Life, Based on the Sievers' J Miniature Drill Test, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt. 22, No. 1, s. 106-116. DOI: 10.1016/j.tust.2006.03.001
- [26] Blindheim, O.T., Bruland, A. 1998. Boreability testing. *Norwegian TBM Tunnelling 30 Years of Experience with TBMs in Norwegian Tunnelling*, s. 29-34, Oslo, Norway.
- [27] Dahl, F. 2003. DRI, BWI, CLI Standard. SINTEF report, Norway, 21 s.
- [28] Aoki, H., Matsukura, Y. 2007. A New Technique for Non-destructive Field Measurement of Rock-surface Strength: An Application of the Equotip Hardness Tester to Weathering Studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, Cilt. 32, s.1759-1769.DOI:10.1002/esp.1492
- [29] Kawasaki, S., Tanimoto, C., Koizumi, K., Ishikawa, M. 2002. An Attempt to Estimate Mechanical Properties of Rocks Using the Equotip Hardness Tester, *Journal of Japan Society Engineering Geology*, Cilt. 43, No. 4, s.244-248.DOI:10.5110/jjseg.43.244
- [30] Hack, H.R., Huisman, M. 2002. Estimating the Intact Rock Strength of a Rock Mass by Simple Means, 9th Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment, s. 1671-1677, Durban, South Africa.