



Farklı cihaz ve yöntemler ile belirlenen Shore sertlik değerlerinin karbonatlı kayaların gevreklik değerlerinin tahmininde kullanılabilirliğinin incelenmesi

Investigation of the usability of Shore hardness values determined by different devices and methods to estimate the brittleness values of carbonated rocks

Deniz AKBAY^{1*}, Gökhan EKİNCİOĞLU², Raşit ALTINDAĞ³, Nazmi ŞENGÜN⁴

¹Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Çan Meslek Yüksekokulu, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye.
denizakbay@comu.edu.tr

²Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Kaman Meslek Yüksekokulu, Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye.
gokhanekincioglu@ahievran.edu.tr

^{3,4}Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
rasitaltindag@sdu.edu.tr, nazmisengun@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 12.03.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 11.05.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 02.05.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.52892
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yeraltı veya yer üstü mühendislik projeleri öncesinde kayaların kesilebilirlik ve delinebilirlik özelliklerini etkileyen sertlik ve gevreklik değerlerinin belirlenmesi çok önemlidir. Kayaların kesilebilirlik ve delinebilirlik özelliklerini belirlemek, bazı diğer fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan belirlemek için uygulanan testler gibi pahalı ve zaman alıcı olabilmektedir. Kayaların sertlik değerlerinin belirlenmesi nispeten diğer özelliklerine göre daha ekonomik ve hızlı olmaktadır. Ayrıca sertlik değerleri, kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin tahmininde güvenilir bir şekilde kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, 13 farklı karbonatlı kayanın Shore sertlik değerleri üç farklı cihaz (C-2 tipi Shore Scleroscope'u, dijital durometre ve dijital Shore sertliği ölçüm cihazı) kullanılarak aynı numuneler üzerinde belirlenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda farklı ölçüm cihazlarının klasik yöntem yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca kazı mekaniği açısından önemli bir kayaç özelliği olan ve literatürde basınç ve çekme dayanımı değerleri dikkate alınarak önerilen dört farklı gevreklik değerinin tahmin edilmesinde kullanılabilecek en uygun yüzey sertliği ölçme yönteminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Üç farklı cihazdan elde edilen Shore sertlik değerleriyle dört farklı gevreklik değeri arasındaki ilişkiler basit regresyon analizleri ile irdelenmiştir. Sonuç olarak dijital Shore sertliği ölçüm cihazlarının klasik C-2 tipi Shore Scleroscope'u yerine güvenli bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Shore sertlik değerinin literatürde çokça kullanılan dört farklı gevreklik değerinden iki tanesini tahmin etmede güvenilir olduğu iki tanesini tahmin etmede ise kullanılamayacağı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Shore sertliği, Gevreklik, Doğal taş, Fiziksel ve mekanik özellikler.

Abstract

It is very important to determine the hardness and brittleness values of rocks, which affect the cuttability and drillability properties of underground or aboveground engineering projects. Determining cuttability and drillability properties of rocks can be expensive and time consuming, such as tests applied to directly determine some other physical and mechanical properties. The determination of the hardness values of rocks is relatively economical and faster than other properties. In addition, hardness values can be used reliably to estimate the physical and mechanical properties of rocks. In this study, Shore Hardness values of 13 different carbonated rocks were determined on the same samples using three different devices (C-2 type Shore Scleroscope, digital durometer and digital Shore Hardness device). As a result of the data obtained, the availability of different measuring instruments instead of the classical method was investigated. In addition, it was aimed to determine the most suitable surface hardness measurement method, which is an important rock property in terms of excavation mechanics, and which can be used to estimate the four different brittleness values recommended by considering the pressure and tensile strength values in the literature. Relationships between Shore Hardness values obtained from three different devices and four different brittleness values were examined with simple regression analysis. As a result, it has been seen that digital Shore Hardness measurement devices can be used safely instead of the classic C-2 type Shore Scleroscope. It has been determined that Shore Hardness value is reliable in predicting two of four different brittleness values, which are widely used in the literature, and cannot be used in estimating two.

Keywords: Shore hardness, Brittleness, Natural stone, Physical and mechanical properties.

1 Giriş

Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespiti, yeraltı ve yerüstü maden işletmeleri, yeraltı açıklıkları, tüneller, barajlar, kaya içinde açılan temeller gibi kaya ile etkileşime giren mühendislik çalışmaları için çok önemlidir. Kayacın dayanımını ve deformasyonunu doğrudan belirlemek için uygulanan testler pahalı ve zaman alıcıdır. Özellikle test için kaya numunelerinin hazırlanması oldukça uzun zaman almaktadır.

Bahsedilen sebeplerden dolayı araştırmacılar kayaların mühendislik özelliklerini belirlemek ve yorumlamak için farklı dolaylı test yöntemleri geliştirmiş ve kullanmıştır. Dolaylı yöntemler nispeten uygulaması kolay, ucuz ve hızlı sonuç alınan testlerdir [1]. Kayaç gevrekliği, yeraltı ve yerüstü maden işletmeleri, yeraltı açıklıkları, tüneller, barajlar, kaya içinde açılan temeller gibi mekanik kazının kullanıldığı mühendislik çalışmaları için oldukça önemlidir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, kayacın gevrekliğini tanımlamak için tek başına

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kayacın dayanımının bir fonksiyonunun kullanılmasının yeterli olmadığını göstermiştir [2]-[10]. Kayacın dayanımının kullanıldığı gevreklik belirleme yöntemlerine bakıldığında en iyi sonucu gerilme dayanımının kullanıldığı yöntemlerin verdiği görülmektedir. Altındağ ve Güney [11] gevreklik ve gevreklik ile basınç dayanımı, çekme dayanımı ve Shore sertliği arasındaki ilişkileri inceleyen bir araştırma yapmışlardır. Yağız ve Gökçeoğlu [12], kayaçların gevrekliğini tahmin etmek için bulanık çıkarım sistemi ve doğrusal olmayan regresyon modeli uygulamışlardır. Ayrıca, Yağız ve Karahan [13], iğne penetrasyon testinden elde edilen bir girdi değişkeni olarak, kayacın gevrekliğini kullanarak tünel açma makinesi (TBM) performansını tahmin etmek için çeşitli optimizasyon teknikleri uygulamışlardır. Tarasov ve Potvin [14], biriken elastik enerji ile kopma/aşırı enerji arasındaki dengeye dayanan iki farklı gevreklik kriteri geliştirmişlerdir. Meng ve diğ. [15], kapsamlı bir analizle yaygın olarak kullanılan kırılma endekslerini irdelemişler ve iki farklı gevreklik endeksi önermişlerdir. Tek eksenli basınç dayanımını ve dolaylı (Brazilian) çekme dayanımını [16]-[18] kullanan endeksler, mekanik kazı performansının değerlendirilmesinde çok faydalı olmuşlardır. Kayacın dayanımının bir fonksiyonu olan gevreklik endeksleri, gevrekliğin dolaylı olarak tahmin edilmesinde ve değerlendirilmesinde çokça kullanılmaktadırlar [19].

Gevreklik tanımı üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bazı ortak kabullere ulaşılmıştır [20],[21]; (1) büyük içsel sürtünme açısı, (2) düşük gerilme değerlerinde yenilme; (3) basınç dayanımı ve çekme dayanımı arasında büyük fark, (4) mikro çatlaklar tarafından baskın olarak kontrol edilen gevrek yenilme, (5) yüksek rezilyans, (6) sertlik testleri sırasında oluşan yeni çatlaklar [10]. Ancak, kayaçların gevrekliğinin hesaplanması ve tahmini için geliştirilmiş standart bir yöntem veya gevreklik için üzerinde fikir birliğine varılmış birleşik bir tanım yoktur [4],[20],[22],[23]. Gevreklik belirleme yöntemlerinin birbirinden çok farklı oluşu, gevrekliğin mühendislik

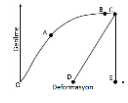
projelerinde tasarım parametresi olarak kullanımını zorlaştırmaktadır. Tanımlarda kesin bir birliğin olmaması, ölçümlerde de belli bir standardın olmamasına neden olmaktadır. Sertlik, statik veya dinamik yükleme şartları altında kayacın göstermiş olduğu direnç olarak ifade edilebilir. Sertlik, konvansiyonel bir büyüklüktür. Sertlik değeri, mühendislik projelerinde fiziksel ve mekanik özellikler gibi doğrudan kullanılamaz, dolaylı olarak mekanik özelliklerin tahmininde veya başka malzemelerle karşılaştırmak için kullanılabilir [24]. 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 sıçrama sertlik deneyleri (Shore, Schmidt) ile çizme (Mohs) sertlik deneyleridir [25],[26]. Ayrıca, Shore sertlik indeksi deney aletinin günümüzde üretiminin oldukça azalması araştırmacı ve mühendisleri yeni sertlik belirleme yöntemlerinin araştırılmasına ve geliştirilmesine sevk etmektedir [27]. Bu çalışmada, kaya ortamında gerçekleştirilen mühendislik çalışmalarında önemli bir parametre olan gevreklik değerinin tahmin edilmesinde kullanılabilecek en uygun yüzey sertliği ölçme yönteminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2 Gevreklik

Gevreklik, bir malzemenin kuvvet altında kırılmadan önce kalıcı deformasyonlar olmaksızın sürekli olarak deforme olma/kırılma/çatlama kabiliyetidir [27]. Bir anlamda kayaçların gevrekliklerinin belirlenmesinde, evrensel bir kavram ve ölçme yöntemi bulunmamaktadır. Gevreklik oranı olarak bilinen basınç dayanımının çekme dayanımına oranı (σ_c/σ_t) en yaygın olarak kullanılan gevreklik ölçütlerinden biridir. Bu değer yüksek oluşu, yüksek gevrekliği işaret etmektedir. Literatürde bulunan çeşitli araştırmacılar tarafından gevreklik için önerilen bazı eşitlikler ve tanımlamalar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kayaç gevrekliğinin belirlenmesi için önerilen bazı ampirik eşitlikler (Yagiz ve Gokceoglu'dan [12] geliştirilmiştir).

Table 1. Some empirical equations proposed for determination of rock brittleness (developed from Yagiz and Gokceoglu [12]).

Protodyakonov [28]	$B_1 = q \times \sigma_c$	q , Protodyakonov darbe testi sonucu oluşan ince tanelerin yüzdesidir.	Özel deney (darbe deneyi)
Hucka ve Das [16]	$B_2 = \frac{DE}{OE}$	Eski haline dönebilen (elastik) deformasyon miktarının toplam deformasyon miktarına oranı	
Hucka ve Das [16]	$B_3 = \frac{AreaDCE}{AreaQABCE}$	Geri verilebilen (elastik) enerjinin toplam enerjiye oranı	
Hucka ve Das [16]	$B_4 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	Basınç dayanımı/çekme dayanımı oranı	Dayanım oranı
Hucka ve Das [16]	$B_5 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$	Basınç dayanımı ve çekme dayanımının farklarının toplamlarına oranı	Dayanım oranı
Hucka ve Das [16]	$B_6 = \sin(\varphi)$		
Hucka ve Das [16]	$= \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} \div \left(1 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial n} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$	Gevreklik $\sigma_n = 0$ olduğunda Mohr zarfından belirlenebilir, burada φ içsel sürtünme açısıdır.	Mohr zarfı
George [29]	$B_7 = \varepsilon_{1i} \times 100, \%$	Kırılma anına kadar geri dönüşü olmayan deformasyon miktarı $\varepsilon_{1i} < \%3$ gevrek $\%3 < \varepsilon_{1i} < \%5$ gevrek - sünek $\varepsilon_{1i} > \%5$ sünek	Deformasyona dayalı
Blindheim ve Bruland [30]	$B_8 = S_{20}$	14 kg yük, 20 kez 500 g malzeme (16-11.2 mm elek aralığında) üzerine düşürülerek yapılan darbe deneyinde ince malzeme yüzdesi (<11.2 mm)	Özel deney (gevreklik deneyi)
Yagiz, [2],[4]	$B_9 = \frac{F_{max}}{P}$	Uç batırma deneyinde en yüksek kuvvetin ilerleme miktarına oranı	Özel deney (standart penetrasyon deneyi)
Altındağ [17]	$B_{10} = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2}$	Basınç dayanımı ile çekme dayanımı çarpımının yarısı	Dayanım oranı
Copur ve diğ. [9]	$B_{11} = \frac{P_{dec}}{P_{inc}}$	Uç batırma deneyinde azalan kuvvetin artan kuvvete oranı	Özel deney (standart penetrasyon deneyi)
Yaralı ve Soyer [31]	$B_{12} = (\sigma_c \times \sigma_t)^{0.72}$	Basınç dayanımı ile çekme dayanımı çarpım değerinin 0.72 kuvveti	Dayanım oranı

3 Shore sertlik indeksi

Kayaçların fiziksel özelliklerinden biri olan Shore sertliği (SH) temel olarak kayacın mineralojisinden, çimentolanma durumundan (bağlayıcı madde), matriks tipinden ve elastisitesinden etkilenmektedir. SH, tane boyu 0.2 mm'den büyük kayaçlar için sert minerallerin yüzdesinin hızlı ölçümünü ortaya koymak için kullanılabilir ve kayaç mineralojisi ile direkt ilişkisi bulunmaktadır [32],[33]. Shore sertlik ölçümleri ISRM (The International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering)'de [34] önerildiği şekilde Shore Sceleroscope'u kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Shore yüzey sertliği kayaçların içyapısını temsil etmesine bağlı olarak kayaçların dayanımları, delinebilirlikleri ve kesilebilirliklerinin tahmininde ucuz, kolay ve pratik olmalarından dolayı birçok çalışmada girdi parametresi olarak kullanılmıştır [35].

4 Materyal ve metot

Bu çalışma kapsamında laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen deneyler yardımıyla sedimanter kökenli 13 farklı karbonatlı kayacın Shore sertlikleri üç farklı cihaz (C-2 tipi Shore Scleroscope'u, dijital durometre ve dijital Shore sertliği ölçüm cihazı) kullanılarak aynı numuneler üzerinde belirlenmiştir. Kayacın dayanımının kullanıldığı gevreklik belirleme yöntemlerine bakıldığında en iyi sonucu gerilme dayanımının kullanıldığı yöntemlerin verdiği önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Bu nedenle, çalışma kapsamında literatürde dayanım oranları dikkate alınarak önerilen dört farklı gevreklik yöntemi (B₄, B₅: Hucka ve Das [16], B₁₀: Altındağ [17], B₁₂: Yaralı ve Soyer [31]) kullanılarak Shore sertliği ile arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinden temin edilen 13 farklı karbonatlı kayaç üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Çalışmada kullanılan kayaçlar.

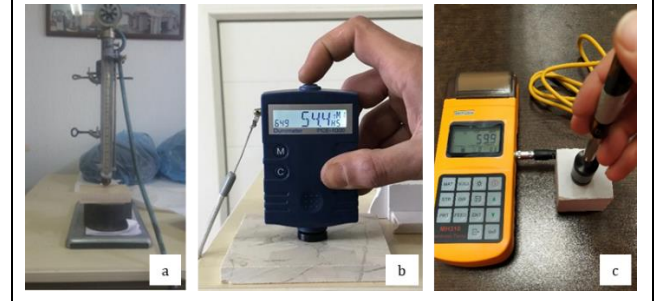
Table 2. Rocks used in the study.

Kayaç Kodu	Kayaç	Köken	Bölge
Trv-1	Traverten	Sedimanter	Denizli
Kkt-1	Kireçtaşı	Sedimanter	Antalya
Kkt-2	Kireçtaşı	Sedimanter	Antalya
Kkt-3	Kireçtaşı	Sedimanter	Antalya
Kkt-4	Kireçtaşı	Sedimanter	Antalya
Kt-1	Kireçtaşı	Sedimanter	Isparta
Kt-2	Kireçtaşı	Sedimanter	Isparta
Kt-3	Kireçtaşı	Sedimanter	Bursa
Kt-4	Kireçtaşı	Sedimanter	Kastamonu
Kt-5	Kireçtaşı	Sedimanter	Burdur
Kt-6	Kireçtaşı	Sedimanter	Bursa
Dkt-1	Dolomitik Kireçtaşı	Sedimanter	Isparta
Dkt-2	Dolomitik Kireçtaşı	Sedimanter	Isparta

4.1 Sertlik ölçümleri

Deneyler Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kazı Mekaniği ve Doğaltaşlar Teknolojisi Laboratuvarı ile Kirşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksekokulu Doğaltaş Analiz Laboratuvarında yapılmıştır. Shore sertliği deneyleri C-2 tipi Shore Scleroscope'u, dijital durometre ve dijital Shore sertliği ölçüm cihazı olmak üzere üç farklı cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Dijital durometre ve dijital Shore sertliği ölçüm cihazlarında da ölçüm, C-2 tipi Shore Scleroscope'unda gerçekleşen ölçüme benzer şekilde tungsten karbürden üretilen ucun zımparalanmış ve parlatılmış kayaç

yüzeyine düşürülmesi ve bunun sonucunda geri sıçrama tepkisine göre gerçekleştirilmektedir. Shore sertlik deneyleri Altındağ ve Güney [36] tarafından önerilen ISRM [34] yöntemine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan Shore sertliği ölçüm cihazları. (a): C-2 tipi Shore Scleroscope'u, (b): Dijital durometre. (c): Dijital Shore sertliği ölçüm cihazı.

Figure 1. Shore hardness measurement devices used in the study. (a): C-2 type Shore Scleroscope. (b): Digital durometer. (c): digital Shore hardness measurement device.

Çalışma genelinde C-2 tipi Shore Scleroscope'u ile yapılan ölçümler sonucu elde edilen Shore sertlik değerleri SH-1, dijital durometre ile yapılan ölçümler sonucu elde edilen Shore sertlik değerleri SH-2 ve dijital Shore sertliği ölçüm cihazı ile yapılan ölçümler sonucu elde edilen Shore sertlik değerleri SH-3 olarak kodlanmıştır. Her örnek için her cihazda aynı 3 numune üzerinde 20'er okuma yapılmış ve bu 20 okumanın aritmetik ortalaması hesaplanarak elde edilen sertlik değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan doğal taşların farklı cihazlarla ölçülen ortalama Shore sertlik değerleri.

Table 3. Average Shore hardness values of the natural stones used in the study measured with different devices.

Kayaç Kodu	SH-1		SH-2		SH-3	
	$\bar{x}$	Std. Sap.	$\bar{x}$	Std. Sap.	$\bar{x}$	Std. Sap.
Trv-1	41.68	7.00	45.12	6.42	44.88	3.88
Kkt-1	30.18	5.20	39.76	3.49	41.00	3.39
Kkt-2	30.48	5.50	38.72	4.16	39.89	5.60
Kkt-3	40.13	5.10	31.80	2.37	35.37	2.04
Kkt-4	42.20	4.60	30.20	4.03	37.01	2.75
Kt-1	54.98	3.40	52.18	4.48	53.53	2.57
Kt-2	55.15	6.20	57.44	2.79	55.34	2.82
Kt-3	58.93	4.90	54.60	3.16	56.84	4.83
Kt-4	60.10	2.80	57.54	2.55	57.81	5.14
Kt-5	58.98	3.50	54.15	3.90	51.82	5.19
Kt-6	60.45	5.20	59.43	7.90	58.80	2.95
Dkt-1	49.73	5.30	42.52	3.16	40.72	4.14
Dkt-2	41.10	6.40	43.23	3.14	44.96	3.45

SH-1: C-2 tipi Shore Scleroscope'u ile ölçüm değeri, SH-2: dijital durometre ile ölçüm değeri, SH-3: dijital Shore sertliği ölçüm cihazı ile ölçüm değeri, $\bar{x}$: ortalama değer, Std. Sap.: standart sapma.

4.2 Gevreklik beğerlerinin belirlenmesi

Çalışmada kullanılan doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı TS EN 1926'e [37] göre küp numuneler üzerinde ve dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı deneyleri ISRM'de [34] belirtilen yöntem esas alınarak disk şeklindeki numuneler üzerinde en az 10 numune üzerinde tekrarlanarak tekrarlanmış olup, dayanım değerleri elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Belirlenen bu dayanım değerlerine göre literatürde yaygınca kullanılan 4 farklı gevreklik hesaplama yöntemine göre (hesaplama dayanım değerlerinin kullanıldığı B_4, B_5, B_{10}, B_{12}) aşağıdaki eşitlikler (1)-(4) kullanılarak gevreklik değerleri hesaplanmış ve Tablo 4'te verilmiştir.

$$B_4 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (1)$$

$$B_5 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (2)$$

$$B_{10} = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} \quad (3)$$

$$B_{12} = (\sigma_c \times \sigma_t)^{0.72} \quad (4)$$

Burada; σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı; MPa; σ_t : Çekme dayanımı, MPa ifade etmektedir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve gevreklik değerleri.

Table 4. Uniaxial compressive strength, indirect tensile strength and brittleness values of natural stones used in the study.

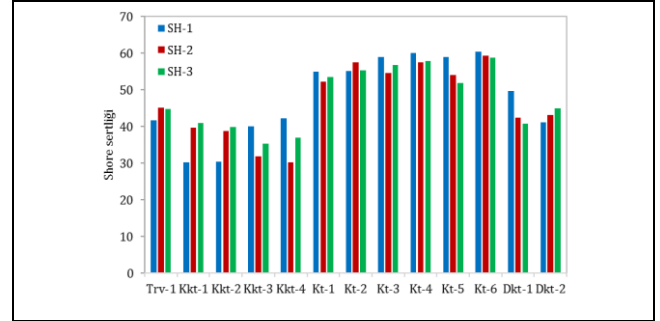
Numune kodu	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	B_4	B_5	B_{10}	B_{12}
Trv-1	48.0	4.3	11.11	0.86	103.66	46.56
Kkt-1	75.3	3.0	25.53	0.92	111.10	48.94
Kkt-2	76.4	3.0	25.90	0.92	112.69	49.44
Kkt-3	80.1	3.6	22.44	0.91	143.00	58.69
Kkt-4	77.7	3.8	20.71	0.88	145.63	59.47
Kt-1	160.5	6.0	26.74	0.92	481.40	140.65
Kt-2	138.4	6.7	20.66	0.91	463.74	136.92
Kt-3	146.9	5.7	25.90	0.92	416.37	126.70
Kt-4	116.2	7.0	16.60	0.88	406.64	124.56
Kt-5	113.1	8.0	14.18	0.87	451.34	134.27
Kt-6	113.6	7.4	15.35	0.89	420.20	127.54
Dkt-1	118.7	5.7	20.72	0.91	340.18	109.54
Dkt-2	108.7	5.6	19.40	0.95	304.24	101.08

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı; σ_t : Brazilian çekme dayanımı; B_4, B_5 : Hucka ve Das [16]; B_{10} : Altındağ [17]; B_{12} : Yaralı ve Soyer [31].

5 Bulgular ve tartışma

Kayaçların farklı sertlik ölçüm cihazları kullanılarak ölçülen Shore sertliği değerlerinin karşılaştırılması ve elde edilen bu Shore sertliği değerlerinin kayaçların gevreklik değerlerini belirlemede kullanılabilirliklerinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Tablo 3'te çalışmada kullanılan kayaçların ölçülen Shore sertliği değerleri, Tablo 4'te kayaçların tek eksenli basınç değerleri ile çekme dayanımları ve bu değerler kullanılarak hesaplanan gevreklik değerleri verilmiştir.

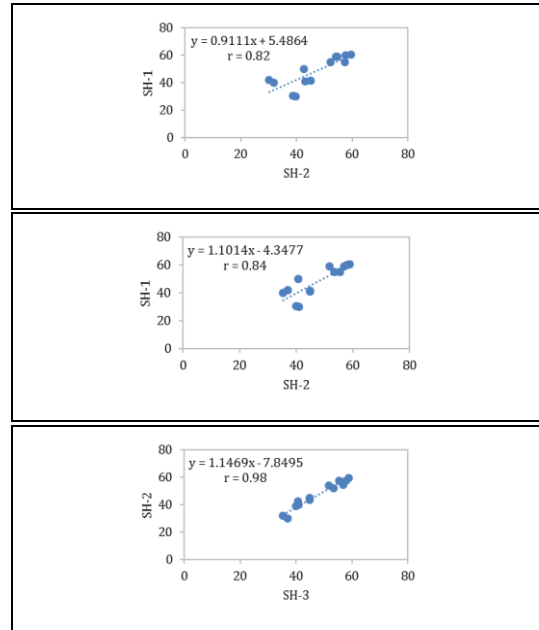
Şekil 2'de verilen aynı numuneler üzerinde farklı sertlik ölçüm cihazları kullanılarak elde edilen Shore sertlik değerlerinin genelde birbirine yakın olduğu, sadece bazı örneklerde C-2 tipi Shore Scleroscope'u kullanılarak elde edilen sertlik değerlerinde (SH-1), diğer iki sertlik değerine (SH-2 ve SH-3) oranla küçük farklılıklar olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan doğal taşların farklı cihazlarla ölçülen Shore sertlik değerleri.

Figure 2. Shore hardness values of natural stones used in the study measured with different devices.

Bunun sebebinin C-2 tipi Shore Scleroscope'u ölçüm yönteminin dijital ölçüm cihazlarıyla ölçüm yönteminden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca kaya malzemesinin heterojenliği veya sahip olduğu kristal yapısı küçük farklılıklara sebep olabilmektedir. Belli bir cihazda ölçülen değerlerin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde yüksek veya düşük olmadığı, cihazların kendi karakteristikleri gereği diğer cihazlardan elde edilen ölçüm sonuçlarına kıyasla her zaman yüksek veya düşük ölçüm sonucu vermediği görülmüştür. Şekil 3'te verilen C-2 tipi Shore Scleroscope'u, dijital durometre ve dijital Shore sertliği ölçüm cihazı kullanılarak yapılan ölçümler arasındaki ilişkiler grafik yardımıyla incelenmiştir.

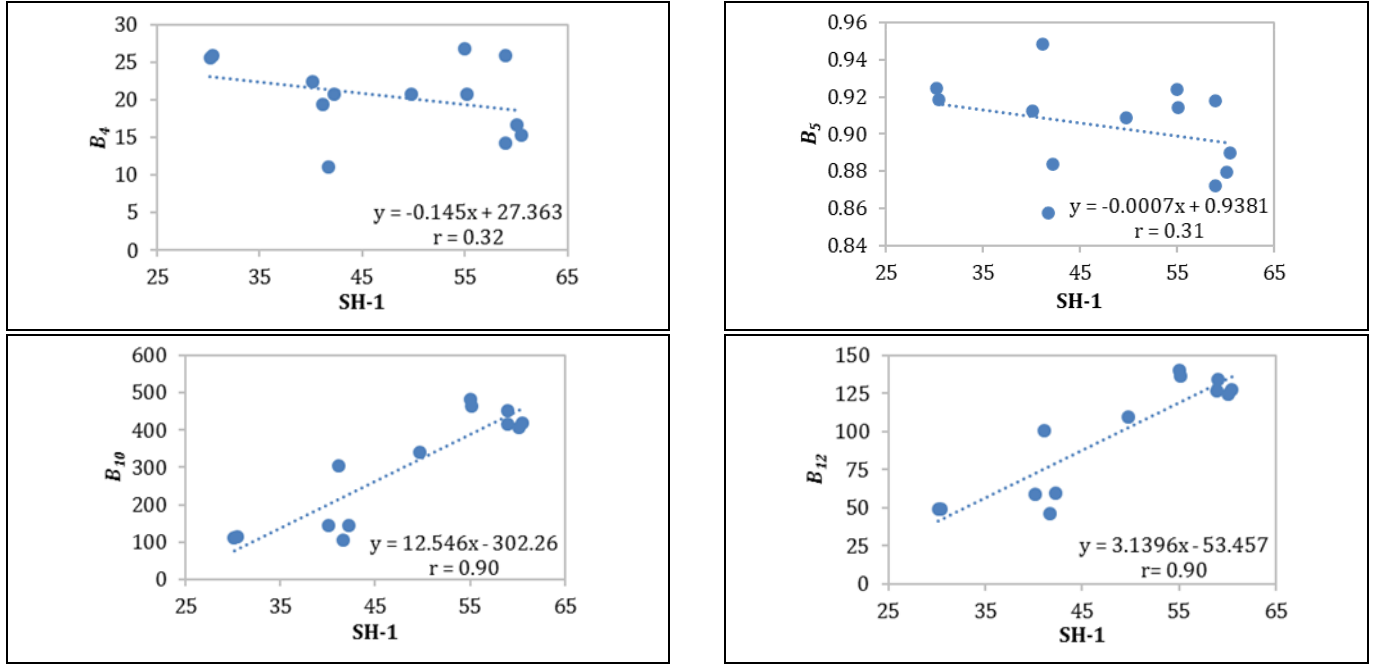


Şekil 3. SH-1, SH-2 ve SH-3 Shore sertlik değeri arasındaki ilişkiler.

Figure 3. Relationships between SH-1, SH-2 and SH-3 Shore hardness values.

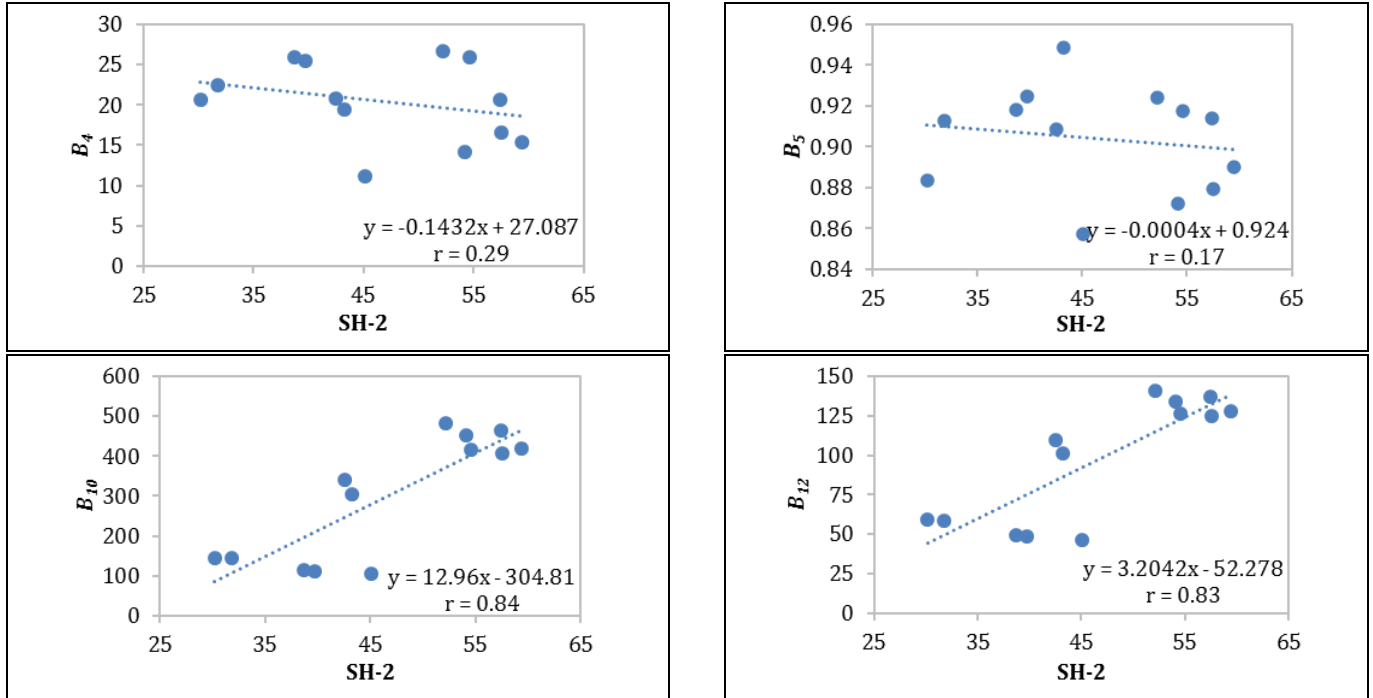
Her üç cihazdan elde edilen sertlik değerleri arasında yüksek korelasyon (r) katsayısına sahip (sırasıyla 0.82, 0.84, 0.98) ilişkiler belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kayaların belirlenen dayanım verileri ile (tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı) B_4, B_5, B_{10} ve B_{12} gevreklik değerleri hesaplanmış ve hesaplanan gevreklik değerleri ile

farklı cihazlarla belirlenen Shore sertlik değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Hesaplanan gevreklik değerleri ile ölçülen Shore sertlik değerleri arasındaki ilişkiler basit regresyon yöntemiyle analiz edilmiş ve dağılım grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4-6).



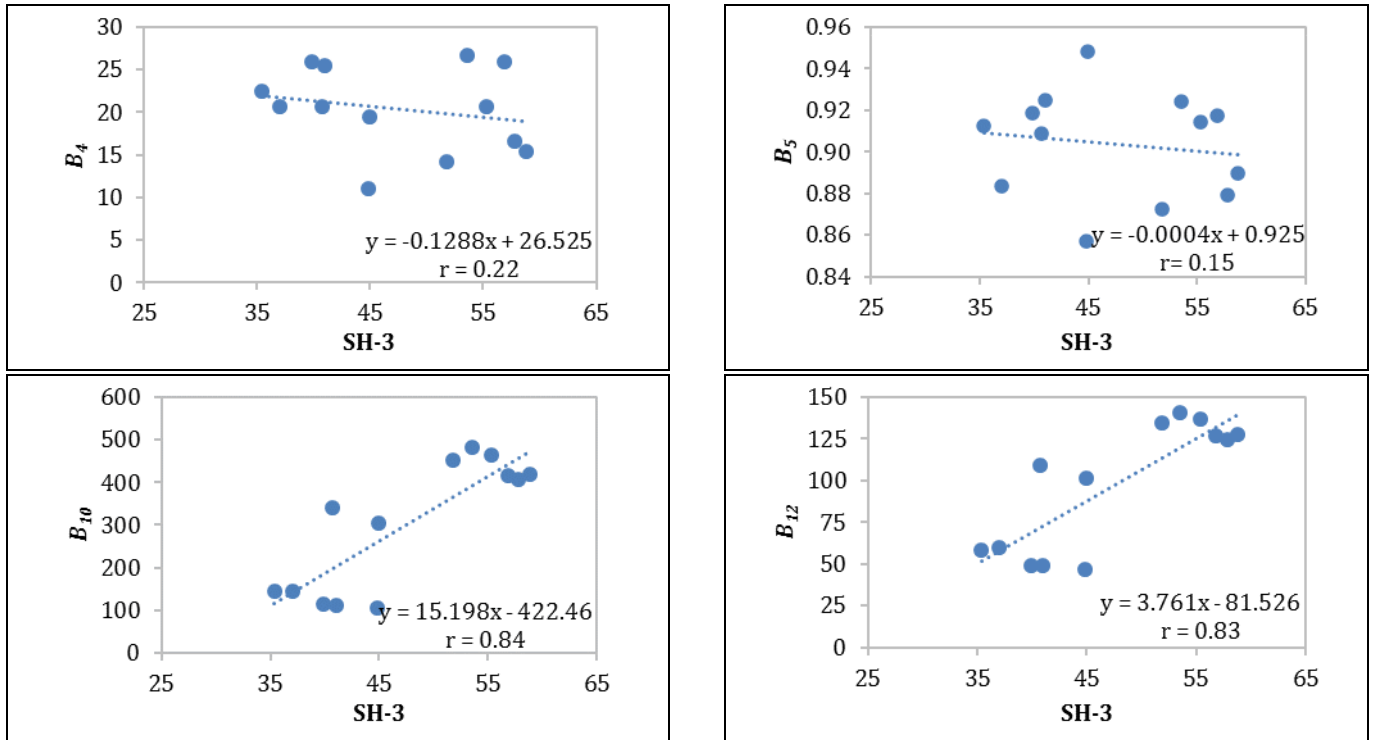
Şekil 4. SH-1 sertlik değeri ile farklı gevreklik değerleri arasındaki ilişkiler.

Figure 4. Relationships between SH-1 hardness value and different brittleness values.



Şekil 5. SH-2 sertlik değeri ile farklı gevreklik değerleri arasındaki ilişkiler.

Figure 5. Relationships between SH-2 hardness value and different brittleness values.



Şekil 6. SH-3 sertlik değeri ile farklı gevreklik değerleri arasındaki ilişkiler.

Figure 6. Relationships between SH-3 hardness value and different brittleness values.

Hesaplanan gevreklik değerleri ile ölçülen Shore sertlik değerleri arasındaki ilişkinin derecesi regresyon analizleri sonucunda hesaplanan korelasyon katsayıları (r) ile ifade edilmiştir (Tablo 5). Tablo 5 incelendiğinde çalışmada kullanılan kayaçların üç farklı cihaz kullanılarak ölçülen Shore sertlik değerleri (SH-1, SH-2, SH-3) ile B_4 ve B_5 gevreklik değerleri arasında anlamlı ilişkiler olmadığı görülmüştür. Çalışmada kullanılan kayaçların üç farklı cihaz kullanılarak ölçülen Shore sertlik değerleri (SH-1, SH-2, SH-3) ile araştırmacılar tarafından önerilen B_{10} ve B_{12} gevreklik değerleri arasında ise 0.83 ile 0.90 arasında değişen yüksek korelasyon katsayısına (r) sahip ilişkiler belirlenmiştir (Tablo 5). Altındağ [17], Altındağ ve Güney [33] ile Yaralı ve Soyer'in [31] yaptıkları çalışmalarda ulaştıkları sonucu doğrular şekilde, Shore sertlik değerlerinin araştırmacılar tarafından önerilen B_4 ve B_5 gevreklik değerlerini tahmin etmede kullanılamayacağı, B_{10} ve B_{12} gevreklik değerlerini tahmin etmede ise güvenilir olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Tablo 5. Gevreklik ve sertlik değerleri arasındaki korelasyon katsayıları (r).

Table 5. Correlation coefficients (r) between brittleness and hardness values.

Sertlik \ Gevreklik	B_4	B_5	B_{10}	B_{12}
SH-1	0.32	0.31	0.90	0.90
SH-2	0.29	0.17	0.84	0.83
SH-3	0.22	0.15	0.84	0.83

SH-1: C-2 tipi Shore Scleroscope'u ile ölçüm, SH-2: Durometre ile ölçüm, SH-3: Shore sertliği ölçüm cihazı ile ölçüm.

İlgili literatür incelendiğinde kayaçların gevrekliğinin belirlenmesinde birçok standart olmayan tanım ve yöntem ile

karşılaşılmaktadır. Gerçekleştirilecek çalışmalar ışığında gevreklik tanımının ve yönteminin standartlaşması gerekmektedir. Bu nedenle Xia ve diğ. [10] yaptıkları kapsamlı çalışmada da belirttikleri gibi kayaç gevrekliğinin anlaşılması ve tanımlanması için standart indeksler ve test yöntemleri oluşturmak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Kayaçların diğer mühendislik özellikleri ile farklı araştırmacılar tarafından kabul gören farklı gevreklik yöntemi arasındaki ilişkiler bundan sonra ayrıca incelenmelidir.

6 Sonuçlar

Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespiti kaya ile etkileşime giren mühendislik çalışmaları için oldukça önemlidir. Kayaçların kesilebilirliğinin ve delinebilirliğinin belirlenmesi de kazı mekaniği açısından en önemli parametrelerdir. Kayaçların kesilebilirlikleri ve delinebilirlikleri ile sertlik ve gevreklik değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğu da birçok çalışmada farklı araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur. Kayaçların kesilebilirliklerini ve delinebilirliklerini doğrudan belirlemek için uygulanan testler pahalı ve zaman alıcıdır.

Bu çalışma kapsamında, günümüzde üretiminin artık olmaması ve ölçüm esnasında göz hassasiyeti gerektirmesi gibi dezavantajlara sahip C-2 tipi Shore Scleroscope'u yerine dijital sertlik ölçüm cihazlarının kullanılabilirliğinin yanı sıra kayaçların Shore sertlik değerleri dört farklı kayaç gevreklik belirleme yöntemi arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar ışığında, kayaçların Shore sertliği belirlenirken C-2 tipi Shore Scleroscope'u yerine dijital olarak sonuç veren sertlik ölçüm cihazlarının kullanılabileceği belirlenmiştir.

Çalışmada, kayaların Shore sertlik değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerleri dikkate alınarak hesaplanan kırılmalık değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Altındağ ve Güney'in [11] çalışmalarından elde ettikleri sonuca benzer şekilde, Shore sertlik değerlerinin literatürde bulunan B_4 ve B_5 gevreklik değerlerini tahmin etmede kullanılamayacağı, B_{10} ve B_{12} gevreklik değerlerini tahmin etmede ise güvenilir olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Kayaç gevrekliğinin anlaşılması ve tanımlanması için standart indeksler ve test yöntemleri oluşturmak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Kayaçların diğer mühendislik özellikleri ile kabul gören gevreklik yöntemi arasındaki ilişkiler bundan sonra ayrıca incelenmelidir.

Çalışma sadece karbonat kökenli kayaçlar üzerinde gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçların farklı jeolojik kökene ve dokusal özelliklere sahip kayaçlar üzerinde deneyler yapılarak, örnek sayısının da artırılması ile istatistiksel açıdan daha anlamlı hale getirilebileceği düşünülmektedir.

7 Conclusions

The determination of the physical and mechanical properties of rocks is very important for engineering studies that interact with the rock. Determining the cuttability and drillability of rocks are also the most important parameters in terms of excavation mechanics. In many studies by many researchers, it has been introduced that there is a strong relationship between the cuttability and drillability of rocks and the hardness and brittleness values of the rocks. The tests applied to directly determine the cuttability and drillability of rocks are expensive and time consuming.

In the light of the results obtained, it was determined that digital hardness measurement devices can be used instead of C-2 type Shore Scleroscope while determining the Shore hardness of the rocks.

It has been determined that Shore hardness values cannot be used to estimate B_4 and B_5 brittleness values in the literature, and can be used reliably to estimate B_{10} and B_{12} brittleness values similar to the results of Altındağ and Güney [11].

More research is needed to establish standard indices and test methods for understanding and defining rock brittleness. The relationships between the other engineering properties of the rocks and the accepted brittleness method should then be studied further.

The study was carried out only on rocks of carbonate origin, and it is thought that the results obtained can be made more statistically significant by increasing the number of samples by repeating experiments on rocks of different geological origin and textural properties.

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Deniz AKBAY, Gökhan EKİNCİOĞLU, Raşit ALTINDAĞ ve Nazmi ŞENGÜN fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan malzemelerin temin edilmesi, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".
"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

10 Kaynaklar

- [1] Shalabi FI, Cording, EJ, Al-Hattamleh, OH. "Estimation of rock engineering properties using hardness tests". *Engineering Geology*, 90(3-4), 138-147, 2007.
- [2] Yagiz S. Development of rock Fracture and Brittleness Indices to Quantify the Effects of Rock Mass Features and Toughness in the CSM Model Basic Penetration for Hard Rock Tunneling Machines. PhD Thesis, Colorado School of Mines, Illinois, United States, 2002.
- [3] Yagiz, S. "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition". *Tunneling and Underground Space Technology*, 23(3), 326-339, 2008.
- [4] Yagiz, S. "Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test". *Tunneling and Underground Space Technology*, 24(1), 66-74, 2009.
- [5] Handewith, HJ. "Predicting the economic success of continuous". *CIM Bulletin*, 63, 595-9, 1970.
- [6] Dollinger GL, Handewith HJ, Breeds CD. "Use of the punch test for estimating TBM performance". *Tunneling and Underground Space Technology*, 13(4), 403-408, 1998.
- [7] Szwedzicki, T. "Draft ISRM suggested method for determining the indentation hardness index of rock materials". *International Journal of Rock Mechanics Mechanics and Mining Sciences*, 35(6), 831-835, 1998.
- [8] Dollinger GL, Raymer JH. "Rock mass conditions as baseline values for TBM performance evaluation". *North American Tunneling Conference*, Seattle, USA, 18-22 May 2002.
- [9] Copur H, Bilgin N, Tuncdemir H, Balci C. "A set of indices based on indentation test for assessment of rock cutting performance and rock properties". *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 103(9), 589-600, 2003.
- [10] Xia Y, Zhou H, Zhang C, He S, Gao Y, Wang P. "The evaluation of rock brittleness and its application: a review study". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1655485>.
- [11] Altındağ R, Güney A. "Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks". *Scientific Research and Essays*, 5(16), 2107-2118, 2010.
- [12] Yagiz S, Gokceoglu C. "Application of fuzzy inference system and nonlinear regression models for predicting rock brittleness". *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2265-2272, 2010.
- [13] Yagiz S, Karahan H. "Application of various optimization techniques and comparison of their performances for predicting TBM penetration rate in rock mass". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 308-315, 2015.
- [14] Tarasov B, Potvin Y. "Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 59, 57-69, 2013.

- [15] Meng F, Zhou H, Zhang C, Xu R, Lu J. "Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(5), 1787-1805, 2015.
- [16] Hucka V, Das B. "Brittleness determination of rocks by different methods". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11(10), 389-92, 1974.
- [17] Altındağ R. "The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills". *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102(1), 61-66, 2002.
- [18] Yagiz S. "A model for prediction of tunnel boring machine performance. Substructures and underground space. Engineering geology for tomorrow's cities". *The 10th International Association of Engineering Geologists Congress*, Nottingham, United Kingdom, 6-10 September 2006.
- [19] Kaunda RB, Asbury B. "Prediction of rock brittleness using nondestructive methods for hard rock tunneling". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(4), 533-540, 2016.
- [20] Altındağ R. "Assessment of some brittleness indices in rock-drilling efficiency". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(3), 361-370, 2010.
- [21] Bishop AW. "Progressive failure with special reference to the mechanism causing it". *Proceedings of the Geotechnical Conference*, Oslo, Norway, 19-22 September 1961.
- [22] Altındağ R. "Reply to H.G. Denkhaus 'Brittleness and drillability' in the Journal of Alloys and Compounds". *Journal of Alloys and Compounds*, 40, 675-678, 2003.
- [23] Sehgal J, Nakao Y, Takahashi H, Ito S. "Brittleness of glasses by indentation". *Journal of Materials Science Letters*, 14(3), 167-169, 1995.
- [24] Çelik MY, Yeşilkaya L, Ersoy M, Turgut T. "Karbonat kökenli doğaltaşlarda tane boyu ile knoop sertlik değeri arasındaki ilişkinin incelenmesi". *Madencilik*, 50(2), 29-40, 2011.
- [25] ISRM. "Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(3), 89-97, 1978.
- [26] Çelik SF, Çobanoğlu, İ. "Comparative investigation of Shore, Schmidt, and Leeb hardness tests in the characterization of rock materials". *Environmental Earth Sciences*, 78(554), 1-16, 2019.
- [27] Su O, Momayez M. "Kayaçların Equotip sertlik indeksi ile mekanik özellikleri ve delinebilirliği arasındaki ilişkiler". *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19(56), 519-531, 2017.
- [28] Protodyakonov MM. "Mechanical properties and drillability of rocks". *Proceedings of the Fifth Symposium Rock Mechanics*, Minnesota, USA, 5 May 1963.
- [29] George EA. *Brittle Failure of Rock Materials: Test Results and Constitutive Models*. Rotterdam, Netherlands, AA Balkema, 1995.
- [30] Blindheim OT, Bruland A. "Boreability testing, Norwegian TBM tunneling 30 years of experience with TBMs in Norwegian Tunneling". *Norwegian Soil and Rock Engineering Association*, 11, 29-34, 1998.
- [31] Yaral O, Soyer E. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. *Scientific Research and Essays*, 6(5), 1077-1088, 2011.
- [32] McFeat-Smith I. Rock property testing for the assessment of tunnelling machine performance. *Tunnels Tunnelling*, 9(2), 29-33, 1977.
- [33] Güney A, Altındağ R, Kibici Y. "Mermerlerin anizotropik karakteristiğinin Shore sertliği üzerine etkisi". *5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 13-14 Mayıs 2004.
- [34] International Society for Rock Mechanics. *The complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. Editors: Ulusay R and Hudson JA. Ankara, Turkey, 2007.
- [35] Ekincioglu G, Güney A, Akbay D, Altındağ R. "Dairesel Testereli Kesme Makinelerinin Saatlik Üretim Miktarının Mermer Yüzey Sertliğine Bağlı Olarak Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Regresyon Analizleri (RA) ile Tahmin Edilmesi". *Türkiye 9. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi ve Sergisi*, Antalya, Türkiye, 13-15 Aralık 2017.
- [36] Altındağ R, Güney A. "ISRM suggested method for determining the Shore Hardness value for rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 19-22, 2006.
- [37] Türk Standartları Enstitüsü. "Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini". Ankara, Türkiye, TS EN 1926, 2013.