



KAYAÇLARIN S_{20} KIRILGANLIK İNDEKSİ İLE SCHMIDT SERTLİĞİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İSTATİSTİKSEL OLARAK BELİRLENMESİ

¹Hakan ÖZŞEN, ²Abdullah UYSAL, ³Arif Emre DURSUN

^{1, 2, 3}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹hozsens@ktun.edu.tr, ²a.uysal938@gmail.com, ³aedursun@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 09.04.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.05.2019)

ÖZ: Kayaçların kırılabilirliğinin belirlenmesi farklı madencilik uygulamalarında önemli bir ön tasarım aracı olarak kabul edilmektedir. Kırılabilirlik değeri kayaçların kazısında ve delinebilirliğinde kullanılan önemli bir kaya parametresidir. Schmidt çekici sertliği ise kayaların dayanım, kesilebilirlik (doğrusal ve dairesel) ve delinebilirlik gibi mekanik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan ucuz ve kolaylık sağlayan bir yüzey sertliği ölçüsüdür. Bu çalışmada, kayaçların kırılabilirlik değerlerini belirlemek için Blindheim ve Bruland'ın (1998) geliştirdiği S_{20} kırılabilirlik indeksinin NTNU modeli kullanılmıştır. Burada amaç, kayaçların S_{20} kırılabilirlik indeksi ile Schmidt sertliği (R_L) değerleri arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak araştırılarak yeni bir tahmin yöntemi geliştirmesidir. Bunun için, farklı dayanım özelliklerine sahip 7 farklı kayaç numunesi üzerinde S_{20} kırılabilirlik indeks deneyi ile Schmidt çekici sertlik deneyleri yapılmıştır. Schmidt çekici sertliği değerleri ile S_{20} kırılabilirlik indeksi değerleri "SPSS" programı yardımıyla istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve korelasyon yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda Schmidt çekici sertliği değerleri ile S_{20} kırılabilirlik indeksi değerleri arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: S_{20} kırılabilirlik indeksi, Schmidt sertliği, istatistiksel tahmin, kaya mekaniği.

Determining the Statistical Relationship between the S_{20} Brittleness Index and Schmidt Hardness of Rocks

ABSTRACT: Determination of the brittleness of rocks is considered as an important preliminary design tool in different mining applications. The brittleness value is an important rock parameter used in the excavation and drilling of rocks. Schmidt's hardness is an inexpensive and easy-to-use surface hardness measure that is commonly used to determine the mechanical properties of rocks, such as strength, cuttability (linear and circular), and permeability. In this study, the S_{20} brittleness index values were determined by using NTNU model to determine the brittleness values of the rocks which were developed by Blindheim and Bruland (1998). The aim of this study was to investigate the relationship between the S_{20} brittleness index and Schmidt hardness (R_L) values statistically. For this purpose, Schmidt hardness tests and S_{20} brittleness index tests on 7 different rock samples with different strength properties were performed. Schmidt hardness test values and S_{20} brittleness index values were statistically evaluated and correlated with SPSS. As a result of this evaluation, it was determined that there was a strong correlation between Schmidt hardness and S_{20} brittleness index values.

Keywords: S_{20} brittleness index, Schmidt hardness, statistical estimation, rock mechanics.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kayaçlar içerisinde yapılacak farklı mühendislik tasarımlarında, yeraltı veya açık ocak madenciliği ile madenlerin çıkarılmasında, kentleşmenin hızla artması ile metro, tünel ve yeraltı deposu gibi uygulamalar için yapılan kazı ve diğer işlemlerde kayaların çeşitli özelliklerini bilmek mühendislik projelerinde birincil temel unsurdur. Bu tür işlemlerde kayaçların dayanım, aşındırıcılık, kazılabilirlik, delinebilirlik, kesilebilirlik ve kırılabilirlik vb. gibi birçok özelliklerini bilmek gerekmektedir. Bu özellikleri belirlemek içinde birçok deney setine ve deneye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özelliklerden kayaçların delinebilirliğinde ve kazısında etkili bir parametre olan kırılabilirlik değeri çeşitli araştırmacılar tarafından bazı eşitlikler veya test metotları kullanılarak belirlenebilmektedir (Hucka ve Das, 1974; Blindheim ve Bruland, 1998; NTNU, 1998; Altındağ, 2002; Dahl, 2003; Yaralı ve Kahraman 2011, Yagiz, 2009; Copur ve diğ., 2003; Dahl ve diğ., 2010; 2012; Dursun ve Gökay, 2016; Köken ve diğ. 2018).

Kayaçların kırılabilirlik derecesinin belirlenmesi, kayaçların delinebilirliği, aşındırıcılığı ve yükler altındaki davranışlarının tahmininde önemli bir büyüklük olarak kabul edilmektedir. Kayaçların kazılmasında en uygun seviyede enerji tüketiminin sağlanması ve çalışma sahasındaki iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin alınması madenciliğin verimliliği, sürdürülebilirliği ve ekolojik dengenin gözetilmesi açısından oldukça önemlidir. Kayaçların kırılabilirliğini en temel olarak litolojik farklılık, tane boyu, mineralojik ve petrografik özellikler, ayrışma-bozunma ve kayaçların bulunduğu ortamın yapısal ve hidrojeolojik özellikleri kontrol etmektedir (Köken ve diğ., 2018).

Madencilik alanında özellikle kazı mekaniği çalışmalarında (aşındırıcılık, kesilebilirlik ve delinebilirlik) kırılabilirlik değerini bilmek önemlidir. Çünkü kırılabilirlik değeri sadece bir parametre değil kaya özelliklerinin bir bileşimidir. Bu nedenle çeşitli araştırmacılar farklı test ölçüm cihazları kullanarak direkt olarak kırılabilirlik değerini ölçmüş ve tanımlamışlardır (Blindheim ve Bruland, 1998; NTNU, 1998; Yağız, 2009; Copur ve diğ. 2003). Bunun yanında bazı araştırmacılar kayaçların tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değeri ile Brazilian çekme dayanımı (σ_t) değerlerini birlikte kullanarak kırılabilirlik değerini dolaylı olarak hesaplamışlardır (Hucka and Das, 1974; Altındağ, 2002; Kahraman, 2002).

Schmidt çekici değeri (R_L) ise, kayaçların dayanım, kesilebilirlik (doğrusal ve dairesel) ve delinebilirlik gibi mekanik özelliklerinin tahmini için yaygın olarak kullanılan, pratik bir kaya sertliği ölçüsüdür (Schmidt, 1951; Kidybinski, 1968; Tarkoy ve Hendron, 1975; Poole ve Farmer, 1978; Farmer ve diğ., 1979; Howarth ve diğ., 1986; Shahriar, 1988; Bilgin ve diğ., 1990; Kahraman, 1999; Kahraman ve diğ., 2000; Bilgin ve diğ., 2002; Kahraman ve diğ., 2003; Aydın ve Basu, 2005; Goktan ve Gunes, 2005; Karakuş ve Tutmez, 2006).

Bu çalışmada 7 farklı kayaç numunesi kullanılarak kayaçların S_{20} kırılabilirlik indeksleri ve Schmidt çekici sertlik değerleri belirlenmiştir. Bu değerler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve kayaçların S_{20} ile R_L değerleri arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmıştır. Araştırma sonucunda hem arazide hem de laboratuvar şartlarında kullanılabilen R_L değerinden S_{20} kırılabilirlik indeks değerinin tahmin edilebildiği görülmüştür.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada 7 farklı kaya numunesi kullanılarak kayaçların S_{20} kırılabilirlik indeks değerleri ile Schmidt sertliği değerleri deneysel çalışmalarla belirlenmiştir.

Kırılabilirlik İndeksleri (Brittleness Index)

Daha önceki çalışmalarda kaya kırılabilirliğini farklı yaklaşımlarla tahmin etmek ve hesaplamak için çeşitli ampirik denklemler verilmiştir. Şimdiye kadar, kırılabilirlik değerini belirlemek için beş ortak yaklaşım kullanılmıştır. Bunlar, kayaçların σ_c ve σ_t değerleri kullanılarak hesaplanan yaklaşım, gerilme birim deformasyon eğrisi kullanılarak hesaplanan yaklaşım, tersinir enerji yaklaşımı, Mohr zarfı esaslı yaklaşım ve özel test ekipmanları kullanılarak hesaplanan yaklaşımlardır. Bu yaklaşımlardan en çok kullanılanları ise dayanım indeks yaklaşımı ve özel test ekipmanı ile hesaplanan yaklaşımlardır.

Dayanım indeks yöntemleri; kayaçların mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi esas alan niceliksel bir büyüklüğü ifade etmektedir. Çoğunlukla σ_c ve σ_t değerleri gibi mekanik özelliklerin dikkate alındığı dayanım indeks yöntemleridir. Bunlardan en çok kullanılanları aşağıdaki gibidir.

$$B_1 = \sigma_c / \sigma_t \text{ (Hucka and Das 1974; Altındağ 2002; Kahraman 2002)}$$

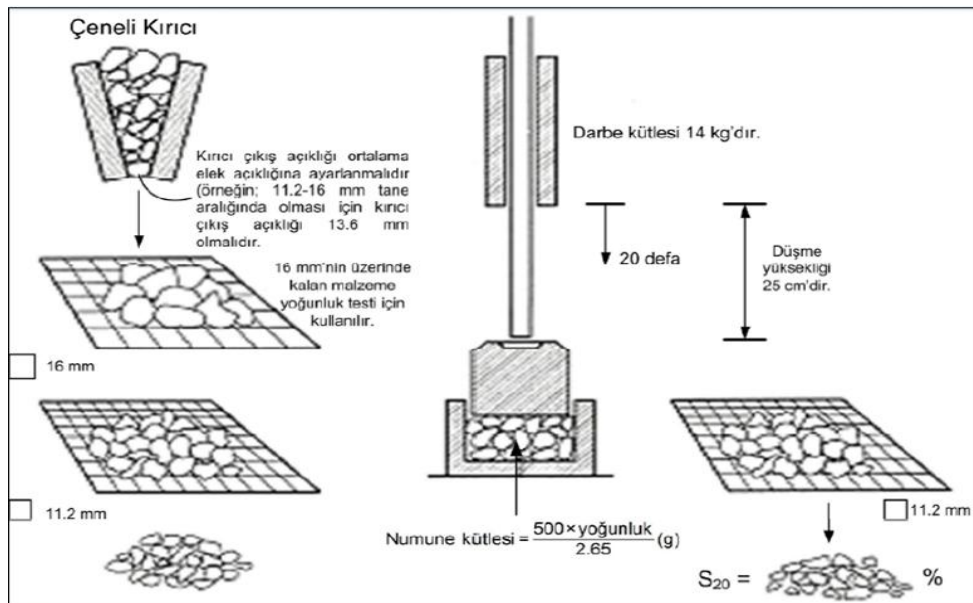
$$B_2 = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t) \text{ (Hucka and Das 1974; Kahraman 2002)}$$

$$B_3 = (\sigma_c \cdot \sigma_t) / 2 \text{ (Altındağ 2002)}$$

Özel test ekipmanı kullanılarak hesaplanan yaklaşımda da en önemlisi Blindheim ve Bruland'ın (1998) geliştirdiği S₂₀ kırılabilirlik değeri olan NTNU modelini kullanılarak belirlenen kırılabilirlik indeksidir. Kırılabilirlik deneyi, tekrarlanan darbe sonucu kayacın kırılmaya karşı gösterdiği direnci dolaylı olarak ölçen bir deney yöntemidir. Diğer bir yöntemde Yağız'ın (2009) geliştirdiği delme penetrasyon (punch penetration) testi yöntemidir.

S₂₀ kırılabilirlik indeksi (S₂₀ brittleness index)

NTNU tarafından kullanılan S₂₀ kırılabilirlik testi yöntemi, ilk olarak Matern ve Hjelmer (1943) tarafından geliştirilmiştir. Orijinal test başlangıçta agregaların mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için tasarlanmıştır, ancak daha sonra farklı amaçlar için testin birkaç değişik uygulama yöntemi geliştirilmiştir. 1950'lerin sonundan bugüne kaya delinebilirliğinin tespiti için geliştirilen ve kullanılan S₂₀ testi daha sonra NTNU tarafından tam cephe tünel açma makinelerinin (TBM) verimliliğinin tahmininde ana kaya parametrelerinden biri olan kırılabilirlik değerinin tespiti için kullanılmıştır. Sonraki yıllarda farklı amaçlar için geliştirilerek farklılaştırılan bu testin prensip şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kırılabilirlik testinin şematik görünüşü (Dahl, 2003)

Figure 1. Schematic view of brittleness test (Dahl, 2003)

Kırılabilirlik deneyinde kullanılacak numuneler çene açıklığı 13,6 mm ayarlanmış bir çeneli kırıcıdan geçirilerek kırıldıktan sonra 16 mm ve 11,2 mm'lik elekler ile sınıflandırılarak -16 mm + 11,2 mm arasında kalan malzeme kırılabilirlik testine tabi tutulur. +16 mm boyutundaki malzeme ise kayaç yoğunluğunun belirlenmesinde kullanılır. -16 + 11,2 mm aralığındaki malzemeden alınan ve 2,65 g/cm³ yoğunluğundaki 500 gr malzeme hacmine karşılık gelen numune hacmi test cihazının havanı içine yerleştirilir. Havanı kısmına yerleştirilen malzeme üzerine ortalama 25 cm yükseklikten 14 kg kütleyle sahip tokmak 20 kez düşürülür. Deney sonunda havanı içindeki malzeme 11,2 mm'lik elekten tekrar

elenerek elekten geçen malzeme ağırlığı belirlenir. 11,2 mm'lik elekten geçen malzeme miktarının deney başlangıcında havan içine konan malzeme miktarına oranı yüzde olarak malzemenin kırılmalık değerini verir.

Schmidt sertliği (Schmidt hardness)

Kayaçların yüzey sertliğini belirlemek için kullanılan yüzey sertlik testlerinden en yaygın olanıdır. Schmidt çekici kullanılarak, kayaçların yüzey sertliğinin tayini amacıyla yapılır. Bu çekik silindirik kaplı bir kutu içinde bulunan yay, çekik ve çekici kurma düzeneğinden oluşmaktadır. Cihazda bulunan yay vasıtasıyla kurulan çelik uç kayaç yüzeyi üzerinde zıplatılır. Zıplama mesafesi çekik üzerindeki kadrandan okunur ve Schmidt indeksi olarak tanımlanır (ISRM, 2007).

LABORATUVAR ÇALIşMALAR (LABORATORY STUDIES)

Bu çalışmada 7 farklı kayaç numunesi üzerinde S_{20} kırılmalık testi ve Schmidt çekici sertliği deneyleri yapılmıştır. Bu kayaçlar bazalt, mermer, andezitik tuf, granit ve üç farklı bölgeden alınan travertenden oluşmaktadır (Şekil 2). Düzenli ve düzensiz numuneler şeklinde laboratuvara getirilen numuneler üzerinde ilk önce Schmidt sertlik deneyleri yapılmış ve sonra numunelerden silindirik karot örnekleri alınarak kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. S_{20} kırılmalık testi içinse 13,6 mm genişliğinde çeneli kırıcı kullanılarak agrega şeklinde deney numuneleri hazırlanmıştır.



Traverten



Andezitik tuf



Mermer



Granit

Şekil 2. Deneylerde kullanılan kayaç numuneleri

Figure 2. Samples used in laboratory tests

S_{20} kırılmalık indeksinin belirlenmesi (Determining the S_{20} brittleness index)

Bu çalışmada kayaçların S_{20} kırılmalık değerlerini belirlemek için kullanılan deney seti kırılmalık test aleti (Şekil 1), 2 adet elek (16 mm, 11,2 mm), çeneli kırıcı ve hassas teraziden oluşmaktadır. Çeneli kırıcıda kırılan numuneler 16 mm ve 11,2 mm'lik eleklerden geçirilerek -16 mm ve + 11,2 mm boyutundaki numune kırılmalık testi için hazırlanmıştır. Deney için istenilen boyutta hazırlanan

numuneler kayaçların yoğunluğuna göre havana konulacak miktarlar Eşitlik 1 yardımıyla belirlenmiştir. Daha sonra numune; havana yerleştirilip deney setinin 14 kg'lık tokmağı 20 defa havan içerisindeki numune üzerine düşürülerek kırılma deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonrası havan içerisindeki numune alınıp 11,2 mm'lik elekten geçirilip, elek altına geçen miktar hassas terazide tartılmış ve havana konulan ilk miktara oranı belirlenerek S₂₀ kırılma değeri belirlenmiştir. Kayaçların S₂₀ kırılma indeks değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bu verilere göre bu çalışmadaki tüm kayaçların Dahl vd. (2012) S₂₀kırılma indeksi sınıflamasına göre "oldukça yüksek kırılma" seviyesinde olduğu belirlenmiştir.

$$\text{Numune kütlesi} = \frac{500 \cdot \text{Yoğunluk}}{2,65 \text{ (gr/cm}^3\text{)}} \quad 1$$

Schmidt çekici sertliğinin belirlenmesi (Determining the Schmidt hardness)

Bu çalışmada kayaçların yüzey sertliğini belirlemek için L tipi dijital Schmidt çekici kullanılmıştır. Bu deneyde laboratuvara getirilen blok veya düzensiz şekilli 7 adet kayaç örneği üzerinde farklı noktalara 20 vuruş yapılmış ve en yüksek 10 değerın ortalaması alınarak kayaçların sertlikleri Schmidt çekici ile belirlenmiştir (Şekil 3). Kayaçların Schmidt çekici sertlik değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Kayaçların Schmidt sertliği değerlerinin belirlenmesi

Figure 3. Determination of Schmidt hardness of rock samples

Çizelge 1. Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri

Table 1. Physical and mechanical properties of rock samples

Kayaç	Kırılma indeksi S ₂₀ (%)	Schmidt sertliği RL	Tek eksenli basınç day. σ _c (MPa)	Dolaylı çekme day. σ _t (MPa)	Kuru Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Nokta yükleme indeksi day. I _{s(50)} (MPa)
Granit	63,18	54,26	76,83	6,55	2,64	7,14
Bazalt	63,97	44,21	64,71	5,48	2,94	8,20
Andezitik Tüf	87,77	20,82	11,29	5,00	2,59	0,84
Mermer	58,22	59,44	60,84	8,43	2,79	7,47
Traverten 1	61,87	38,88	15,50	4,25	2,51	2,65
Traverten 2	60,86	42,68	26,94	4,39	2,62	2,31
Traverten 3	85,77	22,61	22,87	3,20	2,71	1,12

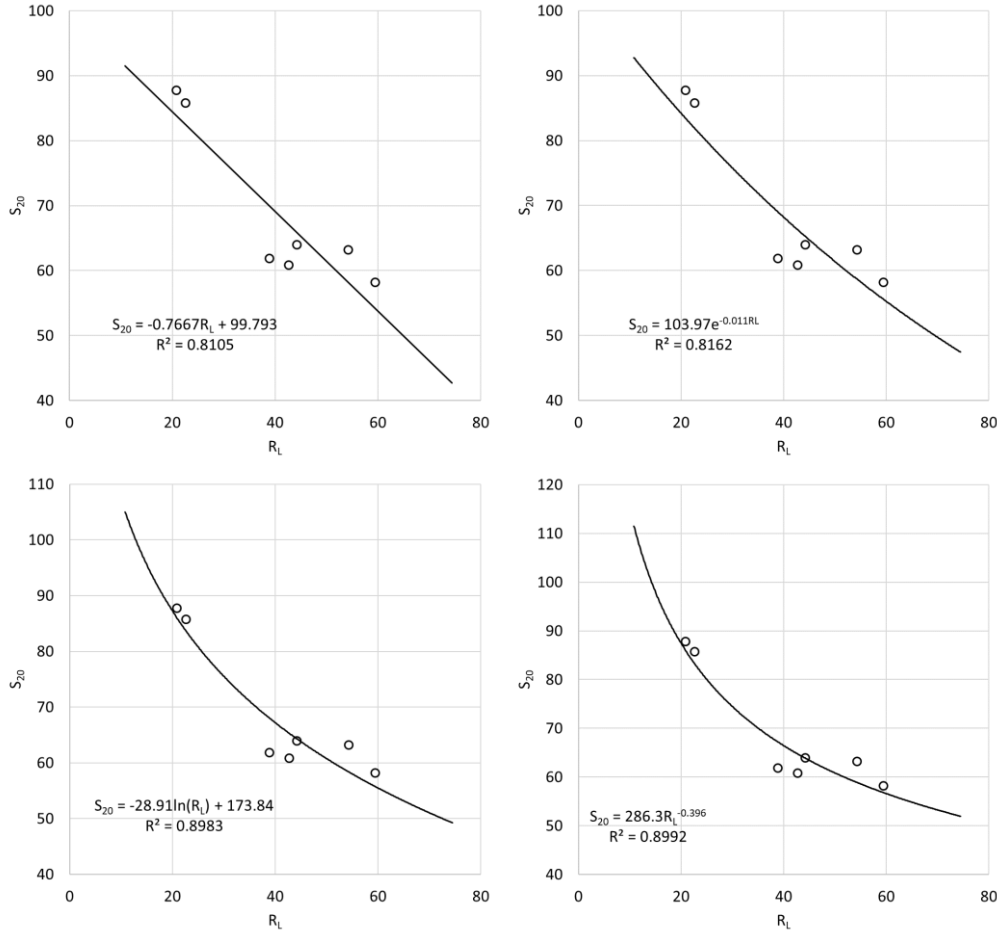
VERİLERİN İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRİLMESİ (STATISTICAL EVALUATION OF DATA)

Laboratuvarda yapılan kaya mekaniği deneyleri sonucunda elde edilen değerlerden S₂₀ kırılma indeksi ile Schmidt çekici sertliği verileri "SPSS v.15.0" programı yardımıyla istatistiksel olarak

değerlendirilmiştir. İlk olarak bu iki değer arasındaki korelasyon katsayısını belirlemek için Bivariate korelasyon analizi yapılmış ve iki değer arasındaki korelasyon istatistiksel olarak anlamlı ve negatif yönlü ($p=0,01$) ve r değeri $0,900$ olarak bulunmuştur. Daha sonra basit regresyon analizi yapılarak bu iki değer arasındaki tahmin modeli "SPSS v.15.0" programı ile belirlenmiştir. İkili regresyon analizine göre elde edilen modeller Çizelge 2 ve Şekil 3'de verilmiştir. Bu değerlendirmelerde uygulanabilirliği en uygun olan ilişki türleri seçilerek, bunlar üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Bütün modellerde R^2 değerlerinin %80'in üzerinde olması iki parametre arasında güçlü bir ilişkinin olduğunu göstermiştir. ANOVA tablosuna göre de anlamlılık değeri $p<0,01$ olduğu için, istatistiksel olarak elde edilen model ilişkisinin anlamlı olduğu, rastlantısal olmadığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 2. Verilerin regresyon analizi sonuçları

Fonksiyon	Regresyon denklemi	R^2 değeri
Doğrusal	$S_{20} = -0,7667R_L + 99,793$	0,8105
Logaritmik	$S_{20} = -28,91\ln(R_L) + 173,84$	0,8983
Üs	$S_{20} = 286,3R_L^{-0,396}$	0,8992
Üstel	$S_{20} = 103,97e^{-0,011R_L}$	0,8162



Şekil 3. Kırılgenlik indeksi (S_{20}) ile Schmidt sertliği (R_L) arasındaki bağıntılar

Figure 3. Relations between brittleness index (S_{20}) and Schmidt hardness (R_L)

SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada kayaçların S_{20} kırılgenlik indeksi değerini uygulamasının pratik olarak hem laboratuvarında hem de arazi şartlarında yapılması nedeniyle Schmidt çekici sertliğinden istatistiksel olarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için laboratuvarında 7 farklı kayaç numunesi üzerinde bazı

kaya mekaniği deneyleri yapılarak kayaçların fiziksek ve mekanik özelliklerini belirlenmiştir. Daha sonra basit regresyon analizi yapılarak bu iki değer arasındaki tahmin modeli "SPSS v.15.0" programın ile belirlenmiştir. Gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda kırılgenlik indeks (S₂₀), ile Schmidt sertliği (R_L) değerleri arasında güçlü ve anlamlı ilişkiler bulunmuştur.

Kayaçların dayanım, aşındırıcılık, kazılabilirlik, delinebilirlik, kesilebilirlik ve kırılgenlik vb. gibi birçok özelliklerini belirlemek için birçok deneye ve deney setine ekonomik olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Bu deney setlerinin oluşturulması zor ve pahalı olduğu için kayaçların bu özelliklerinin pratik yöntemlerle tahmin edilebilmesi önemlidir. Bu çalışmada R_L deneyinin hasarsız bir test yöntemi olması hem laboratuvar hem de arazide kolaylıkla uygulanabilmesi ve numune hazırlama işlemlerinin pratik ve ekonomik olmasından dolayı S₂₀ değerinin tahmininde kullanılmıştır. Bu çalışmada kayaçların S₂₀ kırılgenlik indeks değerinin R_L değerinden istatistiksel olarak tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Altındağ, R., 2002, "The Evaluation of Rock Brittleness Concept on Rotary Blasthole Drills" Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol.102, pp.61-66.
- Aydın, A., Basu, A., 2005, "The Schmidt Hammer in Rock Material Characterization", Engineering Geology, Vol.81, pp.1-14.
- Bilgin, N., Seyrek, T., Shahriar, K., 1990, "Roadheaders Glean Valuable Tips for Istanbul Metro", Tunnels and Tunnelling International, Vol.22, No.10, pp.29-32.
- Bilgin, N., Dincer, T., Copur, H., 2002, "The Performance Prediction of Impact Hammers from Schmidt Hammer Rebound Values in Istanbul Metro Tunnel Drivages", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.17 (3), pp.237-247.
- Blindheim, O.T., Bruland, A., 1998, "Boreability testing, Norwegian TBM tunneling 30 years of experience with TBMs in Norwegian tunneling", Norwegian Soil and Rock Engineering Association Publication, Vol.11, pp. 29-34.
- Copur, H., Bilgin, N., Tuncdemir, H., Balci, C. 2003., "A set of Indices Based on Indentation Test for Assessment of Rock Cutting Performance and Rock Properties", Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 103, No.9, pp.589-600.
- Dahl, F., 2003., "The Suggested DRI, BWI, CLI standards. NTNU", Anglesggdrift, Trondheim, Norway.
- Dahl, F, Bruland, A, Grov, E, Nilsen, B, 2010, "Trademarking the NTNU/SINTEF drillability test indices", Tunnels and Tunnelling International, Vol.4, pp.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, Vol.28, pp.150-158.
- Dursun, A.E., Gokay, M.K., 2016, "Cuttability Assessment of Selected Rocks through Different Brittleness Values", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.49, pp.1173-1190.
- Farmer, I.W., Hignett, H.J., Hudson, J.A., 1979, "The Role of Geotechnical Factors in the Cutting Performance of Tunneling Machines in Rocks", In: Proceedings of the Fourth International Congress on Rock Mechanics of the ISRM, Montreux, pp. 371-377.
- Goktan, R.M., Gunes, N., 2005, "A Comparative Study of Schmidt Hammer Testing Procedures with Reference to Rock Cutting Machine Performance Prediction", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.42, pp.466-477.
- 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 Science & Geomechanics Abstracts, Vol.23, pp.171-175.
- Hucka, V., Das, B., 1974, "Brittleness determination of rocks by different methods", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol.11, pp.389-392.
- Kahraman, R., 1999, "Rotary and Percussive Drilling Prediction Using Regression Analysis", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.36, pp.981-989.

- Kahraman, R., Balcı, C., Yazıcı, S., Bilgin, N., 2000, "Prediction of the Penetration Rate of Rotary Blast Hole Drills Using a New Drillability Index", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.37, pp.729-743.
- Kahraman, S., 2002, "Correlation of TBM and Drilling Machine Performance with Rock Brittleness", *Engineering Geology*, Vol.65, pp.269-283.
- Kahraman, S., Bilgin, N., Feridunoglu, C., 2003, "Dominant Rock Properties Affecting the Penetration Rate of Percussive Drills", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.40, pp.711-723.
- Karakuş, M., Tutmez, B., 2006, "Fuzzy and Multiple Regression Modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based on Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.39(1), pp.45-57.
- Kidybinski, A., 1968, "Rebound Number and the Quality of Mine Roof Strata", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.5, pp.283-291.
- Köken, E., Aydın, H., Özarslan, A., 2018, "S₂₀KırılganlıkİndeksininKayaçlarınParçalanabilirliğiAçısındanİncelenmesi", *BilimselMadencilikDergisi*, c.57 (özelsayı), ss.73-83.
- NTNU-Anleggsdrift, 1998, "Hard Rock Tunnel Boring, Norwegian University of Science and Technology", Dept. of Civil and Transport Engineering, Report 1B-98.
- Poole, R.W., Farmer, I.W., 1978, "Geotechnical Factors Affecting Tunnelling Machine Performance in Coal Measures Rock", *Tunnels and Tunnelling International*, Vol.10, pp.27-30.
- Schmidt, E., 1951, "A Non-Destructive Concrete Tester", *Concrete*, Vol.59, pp.34-35.
- Shahriar, K., 1988, "Rock Cuttability and Geotechnical Factors Affecting the Penetration Rates of Roadheaders", PhD thesis, Istanbul Technical University, p.241.
- Tarkoy, P.J., Hendron, A.J., 1975, "Rock Hardness Index", US National Science Foundation report NSF-RAT-75-030.
- Ulusay, R., Hudson, J.A. (eds), 2007, "The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested methods prepared by the commission on testing methods", *International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, Ankara, Turkey.
- Yagiz, S., 2009, "Assessment of Brittleness Using Rock Strength and Density with Punch Penetration Test" *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.24, No.1, pp.64-77.
- Yarali, O., Kahraman, S., 2011, "The Drillability Assessment of Rock Using the Different Brittleness Values", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.26, No.2, pp.406-414.