

FARKLI SUYA DOYGUNLUK DERECELERİNDE BAZI SEDİMANTER KAYAÇLARDA TEK EKSENLİ SIKIŞMA DAYANIMININ DİĞER FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERDEN KESTİRİMİ

Engin ÖZDEMİR (ORCID: 0000-0002-6043-0403)
Didem EREN SARICI (ORCID: 0000-0003-2639-5226)*

Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

Geliş / Received: 20.03.2017

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 10.05.2017

Kabul / Accepted: 10.05.2017

ÖZ

Mühendislik tasarımlarının pek çoğunda kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu özelliklerin en önemlilerinden bir tanesi olan tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesinde uygun laboratuvar koşullarının gerekliliği ve standartlara uygun örnek hazırlamanın zorlukları bu parametrenin diğer fiziko-mekanik özelliklerden istatistiksel metodlar kullanılarak tahmin edilmesi çalışmalarını yaygınlaştırmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmalarda kullanılan numuneler genellikle kuru halde veya kontrol edilemeyen su içeriğine sahip olmaktadır. Bu çalışmada üç farklı sedimanter kökenli kayaç numunesinde kontrollü şekilde suya doygunluk oluşturularak; kuru ağırlıkça %35, 70 ve 100 doygun koşullarda iken tek eksenli sıkışma dayanımı (TESD), nokta yükleme dayanımı, dolaylı çekme dayanımı (Brazilian), Schmidt ve Shore sertliği, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmıştır. Basit ve çok değişkenli regresyon analizleri ile tek eksenli sıkışma dayanımını diğer fiziko-mekanik özelliklerden tahmin etmek için modeller geliştirilmiştir. Modellerin geçerliliği incelendiğinde %70 ve 100 suya doygunluk koşullarında tek eksenli sıkışma dayanımı ile diğer mekanik özellikler arasında güçlü ilişkilerin olduğu ($R^2 > 90$) görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kayaç, nokta yükleme dayanım indeksi, Regresyon analizi, sertlik, suya doygunluk, tek eksenli sıkışma dayanımı

ESTIMATION UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF SOME SEDIMENTARY ROCKS FROM OTHER PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AT DIFFERENT WATER SATURATION DEGREE

ABSTRACT

The determination of the physico-mechanical properties of rocks is a very important issue in a lot of engineering applications. Uniaxial compressive strength (UCS) is one of the most important properties of rocks. The method to determine it is relatively simple, but it is time consuming, expensive and requires a well-prepared rock sample. For this reason, other physico-mechanical properties are frequently used to predict the UCS. Specimens used in this kind of work are either dry or have uncontrolled water content. This study aims to develop models for estimating the UCS at any water content, and some laboratory tests were carried out on different types of sedimentary rocks. For this purpose the UCS, point load strength, Schmidt and Shore rebound hardness, ultrasonic wave velocity and Brazilian tensile strength were determined for specimens at oven dried and 35, 70 and 100% saturated specimens. Simple and multiple regression analyses were carried out. The results

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 422 377 4774; e-mail / e-posta: didem.sarici@inonu.edu.tr

E. ÖZDEMİR, D.E. SARICI

showed that the predictive performance of models is good, especially at 70 and 100% degree saturation, and they are very practical tools to estimate the UCS at any water content using other mechanical properties.

Keywords: Rock, hardness, point load strength, regression analysis, uniaxial compressive strength, water saturation

1. GİRİŞ

Kayaçların fiziksel-mekanik özellikleri, yeraltı ve yerüstü mühendislik yapılarının tasarımında göz önünde bulundurulmuş önemli girdi parametreleridir. Farklı şekil, boyut, geometriye sahip taneciklerin bir araya gelmesi ile oluşan kayaçlarda gözlenen heterojen yapı, bu parametreleri etkileyen önemli unsurlardandır. TESD bu parametreler içinde büyük öneme sahip olanlardan bir tanesidir [1-4]. TESD, kayacın mineral kompozisyonu, gözenekliliği, süreksizliklerin durumu, tane boyutu, geometrisi gibi kayacın kendisiyle ilgili özelliklerden ayrıca ortamın sıcaklığı, nemi, su içeriği ile etki eden basınç gibi dışsal faktörlerden etkilenmektedir [2, 5-9]. Özellikle kayacın bünyesinde gelişen doymunluk derecesindeki değişim kayaç dayanımını ve davranışlarını etkiler. Bu özellik kil içeriği yüksek olan kayaçlarda daha fazla gözlemlenir.

TESD'nin hasarlı mekanik testler grubunda yer alması, örnek alınımının ve deney standartlarına uygun hazırlıkların yapımının zor ve pahalı oluşu yöntemin dezavantajıdır. Bu nedenle gerçekleştirilmesi daha kolay ve hızlı olan basit yöntemlerle yapılabilen test teknikleri (nokta yük dayanımı, Schmidt sertliği vb.) TESD'nin dolaylı yoldan tayin edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [5, 10-13].

TESD'nin diğer kayaç parametrelerinden dolayı olarak tahmin edilmesinde tekli ve çoklu regresyon analizleri yaygın biçimde kullanılan yöntemlerdir. Bu amaçla bazı araştırmacılar tarafından çeşitli koşullarda deneyler yapılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmalarda doymunluğun etkisi ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan kayaçlar ya kuru halde ya da kontrolsüz doymunluk koşullarında deneye tabi tutulmaktadır. [6, 14-17]. Bu husus dikkate alınarak bu çalışmada kayaçların TESD ile nokta yükleme dayanımı, dolaylı çekme dayanımı (Brazilian), Schmidt ve Shore sertliği, ultrasonik hız değerleri arasındaki ilişkiler farklı doymunluk koşulları için araştırılmıştır.

Bu amaçla kuru %35, 70 ve 100 doymun durumdaki kayaçlar üzerinde TESD, nokta yükleme dayanımı, dolaylı çekme dayanımı (Brazilian), Schmidt ve Shore sertliği, ultrasonik hız tayini deneyleri yapılmıştır. TESD'nin diğer mekanik özelliklerden kestirimi için basit ve çok değişkenli regresyon analizleri uygulanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzeme

Çalışmada, Doğu Anadolu Bölgesi'nde (Malatya, Erzurum, Adıyaman) bulunan üç farklı sedimanter kayaç türü (traverten, kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı) kullanılmıştır. Yapılan arazi çalışmalarından ve mermer fabrikalarından yaklaşık 30x30x50 cm ebatlarında prizmatik örnekler alınarak İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği laboratuvarına nakledilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere ISRM ve TSE standartlarında öngörülen boyutlarda örnekler hazırlanmıştır. NX çaplı karotiyerle alınan karot örnekleri taş kesme testere kullanılarak TESD, nokta yükleme dayanımı, indirekt çekme dayanımı (Brazilian), Schmidt, Shore sertlik tayini, ultrasonik hız tayini deneyleri için uygun ebatlarda kesilmiş, düzeltilmiştir. Örneklerin fiziksel özellikleri (porozite, doğal birim hacim ağırlık, ağırlıkça su emme) TSE ve ISRM standartlarında önerilen şekilde belirlenmiştir [18-25]. Örneklerin mineralojik bileşimini ve oksit içeriğini belirlemek için İnönü Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında XRD, XRF analizleri yaptırılmıştır. Örneklerin fiziksel özellikleri ve XRD analizi sonuçları Tablo 1'de, XRF analizi sonuçları Tablo2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kayaçların fiziksel ve mineralojik özellikleri

Örnek	Porozite (%)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Mineralojik Bileşim
Kireçtaşı	3,24	26,38	0,15	Kalsit
Traverten	10,55	24,23	1,20	Kalsit
Dolomit	5,42	25,70	1,36	Dolomit, Kalsit

FARKLI SUYA DOYGUNLUK DERECELERİNDE BAZI SEDİMANTER KAYAÇLARDA TEK EKSENLİ BASMA DAYANIMININ DİĞER FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERDEN KESTİRİMİ

Tablo 2. Çalışılan kayaçların XRF analizi sonuçları

Kimyasal Bileşimi	Kireçtaşı (%)	Dolomitik Kireçtaşı (%)	Traverten (%)
Fe ₂ O ₃	0,16	0,74	0,06
MgO	0,32	14,33	0,45
Al ₂ O ₃	0,08	2,16	0,04
SiO ₂	0,001	0,001	0,001
P ₂ O ₅	0,01	0,01	0,003
K ₂ O	0,001	0,02	0,001
CaO	56,77	38,97	56,13
TiO ₂	0,01	0,01	0,0003
MnO	0,003	0,02	0,002
ZnO	0,002	0,34	0,006
SrO	0,02	0,02	0,02
PbO	0,001	0,14	0,002
Na ₂ O	2,12	2,72	2,20
Kızdırma Kaybı	40,73	40,95	41,13
Toplam	100,22	100,43	100,05

2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, ISRM ve TSE standartlarında önerilen metotlarla gerçekleştirilmiştir [18-25]. Söz konusu standartlarda kullanılan örnekler kuru halde veya suya doygunluk dereceleri kontrol edilmeden testlere tabii tutulmaktadır. Bu çalışmada amaç, kayaçlarda kontrollü bir suya doygunluk yaratmak ve bunun etkilerini incelemektir. Bu amaçla her deney için her bir kaya biriminden dört grup numune hazırlanmış, bu gruplar a, b, c ve d olarak isimlendirilmiştir. 1. grup numuneler 105°C'lik etüvde 24 saat süreyle kurutulmuş ve oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulularak deneye tabii tutulmuştur. Bu gruba kuru numune grubu (a grubu) adı verilmiştir. Daha sonra numuneler ağırlıkça %35, 70 ve 100 suya doygun hale gelinceye kadar su içerisinde bekletilmiştir. Numunelerin istenilen doygunluğa ulaşip ulaşmadığını belirlemek için belirli aralıklarla ağırlık ölçümleri alınmış ve su içeriği Eşitlik 1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$W_m = \left(\frac{m_w - m_d}{m_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

Burada;

W_m: Su içeriği (%)

m_w: Suya doygun ağırlık (g)

m_d: Kuru ağırlık (g)

Ağırlıkça % 35 doygunluk seviyesine ulaşan numuneler b grubu, %70 doygunluk seviyesine ulaşanlar c grubu, %100 doygunluk seviyesine ulaşanlar d grubu numuneler olarak isimlendirilmiştir. Her bir grup üzerinde TESD, nokta yükleme dayanımı, dolaylı çekme dayanımı (Brazilian), ultrasonik hız tayini, Schmidt ve Shore sertliği deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Fiziko-Mekanik Deneyler

2.2. 1. 1. Schmidt Sertlik İndeksi

Kolay, pratik ve ucuz bir deney yöntemi olan Schmidt çekici ile sertlik tayini, kaya ve betonların sertliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Schmidt sertlik indeksi kullanılarak yapılan deney TESD'nin dolaylı olarak tayin edilmesinde kullanılmaktadır. Arazide uygulanabilmesi ve hasarlı olmayan bir test tekniği olması yöntemin avantajlı yönüdür. Fakat yöntem çok yumuşak ve çok sert kayaçlarda uygulanamaz. L ve N tipi olmak üzere iki tür Schmidt çekici bulunmaktadır. Bu çalışmada L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Test sonuçlarının güvenilirliği çekicinin tipi, örnek boyutları, yüzeyin pürüzlülüğü, örneğin zayıflığı ve nem içeriği gibi faktörlerden etkilenmektedir [6].

E. ÖZDEMİR, D.E. SARICI

Bu deney için NX (54 mm çapında) karot numuneleri kullanılmıştır. Deneyin uygulandığı numune yüzeylerinin düzgün ve çatlaksız olmasına özen gösterilmiştir. Numune deneyin gerçekleştirileceği V yatak içine yerleştirilmiştir. Çekicinin ucu deney örneğinin yüzeyine dik olacak şekilde yavaşça bastırılmış ve çekicinin içindeki yaydan geri tepme sesi geldiği anda, çekicinin gövdesi üzerindeki göstergesi sabitleme tuşuna basılarak, geri sıçrama değeri çekicinin gövdesindeki göstergeden okunup kaydedilmiştir. Deney örneği üzerinde birbirinden uzaklığı en az çekicinin uç çapına eşit olacak şekilde, 20 farklı noktada ölçüm alınmıştır. Deney esnasında herhangi bir çatlak oluşması veya gözle görülebilir bir yenilmenin gelişmesi durumunda deney iptal edilmiştir. Elde edilen 20 adet sertlik değeri büyükten küçüğe doğru sıralanmış ve bu değerlerin en küçük %50'si iptal edilmiştir. Geri kalan sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır [21].

2.2.1.2. Nokta Yükleme Dayanımı İndeksi

Nokta yükleme dayanımı indeksi kayaların dayanım sınıflandırmasının yapılmasında, anizotropilerinin belirlenmesinde, TESD değerinin dolaylı yoldan tahmin edilmesinde kullanılan bir mekanik özelliktir. Hem düzgün geometrik şekilde hem de düzgün geometrik şekle sahip olmayan numuneler kullanılarak arazide ve laboratuvarında kolay uygulanabilen bir test yöntemiyle belirlenir. Birçok araştırmacı TESD değeri ile nokta yükleme dayanımı indeksi arasında ki bağlantıyı ortaya koymak için farklı kökenli (magmatik, metamorfik ve tortul) kayalar üzerlerinde deneyler yaparak çeşitli eşitlikler önermiştir. Bu eşitliklerin çoğu benzer sonuçlar vermesine rağmen, bütün kayaç tipleri için nokta yükleme dayanım indeksi değeri ile TESD tahminine yönelik tek bir faktör yoktur [26, 27].

Dört farklı doygunluk derecesindeki kayaların nokta yükleme dayanımları ISRM 1985'de belirtilen şekilde, çapsal nokta yükleme dayanımı testi uygulanarak belirlenmiştir [24]. Deneyde boy/çap oranı 1'den büyük olan numuneler kullanılmıştır

Elde edilen yük değerleri kullanılarak düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (2)$$

Burada;

I_s : Nokta yük dayanımı indeksi (MPa)

P: Kırılma yükü (kN)

De: Eşdeğer karot çapı (mm)

Bulunan düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi değerinden aşağıdaki formül kullanılarak düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi değeri bulunmuştur.

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (3)$$

Burada; F: Boyut düzeltme faktörüdür.

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \quad (4)$$

2.2.1.3. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Tayini

TESD, kayaların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde, kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında kullanılan önemli bir mekanik özelliktir. Uluslararası Kaya Mekanik Birliği (ISRM) ve Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenebilmektedir [17]. TESD, belirli boyutlardaki kayacın, belirli doğrultuda etkiyen kuvvet karşısında kırılmaya karşı göstermiş oldukları direnç veya bir kayacın kırılmadan önce göstermiş olduğu maksimum dayanım şeklinde tanımlanabilir. TESD litolojik özellikler, ayrışma derecesi, izotropluk, süreksizliklerin durumu, çimentolanma ve kristallenme derecesi, su içeriği gibi kayaca ait içsel faktörlerden ve deney numunesinin boy/çap oranı, yükleme hızı basınç uygulanan yüzeylerin nitelikleri gibi faktörlerden etkilenmektedir [17, 28, 29].

Dört farklı doygunluk derecesindeki kayaların TESD'ları ISRM 1978'de önerilen yöntemle göre belirlenmiştir [23]. Deneyde 54 mm çapında (NX), boy/çap 2-2,5 olan karot numuneleri kullanılmıştır. Numune, presin ortasındaki yükseltme plakasının ortasına gelecek şekilde altında ve üstünde küresel yüzeyli iki çelik silindirik

FARKLI SUYA DOYGUNLUK DERECELERİNDE BAZI SEDİMANTER KAYAÇLARDA TEK EKSENLİ BASMA DAYANIMININ DİĞER FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERDEN KESTİRİMİ

platen yerleştirilerek konulmuş ve kırılıncaya kadar sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Deney numunesinin kırıldığı andaki yük, okunarak kaydedilmiştir.

Numunenin basınç dayanımı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$f_b = \frac{P_k}{A} \quad (5)$$

Burada;

f_b : Numunenin basınç dayanımı (MPa)

P_k : Kırılmaya sebep olan en büyük yük (kN)

A: Numunenin yük uygulanan yüzeyinin alanı (cm²)

2.2.1.4. Ultrasonik Dalga Hızı Tayini

Sismik teknikler kayaçların dinamik özelliklerinin tespit edilmesinde kullanılan ve tahribatsız, uygulaması kolay olduğu için tercih edilen test yöntemleridir. Laboratuvar ortamında kolaylıkla ölçülebilmesi nedeniyle, P-dalga hızı (V_p) kullanılarak kaya malzemelerinin dayanım, deformabilite ve fiziksel özelliklerinin tahmini son yıllarda kaya mekaniği alanında ilgi çekici araştırma konularından biri olmuştur. Kayacın sonik hız değerini etkileyen pek çok etmen bulunmaktadır. Bunlardan bazıları kayaç tipi, tane boyutu ve şekli, porozite, anizotropi, gözenek suyu, basınç ve ısıdır. Bunlara ek olarak zayıflık ve alterasyon zonları da sonik hızı önemli oranda etkiler. Kayaç içinde bulunan eklem takımlarının sayısının artması sonik hızı düşürürken TESD ve elastisite modülünün artması sonik hız değerinde artış meydana getirir [30, 31].

Dört farklı doygunluk derecesinde kayaç örneklerinin ultrasonik hız tayini ISRM 1978 tarafından önerilen yöntemle yapılmıştır [22]. Deneyde Pundit 6 ultrasonik dalga üretici cihazı ile NX (54 mm) çaplı silindirik numuneler kullanılmıştır. Numunelerin boyu ve çapı birbirine dik şekilde 0,1 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Numunelerin gönderici ile temasta olacak alt ve üst yüzeylerinin düzgün ve birbirine paralel olmasına dikkat edilmiştir. Sinyalin ilerleme mesafesi 0,025 mm duyarlılıkla ölçülmüştür. Deneyde düzgün silindirik numuneler kullanıldığı için sinyalin ilerleme mesafesi karotun boyuna (L) eşit olarak alınmıştır. Gönderici ve alıcı ile karot numunesinin yüzeyleri arasındaki teması artırmak amacıyla numunenin alt ve üst yüzeyine jel sürülmüştür. Bu ayarlamalardan sonra dakikada bir veya iki okuma yapılacak şekilde sinyal gönderilerek ses dalgasının (P) numuneden geçiş süresi (t_p) %1 duyarlılıkla ölçülmüştür. Sinyallerin ilerlemesinin başlangıç zamanı (t_0) sıfır olarak alınmıştır.

Yayıma hızları aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır:

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad (6)$$

$$T_p = T_p - T_0 \quad (7)$$

Burada;

L: Silindirik deney örneğinin boyu (sinyalin katettiği mesafe, mm),

V_p : P dalgasının yayılma hızı (m/s),

t_p : P dalgasının ölçülen yayılma zamanı (μ s),

T_p : P dalgasının etkin ilerleme hızı (μ s),

T_0 : Ölçülen sıfır (başlangıç) zamanı (μ s)

2.2.1.5. Dolaylı Yoldan Çekme Dayanımı Tayini (Brazilian) Deneyi

Kayaç numunelerinin tek eksenli birbirlerine zıt yönde etkiyen kuvvetlere karşı göstermiş oldukları direnç çekme dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Kayaçların çekme dayanımı, doğrudan ve dolaylı yoldan olmak üzere iki şekilde yapılır. Dolaylı yoldan çekme dayanımı tayini 1943 yılından beri kayaçlarda ve beton gibi diğer kırılabilir malzemelerde, hazırlanan dairesel disklerin çapsal basınç altındaki dayanımlarının belirlenmesi esasına göre uygulanmaktadır. Örnek hazırlaması ve deneyin yapılışı bakımından tek eksenli çekme dayanımına (doğrudan yöntem) göre daha basit ve az zaman alması nedeniyle, Brazilian (dolaylı yöntem) yöntemi daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [23].

Kayaç örneklerinin çekme dayanımları dört farklı doygunluk değerinde TS 7654'te tanımlanan yöntemle yapılmıştır [25]. Boy/çap oranı 0,5 olan 10 adet numune kullanılmıştır. Numuneler Brazilian test aparatının arasına, karot eksenine dik yönde ve Brazilian test aparatı da TESD presine yerleştirilmiştir. Numune 15-30

E. ÖZDEMİR, D.E. SARICI

saniye içerisinde kırılacak şekilde yükleme yapılmıştır. Deney sırasında uygulanan yükün artmasına bağlı olarak yatay çekme gerilmelerinin şiddeti de artış göstermiştir. Yatay çekme gerilmesi numunenin çekme dayanımını aştığı anda numune yükleme doğrultusunda kırılmaya maruz kalmıştır. Kırılma anındaki yük dijital göstergeden okunup kaydedilmiştir.

Numunenin dolaylı yoldan çekme dayanımı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_{\zeta} = \frac{0,636 \times P_k}{D \times t} \quad (8)$$

Burada;

σ_{ζ} : Numunenin dolaylı yoldan çekme dayanımı (MPa)

P_k : Numunenin yenildiği anda uygulanan yük (kN)

D: Numunenin çapı (cm)

t: Numunenin kalınlığı (cm)

2.2.1.6. Shore Skleroskop Sertlik Değeri Tayini

Kayaçların fiziksel özelliklerinin önemli bir göstergesi olan Shore sertlik değeri Shore Sclereskobu ile tayin edilmektedir. Shore Sclereskobu taşınabilir ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle hem laboratuvar hem de arazi koşullarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Shore sertliği kayacı oluşturan minerallerin tane boyutu, tane şekli, tanelerin birbiriyle bağlanma şekli gibi özelliklerden etkilenmektedir [31].

Dört farklı doymunluk derecesindeki kayaç örneklerinin Shore sertlik değerleri ISRM 1978'de tanımlanan yöntemle göre belirlenmiştir [20]. Deneyde C-2 tipi Shore sklereskobu kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce sertlik değeri belli olan standart test çubukları üzerinde 5 adet sertlik okuması yapılarak aletin kalibrasyonu kontrol edilmiştir. Deneyde NX (54 mm çaplı) karot numuneleri kullanılmıştır. Karot numunesi Shore sklereskobunun üzeri ölçeklendirilmiş cam tüpünün altına gelecek şekilde özel karot sabitleştirme yatağı üzerine düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Sıkılaştırılmış elmas uç belirli bir yükseklikten numune üzerine serbest bırakılmıştır. Kütle numunenin yüzeyine çarptıktan sonra geri sıçrama yüksekliği üzeri ölçülendirilmiş tüpten okunarak kaydedilmiştir. Ortalama 15 okumadan sonra elde edilen değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kaya mühendisliğinde regresyon analizi, kayaç parametreleri arasındaki ilişkinin varlığını belirlemek ve modeller oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında SPSS 20 paket programı kullanılarak basit ve çok değişkenli regresyon analizleri dört farklı doymunluk koşulu için ayrı ayrı yapılmıştır. Tablo 3'de değişkenlerin tanımlayıcı istatistik değerleri verilmektedir.

Tablo 3'te yer alan verilere göre mekanik özelliklerin doymunluğa bağlı değişimlerine bakıldığında doymunluk derecesindeki artışa bağlı olarak dayanım ve sertlik değerlerinin azalma, ultrasonik hız değerlerinin ise artma eğiliminde oldukları görülmektedir.

3.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Farklı Doymunluk Koşullarında Tahmini

Çalışmanın bu aşamasında basit regresyon analizleri kullanılarak herhangi bir doymunluk derecesindeki TESD'nin diğer doymunluk derecelerindeki TESD'dan kestirimi amacıyla dört farklı doymunluk durumu için görgül ilişkiler geliştirilmiştir. Kuru, %35, 70 ve 100 suya doymun koşullar için altı farklı model geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin geçerliliğini kontrol etmek için mutlak ortalama hata hesaplamaları, ortalama karesel hatanın karekökü (RMSE) hesaplamaları ve R^2 (belirleme katsayısı) kullanılmıştır.

3.1.1. Mutlak Ortalama Hata Hesabı

Oluşturulan modellerin performanslarını değerlendirmek için kullanılan mutlak ortalama hata değerleri aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir. Mutlak ortalama hata değerinin 0'a yakın olması geliştirilen modelin performansının iyi olduğunu ifade etmektedir.

$$MOH = \frac{1}{n} \times \left| \frac{X_d - X_m}{X_d} \right| \times 100 \quad (9)$$

FARKLI SUYA DOYGUNLUK DERECELERİNDE BAZI SEDİMANTER KAYAÇLARDA TEK EKSENLİ BASMA DAYANIMININ DİĞER FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERDEN KESTİRİMİ

Burada;

MOH: Mutlak ortalama hata

X_d: Deneyden elde edilen sonuçlar

X_m: Modelden elde edilen sonuçlar

n: Deney sayısı

Tablo 3. Değişkenlerin tanımlayıcı istatistik bilgileri

Değişkenler	Minimum	Maximum	Ortalama
TEBD _a (MPa)	42,96	91,47	69,83
TEBD _b (MPa)	36,33	87,83	61,57
TEBD _c (MPa)	31,10	83,57	55,41
TEBD _d (MPa)	20,73	71,93	46,34
NYD _a (MPa)	2,53	6,78	4,85
NYD _b (MPa)	2,30	5,68	4,20
NYD _c (MPa)	2,04	4,99	3,65
NYD _d (MPa)	1,87	4,84	3,40
BRA _a (MPa)	3,80	6,48	5,35
BRA _b (MPa)	3,03	6,26	4,37
BRA _c (MPa)	2,95	5,82	4,09
BRA _d (MPa)	2,55	5,29	3,81
SCH _a (MPa)	33,00	46,00	40,00
SCH _b (MPa)	30,00	43,00	37,53
SCH _c (MPa)	28,00	42,00	36,00
SCH _d (MPa)	25,00	41,00	33,87
SH _a (MPa)	49,00	62,00	56,53
SH _b (MPa)	43,00	60,00	53,07
SH _c (MPa)	37,00	52,00	45,13
SH _d (MPa)	30,00	45,00	39,40
V _p _a (m/s)	4061,00	6091,00	5089,73
V _p _b (m/s)	4425,00	6150,00	5257,66
V _p _c (m/s)	4977,00	6210,00	5486,60
V _p _d (m/s)	5228,00	6278,00	5652,33

TESD: Tek eksenli sıkışma dayanımı, NYD: Nokta yükleme dayanımı, BRA: Dolaylı çekme dayanımı, SCH: Schmidt sertliği, SH. Shore sertliği, V_p: Ultrasonik hız. a:kuru durumdaki numune, b %35 suya doygun numune, c %70 suya doygun numune, d %100 suya doygun numune

3.1.2. Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (RMSE)

Oluşturulan modellerin RMSE değerleri aşağıdaki formül ile belirlenmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (y_m - x_m)^2}{N}} \tag{10}$$

Burada;

RMSE: Ortalama Karesel Hatanın Karekökü

y_m: modelden elde edilen sonuçlar

x_m: deneyden elde edilen sonuçlar

N:Deney sayısı

Elde edilen basit regresyon modelleri ve modellerin performans indisleri Tablo 4’te verilmiştir. Modellerden elde edilen TESD değerleri ile deneylerden elde edilen TESD değerlerinin karşılaştırması Şekil 1’de verilmiştir.

Basit regresyon analizleriyle belirlenen ilişkilerden tahmin edilen TESD değerleri deneysel değerlerle genel olarak uyumlu olmakla birlikte yüksek doygunluk derecelerinde (%70 ve 100) tek eksenli sıkışma dayanımının

E. ÖZDEMİR, D.E. SARICI

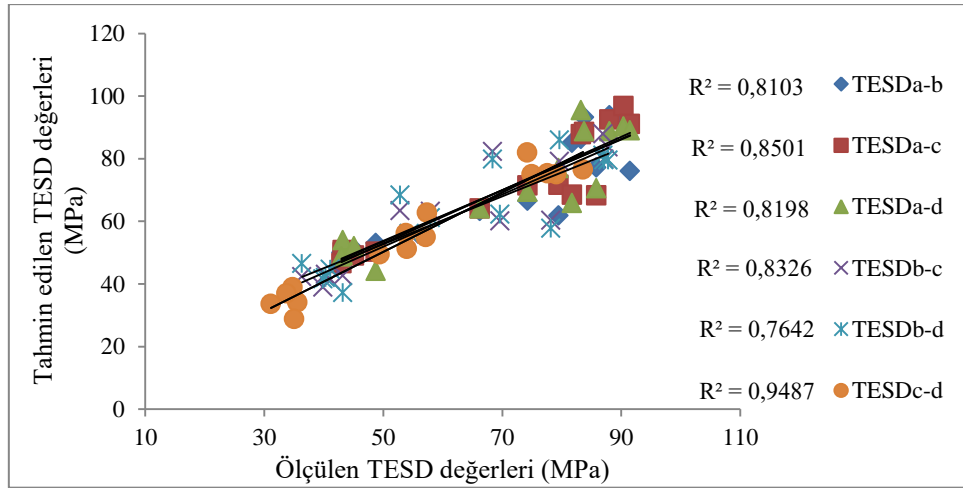
birbirinden kestirimi için oluşturulan modellerin daha iyi performans gösterdiği R^2 değerinden (%95), MOH ve RMSE değerlerinden anlaşılmaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında farklı doygunluk derecelerinde elde edilen TESD diğer mekanik parametrelerden (I_{s50} , V_p , Barazilian çekme dayanımı, Schmidt sertliği, Shore sertliği) çok değişkenli regresyon analizleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Tablo 5’te çoklu regresyon analizleri neticesinde elde edilen katsayılar verilmektedir.

Tablo 4. Oluşturulan basit regresyon modelleri ve modellerin performans indisleri

Model	Belirleme katsayısı	MOH	RMSE
$TESD_a = 13,568 + 0,914TESD_b$	($R^2=0,81$)	10,39	8,19
$TESD_a = 16,765 + 0,958TESD_c$	($R^2=0,85$)	8,75	7,28
$TESD_a = 23,437 + 1,001TESD_d$	($R^2=0,81$)	10,11	7,99
$TESD_b = 9,841 + 0,934TESD_c$	($R^2=0,83$)	8,76	7,58
$TESD_b = 17,448 + 0,952TESD_d$	($R^2=0,76$)	12,22	9,00
$TESD_c = 7,358 + 1,037TESD_d$	($R^2=0,94$)	6,76	4,10

a: Kuru koşullardaki değerler, b: %35 doygun koşullardaki değerler, c: %70 doygun koşullardaki değerler, d: %100 doygun koşullardaki değerler



Şekil 1. Farklı doygunluk derecelerinde deneylerden elde edilen ve modellerden tahmin edilen TESD değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 5. Çok değişkenli regresyon analizlerinden elde edilen katsayılar

Değişken	Kuru Koşullar	%35 Doygunluk Derecesi	%70 Doygunluk Derecesi	%100 Doygunluk Derecesi
Nokta yük dayanım	-4,785	-4,998	-2,465	-13,429
Schmidt sertliği	3,760	-3,329	3,846	-0,062
Shore sertliği	-2,465	3,691	-2,153	1,179
Ultrasonik hız	0,004	0,021	0	0,008
Brazilian dayanımı	18,048	5,365	9,149	20,928
constant	-37,307	-120,193	-16,032	-78,528
Ayarlanmış R^2	9,15	0,809	0,959	0,91
Standat sapma	5,68	8,37	3,81	5,25
F-değerleri	31,136	12,889	65,707	29,707
MOH	5,79 %	8,66%	6,05 %	9,40 %

Çizelgede verilen katsayılar kullanılarak elde edilen modeller aşağıdaki gibidir.

FARKLI SUYA DOYGUNLUK DERECELERİNDE BAZI SEDİMANTER KAYAÇLARDA TEK EKSENLİ BASMA DAYANIMININ DİĞER FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERDEN KESTİRİMİ

$$TEBD_a = -37,307 - 4,785I_{s(50)a} + 18,048BRA_a + 3,760SCH_a - 2,465SH_a + 0,004Vp_a \quad (11)$$

$$TESD_b = -120,193 - 4,998I_{s(50)b} + 5,365BRA_b - 3,329SCH_b + 3,691SH_b + 0,021Vp_b \quad (12)$$

$$TESD_c = -16,032 - 2,465I_{s(50)c} + 9,149BRA_c + 3,846SCH_c + 2,153SH_c \quad (13)$$

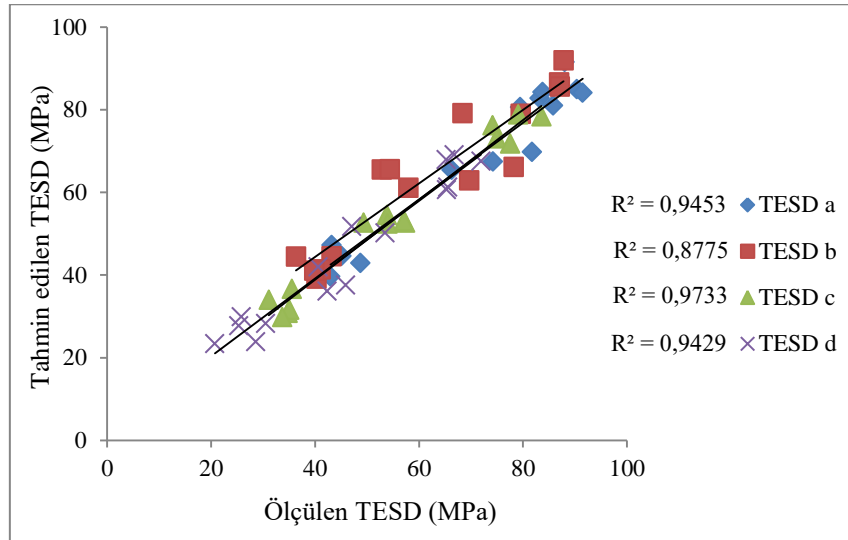
$$TESD_d = -78,528 - 13,429I_{s(50)d} + 20,928BRA_d - 0,062SCH_d + 1,179SH_d + 0,008Vp_d \quad (14)$$

Geliştirilen modellerin geçerliliğini kontrol etmek için mutlak ortalama hata ve RMSE hesaplamaları yapılmıştır. Oluşturulan modellerin mutlak ortalama hata ve RMSE değerleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Oluşturulan çoklu regresyon modellerinin performans değerleri

Tahmin Edilen Parametre	MOH	(R ²)	RMSE
TEBD _a	5,79	0,94	4,95
TEBD _b	13,65	0,87	6,78
TEBD _c	6,05	0,97	3,41
TEBD _d	9,40	0,94	4,25

Modellerden elde edilen TESD değerleri ile deneylerden elde edilen TESD değerlerinin karşılaştırması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı doyumluk derecelerinde deneylerden elde edilen ve modellerden tahmin edilen TESD değerlerinin karşılaştırılması

Çok değişkenli regresyon analizleri neticesinde farklı doyumluk derecelerinde TESD’nin diğer mekanik özelliklerden belirlenmesi amacıyla geliştirilen matematiksel modellerden elde edilen değerler ile deneylerden elde edilen değerler grafiğe geçirildiğinde birbirleriyle uyum içinde oldukları anlaşılmaktadır. Özellikle %70 ve %100 doyumluk koşullarında geliştirilen modellerin performans indislerine bakıldığında bu koşullarda TESD’nin diğer mekanik testlerden kestiriminin daha güvenilir olduğu ve modellerin daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

4. SONUÇLAR

Su içeriğinin tek eksenli basma dayanımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmada kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, traverten örnekleri kuru, %35, 70 ve 100 doyumluk koşullarında iken çeşitli

E. ÖZDEMİR, D.E. SARICI

mekanik testlere (TESD, nokta yükleme dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, ultrasonik hız tayini, Schmit ve Shore sertliği) tabii tutulmuştur. TESD’ni farklı doyumluk koşullarında birbirinden elde edebilmek için basit regresyon analizleri yapılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında farklı doyumluk derecelerinde elde edilen nokta yükleme dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, ultrasonik hız tayini, Schmidt ve Shore sertliği değerlerinden TESD’ni tahmin edebilmek için çok değişkenli regresyon analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonunda elde edilen modellerin geçerliliğini belirlemek için mutlak ortalama hata ve Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (RMSE) hesaplanmış, modellerden elde edilen değerler ile deneylerden elde edilen değerler karşılaştırılarak modellerin geçerliliği incelenmiştir.

Yapılan basit ve çoklu regresyon analizlerinin performansları değerlendirildiğinde, suya doyumluk koşullarının yüksek olduğu (%70 ve 100) durumlarda TESD tahmini için geliştirilen basit ve çoklu regresyon eşitliklerinin yüksek belirleme katsayısı ($R^2 > 95$) ve daha düşük MOH ve RMSE verdiği ve başarılı olduğu görülmüştür.

Çalışmanın sonucunda önerilen matematiksel eşitlikler ile kuru durumda iken elde edilen TESD değeri kullanılarak doğal, doyum veya %70 gibi tam doyum koşullara yakın değerlerdeki TESD değerlerini deney yapmadan tahmin edilebilir ve böylelikle örnek hazırlaması zor ve zaman alıcı olan TESD’ni diğer mekanik testlerden belirleme imkânı doğmaktadır. Böylece kayaçların doğada maruz kaldıkları çevresel koşullara bağlı olarak davranışlarında meydana gelen değişiklikler hakkında fikir sahibi olmak mümkündür. Özellikle baraj gövdelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılan ve su altında kalan kayaçlarda TESD’nin değişebilirliği hakkında fikir sahibi olmak için yararlı olacaktır. Sadece sedimanter kayaçlar kullanılarak yapılan bu çalışmada elde edilen eşitliklerin tüm kayaç birimleri için geçerliliği olmamakla birlikte diğer kayaç türleri ile yapılacak çalışmalar ile geçerliliği artırılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmayı 2013/162 nolu proje ile maddi açıdan destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- [1] ASTM D 4543, “Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances”, Philadelphia, 2001.
- [2] YILMAZ, I., “Influence of Water Content on the Strength and Deformability of Gypsum”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 47, 342-347, 2010.
- [3] HARRISON, H.P., HUDSON, J.A., Engineering Rock Mechanics Part2: Illustrative Worked Examples, Pergamon Press, London, UK, 2000.
- [4] GOEL, R., SINGH, B., Engineering Rock Mass Classification Tunneling Foundations and Landslides, Butterworth-Heinemann, London, UK, 2011.
- [5] MISHRA, D., BASU, A., “Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials by Index Test Using Regression Analysis and Fuzzy Inference System”, Engineering Geology, 160, 54-68, 2013.
- [6] KAHRAMAN, S., “Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 38, 981-994, 2001.
- [7] BAREFIELD, E., SHAKOOR, A., “The Effect of Degree of Saturation on the Unconfined Compressive Strength of Selected Sandstones”, 10th IAEG International Congress, 606-612, Nottingham, UK, 2006.
- [8] AJALLOIAN, R.M., KARIMZADEH, L., “Geotechnical Rock Mass Evaluation of Givi Dam Site (Case Study, Ardabil Iran)”, 10th ISRM Congress, 7-10, Sandton, South Africa, 2003.
- [9] VASARHELYI, B., “Some Observations Regarding the Strength and Deformability of Sandstones in Case of Dry and Saturated Conditions”, Bulletin Engineering Geological Environment, 62, 245-249, 2003.
- [10] KILIÇ, A., TEYMEN, A., “Determination of Mechanical Properties Rocks Using Simple Methods”, Bulletin Engineering Geological Environment, 67, 237-244, 2003.
- [11] ERSOY, H., KANİK, D., “Multicriteria Decision-Making Analysis Based Methodology for Predicting Carbonate Rocks Uniaxial Compressive Strength”, Earth Science Rescue Journal, 16(1), 65-74, 2012.
- [12] MISHRA, D.A., BASU, A., “Use of the Block Punch Test to Predict to Compressive and Tensile Strengths of Rocks”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 51, 119-127, 2012.
- [13] SÖNMEZ, H., GÖKÇEÖĞLU, C., MEDLEY, E.W., TUNCAI, E., NEFESİLİOĞLU, H.A., “Estimating the Uniaxial Compressive Strength of a Volcanic Bedrock”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(4), 554-561, 2006.

FARKLI SUYA DOYGUNLUK DERECELERİNDE BAZI SEDİMANTER KAYAÇLARDA TEK EKSENLİ BASMA DAYANIMININ DİĞER FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERDEN KESTİRİMİ

- [14] TSIAMBAOS, G., SABATAKAKIS, N., “Consideration on Strength of Intact Sedimentary Rocks”, Engineering Geology, 72, 261-273, 2004.
- [15] FENER, M., KAHRAMAN, S., BİLGİL, A., GÜNAYDIN, O.A., “Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 38, 329-343, 2005.
- [16] ANSARI, M.K., AHMAD, M., SINGH. R., SINGH. T.N., “Correlation between Schmidt Hardness and Coefficient Restitution of Rocks”, Journal of African Earth Science, 104, 1-5, 2015.
- [17] GOKCEOGLU, C., “A Fuzzy Triangular Chart to Predict the Uniaxial Compressive Strength of Ankara Agglomerates from Their Petrographic Composition”, Engineering Geology, 66, 39-51, 2002.
- [18] TSE., TS 699 Tabii Yapı Taşları-Muayene ve Deney Metodları, Ankara, 1987.
- [19] TSE., TS 6809 Mohs Sertlik Cetveline Göre Sertlik Tayini, Ankara, 1989.
- [20] ISRM., “Suggested Methods for Determination of the Shore Sclerescope Hardness”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract, 15(3), 102-103, 1978.
- [21] ISRM., “Suggested Methods for Determination of the Schmidt Rebound Hardness”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract, 15:3, 101-102, 1978.
- [22] ISRM., “Suggested Methods For Determining Sound Velocity”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract, 15, 53-58, 1978.
- [23] ISRM., “Suggested Methods For Determining The Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract, 16, 135-140, 1978.
- [24] ISRM., “Suggested Methods for Determining Point Load Strength”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract, 22, 51-60, 1985.
- [25] TSE., TS 7654, Kayaçların Çekme Mukavemetinin Dolaylı (İndirekt) Metotla Tayini, 1989.
- [26] KARAMAN, K., KESİMAL, A., “Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmininde Nokta Yüklü Deney Yöntemleri ve Porozitenin Değerlendirilmesi”, Madencilik, 51(4), 3-14, 2012.
- [27] AKRAM, M., BAKAR, M.Z.A., “Correlation Between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Index for Salt-Range Rock”, Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences, 1, 1-8, 2007.
- [28] KARAKUŞ, M., TÜTMEZ, B., “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, 39(1), 45-57, 2006.
- [29] TÜTMEZ, B., KAHRAMAN, S., GÜNAYDIN, O., “Multifactorial Fuzzy Approach to the Sawability Classification of Building Stones”, Construction and Building Materials, 21, 1672-1679, 2007.
- [30] KARAKUL, H., ULUSAY, R., “Kayaların Dayanım Özelliklerinin Farklı Doygunluk Koşullarında P-dalga Hızından Kestirimi ve P-Dalga Hızının Fiziksel Özelliklere Olan Duyarlılığı”, Yerbilimleri, 33 (3), 239-268, 2012.
- [31] ALTINDAĞ, R., “Effects of Specimen Volume and Temperature on Measurement of Shore Hardness”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 35(2), 109-113, 2002.