

CaCO₃ İÇEREN KAYAÇLARIN SONDAJ İLERLEME HIZININ KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN TAHMİN EDİLMESİ

Ahmet TEYMEN¹ (ORCID: 0000-0001-7952-1025)*

¹Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

*Geliş / Received: 14.03.2019
Kabul / Accepted: 03.07.2019*

ÖZ

Delinebilirlik, matkap ucunun formasyon veya kaya içerisindeki ilerleme hızı olarak tarif edilir. Madencilik tüm aşamalarında, baraj, yol yapımı, tünel ve kanalizasyon gibi mühendislik çalışmalarında patlatma deliklerinin olabildiğince ekonomik ve kısa zamanda delinebilmesi işletme maliyeti açısından oldukça önemlidir. Ekonomik ve hızlı sondaj, kayacın mineralojisi, mekanik özellikleri ve kullanılan matkap tipi ile doğrudan ilişkilidir. Kayaç özellikleri, dünyanın her yerinde standart olarak uygulanabilir olduklarından delinebilirlik ölçütü olarak kullanılmaktadır. Bu makale, CaCO₃ esaslı kayalarda sondaj ilerleme hızının çeşitli kaya ve agrega testleri ile tahmin edilmesi için gerçekleştirilmiş deneysel bir çalışmanın sonuçlarını içermektedir. Çalışmanın amacı, delinebilirliğe etki eden kayaç parametreleri ile laboratuvar karotlu sondaj çalışmalarından elde edilen veriler arasında regresyon analizi ile delme hızı tahmin modellerinin geliştirilmesidir. Yapılan basit ve çoklu regresyon modelleri ile sondaj ilerleme hızının tahmininde yüksek korelasyon değerlerine sahip eşitlikler elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sondaj ilerleme hızı, mermer, kireçtaşı, kaya özellikleri, agrega

ESTIMATION OF RATE OF PENETRATION OF ROCKS CONTAINING CaCO₃ FROM ROCK PROPERTIES

ABSTRACT

Drillability is defined as penetration rate of a drill bit in a rock or formation. An economical completion of drilling operations in a short time in all stages of mining, in engineering works such as dam, road construction, tunnels and sewage, blasting holes are very important in terms of operating costs. Economical and rapid drilling, mineralogy of the rock, mechanical properties and type of drilling used are directly related. The rock properties are used as a criterion of drillability as they are applicable as standard throughout the world. This paper presents the results of an experimental study carried out to estimate the rate of penetration in CaCO₃ based rocks by various rock and aggregate tests. The aim of the study is to develop rate of penetration models with the regression analyses by the combination of rock parameters affecting drillability and the data obtained from laboratory core drilling tests. With simple and multiple regression studies, equations a high correlation coefficient are obtained in predicting the drilling rate.

Keywords: Rate of penetration, marble, limestone, rock properties, aggregate

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel. : +90 0505 570 14 41; e-mail: ateymen@ohu.edu.tr

A. TEYMEN

1. GİRİŞ

Yeraltı ve açık ocak işletmelerinde hazırlık ve üretim faaliyetlerinde, baraj, tünel, yol yapımı ve kanalizasyon gibi inşaat çalışmalarında, su, petrol ya da doğal gaz gibi doğal kaynak rezervlerinin belirlenmesinde ve çıkarılmasında, enjeksiyon işlemleri ile zemin araştırmalarında sıklıkla delme-patlatma yöntemi kullanılmaktadır. Patlatma deliklerinin olabildiğince hızlı ve ekonomik olarak delinmesi, bu çalışmaların verimi ve maliyeti açısından oldukça önem arz etmektedir. Hızlı ve ekonomik sondaj; delinecek kayacın mineralojik yapısına, mekanik özelliklerine, delicinin tasarım ve operasyon parametrelerine bağlıdır [1]. Hızlı sondaj düşüncesi ise delinebilirlik kavramının önemini ortaya çıkarmaktadır. Delinebilirlik, matkabın formasyondaki ilerleme hızı (m/dk, cm/dk veya mm/dk) olarak ya da delici ucun delme hızı, matkap ömrü, sondaj işinde harcanan özgül enerji gibi birçok şekilde tanımlanabilir. Genel olarak ise delici ucun kayacın dayanım ve sertliğini yenmesi sonucu sağlanan ilerleme olarak tanımlanmaktadır [2, 3]. Kayaç delinebilirliği, kazı ve ilerlemenin tanımlanmasında kullanılan bir parametre olup proje ekonomisini etkileyen önemli faktörlerden bir tanesidir.

Kayaç delinebilirliğini etkileyen faktörler kontrol edilebilir ve kontrol edilemez olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. Kontrol edilebilir faktörler; delici uç (matkap) tipi ve çapı, darbe miktarı, dönme hızı, baskı kuvveti, tork ve dolaşım sıvısı gibi makineye bağlı olan değişkenlerden oluşmaktadır. Kontrol edilemez faktörler ise genellikle süreksizlik, tabakalanma, tane boyutu, matris yapısı, gözeneklilik, çimentolanma derecesi ve aşındırıcı mineral oranı gibi kayaç özelliklerine bağlı parametrelerdir [4-6].

Kontrol edilemeyen parametrelerin (jeolojik özelliklerin) belirlenmesi, sondaj çalışmasında kullanılacak sondaj yöntemi, matkap türü, dönme hızı, matkaba uygulanacak yük miktarı, sondaj dizisi niteliği, pompa türü, dolaşım sıvısı/hava hızı ve hacmi gibi kontrol edilebilir parametrelerin en iyi şekilde seçilebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca elde edilen veriler sondaj çalışma sürelerinin planlanmasında ve maliyet tahminlerinde de kullanılabilir [7].

Sondaj ilerleme hızını arttırmak için farklı sondaj yöntemleri ve makinaları farklı kayaç tipleri için kullanılmaktadır. Öncelikle delici makinanın seçimi için, kayacın orijininin (mağmatik, metamorfik, tortul), sertliğinin, aşındırıcılığının, fiziksel özelliklerinin ve mekanik mukavemetlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yüksek sertlikte ve aşındırıcı özellikteki kayaçlar için ağır darbeli deliciler, orta dayanımlı kayaçlar için orta ağırlıktaki darbeli veya ağır döner deliciler, aşındırıcı ve gevrek kayaçlar için hafif darbeli deliciler veya döner delici makinalar kullanılmaktadır [8].

Kayaçların dayanım özellikleri, dünyanın her yerinde standart olarak elde edilebilir olduklarından uzun zamandır delinebilirlik ölçütü olarak kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan araştırmalar dayanım özelliklerinin tek başına kullanılmasının yanıltıcı olacağını göstermiştir [9, 10]. Delinen kayaçların özellikleri delinebilirliği ve ilerlemeyi en fazla etkileyen parametreler olup, özellikle dikkate alınmaları gerekmektedir. Delinebilirlik ve ilerleme terimleri sondaj sisteminin ilerleme hızına kayaçların fiziksel, mekanik ve dokusal parametrelerinin eşzamanlı etkisini tarif etmek için kullanılmaktadır [11].

Pek çok araştırmacı; mekanik, fiziksel ve kütleli kayaç özelliklerini göz önünde bulundurarak, delinebilirlik performansını incelemiştir. Araştırmacılar, yapmış oldukları çalışmalarda kayacın delinebilirliğinin belirlenmesinde tek eksenli basınç dayanımının daha etkin olduğunu ileri sürmüşler, ancak tek eksenli çekme dayanımı, porozite ve petrografik özelliklerinin de önemli rol oynadığını da belirtmişlerdir [2, 12-21].

Delinebilirliğin belirlenmesinde bahsedilen deneylerin haricinde arazide ve laboratuvarında yapılan; Schmidt yüzey sertlik deneyi, nokta yükü dayanımı indeks deneyi, Shore Schleroscope sertlik deneyi, delme oranı indeksi (DRI), konik batırma deneyi, kayaç dayanım katsayısı deneyleri de Delinebilirlik ile ilgili çalışmalarda sık bir şekilde kullanılmaktadır [2, 4, 13, 19, 22-27]. Delinebilirlik üzerine yapılan çalışmalar için günümüzde pek çok yöntem geliştirilmiş olmakla birlikte, en iyi yöntemin doğrudan delinebilirlik deneylerinin yapılması yönünde bir yaklaşım ön plana çıkmaktadır [28-30].

Bilindiği üzere, sondajlarda inilecek derinlik arttıkça, çalışma koşulları güçleşmekte ve buna bağlı olarak da ilerleme hızı azalmaktadır. İlerleme hızını etkileyen faktörlerin araştırılması; istenilen derinliğe maksimum ilerleme hızı ile ulaşılabilmesi sondajın birim maliyetini ve başarı ile sonuçlandırılmasını doğrudan etkilemesi açısından büyük bir önem arz etmektedir [31]. Her bir kayaç parametresinin niteliksel ve niceliksel etkisini bilmek çok önemlidir. İlk araştırmacılar kayaç parametrelerini doğrudan delinebilirlik ölçüsü olarak kullanmışlardır. Kayaçların sertlik ve dayanıklılığına bağlı delme hızını ifade eden bir teori öneren Paona ve Bruce, sondaj ilerleme hızını doğrudan kayaç dayanımı ile ilişkilendiren araştırmalar yapmışlardır [32].

Tek bir kayaç parametresinin kayaç örneği üzerinde etkisini test etmek matkap seçiminde ve kullanımında hatalara neden olabileceğini göz önüne alınarak son yıllarda çeşitli araştırmacılar ağırlıklar ve oranlar ile her bir parametrenin diğer parametre ile olan ilişkisini hesaba katan kayaç sınıflandırma sistemlerine yoğunlaşmaktadır. Bütün parametrelerin dikkate alınması sondaj verimliliğinin iyileştirilmesini sağlayacak, işletme maliyetini ve uç aşınmasını düşürecektir [16, 26]. Bu bağlamda yapılan önemli fiziko-mekanik kayaç özelliklerinin ilerleme

CaCO₃ İÇEREN KAYAÇLARIN SONDAJ İLERLEME HIZININ KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN TAHMİN EDİLMESİ

hızına etkileri belirlenmiştir [11]. Kayaçların mekanik özellikleri ve jeolojik koşulları içeren formasyon özelliklerinin yanında matkap tipi, tasarımı, baskı kuvveti, tork, dönme hızı, malzeme kalitesi gibi matkap özellikleri ile işletme parametreleri de sondaj işlemini ve matkapların aşınmasını etkiler [33-36].

Bu çalışmanın amacı birçok mühendislik çalışmasının ekonomisini doğrudan etkileyen delme işleminin en önemli parametresi olan sondaj ilerleme hızının (ROP-rate of penetration) kayaç özellikleri yardımı ile pratik ve anlamlı şekilde tahmin edilmesine yönelik eşitlikler ortaya koymaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Karotlu sondaj ekipmanı

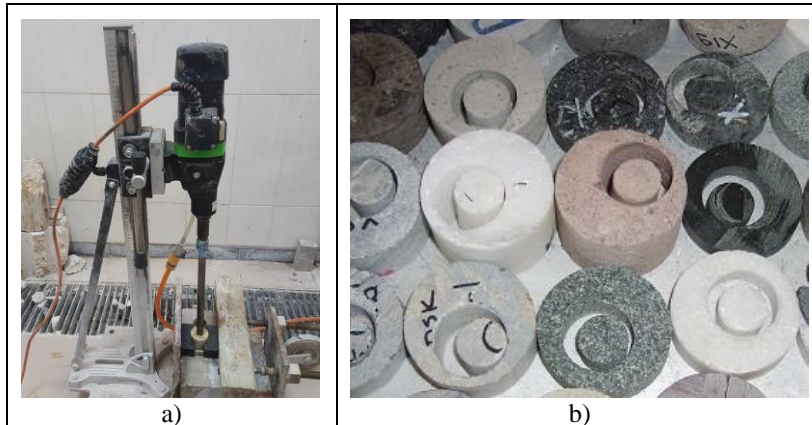
Bu çalışmada, 25-162 mm arasında standart delik çaplarında karot alma kapasitesine sahip, yumuşak kalkışlı, üç farklı devirde çalışabilen (L 1000 (boşta) / 650 (yükli) rpm, M 2200 (boşta) / 1400 (yükli) rpm, H 4300 (boşta) / 3000 (yükli) rpm), 2500 watt güce, 230 volt voltaja ve 630 mm strok'a (inme yüksekliği) sahip, net ağırlığı 6.6 kg olan Eibenstock EBM 162/3 marka stantlı temel karot alma makinesi kullanılmıştır (Şekil 1a).

2.2. Laboratuvar deneyleri

Karbonat kökenli kayaçlarda sondaj ilerleme hızının (ROP) tahmin edilmesi için gerçekleştirilen bu çalışmada toplam 37 adet kayaç test edilmiştir. ROP'un diğer mühendislik özellikleri ile olan ilişkisini araştırmak için ilgili kayaçların fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kaya örnekleri genel olarak ISRM [37] tarafından önerilen kurallara uygun olarak hazırlanmış ve test edilmiştir. Bu kapsamda ilerleme hızı (ROP), Böhme aşınma dayanımı (BSA), Shore Schleroscope sertlik (SSH), Brinell sertlik (HB), nokta yük dayanımı ($I_s(50)$), kayaç dayanım katsayısı (CRS), kayaç darbe sertlik numarası (RIHN), disk makaslama dayanımı (BPI), birim hacim ağırlık (UW) ve darbe dayanım indeksi (ISI) testleri gerçekleştirilmiştir. Ortalama deney sonuçlarının tamamı Tablo 1'de verilmiştir.

2.2.1 Sondaj ilerleme hızı (ROP)

Delinebilirliğin tayininde, farklı formasyonlar için ölçülen değerler karşılaştırılabilir olmalı, aynı ekipman ve eşit şartlar altında ilerleme hızı ölçümü yapılmalıdır. Kayaçlarda ilerleme hızının tespiti amacıyla Şekil 1a'da gösterilen deney düzeneği kurulmuştur. Laboratuvar tipi karot alma makinası ve 22mm çapa sahip elmas uçlu bir karotiyer yardımıyla gerçekleştirilen testler için boy/çap oranı yaklaşık 1 olan 54 mm çaplı karot numuneleri hazırlanmıştır. Her bir kayaç için 3 numune hazırlanmıştır. Kayaçların tamamının standart bir şekilde test edilmesi amaçlanmıştır. Karot alma makinasının zeminine 10cm x 30cm x 50cm ebatlarında düzgün yüzeylere sahip bir prizmatik bir beton yerleştirilmiştir. 54mm çapa sahip karotların sabitlenmesi ve iyice kavranması için Brazilian dolaylı çekme test aparatının çeneleri kullanılmıştır.



Şekil 1. a) Karotlu sondaj mekanizması b) 22 mm çaplı elmas uçlu karotiyerle sondaj işlemi uygulanmış karot örnekleri.

A. TEYMEN

Test parametrelerinin tamamı sabit tutulmuştur. Tüm karotlu sondaj testlerinde matkap ucunun dönme hızı, karot alma makinasının en düşük hızı olan 650 rpm (devir/dk) olarak belirlenmiştir. Matkap çalıştırdıktan sonra herhangi bir baskı kuvveti uygulamadan matkabın kendi ağırlığı ile kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm penetrasyon testlerinde, su debisi 2.4 lt /dk, baskı kuvveti 137 N olarak uygulanmıştır. Kronometre makinanın çalışmasıyla eş zamanlı olarak başlatılmış ve karot kesme işlemi tamamlandığı anda durdurulmuştur. Kumpas yardımı ile önceden belirlenmiş olan uzunlukların kesme sürelerine bölünmesiyle kayaçların sondaj ilerleme hızları hesaplanmıştır. Sondaj ilerleme hızları Eşitlik 1'e göre hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

$$ROP=L/DS \quad (1)$$

Burada; ROP sondaj ilerleme hızı (mm/dk), L karot boyu (mm) ve DS sondaj süresi (dk)'dir.

2.2.2 Nokta Yük Dayanım İndeksi (Is₅₀)

Nokta yükleme deneyi aksel ve çapsal olarak iki doğrultuda da yapılabilmektedir. Nokta yük dayanımı için 42 mm çapında ve yaklaşık 50 mm boyunda karot numuneleri hazırlanmıştır. Deneyler, standart nokta yük dayanım indeksi deney cihazında ve çapsal yükleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi, I_{s(50)}, şeklinde verilmiştir.

$$I_{s(50)}=P/D_e^2 \quad (2)$$

Burada; I_{s(50)} nokta yük dayanımı (MPa), D_e eşdeğer karot çapı (mm) ve P uygulanan yük (kN)'tür.

2.2.3 Böhme aşınma dayanımı (BSA)

Bu deney, yapı ve kaplama taşı olarak kullanılan kayaçların yüzey aşınma dayanımlarının belirlenmesi amacıyla TS 699'da [38] tanımı yapılan bir deneydir. Blok örneklerinden standartta belirtilen ebatlara uygun olarak yaklaşık 71 mm kenar uzunluğuna sahip küp numuneler hazırlanmıştır. Etüvde 105 °C'de kurutulan deney numunelerinin tüm boyutları kumpas yardımıyla hassas bir şekilde ölçülerek kaydedilmiştir. Deneye hazır hale gelen deney numunesi aşındırma cihazının numune tutucu çerçevesi içine yerleştirilmiştir. Her bir devir için yaklaşık 20 gr aşındırma tozu kullanılmıştır. Çelik manivela aracılığı ile numune üzerine 30 kg'lık yük uygulanarak, sürtünme şeridi üzerinde 0.6 kg/cm²'lik bir basınç oluşturulmuştur. 22 devir döndükten sonra otomatik olarak duran diskin üzeri temizlemiştir. Her örnek için 20 aşınma periyodu, yani 440 devir uygulanmıştır. Deney bitiminde numuneler sert bir fırça ile temizlenerek tüm boyutları tekrar ölçülmüş ve meydana gelen aşınma miktarları hacimsel olarak tespit edilmiştir.

2.2.4 Disk makaslama dayanımı (BPI)

Deney, disk makaslama deney aparatı ve nokta yük dayanım aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 54 mm çapa ve 10 mm kalınlığa sahip karot numuneleri iki noktadan makaslanacak şekilde yüklenmiştir. BPI değerleri okunan kırılma yükleri ve çap değerleri kullanılarak Eşitlik 3'e göre hesaplanmıştır.

$$BPI=3499.D^{-1.3926}.t^{-1.1275}.P \quad (3)$$

Burada; BPI disk makaslama dayanımı (MPa), D disk numune çapı (mm), t disk numune kalınlığı (mm), P uygulanan yük (kN)'dur.

2.2.5 Shore Schleroscope Sertliği (SSH)

SSH, herhangi bir kayacın yüzey sertliğini elastiklik açısından ölçen bir yöntemidir. Bu test, mineraloji, sedimentasyon ve elastikiyetten etkilenen matkaplara ilişkin ampirik denklemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [39, 40]. Bu çalışmada kullanılan kayaçların SSH' sini ölçmek için C-2 modeli tahribatsız ölçüm cihazı kullanılmıştır. Test, kızak içerisine yerleştirilmiş 14 cm² yüzey alanına ve 2 cm kalınlığa sahip kaya örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Karotların üst yüzeyleri zımparalanmış ve elmas uç kayaç örneğinin yüzeyine 30 cm yükseklikten dikey yönde düşürülmüştür. Ölçümler, en az 5 mm'lik aralıklarla 20 kez tekrarlanmış ve en yüksek on ölçüm sonucunun ortalaması o kayacın SSH değeri olarak belirlenmiştir.

CaCO₃ İÇEREN KAYAÇLARIN SONDAJ İLERLEME HIZININ KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN TAHMİN EDİLMESİ**2.2.6 Brinell Sertlik Deneyi (HB)**

HB, metaller için yaygın olarak kullanılan bir test yöntemidir, ancak kırılğan doğası nedeniyle kayaçlar için genellikle tercih edilmez. Bu, batmaya karşı kaya direncinin bir ölçüsüdür ve uygulanan kuvvet ile doğrudan ilişkilidir. Kalınlığı 30mm ve çapı 42mm olan karotların uçları kesilip birbirine paralel olarak düzleştirilmiştir. HB testleri, kayaç örneği ile temas halinde olan 10 mm çapında (D) küresel bir çelik bilye ile gerçekleştirilmiştir. Kaya yüzeylerine 50 kg'dan 3000 kg'a kadar olan yükler standart süreyle (30 saniye) uygulanmış ve batma alanının çapı (d) ölçülmüştür. Sertlik değeri, uygulanan yükün batma yüzey alanına oranından tespit edilmiş ve kg / mm² birimi ile ifade edilmiştir. HB değerleri, üç deneyin ortalaması kullanılarak Eşitlik 4'e göre hesaplanmıştır.

$$HB = \frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right) \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

Burada; HB Brinell sertliği (kg/mm²), D çelik bilye çapı (mm), d batma izinin çapı (mm), P uygulanan yük (kg)'tür.

2.2.7 Birim hacim ağırlık (UW)

Küp numuneler 105°C'de 24 saat kurutulup, desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve kuru ağırlıkları tespit edilmiştir. Örnekler 24 saat suda bekletilerek doygun ağırlıkları da belirlenmiştir. Kumpas yardımıyla ebatları 0.1 mm hassasiyetle ölçülen numunelerinin hesaplanan ortalama kuru birim hacim ağırlık değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

$$UW = W/V \quad (5)$$

Burada; UW birim hacim ağırlık (gr/cm³), W numune ağırlığı (gr) ve V numune hacmi (cm³)'dir.

2.2.8 Darbe dayanım indeksi (ISI)

İlk kez Protodyakonov tarafından geliştirilen bu test Evans ve Pomeroy [41] tarafından kömür sınıflaması amacıyla kullanılmıştır. Deney daha sonra birçok araştırmacı tarafından modifiye edilmiştir. Deney için etüv kurusu durumda 100 gr (-9.525 +3.175mm) numune kullanılmaktadır. Deney, 42.86 mm çapa sahip test aparatının içine yerleştirilen agrega üzerine 1.8 kg'lık ağırlığın 30.48 cm yükseklikten 20 defa düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ezilmiş durumdaki agrega 3.175 mm elekten elenmiş ve elek üstü tartımı ISI değeri olarak kabul edilmiştir.

2.2.9 Kayaç Darbe Sertlik Numarası (RIHN)

Bu deney Protodyakonov darbe testinin başka bir versiyonudur. Deney istenilen oranda ince tane üretmek için gerekli enerji miktarı açısından parçalanma direncini ölçer. Shore Schleroscope sertliği, çalışma hava basıncı ve RIHN değerleri darbeli sondaj makinelerinin ilerleme hızlarını hesaplamak için kullanılabilir. Deney için 25.4 cm³ hacme sahip karot numuneler hazırlanmıştır. Karot numunelerinin üzerine 63.5 cm'lik bir yükseklikten 2.4 kg'lık bir ağırlık düşürülmüştür. RIHN değeri, 0.5 mm'lik elekten geçen ve orijinal kütlelerin % 25'ine neden olan darbe sayısıdır.

2.2.10 Kayaç Dayanım Katsayısı (CRS)

CRS değeri darbeli matkapların ilerleme oranını hesaplamak için çalışma havası basıncı ile birlikte kullanılabilir. CRS, Protodyakonov testinin bir başka bir versiyonudur ve enerji/birim hacim açısından parçalanmaya karşı direnci ölçer. Test, -25.4 mm +19.1 mm elek aralığından seçilen iki agrega parçasına 63.5 cm'lik bir yükseklikten 2.4 kg'lık bir ağırlık düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, aynı kayaç için farklı darbe sayıları kullanılarak beş kez tekrarlanmıştır. Ezilmiş agrega parçaları, 500 mikron elekten elenmiş ve beş deneyden hesaplanan en küçük değer o kayacın CRS değeri olarak kabul edilmiştir.

A. TEYMEN

Tablo 1. Çalışmada kullanılan CaCO₃ kökenli kayaların bölge, isim ve deney sonuçları

No	Kaya Tipi	Bölge	ROP	Is ₅₀	BSA	BPI	SSH	HB	UW	ISI	RIHN	CRS
			mm/dk	MPa	cm ³ /50cm ²	MPa	*	kg/mm ²	gr/cm ³	%	*	%
1	Mermer	İçel	13.5	4.6	28.1	13.2	51.7	112.9	2.68	81.2	33.2	1.4
2	Mermer	İçel	14.4	3.3	32.6	9.5	48.6	37.5	2.69	70.7	16.1	1.3
3	Mermer	İçel	16.4	3.9	29.4	9.7	43.3	76.3	2.68	71.9	23.7	0.7
4	Kireçtaşı	Kayseri	8.4	5.9	17.7	21.1	57.7	161.9	2.66	84.3	38.9	3.4
5	Traverten	Burdur	13.3	3.4	20.1	13.1	42.5	132.9	2.53	73.8	32.8	1.5
6	Kireçtaşı	Bursa	5.1	9.7	9.0	28.3	75.1	382.4	2.75	93.2	60.0	4.5
7	Kireçtaşı	Kayseri	8.0	5.9	13.9	16.3	67.7	236.0	2.70	90.9	50.7	3.8
8	Kireçtaşı	Niğde	9.8	3.9	12.4	12.6	45.0	179.3	2.67	68.2	40.3	1.5
9	Oniks	Nevşehir	25.5	1.2	36.2	2.5	28.0	4.1	2.45	51.7	7.4	0.4
10	Kireçtaşı	Osmaniye	15.4	3.1	21.1	6.8	37.0	88.5	2.55	74.4	25.0	0.9
11	Fay Breşi	Adana	11.8	3.8	17.8	6.3	45.0	71.5	2.65	75.0	34.2	1.8
12	Kireçtaşı	Antalya	9.9	3.8	14.1	11.9	51.3	110.1	2.65	81.9	40.8	2.1
13	Kireçtaşı	Diyarbakır	9.3	5.5	13.4	18.5	57.3	131.1	2.62	79.5	39.1	2.5
14	Kireçtaşı	Hatay	8.4	6.8	14.8	18.1	55.2	162.1	2.72	78.0	46.2	2.7
15	Mermer	Afyon	12.0	2.9	20.9	11.1	43.4	112.3	2.71	63.8	13.7	0.6
16	Kireçtaşı	Bursa	13.1	4.4	16.4	12.1	51.3	125.2	2.69	78.4	23.6	1.5
17	Kireçtaşı	Bilecik	10.1	5.9	11.0	18.2	51.3	192.5	2.69	81.9	39.3	3.2
18	Traverten	Denizli	12.2	3.3	18.3	13.3	45.6	102.5	2.40	73.7	20.9	1.3
19	Kireçtaşı	Bursa	9.8	3.9	11.1	10.9	54.1	156.1	2.71	75.1	45.5	2.5
20	Kireçtaşı	Bursa	11.1	4.9	12.2	16.9	50.1	122.4	2.67	69.1	41.1	2.2
21	Mermer	İçel	12.7	4.3	27.6	8.0	40.0	61.9	2.61	78.3	33.2	1.9
22	Mermer	Muğla	12.8	3.0	25.4	7.0	42.1	59.3	2.72	55.9	18.4	0.8
23	Mermer	Sivas	12.2	3.3	28.6	9.4	50.5	51.6	2.70	71.5	23.0	1.7
24	Limra	Nevşehir	24.3	2.1	45.0	5.6	33.0	31.5	2.32	66.1	16.5	0.8
25	Kireçtaşı	Adana	14.4	3.3	24.3	11.1	47.1	76.2	2.49	71.5	30.4	1.1
26	Mermer	Irak	11.6	5.0	20.8	15.4	52.3	187.2	2.70	73.1	46.1	2.0
27	Mermer	Afyon	13.8	4.2	30.5	12.3	48.8	110.5	2.69	65.3	16.7	1.1
28	Mermer	Balıkesir	11.1	4.4	22.5	14.6	49.1	109.4	2.70	65.5	19.1	1.8
29	Kireçtaşı	Adana	9.3	5.8	13.8	20.0	57.1	222.3	2.68	69.0	40.2	2.0
30	Kireçtaşı	Diyarbakır	7.4	4.9	11.7	17.3	55.4	207.4	2.61	74.6	39.7	2.3
31	Kireçtaşı	Adana	9.2	5.8	15.1	19.6	55.6	198.2	2.63	75.1	41.7	3.5
32	Kireçtaşı	Diyarbakır	11.4	4.9	16.3	16.1	51.0	170.5	2.65	74.7	31.4	2.5
33	Traverten	Denizli	17.1	3.9	23.4	10.0	41.3	55.8	2.36	70.0	25.9	1.3
34	Traverten	Denizli	26.8	2.5	39.4	3.5	33.5	33.5	2.45	62.4	5.5	0.6
35	Kireçtaşı	Hatay	5.3	7.6	8.7	26.1	66.5	315.0	2.70	86.3	62.8	4.4
36	Kireçtaşı	Eskişehir	7.5	5.4	10.6	19.3	54.1	228.9	2.67	73.2	54.1	3.6
37	Mermer	Muğla	14.5	3.2	25.7	6.4	43.3	88.8	2.68	58.1	9.3	0.4
Minimum			5.1	1.2	8.7	2.5	28.0	4.1	2.32	51.7	5.5	0.4
Maximum			26.8	9.7	45.0	28.3	75.1	382.4	2.75	93.2	62.8	4.5
Ortalama			12.4	4.4	20.5	13.3	49.2	132.6	2.63	73.2	32.1	1.9
Standart sapma			4.9	1.6	8.9	5.9	9.5	80.2	0.11	8.8	14.4	1.1

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Karbonat kökenli kayaların sondaj ilerleme hızlarının (ROP) yanı sıra fiziksel, indeks ve mekanik özellikleri de belirlenmiş ve ortalama deney sonuçlarının tamamı Tablo 1’de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre; sondaj ilerleme hızı (ROP) değerleri 5.15 ile 26.79 mm/dk, Böhme aşınma dayanımı (BSA) 8.69 ile 45 cm³/50cm², Shore Schleroscope sertlik (SSH) 28 ile 75.15, Brinell sertlik (HB) 4.1 ile 382.4 kg/mm², nokta yük dayanımı (Is₅₀) 1.15 ile 9.69 MPa, kayaç dayanım katsayısı (CRS) 0.4 ile 4.5 %, kayaç darbe sertlik numarası (RIHN) 5.5 ile 62.8, disk makaslama dayanımı (BPI) 2.52 ile 28.25 MPa, birim hacim ağırlık (UW) 2.32 ile 2.75 gr/cm³ ve darbe dayanım indeksi (ISI) 51.4 ile 93.2 % arasında değişmektedir.

Kayaç özellikleri arasındaki ilişkileri modellemek için hem basit hem de çoklu regresyon analizleri birçok araştırmada kullanılmaktadır. F-testleri ve t-testlerini de kapsayan tüm istatistiksel analizler için SPSS bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Birinci aşamada en uygun ilişkiyi temsil eden ve yüksek korelasyon katsayısına sahip

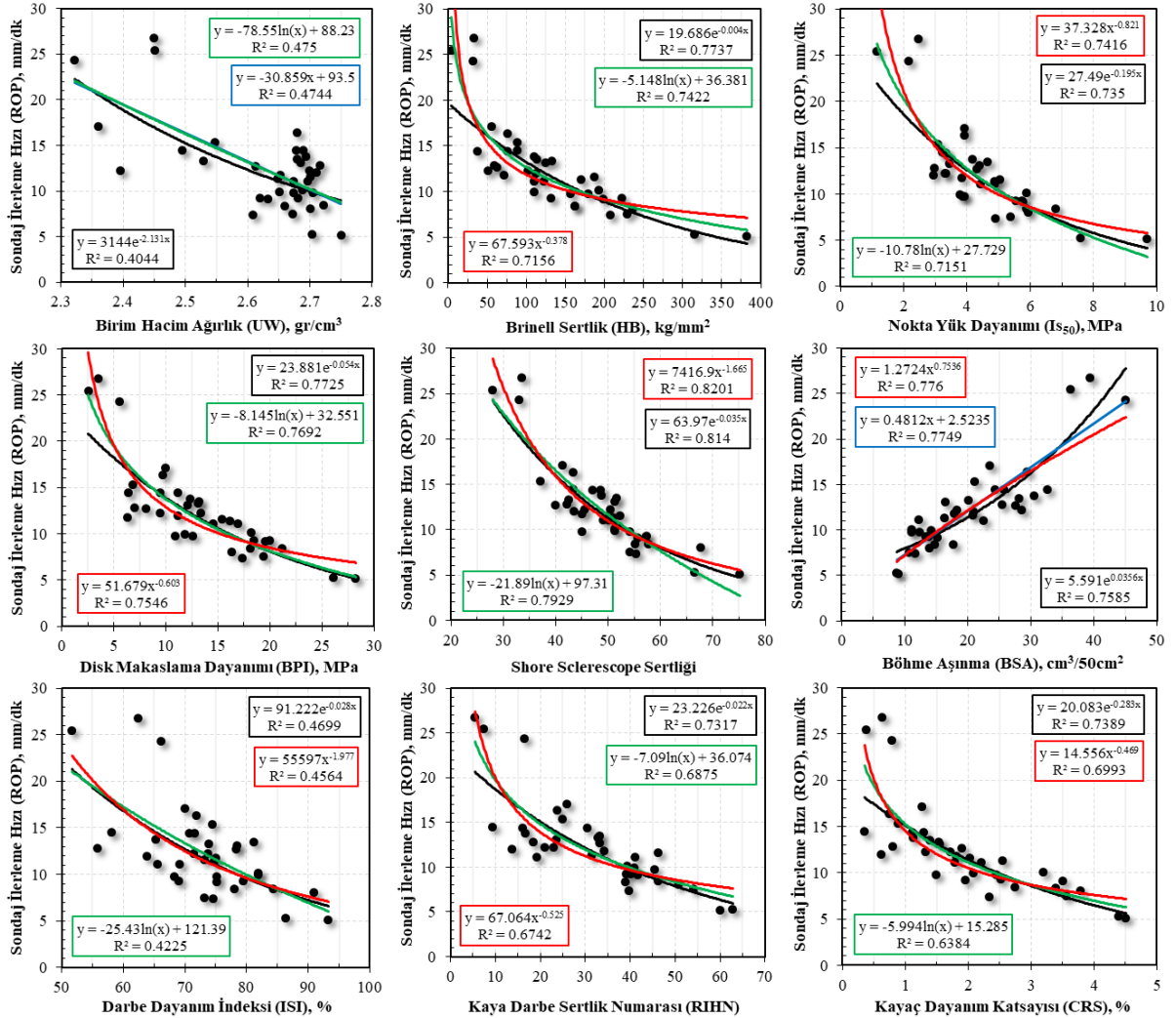
CaCO₃ İÇEREN KAYAÇLARIN SONDAJ İLERLEME HIZININ KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN TAHMİN EDİLMESİ

denklemleri elde etmek için, üs, üstel, logaritmik ve lineer fonksiyonları kullanarak basit regresyon analizleri yapılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Sondaj ilerleme hızının (ROP) basit korelasyon denklemleri ve güvenilirlik testleri

Eşitlik no	Değişken	Denklem	Model	F-değeri	Sig.	t min.	t max.	Sig.	R ²
1	Is ₅₀	$PR = 37.328 Is_{50}^{-0.821}$	Üs	100.3	0.00	8.30	10.02	0.00	0.7416
2	UW	$PR = -78.55 \ln(UW) + 88.23$	Logaritmik	31.4	0.00	5.60	6.51	0.00	0.4750
3	BPI	$PR = 23.881 e^{-0.054BPI}$	Üstel	118.8	0.00	10.90	13.86	0.00	0.7725
4	BSA	$PR = 1.2724 BSA^{0.7536}$	Üs	121.4	0.00	4.93	11.02	0.00	0.7760
5	HB	$PR = 19.686 e^{-0.004HB}$	Üstel	119.6	0.00	10.94	17.81	0.00	0.7737
6	SSH	$PR = 63.97 e^{-0.035SSH}$	Üstel	153.2	0.00	7.13	12.38	0.00	0.8140
7	ISI	$PR = 91.222 e^{-0.028ISI}$	Üstel	31.1	0.00	2.68	5.57	0.00	0.4699
8	RIHN	$PR = 23.226 e^{-0.022RIHN}$	Üstel	95.5	0.00	9.77	12.90	0.00	0.7317
9	CRS	$PR = 20.083 e^{-0.283CRS}$	Üstel	98.7	0.00	9.94	15.84	0.00	0.7389

Analizlerin ikinci aşamasını detayları Tablo 3 ve 4'te özetlenen bir dizi çoklu regresyon analizi oluşturmaktadır. Basit regresyon analizinde en küçük kareler tekniği kullanılmıştır. Karbonatlı kayaçların test edilen dokuz farklı özelliği bu kayaçların ROP değerleri ile anlamlı korelasyonlar göstermiştir ve denklemlerden elde edilen korelasyon katsayıları 0.48 ile 0.81 arasında değişmektedir.



Şekil 2. Sondaj ilerleme hızları (ROP) ile kayaç özellikleri arasındaki basit korelasyon grafikleri.

A. TEYMEN

ROP için en yüksek korelasyon katsayısı sırasıyla SSH, BSA, HB ve $Is_{(50)}$ deneylerinden elde edilmiştir. En zayıf korelasyonlar ISI ve UW deneylerine aittir. Elde edilen denklemlerin geçerliliğini kontrol etmek için % 95 güven aralığında F ve t-testleri kullanılmıştır. 37 kayacın kullanıldığı çalışma için tablo F değeri 4.12, tablo t-değeri 2.028 olarak tespit edilmiştir. t-testi, bağımsız değişkenin modele yeterli katkı yapıp yapmadığının tespit edilmesinde ve denklemlerin R değerlerinin önem seviyesini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir parametredir.

Tablo 2 incelendiğinde, basit regresyon denklemlerinin tamamında hesaplanan t-değerlerinin tablo t-değerinden çok daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, tüm t-değerlerinin önem katsayısı 0.05'in altındadır. Bu durum kurulan modellerin geçerliliğinin bir göstergesidir. Regresyonların önemini belirlemek için t-testine ek olarak, regresyon varyans analizi de (F testi) kullanılmıştır.

Hesaplanan F değerleri tablo F değerlerinden önemli derecede yüksektir. Denklemlerin önemi, F ve t testleri ile teyit edildiğinden, tahmin amaçlı olarak güvenilir bir şekilde kullanılabilirler. Tablo 2'de verilen eşitlikler tek bir bağımsız değişken kullanılarak tahmin edildiğinden, kullanım kolaylığı açısından birden fazla bağımsız değişkene sahip denklemlere göre daha pratiktir. Şekil 2'de basit regresyon grafikleri verilmiştir.

Sondaj ilerleme hızının tahmin edilebilmesi için yapılan çoklu regresyon çalışmalarında, ortalama sonuçları Tablo 1'de özetlenen farklı deneysel veriler kullanılmıştır. Modellerde farklı bağımsız değişkenler girilerek anlamlı ve yüksek güvenilirlikte regresyon denklemleri elde edilmeye çalışılmıştır. ROP'u tahmin etmek için, istatistiksel analizle elde edilebilen en güvenilir ve anlamlı çoklu regresyon denklemleri, korelasyon katsayıları, F ve t-değerleri Tablo 3 ve 4'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Sondaj ilerleme hızının (ROP) kayaç özellikleri ile elde edilen çoklu korelasyon denklemleri

Eşitlik No	Bağımsız Değişkenler	Denklemler	Düzeltilmiş R ²
10	BSA, Is_{50}	$ROP = 0.36BSA - 0.94Is_{50} + 9.12$	0.813
11	UW, Is_{50}	$ROP = -17.24UW - 1.74Is_{50} + 65.38$	0.707
12	BSA, BPI	$ROP = 0.34BSA - 0.28BPI + 9.05$	0.814
13	BSA, SSH	$ROP = 0.30BSA - 0.23SSH + 17.47$	0.860
14	BSA, UW	$ROP = 0.39BSA - 14.65UW + 42.87$	0.847
15	BSA, ISI	$ROP = 0.42BSA - 0.11ISI + 11.61$	0.788
16	BSA, CRS	$ROP = 0.38BSA - 1.11CRS + 6.73$	0.793
17	BPI, UW	$ROP = -0.52BPI - 18.07UW + 66.76$	0.751
18	SSH, UW	$ROP = -0.35SSH - 11.69UW + 10.94$	0.753
19	SSH, RIHN	$ROP = -0.31SSH - 0.1RIHN + 31.03$	0.744
20	HB, UW	$ROP = -0.04HB - 17.96UW + 64.27$	0.711
21	RIHN, UW	$ROP = -0.21RIHN - 19.23UW + 69.55$	0.765
22	CRS, UW	$ROP = -2.52CRS - 19.88UW + 69.52$	0.725
23	BSA, Is_{50} , UW	$ROP = 0.32BSA - 0.65Is_{50} - 12.4UW + 41.22$	0.865
24	BSA, BPI, UW	$ROP = 0.28BSA - 0.24BPI - 13.39UW + 44.92$	0.880
25	BSA, SSH, UW	$ROP = 0.29BSA - 0.17SSH - 9.71UW + 40.32$	0.887
26	BSA, ISI, UW	$ROP = 0.33BSA - 0.11ISI - 14.52UW + 51.32$	0.867
27	BSA, RIHN, UW	$ROP = 0.29BSA - 0.08RIHN - 14.39UW + 46.66$	0.862
28	BSA, CRS, UW	$ROP = 0.31BSA - 0.94CRS - 13.92UW + 44.42$	0.865
29	BPI, RIHN, UW	$ROP = -0.3BPI - 0.12RIHN - 17.02UW + 64.78$	0.807
30	SSH, RIHN, UW	$ROP = -0.19SSH - 0.13RIHN - 13.65UW + 61.56$	0.798
31	HB, ISI, UW	$ROP = -0.03HB - 0.14ISI - 18.21UW + 73.51$	0.740

Elde edilen çoklu regresyon denklemlerinin geçerliliğini kontrol etmek için % 95 güven aralığında F ve t-testleri kullanılmıştır. Doğrulamanın daha güçlü olabilmesi için çoklu doğrusallık problemi olup olmadığı da incelenmiştir. Çoklu doğrusallık probleminin göstergesi, 10'dan az olması gereken VIF (varyans enflasyon faktörü) değeridir. Tablo 3 ve 4 incelendiğinde sunulan denklemlerde herhangi bir çoklu doğrusallık probleminin olmadığı görülmektedir.

Çoklu regresyonlarda en yüksek katsayıya sahip denklemleri tespit edebilmek amacıyla çizilen ve gözlemlenen-tahmin edilen ROP değerlerine ait dağılım diyagramları ve histogram grafiklerinden dört tanesi Şekil 3-6'da verilmiştir. Noktaların her iki bölgede diyagonal çizgiye eşit olarak dağıldığı gerçeği, modellerin güvenilirliğini güçlendirmektedir. Tüm eşitliklerde hesaplanan t-değerlerinin tablo t-değerinden çok daha büyük değerlere sahip olduğu, benzer şekilde regresyon varyans analizinde (F testi) hesaplanan F değerlerinin tablo F

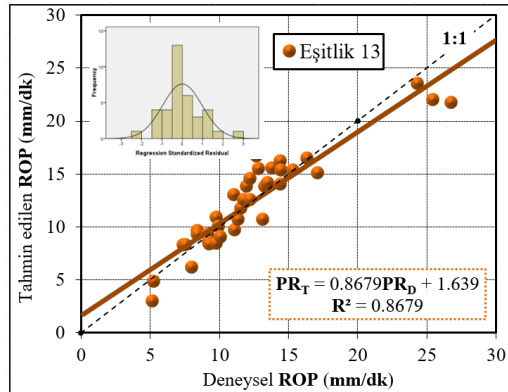
CaCO₃ İÇEREN KAYAÇLARIN SONDAJ İLERLEME HIZININ KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN TAHMİN EDİLMESİ

değerlerinden önemli derecede yüksek olduğu görülmektedir. Elde edilen çoklu regresyonlara ait denklemler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 4. Sondaj ilerleme (ROP) hızının tahminine ilişkin çoklu denklemlerin istatistiksel verileri

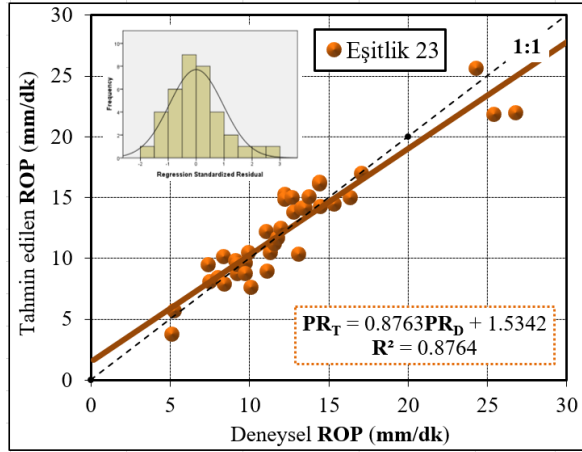
Eşitlik No	F-değeri	F-sig.	F-tablo	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t-tablo	VIF ₁	VIF ₂	VIF ₃
10	79.5	0.00	3.28	3.92	3.06	6.56	*	2.032	1.97	1.97	*
11	41.1	0.00	3.28	5.38	5.23	3.52	*	2.032	1.39	1.39	*
12	79.5	0.00	3.28	3.93	5.73	3.07	*	2.032	2.31	2.31	*
13	117.6	0.00	3.28	5.55	6.07	4.89	*	2.032	2.15	2.15	*
14	100.3	0.00	3.28	4.59	9.49	4.33	*	2.032	1.34	1.34	*
15	67.8	0.00	3.28	2.55	8.06	2.04	*	2.032	1.53	1.53	*
16	70.0	0.00	3.28	3.25	6.27	2.27	*	2.032	2.15	2.15	*
17	61.4	0.00	3.28	6.59	6.99	4.51	*	2.032	1.26	1.26	*
18	56.0	0.00	3.28	5.54	6.57	2.48	*	2.032	1.61	1.61	*
19	53.4	0.00	3.28	12.20	4.29	2.18	*	2.032	2.80	2.80	*
20	45.3	0.00	3.28	5.48	5.64	3.90	*	2.032	1.32	1.32	*
21	60.1	0.00	3.28	6.90	4.84	6.89	*	2.032	1.22	1.22	*
22	48.5	0.00	3.28	6.30	4.60	5.93	*	2.032	1.22	1.22	*
23	78.0	0.00	2.89	4.69	2.39	6.72	3.75	2.035	2.14	2.07	1.46
24	88.6	0.00	2.89	5.41	5.64	3.21	4.43	2.035	2.50	2.35	1.36
25	95.6	0.00	2.89	5.02	6.44	3.65	3.04	2.035	2.17	2.61	1.63
26	79.3	0.00	2.89	5.50	7.33	4.62	2.50	2.035	1.86	1.34	1.53
27	76.1	0.00	2.89	5.17	4.96	4.49	2.20	2.035	3.07	1.34	2.79
28	77.9	0.00	2.89	5.05	6.02	4.37	2.37	2.035	2.38	1.35	2.17
29	51.1	0.00	2.89	6.94	2.84	4.60	2.71	2.035	3.02	1.27	2.92
30	48.4	0.00	2.89	6.21	2.51	3.16	2.92	2.035	3.81	1.65	2.87
31	35.1	0.00	2.89	6.17	3.35	4.16	2.18	2.035	2.12	1.32	1.77

Çoklu regresyon analizlerinden elde edilen eşitlikler ve bunlara ait güvenilirlik analizleri detaylı olarak incelendiğinde sondaj ilerleme hızının tahmininde en güvenilir sonuçları ve yüksek korelasyon katsayılarını veren denklemlerde sırasıyla UW, BSA, RIHN, SSH ve BPI testlerinin etkisi görülmektedir. HB, ISI gibi testler ise güvenilirlik testlerinden geçmiş çoklu regresyon denklemlerinde çok fazla görülmemektedir. Ayrıntılı analizler, çoklu denklemlerin önemli bir bölümünün kayaç delinebilirliğinin tahmini için kullanılabilirliğini göstermiştir. Çoklu regresyon denklemlerinde birden fazla bağımsız değişken modele girdiğinden, tahmin yetenekleri ve korelasyon katsayıları basit modellerden daha güçlüdür.

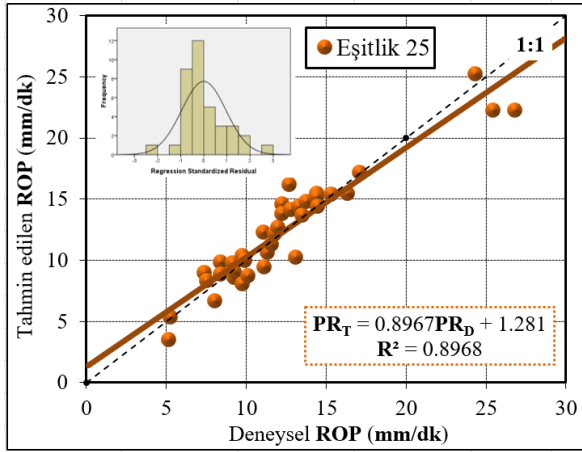


Şekil 3. DeneySEL (ROP_D) ve tahmin edilen (ROP_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 13)

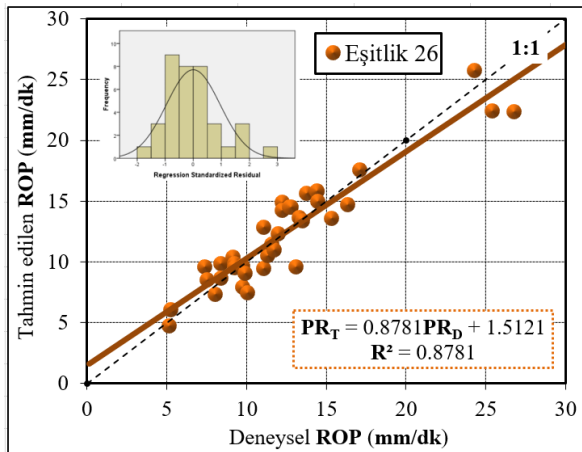
A. TEYMEN



Şekil 4. Deneysel (ROP_D) ve tahmin edilen (ROP_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 23)



Şekil 5. Deneysel (ROP_D) ve tahmin edilen (ROP_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 25)



Şekil 6. Deneysel (ROP_D) ve tahmin edilen (ROP_T) değerlerinin karşılaştırılması (Eşitlik 26)

CaCO₃ İÇEREN KAYAÇLARIN SONDAJ İLERLEME HIZININ KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN TAHMİN EDİLMESİ**4. SONUÇLAR**

Bu çalışma, kayaçlarda sondaj ilerleme hızının (ROP) tahmin edilmesine yönelik deneysel bir çalışmanın sonuçlarını ortaya koymaktadır. Çalışmada, karbonatlı kayaçların farklı mühendislik özellikleri test edilmiştir ve çoklu-basit regresyon analizlerinden çıkarılan sonuçlar aşağıdaki maddelerde özetlenmiştir.

- Deneyler için uygulamada sıkça karşılaşılan, çok fazla aşındırıcı mineral içermeyen mermer, kireçtaşı, traverten gibi kayaçlar tercih edilmiştir. Test edilen 37 kayacın sondaj ilerleme hızı (ROP) değerleri 5.15 ile 26.79 mm/dk arasında değişmektedir. Test edilen kayaçlarda aşındırıcı minerallerin bulunmadığı düşünüldüğünde, sondaj ilerleme hızını kontrol eden temel parametrelerin yoğunluk ve çimentolanma olduğu çok açıktır.
- ROP'un diğer mühendislik özellikler ile tahmin edildiği basit korelasyon denklemleri anlamlı ilişkiler ortaya koysa da korelasyon katsayılarının 0.470 ile 0.814 arasında değiştiği görülmektedir. Bahsi geçen bu mühendislik özelliklerinin bir ya da iki tanesinin ROP değerleri ile birlikte bağımsız değişken olarak kullanıldığı çoklu regresyon denklemleri incelendiğinde çok daha yüksek korelasyon katsayıları elde edildiği görülmektedir. Bu durum çoklu denklemlerin tahmin güçlerinin basit denklemlere göre daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. Pratik olarak tespit edilebilecek bu testlerin verileri kullanılarak ROP'un güvenilir bir şekilde tahmini mümkün olacaktır.
- ROP'un tahmininde en güvenilir sonuçları ve yüksek korelasyon katsayılarını veren denklemlerde sırasıyla UW, BSA, RIHN, SSH ve BPI testlerinin etkisi görülmektedir. HB, ISI gibi testler ise güvenilirlik testlerinden geçmiş çoklu regresyon denklemlerinde çok fazla görülmemektedir.
- Kayaçlarda sondaj ilerleme hızının yerinde tespit edilmesi zaman alıcıdır ve özel ekipmanlar gerektirmektedir. Öte taraftan çalışma kapsamında gerçekleştirilen agrega/kayaç deneylerinin büyük bir bölümü oldukça basit test ekipmanına, oldukça az miktarda deney numunesine ihtiyaç duyulan testlerdir. Dolayısı ile literatürde çok rastlanmayan özellikler taşıyan bu çalışmanın ortaya koyduğu eşitlikler, PR'nin belirlenmesinin çok mümkün olmadığı durumlarda özellikle tahmin amaçlı olarak güvenilir bir şekilde kullanılabilir.
- Bu çalışma ağırlıklı olarak sedimanter kireçtaşları, metamorfik mermerler ve traverten oluşturduğu çok sayıda kayaç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen modellerin yukarıda belirtilen özelliklere sahip kayaçlar için kullanılması uygun olacaktır. Mağmatik, metamorfik gibi daha farklı özelliklere sahip kayaçlar söz konusu olduğunda kontrol ederek kullanılmalıdır. Bu makale kapsamında değerlendirilen parametrelerin, mühendislik girişimlerinde sıkça rastlanan, sondaj çalışmalarında uygulamalara zorluk çıkartan, aşındırıcı mineral içeriği yüksek farklı kayaçlar kullanılarak çalışılmasında fayda vardır.

KAYNAKLAR

- [1] YARALI, O., "Tünel Açma Makinalarının Performans Analizinde Kullanılan Delme Oranı İndeksinin (DRI) Tahmini", 2. Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, 169-181, 2007.
- [2] ADEBAYO, B., OPAFUNSO, Z.O., AKANDE, J.M., "Drillability and Strength Characteristics of Selected Rock in Nigeria", Assumption University Journal of Technology, 14(1), 56-60, 2010.
- [3] KRAMADIBRATA, S., MADE, A.R., JUANDA, J., SIMANGUNSONG, G.M., PRIAGUNG, N., "The Use of Dimensional Analysis to Analyse the Relationship Between Penetration Rate of Jack Hammer and Rock Properties and Operational Characteristics", Proceedings Indonesian Mining Conference and Exhibit., Jakarta, Indonesia, 2001.
- [4] YARALI, O., KAHRAMAN, S., "The Drillability Assessment of Rocks Using the Different Brittleness Values". Tunnelling and Underground Space Technology, 26, 406-414, 2011.
- [5] SU, O., "Performance Evaluation of Button Bits in Coal Measure Rocks by Using Multiple Regression Analysis", Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(2), 541-553, 2016.
- [6] KHANDELWAL, M., ARMAGHANI, D.J., "Prediction of Drillability of Rocks with Strength Properties Using a Hybrid GA-AAN technique". Geotechnical and Geological Engineering 34(5), 605-620, 2016.
- [7] ÖZDEMİR, A., "Kayaların Delinebilirliğini Etkileyen Jeolojik Özellikler" Sondaj Dünyası Dergisi, 5.
- [8] TAMROCK, (ed. M. Heiniö), "Rock Excavation Handbook", Sandvik Tamrock Corp., 305, 1999.
- [9] POOL, R.W., FARMER, I.W., "Geotechnical Factors Affecting Tunneling Machine Performance in Coal Measure Rock", Tunnels and Tunneling, 27-30, 1978.

A. TEYMEN

- [10] BİLGİN, N., ve SHAHRIAR, K., “Kayaçların ve Kömür Damarlarının Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Dolaylı Yöntemlerin Değerlendirilmesi”, 1. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, TUKMD; Ankara, 86-97, 1986.
- [11] SINGH, T.N., JAIN, A., SARKAR, K., “Petrophysical Parameters Affecting the Micro Bit Drillability of Rocks”, International Journal of Mining and Mineral Sciences, 1(3): 261-277, 2009.
- [12] McFEAT-SMITH, I., FOWELL, R.J., “Correlation of Rock Properties and the Cutting Performance of Tunneling Machines”, Proceedings of the Conference on Rock Eng., 581-602, 1977.
- [13] HOWARTH, D.F., ADAMSON, W.R., BERNDT, J.R., “Correlation of Model Tunnel Boring and Drilling Machine Performances with Rock Properties”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 23, 57-85, 1986.
- [14] HOWARTH, D.F., ROWLAND, J.C., “Quantitative Assessment of Rock Texture and Correlation With Drillability and Strength Properties”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 20, 57-85, 1987.
- [15] KARPUZ, C., PAŞAMEHMETOĞLU, A.C., DİNÇER, T., MÜFTÜOĞLU, Y., “Drillability Studies on The Rotary Blast Hole Drilling on Lignite Overburden Series”, International Journal of Surfine Min. Reel., 4, 89-93, 1990.
- [16] THURO, K., SPAUN, G., “Introducing the ‘Destruction Work’ As a New Rock Property of Toughness Referring to Drillability in Conventional Drill and Blast Tunneling”. ed. M. Barla, Eurock’96 Pre. and Per. in Rock Mechanics and Rock Engineering, 2, 707-713, 1996.
- [17] THURO, K., “Prediction of Drillability in Hardrock Tunneling by Drilling and Blasting”, in: Golse J. et. al, Hinkel and Schubert (edt.), Tunnels for People, 103-108, 1997.
- [18] KAHRAMAN, S., “Rotary and Percussive Drilling Prediction Using Regression Analysis”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 36, 981-989, 1999.
- [19] KAHRAMAN, S., BİLGİN, N., FERİDUNOĞLU, C., “Dominant Rock Properties Affecting Penetration Rate of Percussive Drills”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 711-723, 2003.
- [20] TANAINO, A.S., “Rock Classification by Drillability. Part I: Analysis of the Available Classification”, Journal of Mining Science, 41(6), 541-549, 2005.
- [21] AKÜN, M.E., KARPUZ, C., “Drillability Studies of Surface Set Diamond Drilling in Zonguldak Region Sandstones From Turkey”, Technical Note, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 42, 473-479, 2005.
- [22] SELMER-OLSEN, R., BLINDHEIM, O.T., “On The Drillability of Rock by Percussive Drilling”, In: Proceedings of the Sec. Cong. Int. Soc. on Rock Mech., 65-70, 1970.
- [23] WIJK, G., “The Stamp Test for Rock Drillability Classification”. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26, 37-44, 1989.
- [24] NILSEN, B., ÖZDEMİR, L., “Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance”, RETC Conference Proceedings, Boston, MA, 52,832-852, 1993.
- [25] HOSEINIE, S.H., AGHABABAEI, H., POURRAHIMIAN, Y., “Development of a New Classification System for Assesing of Rock Mass Drillability Index” (RDI). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 45, 1-10, 2008.
- [26] HOSEINIE, S.H., ATAELI, M., OSANLOO, M., “A New Classification System Evalating Rock Penetrability”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 46, 1329-1340, 2009.
- [27] YARALI, O., SOYER, E., “Assessment of Relationships Between Drilling Rate Index and Mechanical Properties of Rocks”, Tunnelling and Underground Space Technology, 33, 46-53, 2013.
- [28] ANDREWS, R., HARELVE, G., NYGAARD, R., “Methods of Using Logs to Quantify Drillability”, Paper No. SPE 106571, SPE, Denver, CO, April 16-18, 2007.
- [29] ZHANG, X., ZHAI, Y.H., XUE, C.J., JIANG, T.X., “A Study of the Distribution of Formation Drillability”, Petroleum Science and Technology, 29, 149-159, 2012.
- [30] ZHANG, K., HOU, R., ZHANG, G., ZHANG, G., ve ZHANG, H., “Rock Drillability Assessment and Lithology Classification Based on the Operating Parameters of a Drifter: Case Study in Coal Mine in China”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(3), 329-334, 2016.
- [31] ONAN, M., MÜFTÜOĞLU, Y.V., “Gelik-44 Sondajında Sondaj Parametreleri ve İlerleme Hızı İlişkilerinin Etüdü”, Türkiye XIII. Madencilik Kongresi, 221-234, 1993.
- [32] PAONA, J., BRUCE W.E., “Drillability Studies: Diamond Drilling”, Bureau of MİNES, RI-USBM 6324, 1963.
- [33] PRAILLET, D., “Drilling a Manufacturer’s Viewpoint”, Mining Technologies International, 73-82, 1990.

CaCO₃ İÇEREN KAYAÇLARIN SONDAJ İLERLEME HIZININ KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN TAHMİN EDİLMESİ

- [34] PRAILLET, R., “Blasthole Drilling, Rotary Drilling and the Four Kingdoms”, World Mining Equipments, 20-23, 1998.
- [35] KORONKA, F., TACAĞS, F., ANDRAS, I., “The Influence of Rock Properties on the Wear of Mining Tools for Rotating Drilling”, Revisto Minerol, 9, 20-24, 2009.
- [36] OPAFUNSO, Z.O., ADEBAYO, B., “Blast-Hole Cuttings: An Indicator of Drill Bit Wear in Quarries”, European Journal of Scientific Research, 20, 721-736, 2008.
- [37] ISRM, Rock Characterization, Testing and Monitoring – Commission on Standardization Laboratory and field Results. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks. Part 4, 102-103, Pergamon, Oxford, 1981.
- [38] TS 699, “Doğal Yapı Taşları- İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri”, Ankara, Mart, 2009.
- [39] RABIA, H., BROOK, N., “The Shore Hardness of Rock”, Technical Note, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16, 335-336, 1978.
- [40] ALTINDAĞ, R., GÜNEY, A., “Suggested Method for Determining the Shore Hardness Value for Rock”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 43, 19-22, 2006.
- [41] EVANS, I., POMEROY, C.D., “The Strength, Fracture and Workability of Coal”, Pergamon Press, London, 1966.