



Kayaç Özelliklerine Bağlı Olarak Kayaç Delinebilirliğinin Yapay Sinir Ağları (YSA) Metodu ile Tahmini

Prediction of Drillability of Rocks Based on Rock Properties Using Artificial Neural Networks (ANN)

Utku Sakız*, Olgay Yaralı, Hamit Aydın

Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı; kayaçların mekanik, indeks ve petrografik özelliklerinden yararlanarak pratik bir delinebilirlik indeks modeli (DRI) geliştirmektir. DRI'nın tahmin edilmesi için geliştirilen modellerde yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. Bu amaçla, laboratuvarında farklı kayaçlar üzerinde yapılan delinebilirlik deney verileri kullanılmıştır. Ayrıca kayaçların; mekanik (tek eksenli basınç ve Brezilian çekme dayanımı) ve indeks (Schmidt sertlik ve nokta yükü dayanımı) özelliklerinin yanı sıra petrografik analiz (ortalama tane boyu, eş değer kuvars içeriği (%), çimentolanma derecesi) sonuçları da YSA modellemesi için kullanılmıştır. DRI ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon incelenmiş ve yüksek korelasyona sahip değişkenler YSA'na girdi parametresi olarak seçilmiştir. Buna göre 14 veri ağı eğitimi için, 7 veri ise test için kullanılmış ve en anlamlı sonucu veren model belirlenmiştir. Testler sonucunda tahmin edilen DRI sonuçları ile deneylerden elde edilen DRI sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak YSA ile modellenen DRI sonuçlarının deneysel verilerden elde edilen sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Delme oranı indeksi, Kayaçın mekanik özellikleri, Yapay sinir ağları

Abstract

The objective of this paper is to develop a practical model for predicting the drilling rate index (DRI) based on mechanical, index and petrographic properties of rocks. Artificial neural network (ANN) is employed in the models developed for predicting the DRI. For this purpose, experimental data obtained from drillability test carried out on different rocks in the laboratory were used. Furthermore, in addition to the mechanical (i.e. uniaxial compressive and Brazilian tensile strengths) and index (i.e. Schmidt hardness and point load index) properties, the results of petrographic analyses (i.e. mean grain size, equivalent quartz content, degree of cementation) were also used for the ANN modelling. The correlations between the DRI and rock properties were evaluated, and the parameters having high correlations were selected as input parameters for the ANN model. Accordingly, 14 data were used for network training and 7 data were used for testing, and the most meaningful was determined. The estimated DRI values from the ANN models were compared with the experimental DRI data. In conclusion, the DRI values estimated by the ANN models were found to be close to those obtained from experiments.

Keywords: Drilling rate index, Mechanical properties of rock, Artificial neural network

1. Giriş

Genel olarak delinebilirlik, delici ucun kayaç dayanımı yenmesi ile sağlanan ilerleme olarak tanımlanmaktadır (Tamrock 1987, Kramadibrata vd. 2001, Adebayo vd. 2010).

Madencilik ve inşaat mühendisliği faaliyetlerinde, su, petrol ya da doğal gaz gibi doğal kaynakların belirlenmesinde ve çıkarılmasında, zemin etüdü araştırmalarında, baraj gibi

inşaat çalışmalarında kayaç delinebilirlik özelliklerinin bilinmesi, mühendislik ve proje maliyetleri açısından oldukça önemlidir. Kayaç delinebilirliği, kazı ve ilerlemenin tanımlanmasında kullanılan bir parametre olup proje ekonomisini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Kayaç delinebilirliğini etkileyen faktörler incelendiğinde bu faktörler kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere başlıca iki grupta toplanmaktadır (Şekil 1). Kontrol edilebilen faktörleri; delici ucun tipi ve çapı, darbe miktarı, dönüş hızı gibi makinaya bağlı olan değişkenler oluştururken, kontrol edilemeyen faktörleri ise kayaç özelliklerine bağlı parametreler oluşturmaktadır (Yaralı

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: utku.sakiz@beun.edu.tr

ve Kahraman 2011, Su 2016, Khandelwal ve Armaghani 2016). Bu nedenle, ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olan ve ithal edilen kazı makinalarının seçiminde kayaç kütle ve malzeme özelliklerinin doğrudan etkili olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Hoseinie vd. 2008). Kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörlerin yanında, iş organizasyonunun delinebilirlik çalışmalarına olumlu ya da olumsuz nasıl bir katkı sağlayacağına göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

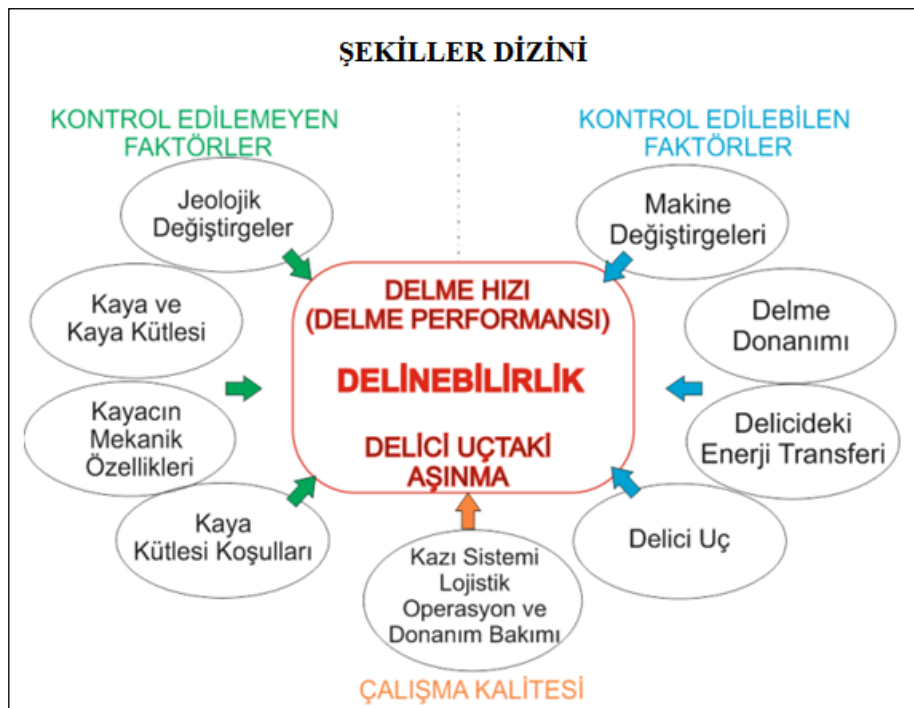
Pek çok araştırmacı; mekanik, fiziksel ve kütleli kayaç özelliklerini göz önünde bulundurarak, delinebilirlik performansını incelemiştir. Araştırmacılar, yapmış oldukları çalışmalarda kayaç delinebilirliğinin belirlenmesinde tek eksenli basınç dayanımının daha etkin olduğunu ileri sürmüşler, ancak tek eksenli çekme dayanımı, porozite ve petrografik özelliklerinin de önemli rol oynadığını da belirtmişlerdir (McFeat-Smith ve Fowell 1977, Howarth vd.1986, Howarth ve Rowland 1987, Karpuz vd.1990, Thuro ve Spaun 1996, Thuro 1997, Kahraman 1999, Kahraman vd.2003, Tanaino 2005, Akun ve Karpuz 2005, Adebayo vd.2010).

Delinebilirliğin belirlenmesinde bahsedilen deneylerin haricinde arazide ve laboratuarda yapılan; Schmidt çekici sertlik deneyi, nokta yükü dayanımı indeks deneyi, Shore sertlik deneyi, delme oranı indeksi (DRI), konik batırma deneyi, kayaç dayanım katsayısı deneyleri de delinebilirlik ile ilgili çalışmalarda sık bir şekilde kullanılmaktadır

(Salmer – Olsen ve Blindheim 1970, Wijk 1989, Howarth vd.1986, Nilsen ve Özdemir 1993, Kahraman vd.2003, Hoesini vd.2008, Hoesini vd.2009, Adebayo vd.2010, Yaralı ve Kahraman 2011, Yaralı ve Soyer 2013). 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 (Andrews vd. 2007, Zhang vd.2012, Zhang vd.2016).

DRI ilk olarak, 1943 yılında İsviçre’de N. Von Matern ve A. Hjelmer tarafından geliştirilmiştir. Sonrasında yapılan birkaç değişiklikten sonra standart hale gelmiş ve 1950’li yılların sonundan itibaren kayaç delinebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Konu ile ilgili literatürde, DRI ile kayaç kütle ve malzeme özelliklerinin kullanıldığı pek çok regresyon modellemesi mevcuttur (Karpuz vd. 1990, Bruland 1998, Dahl 2003, Hoseinie vd.2009, Dahl vd.2012, Zare ve Bruland 2013, Moein vd.2014; Ataei vd.2015). Günümüzde, mühendislik uygulamalarında karşılaşılan jeoteknik problemlerin çözümünde yeni bir yöntem olan yapay sinir ağlarından yararlanılmaktadır.

Özellikle maden ve tünelticilik faaliyetleri kapsamında kayaç özelliklerinin değerlendirilmesinin yanı sıra delici makinalar, tünel açma makinaları, doğal taş kesme makinaları vb. kazı araçlarının performans değerlendirmesi amacıyla YSA yaygın olarak kullanılmaktadır (Tumac 2016). Yılmaz ve



Şekil 1. Delinebilirliği etkileyen faktörler (Thuro ve Spaun 1996'dan değiştirilerek).

Yüksek 2007, Denghan vd.2010, Kahraman vd.2010, Ceryan vd. 2013, Mishra vd. 2015, Khandelwal ve Armaghani 2015, kayaç özelliklerinin değerlendirilmesine yönelik YSA'da araştırmalar yapmışlardır. YSA'nın kullanılarak kazı makineleri üzerine yürütülen performans araştırmaları ise; Avunduk vd. 2014'te kollu galeri açma makinasının performansını incelemişlerdir, Benardos ve Kaliampos 2004 tünel açma makinasının performans üzerine çalışmalar yapmışlardır, Tumaç 2016'da büyük dairesel testereler kullanılarak doğal taş kesme performansını incelemiştir. YSA ile delinebilirlik modellemesinde daha çok ilerleme hızının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır (Akın ve Karpuz 2008; Başarır vd.2014, Kahraman 2016) ve bu çalışmalarda DRI kullanılmamıştır. Literatürde, DRI'nın YSA ile modellenmesi sadece Khandelwal ve Armaghani (2016) tarafından gerçekleştirilmiş olup, sadece kayaç mekanik özellikleri (tek eksenli basınç ve çekme dayanımı) dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada, kayaç delinebilirliğinin bir göstergesi olan delme oranı indeksinin (DRI) yapay sinir ağları (YSA) yöntemi ile modelleyerek belirlenmesi amaçlanmıştır. Literatürdeki çalışmadan farklı olarak kurulan modellerde kayaçların mekanik, indeks ve petrografik özellikleri kul-

lanılmıştır. Modeller oluşturulurken değişkenler arasındaki korelasyonlara bakılmış ve yüksek korelasyona sahip olan değişkenler YSA'ye girdi parametresi olarak seçilmiştir.

2. Gereç ve Yöntem

Bu çalışma, Zonguldak ilinin farklı bölgelerinden TÜBİTAK 110M437 projesi kapsamında temin edilen, magmatik ve sedimanter kökenli 21 adet kayaç örneği üzerinde yürütülmüştür. Örneklerin adları ve alındıkları yerler Çizelge 1'de verilmiştir. Örnekler üzerinde yapılan delinebilirlik deneyi (kırılgenlik ve Sievers minyatür delme deneyi), mekanik (tek eksenli basınç ve Brazilian çekme dayanımı), indeks (Schmidt sertlik, Shore sertlik ve nokta yükü dayanımı) ve petrografik analiz sonuçları kullanılmıştır. Deney sonuçları kullanılarak yapay sinir ağları ile modellemeler yapılmıştır.

2.1 Delme Oranı İndeksi (DRI)

DRI, kayaç delinebilirlik derecesinin bir ölçüsü olarak, kayaç delinebilirliğini belirlemede kullanılan bir deney yöntemidir. Bu deney, Norveç Teknoloji Enstitüsü ve SINTEF tarafından 1960'lı yıllardan itibaren kayaç delinebilirliği üzerinde yapılan çalışmaların derlenmesi sonucu geliştirilmiştir. 1988 yılından itibaren özellikle İskandinav ülkelerinde kayaç de-

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan kayaç türleri ve alındığı yerler.

No	Örnek Adı	Konum	No	Örnek Adı	Konum	No	Örnek Adı	Konum
1	Diyabaz (açık gri)	Dorukan Tüneli	8	Andezitik bazalt	Zong.-Kdz. Ereğli 26. km	15	Silttaşı (Çok ince taneli)	Türkali-Göbü arası
2	Siyenit	Devrek-Yenice	9	Porfirik andezit	Zong.-Kdz. Ereğli 37. km (Sütunlu bazaltlar)	16	Porfirik bazaltik andezit	Zong.-Devrek 18. km, Beycuma yol kavşağı karşısı
3	Dolomit	Devrek	10	Traki andezit	Kdz. Ereğli-Alaplı arası Taşocağı	17	Granit	Yenice-Kayabaşı mevki
4	Porfirik bazaltik andezit	Zonguldak-Kdz. Ereğli 34. km	11	Bazaltik andezit	Kdz. Ereğli-Devrek 11.km Yazıcılar Köyü mevki	18	Dolomitik kireçtaşı	Zong. Filyos arası
5	Porfirik bazaltik andezit	Zonguldak-Kdz. Ereğli 35. km	12	Dolomitik kireçtaşı	Kdz. Ereğli-Devrek 25.km Yazıcılar Köyü mevki	19	Dolomit	Zong. Filyos arası
6	Bazaltik andezit	Zonguldak-Kdz. Ereğli 42. km	13	Bazaltik andezit	Amasra	20	Bazaltik andezit	Zong.-Yenice arası 50. km
7	Alkali granit	Devrek-Yenice	14	Kireçtaşı	Hema Madencilik yeni kuyu yeri	21	Marn	Zong.-Devrek Karaman Mevkii

linebilirliğinin belirlenmesi konusunda standart bir deney haline gelmiştir (Yaralı ve Soyer 2007).

DRI'nin belirlenmesi amacıyla kayaç numuneleri üzerinde kırılma (Şekil 2) ve Sievers minyatür delme deneyleri (Şekil 3) yapılmıştır. Bu iki deneyden elde edilen sonuçlara bağlı olarak Şekil 4'de gösterilen abaktan incelenen kayaçlara ait DRI değerleri belirlenmiş ve Çizelge 2'de verilen delinebilirlik sınıflamasına göre de sınıflandırılmıştır (Yaralı vd. 2008).

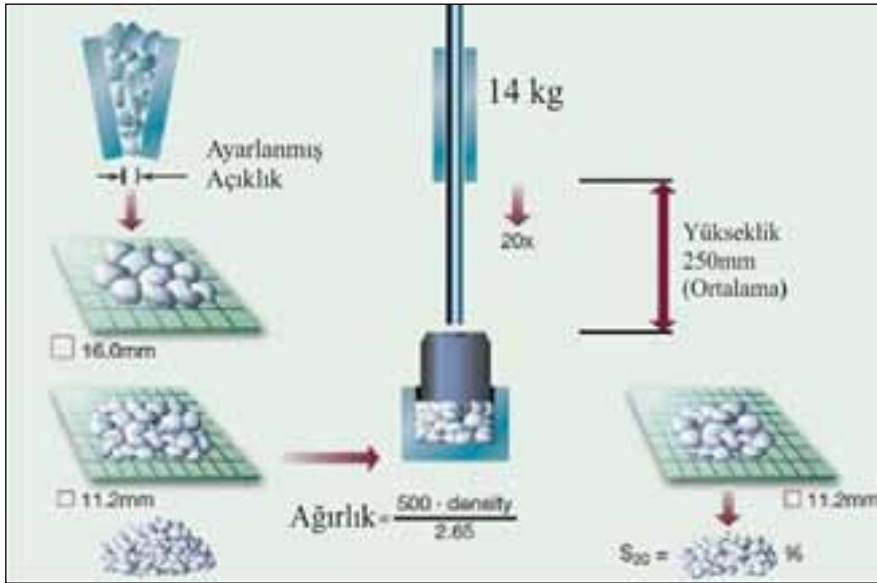
2.2 Kayaç Mekanik Özellikleri

Kayaç mekanik özellikleri, tek eksenli basınç ve Brazilian çekme dayanımı deneylerinden belirlenmiştir.

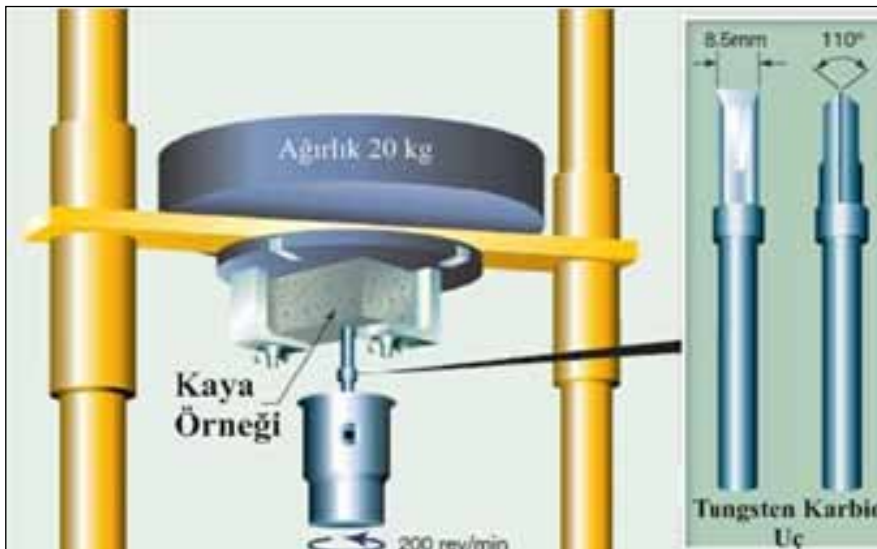
Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, silindirik bir şekle sahip karot örnekleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda ISRM (1979) tarafından önerilen yöntem izlenmiştir. Önerilen standartta yükseklik/çap oranı (H/D) 2.5-3.0 olması istenirken, kaya bloklarının kalınlıkları yeterli olmadığı için H/D oranı 2.0 olacak şekilde örnekler hazırlanmıştır. Her kaya tipi için deney 5 kez tekrarlanmıştır. Deneyler, 200 ton kapasiteli hidrolik preste ve ortalama 0.5 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır. Deney sonuçlarından kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı Eşitlik 1'den bulunmuştur. Çizelge 3'de deney sonuçları verilmiştir.

$$\sigma_c = 4000 * F/\pi D^2 \quad (1)$$

Burada;



Şekil 2. Kırılma deneyi düzeni (Dahl 2003).



Şekil 3. Sievers minyatür delme deneyi düzeni (Dahl 2003).

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı , (MPa); F: Yenilme anında kaydedilen yük, (kN), D: Örnek çapı (mm)'dir.

Brazilian çekme dayanımı deneyi, disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yükleme altında çekme dayanımlarının dolaylı olarak tespiti için, ISRM (1978) tarafından önerilen bir dayanım deney yöntemidir. Yapılan deneylerde H/D oranı 0.5 olacak şekilde örnekler hazırlanmış, örneklerin alt ve üst yüzeyleri kabaca düzeltilmiştir. Her bir kaya örneği için 10'ar adet deney yapılmıştır. Örneklerin yenilmesi 20-35 saniye arasında gerçekleştirilmiştir. Brazilian çekme dayanımı değeri Eşitlik 2'den hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 3'de verilmiştir.

$$\sigma_t = 0.636 F / D * t \quad (2)$$

Burada;

σ_t : Brazilian çekme dayanımı, (MPa), F: Yenilme anında kaydedilen yük, (kN), D: Örnek çapı (mm) ve t: Örneğin kalınlığı (mm)'dir.

2.3 Kayaçın İndeks Özellikleri

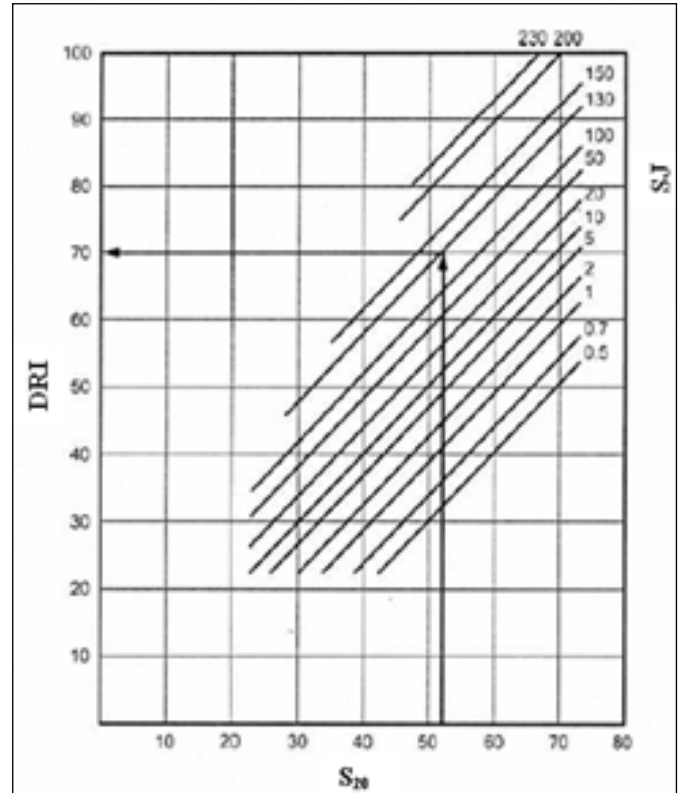
Kayaç numunelerinin mekanik özelliklerinin yanında

Çizelge 2. DRI sınıflaması (Dahl 2003).

Sınıf	Değer
Oldukça düşük	≤ 25
Çok düşük	26 – 32
Düşük	33 – 42
Orta	43 – 57
Yüksek	58 – 69
Çok yüksek	70 – 82
Oldukça yüksek	≥ 83

nokta yükü dayanım indeksi ve Schmidt sertlik deneyleri yapılmıştır.

Nokta yükü dayanımı indeksi deneyi, kayaçların dayanımına göre sınıflandırılmasında ISRM (1985) tarafından önerilen bir deneydir. Kaya malzemesinin önemli dayanım parametrelerinden tek eksenli basınç ve çekme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerinin dolaylı olarak tahminde edilmesinde ve kayacın dayanım anizotropi indeksinin bulunmasında kullanılır. Nokta yükü dayanımı indeksi Eşitlik 3'den



Şekil 4. DRI abağı (Dahl 2003).

Çizelge 3. Kayaç petrografik, mekanik ve indeks özellikleri deney sonuçları.

	DRI	Petrografik Özellikler				Mekanik Özellikler		İndeks Özellikler		
		d_{ort} (mm)	Q_{eqv} (%)	Ç. D.	DSK	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	$Is_{(50)\perp}$ (MPa)	$Is_{(50)//}$ (MPa)	SRH
Örnek Sayısı	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Minimum	39	0.05	1.6	40	270	28.61	2.57	1.37	1.88	36
Maksimum	86	1.68	52.44	75	675	182.1	12.38	7.65	7.51	87.4
Ortalama	63.33	0.64	24.41	57.38	464.05	90.86	7.91	3.96	4.22	57.64
Standart Sapma	11.46	0.44	14.43	10.32	130.38	39.17	2.50	1.77	1.78	10.48

d_{ort} : ortalama tane boyutu, Q_{eqv} : eşdeğer kuvars içeriği, Ç.D.: çimentolanma derecesi, DSK: Doku Sağlamlık Katsayısı, σ_c : tek eksenli basınç dayanımı, σ_t : Brazilian dolaylı çekme dayanımı, $Is_{(50)\perp}$: eksenel nokta yükü dayanımı, $Is_{(50)//}$: çapsal nokta yükü dayanımı, SRH: Schmidt sertlik indeksi.

yararlanılarak bulunmaktadır. Deney sonuçları Çizelge 3'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan örnekler ISRM (1985) tarafından belirtilen standartlara uygun olarak hazırlanmıştır.

$$I_{s(50)} = F / D_e^2 \quad (3)$$

Burada ;

$I_{s(50)}$ = Düzeltilmemiş nokta yükü dayanım indeksi, (MPa);
F = Kırılma yükü. (kN); D_e = Eşdeğer karot çapı (mm²)'dir.

Schmidt sertlik indeksi deneyi arazide, N-tipi 2.207 Nm darbe enerjisine sahip Schmidt çekici kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5). Her bir örnek alınan yerde en az 3 en fazla 5 noktada 20 kez tekrarlamalı okuma yapılmıştır. Okumalar kayaç yüzeyine dik konumda ve süreksizlikler içermeyen sağlam yüzeyde yapılmıştır. Yapılan okumaların minimum, maksimum değerleri ile ortalamaları ve standart sapmaları Çizelge 3'de verilmiştir.

2.4. Kayaç Petrografik Özellikleri

Çalışma kapsamında Batı Karadeniz Bölgesi, Zonguldak sınırları içerisinde yer alan jeolojik formasyonlardan alınan çeşitli magmatik ve sedimanter ağırlıklı kayaç türleri için makrosopik ve mikroskobik incelemesi yapılarak, petrografik tanımlamaları gerçekleştirilmiştir. Makrosopik olarak; kayaç örneklerine ait kaba mineral bileşim, renk, kabaca doku ve yapısal özellikleri, alterasyon ve ayrışım-bozuşum, sertlik, dayanıklılık, çatlak ve kırıklık gibi özellikleri dikkate alınmış, mikroskobik incelemelerde ise; detay mineralojik bileşim, mikroskobik bazda doku türü, tane boyu ve şekli, yuvarlaklık, küresellik, çimento türü ve çimentolanma derecesi gibi özel-

likleri incelenerek detay petrografik tanımlamaları yapılmış ve buna paralel kayaç isimlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Kayacın çimento türüne bakılarak McFeat-Smith ve Fowell, (1977)'e göre çimentolanma katsayıları belirlenmiştir. Ek olarak, kayacın çimentolanmasına ve çimento türüne bağlı olarak "Doku Sağlamlık Katsayısı (DSK)"; çimentolanma katsayısı ile çimentolanma derecesinin çarpılmasıyla bulunmuştur. Kayaca ait aşındırıcı minerallerin ortalama tane boyutları da (d_{ort}), kayaç Rosival aşındırıcılıkları (Schormair et al. 2006) ve kayaç eşdeğer kuvars içerikleri (Q_{eqv})'de saptanmıştır. Kayaç türlerine ait petrografik özelliklere ilişkin veriler Çizelge 3.'te özetlenmiştir.

3. Yapay Sinir Ağları

1990'lı yılların başından itibaren özellikle yapay sinir ağları (YSA), regresyon modellemesinin açıklamakta yetersiz kaldığı durumlarda regresyon analizine alternatif bir yöntem olarak tahminlemede yaygın olarak kullanılmaktadır (Ceryan et al. 2013). Bilgisayar teknolojisi ve yazılım sektöründeki gelişmelere bağlı olarak YSA modellemesinin basitleşmesi ve klasik yöntemlerle çözümü zor olan problemlere daha kolay çözüm getirmesi, YSA'nın mühendislik uygulamalarında ve özellikle karmaşık problemlerin modellemesinde yaygın kullanım alanı bulmasını sağlamıştır. YSA'nın diğer modelleme tekniklerinden farkı, problemlerin çözümü için matematiksel modeller kullanmak yerine gözlem ve/veya deney verilerine dayanan benzetimler kullanmasıdır (İnan 1999, Güvenç et al. 2011). Bu modelleme tekniği, canlılardaki beyin ve sinir sisteminin çalışmasından yola çıkılarak geliştirilen ve lineer olmayan bir matematiksel optimizasyon



Şekil 5. Schmidt çekici deney aleti ve arazide kullanımı.

işlemdir (Ceryan et al. 2013). Ayrıca, yöntem esas olarak kendisine tanıtılan pek çok değişken arasındaki ilişkileri ve bilgileri öğrenerek edindiği tecrübelerden farklı yaklaşımların ortaya konması üzerine kuruludur (Yurdakul 2009).

Yapay sinir ağları nöron adı verilen sinir hücrelerinden oluşmakta olup, bu metot ile modellemede genel olarak bir girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli ara katman ve son olarak bir çıkış katmanı tanımlanmalıdır. Nöronlar, bağlantı linkleri (sinapslar) aracılığıyla birbirlerine bağlı olup, bu linkler ağırlık adı verilen sayısal değerler ile karakterize edilmektedir. Nöron ve girdi katmanı arasındaki ağırlıklar, ağırlık matrisi ile tanımlanır ve ağa sunulur, ağırlıklar ait oldukları girdiler ile çarpılıp toplanarak toplama fonksiyonuna (Eşitlik 4) gönderilir. (Güvenç 2007, Yurdakul 2009).

$$v_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} * x_j \quad (4)$$

Toplama fonksiyonunun çıktısı aktivasyon formülü için girdi parametresini oluşturmaktadır. Sonuç olarak nöronlar tarafından üretilen çıktı Eşitlik 5 ile tanımlanmaktadır.

$$y_i = f(v_i) \quad (5)$$

Aktivasyon fonksiyonları nöronlardan gelen çıkış değerlerini genellikle (0,1) ve (-1,1) arasında sınırlar. Aktivasyon fonksiyonuna gelen ve sonrasında çıktı katmanından çıkan değerlerin sıfır olmasını önlemek amacıyla bir eşik değerine (*Bias*) ihtiyaç vardır (Yurdakul 2009). Bir yapay sinir ağının öğrenme kabiliyeti, uygun öğrenme yöntemi ve ağırlıkların

uyumlu olarak kullanılmasına bağlıdır. Ağın verimliliği açısından anlık hataların minimumda tutulması oldukça önemli olup, yaygın olarak ortalama karesel hatanın (*MSE*: *mean square error*) hesaplanması ile sağlanmaktadır (Eşitlik 6). Ağın eğitimi esnasında hata değeri istenen değerlere ulaştığında işlem sonlandırılır (Güvenç 2011).

$$MSE\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (bedef_i - \text{çkt}_i)^2 \quad (6)$$

Burada n nöron sayısını vermektedir (Yurdakul 2009).

Bu çalışmada, DRI'nın kayacın mekanik, petrografik ve indeks özelliklerinden yararlanarak yapay sinir ağları ile modellenmiştir. Modellemede kayacın DRI değeri ve diğer özellikleri arasındaki korelasyona bağlı kalınarak, korelasyonu yüksek ($R \geq 80$) olan kayaç özellikleri girdi parametresi olarak kullanılmıştır (Çizelge 4.). Bu kapsamda Çizelge 4. incelendiğinde; kayacın DRI değerleri ile petrografik özelliklerinden DSK ($R=0,80$), mekanik özelliklerinden σ_c ($R=0,82$) ve indeks özelliklerinden $I_{s(50)\perp}$ ($R=0,79$ - $R=0,86$) ve SRH ($R=0,82$) değerleri arasında anlamlı ilişkiler veren modeller oluşturabileceği gözlemlenmiştir. Ancak çalışma kapsamında, farklı kayaç türleri için nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)\perp}$ ve $I_{s(50)\parallel}$) değerlerinin uygulama yönünden elde etmesi zor ve zahmetli olduğu için değerlendirmeye alınmamıştır.

Yapay sinir ağları modellemesinde MATLAB bilgisayar yazılımından yararlanılmış olup, bu amaçla kurulan YSA modelleri kapsamında çok katmanlı (*neural network fitting*)

Çizelge 4. Değişkenler arası korelasyon matrisi.

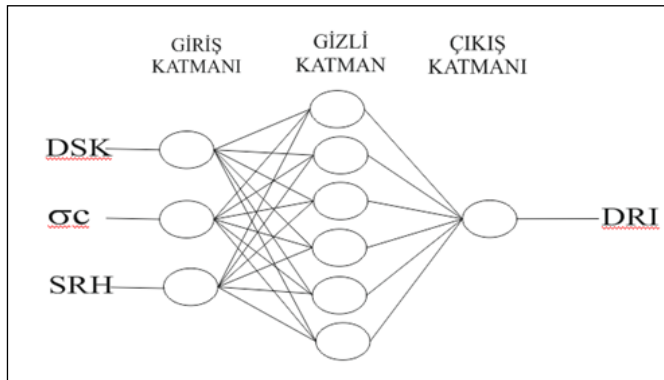
	DRI	d_{ort} (mm)	Q_{eqv} (%)	Ç.D.	DSK	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	$I_{s(50)\perp}$ (MPa)	$I_{s(50)\parallel}$ (MPa)	SRH
DRI	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d_{ort} (mm)	-0.63	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
Q_{eqv} (%)	-0.58	0.78	1.00	-	-	-	-	-	-	-
Çimentonma Derecesi (ÇD)	-0.68	0.62	0.64	1.00	-	-	-	-	-	-
DSK	-0.80	0.87	0.80	0.77	1.00	-	-	-	-	-
σ_c (MPa)	-0.82	0.56	0.59	0.66	0.71	1.00	-	-	-	-
σ_t (MPa)	-0.58	0.26	0.39	0.76	0.50	0.59	1.00	-	-	-
$I_{s(50)\perp}$ (MPa)	-0.79	0.43	0.54	0.70	0.73	0.82	0.75	1.00	-	-
$I_{s(50)\parallel}$ (MPa)	-0.86	0.69	0.70	0.82	0.88	0.84	0.71	0.91	1.00	-
Schmidt Sertliği (SRH)	-0.82	0.52	0.49	0.58	0.65	0.66	0.54	0.60	0.73	1.00

tool), ileri beslemeli ve geri yayılım algoritmali (*feed forward backpropagation*) ağ modeli kullanılmıştır. Eğitim için, diğer algoritmalara göre daha hızlı sonuçlar üreten “Levenberg – Marquardt” öğrenme algoritması seçilmiştir (Ceryan et al. 2013). Optimum sonuca ulaşmak için çok sayıda model oluşturulmuş ve 3 nörondan oluşan giriş katmanı, 6 nörondan oluşan gizli katman ve 1 nörondan oluşan çıkış katmanına sahip 3'lü bir YSA modelinin en anlamlı sonuçları verdiği gözlemlenmiştir (Şekil 6). Çalışma kapsamında oluşturulan model yapısı Çizelge 5'te sunulmuştur. Çalışmada gizli katmandaki nöronların sayısının artmasıyla birlikte YSA'nın performans verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, Sönmez ve Gökçeoğlu (2008) gizli katmanlarda kullanılan nöron sayısının mümkün olan en düşük sayıda seçilmesini önermiştir.

Şekil 6'da, giriş katmanını DSK, σ_c ve SRH değişkenlerinin oluşturduğu ve sonuç olarak DRI verilerinin tahmin

Çizelge 5. YSA model yapısı.

Girdi sayısı	63
Çıkış	21
Gizli tabaka sayısı	1
Gizli tabakadaki nöron sayısı	6
Maksimum epoch sayısı	50
Aktivasyon fonksiyonu	Sigmoid
Eğitim algoritması	Levenberg – Marquardt
Performans hedefi	MSE=0
Eğitim için kullanılan data yüzdesi	%80
Doğrulama için kullanılan data yüzdesi	%10
Test için kullanılan data yüzdesi	%10



Şekil 6. Yapay sinir ağları modeli.

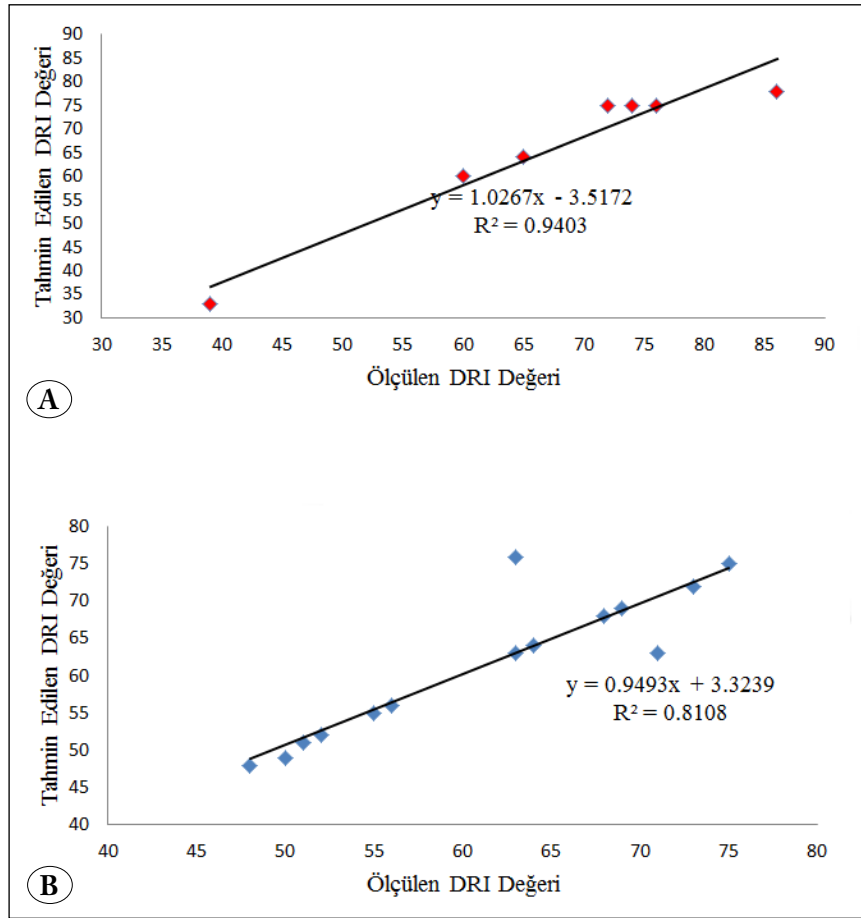
edilmeye çalışıldığı bir kayaç veri setine ait YSA modeli sunulmuştur. Kurulan YSA modeli kapsamında, 21 kayaç veri setinin 14'ü eğitim için ayrılmış ve diğer 7 veri seti ise kontrol amaçlı olarak test için bırakılmıştır. Şekil 7.-a'da, YSA modellemesinde test için ayrılan veri setinden elde edilen sonuçlar ile ölçülen DRI sonuçları karşılaştırılmış ve $R^2=0.94$ gibi yüksek bir regresyon ilişkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 7.b'de, eğitim için ayrılan veri setinden elde edilen değerler için de benzer bir ilişki olarak $R^2=0.81$ olarak bulunmuştur. Yapılan karşılaştırma göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen sonuçlar arasında oldukça anlamlı ve yüksek bir ilişkinin kurulduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7). Ayrıca Şekil 8'de, 21 kayaç türüne ait veri seti için YSA modelinde ölçülen DRI değerleri ile tahmin edilen DRI değerleri gösterilmiştir. Şekil 7 ve 8 incelendiğinde, DRI değerlerinin YSA ile uyumlu ve güvenilirlik sınırları içerisinde incelenen kayaç özelliklerine bağlı olarak belirlenebileceğini ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

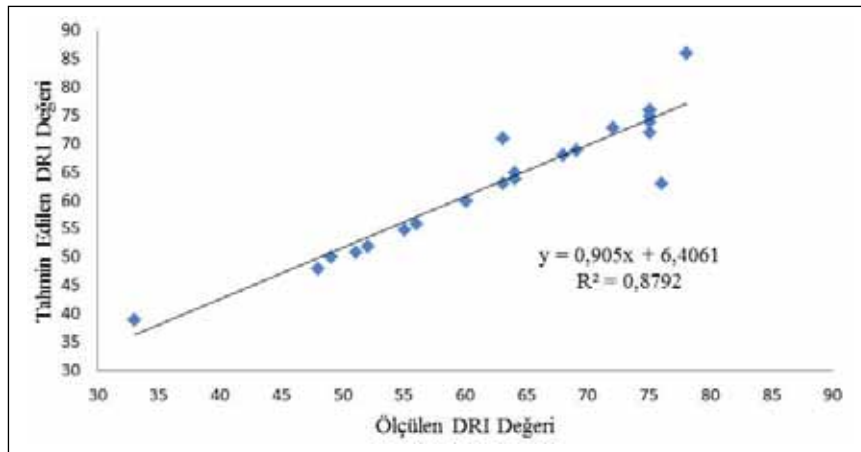
YSA ile DRI'nın modellenmesinde sadece kayaç mekanik özelliklerini (tek eksenli basınç ve çekme dayanımı) göz önünde bulunduran çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada ise; kayaç mekanik, petrografik ve indeks özelliklerine bağlı olarak DRI'nın tahmini için YSA metodu kullanılmıştır. DRI değeri ile bu çalışmada incelenen kayaç özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için korelasyon analizi yapılmış ve korelasyonu yüksek olan kayaç özellikleri YSA uygulaması için girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, DRI ile en anlamlı ilişkileri veren kayaç özellikleri σ_c , DSK ve SRH incelenmiştir. YSA ile elde edilen modeller için örnek sayısı az olmasına rağmen DRI ile diğer değişkenler (σ_c , DSK ve SRH) arasındaki ilişkinin yüksek ve anlamlı olması, DRI değerlerinin tahmininin güvenilirlik sınırları içerisinde yapılabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada, mekanik- petrografik- indeks kayaç özelliklerine bağlı olarak DRI değerlerinin σ_c (mekanik), DSK (petrografik) ve SRH (indeks) değişkenleri aracılığıyla yüksek güvenilirlikle tahmin edilebileceği belirlenmiştir Eğitimde ve analizde kullanılan verilerin sayısının artırılmasının DRI'nın güvenilir tahmin edilmesine önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5. Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a (Proje No: 110M437), Bülent Ecevit Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (BAP, Proje No:201598150330-01), Arş. Gör. Ferdi KARA'ya (BEÜ) sonsuz teşekkürlerini sunar.



Şekil 7. YSA'dan elde edilen tahmin verileri ile gerçek DRI değerleri arasındaki ilişki. **A)** test verileri için yapılan DRI karşılaştırması, **B)** eğitim verileri için yapılan DRI karşılaştırması.



Şekil 8. YSA'da kullanılan bütün veriler için elde edilen tahmin verileri ile gerçek DRI değerleri arasındaki ilişki.

6. Kaynaklar

- Adebayo, B., Opafunso, Z.O., Akande, J.M. 2010.** Drillability and strength characteristics of selected rock in Nigeria, *AU J. T.*, 14(1):56-60.
- Akün, M.E., Karpuz, C. 2005.** Drillability studies of surface set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey. Technical Note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42:473-479.

- Akin, S., Karpuz, C. 2008.** Estimating drilling parameters for diamond bit drilling operations using artificial neural networks. *Int. J. Geomech.* 8(1):68-73
- Altındağ, R., Güney, A. 2006.** Suggested method for determining the shore hardness value for rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* 43: 19-22.

- Andrews, R., Harelve, G., Nygaard, R. 2007.** Methods of using logs to quantify drillability. Paper No. SPE 106571, *SPE*, Denver, CO, April 16–18.
- Ataei, M., Kakaie, R., Ghavidel, M., Saedi, O. 2015.** Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 73: 130-138.
- Avunduk, E., Tumaç, D., Atalay, A.K. 2014.** Prediction of roadheader performance by artificial neural network. *Tunn. Undergr. Space Tec.*, 44:3-9.
- Basarir, H., Tutluoglu, L., Karpuz, C. 2014.** Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions. *Eng Geol* 173:1–9.
- Benardos, A.G., Kaliampos, D.C. 2004.** Modelling TBM performance with artificial neural networks. *Tunn. Undergr. Space Tech.*, 19 (6) : 597-605
- Bruland, A. 1998.** Hard rock tunnel boring , drillability test methods. Norwegian University of Science and Technology, Dept. of Civil and Transport Engineering Project report 13A-98.15.
- Ceryan, N., Okkan, U., Kesimal, A. 2013.** Prediction of unconfined compressive strength of carbonate rocks using artificial neural networks. *Environ. Earth Sci.* 68:907-819.
- Dahl, F. 2003.** *DRI Standards*, NTNU, Angleggsdrift, Trondheim. 21 p.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, PD., Nilsen, B., Grov, E. 2012.** Classifications of properties influencing the drillability of rocks based on the NTNU/SINTED test method. *Tunn. Undergr. Space Tech.*, 28:150-158
- Denghan, S., Sattari, G., Cherreh C.S., Aliabadi M.A. 2010.** Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for Travertine samples using regression and artificial neural networks. *Min. Sci. Technol.*, 20(1):41-46
- Güvenç, U. 2007.** Anahtarlamalı relüktans motor manyetik akısının yapay sinir ağı tabanlı modellenmesi. *Akademik Bilişim'07- IX. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri*, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Güvenç, U., Dursun, M., Çimen, H. 2011.** Mermer kesme işleminde kesim süresinin yapay sinir ağı tabanlı modellenmesi. *SDU Int. Tech. Sci.* 3(2):9-16.
- Hoseinie, SH., Aghababaei, H., Pourrahimian, Y. 2008.** Development of a new classification system for assesing of rock mass drillability index (RDi). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 45:1-10.
- Hoseinie, SH., Ataei, M., Osanloo, M. 2009.** A new classification system evalating rock penetrability. *Int. J. Rock Mech. Rock Eng.* 46: 1329 – 1340.
- Howarth, DF., Adamson, WR., Berndt, JR. 1986.** Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 23: 57-85.
- Howarth, DF., Rowland, JC. 1987.** Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mech. Rock Eng.* 20: 57–85.
- İnan, A. 1999.** Yapay sinir ağlarının güç sistemlerinde kullanım alanları. *Kaynak Elektrik*, 119: 104-114
- ISRM. 1978.** Suggested method for determining tensile strength of rock materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* 15: 99-103.
- ISRM. 1979.** Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* 16: 135-140.
- ISRM. 1985.** Suggested methods for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* 22(2): 51–60.
- Kahraman, S. 1999.** Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36: 981–989.
- Kahraman, S. 2016.** Estimating the penetration rate in diamond drilling in laboratory Works using the regression and artificial neural networks. *Neural Process Lett.*, 43:523-535
- Kahraman, S., Bilgin, N., Feridunoğlu, C. 2003.** Dominant rock properties affecting penetration rate of percussive drills. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, pp. 711-723.
- Kahraman, S., Alber, M., Fener, M, Günaydın, O. 2010.** The usability of Cerchar abrasivity index for the prediction of UCS and E of Misis Fault Breccia: regression and artificial neural networks analysis, *Exp. Sys. with App.*, 37:8750-8756
- Karpuz, C., Paşamehmetoğlu, AC., Dinçer, T., Müftüoğlu, Y. 1990.** Drillability studies on the rotary blast hole drilling on lignite overburden series. *Int. J. Surfine Min. Reel.*, 4 : 89-93.
- Khandelwal, M., Armaghani, DJ. 2016.** Prediction of drillability of rocks with strength properties using a Hybrid GA-AAN technique. *Geotech. Geo. Eng.* 34 (5) : 605- 620.
- Kramadibrata, S., Made, AR., Juanda, J., Simangunsong, GM., Priagung, N. 2001.** The use of dimensional analysis to analyse the relationship between penetration rate of Jack Hammer and rock properties and operational characteristics. Proc. Indonesian Mining Conf. and Exh., Jakarta, Indonesia
- McFeat-Smith. I., Fowell, RJ. 1977.** Correlation of rock properties and the cutting performance of tunneling machines, *In Proc. of a Conf. on Rock Eng.*, pp. 581-602.
- Mishra, D.A., Srighyan, M., Basu, A., Rokade, P.J. 2015.** Soft computing methods for estimating the uniaxial compressive strength of intact rock from index test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 80:418-424
- Moein, MJA., Shaabani, E., Rezaeian, M. 2014.** Experimental evaluation of hardness models by drillability tests for carbonate rocks, *J. Petroleum Sci. Eng.* 113: 104 -108.

- Nilsen, B., Özdemir, L. 1993.** Hard rock tunnel boring prediction and field performance., *RETC Conf. Proc.*, Boston, MA, Chapter 52, 832-852.
- Sakız, U. 2016.** Spesifik enerjinin kayaçların delinebilirliğine ve aşındırıcılığına olan etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi: 3. Tez İzleme Raporu*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 81 s.
- Selmer-Olsen, R., Blindheim, OT. 1970.** On the drillability of rock by percussive drilling. *In: Pro. of the Sec. Cong. Int. Soc. on Rock Mech.*, pp.65-70.
- Schormair, N., Thuro, K., Plinninger, R. 2006.** The influence of anisotropy on hard rock drilling and cutting, The Geological Society, *IAEG-491*, 1-11.
- Sönmez, H., Gokceoglu, C. 2008.** Discussion on the paper by H. Gullu and E Ercelebi A neural network approach for attenuation relationship: an application using strong ground motion data from Turkey, *Eng. Geol.* 97:91-93
- Su, O. 2016.** Performance evaluation of button bits in coal measure rocks by using multiple regression analysis, *Rock Mech. Rock Eng.*, 49 (2) : 541 - 553.
- Tamrock. 1987.** Handbook of Underground Drilling, Tamrock Drills SF-33310 Tampere, Finland, 327 p.
- Tanaino, AS. 2005.** Rock classification by drillability. Part I: analysis of the available classification. *J. Min. Sci.*, 41 (6): 541 - 549
- Thuro, K. 1997.** Prediction of drillability in hardrock tunneling by drilling and blasting, *In: Golse J. et. al*, Hinkel and Schubert (edt.), *Tunnels for people*, pp.103-108.
- Thuro, K., Spaun, G. 1996.** Introducing the 'detruction work' as a to new rock property of toughness refering to drillability in conventional drill and blast tunnelling. ed. M. Barla, *Eurock'96 Pre. and Per. in Rock Mech. Rock Eng.*, 2 : 707-13.
- Tumaç, D. 2016.** Artificial neural network application to predict the sawability performance of large diameter circular saws. *Measurement*, 80:12-20.
- Wijk, G. 1989.** The stamp test for rock drillability classification. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, 26:37-44
- Yaralı, O., Kahraman, S. 2011.** The drillability assessment of rocks using the different brittleness values. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 26: 406 – 414.
- Yaralı, O., Soyer, E. 2013.** Assessment of relationships between drilling rate index and mechanical properties of rocks, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 33:46-53.
- Yılmaz, I., Yüksek, A.G. 2008.** An example of artificial neural network (ANN) application for indirect estimation of rock parameters. *Rock Mech. Rock Eng.*, 41(5): 781- 795
- Yurdakul, M. 2009.** Karbonat kökenli doğal taşların yapay sinir ağları ile kesilebilirlik tayini. *Doktora Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 261 s.
- Zare, S., Bruland A. 2013.** Applications of NTNU/SINTEF drillability indices in hard rock tunneling. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46:179 – 187.
- Zhang, X., Zhai, YH., Xue, CJ., Jiang, TX. 2012.** A study of the distribution of formation drillability, *Pet. Sci Technol.*, 29 : 149 – 159.
- Zhang K, Hou R, Zhang G, Zhang G ve Zhang H 2016.** Rock drillability assessment and lithology classification based on the operating parameters of a drifter: case study in coal mine in China. *Rock Mech. Rock Eng.*, 49 (3) : 329-334.