

Kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinin delinebilirlik üzerindeki etkisinin araştırılması

Investigation of the effect of physico-mechanical properties of rocks on drillability

Ali Rıza KARADAL¹ , Nazmi ŞENGÜN^{2*} 

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

alirizakaradal@gmail.com

²Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

nazmisengun@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.04.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 08.08.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.07455

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, altı farklı açık maden ocağında (4 adet kalker, 1 adet kil ve 1 adet feldspat ocağı) yapılan delme çalışmaları sırasında delici uç ve makine çalışma parametreleri (darbe miktarı, baskı kuvveti, hava basıncı ve dönme hızı) sabit tutularak delme hızları yerinde ölçülmüştür. Bu ocaklardan, laboratuvar deneyleri için şekilsiz bloklar ve delme işleminden çıkan kırıntılardan numuneler alınmıştır. Alınan kırıntı numunelerden pasa irilik katsayısı, blok numunelerden ise kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu kaya birimlerinin delme oranı indeksi (DRI) değerlerini belirlemek için Sievers minyatür delme deneyi ve kırılma deneyleri yapılmıştır. Çalışmalar sonunda, araziden alınan delme hızı verileri ile laboratuvarda yapılan deney sonuçları birlikte değerlendirilerek istatistiksel olarak irdelenmiştir. Arazi üzerinde ölçülen ilerleme hızları ile kayacın fiziksel ve mekanik özellikleri arasında anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında belirlenen delinebilirlik değerlerinin delme-patlama çalışmalarında ilerleme hızının tahmin edilmesinde güvenilir bir şekilde kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Delinebilirlik, Delme oranı indeksi, Delme hızı, Kırılma

Abstract

In this study, drilling speeds were measured in situ by keeping the drill bit and machine working parameters (impact, pressure, air pressure and rotation) constant during drilling-blasting operations on six different open mines (4 limestones, 1 clay and 1 feldspar quarries). From these quarries, shapeless blocks samples and rock chipping specimens from blasting holes were taken for laboratory experiments. The physical and mechanical properties of the rocks from the block samples and coarseness index from chip samples were determined. Sievers miniature drilling tests and brittleness tests were also performed to determine the drilling rate index (DRI) values of the rocks. As a result, the results of the laboratory tests and insitu drilling data were evaluated statistically. Significant relationships were found between the physical and mechanical properties of the rock and the measured drilling speed. It has been determined that the drillability values determined in the laboratory can be reliably used in predicting the rate of penetration in drilling-blasting operations.

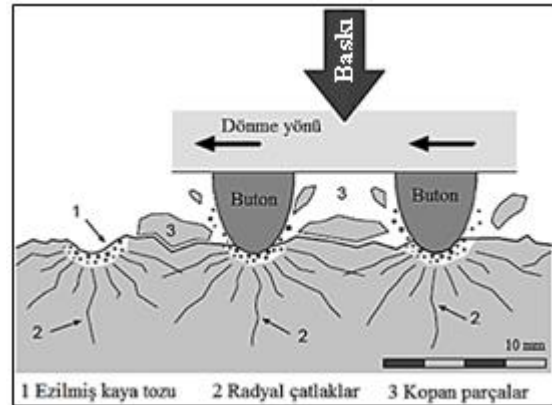
Keywords: Drillability, Drilling rate index, Drilling speed, Brittleness

1 Giriş

Mühendislik yapılarının çoğunda patlatma faaliyetinin gerçekleştirilmesi, patlayıcıların yerleştirileceği deliklerin açılmasıyla mümkün olabilmektedir. Yeraltı ve yerüstü maden ocaklarında, tünel açım faaliyetlerinde, kazı, yol ve baraj yapımlarında ayrıca yerüstü inşaat işletmelerinde gerek üretim-hazırlık gerekse ilerleme ve yapım aşamasında patlatma oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Özellikle açık işletmelerde, kaya veya cevher kazısı sırasında kaya dayanımı dikkate alındığında doğrudan kazı yapılamaması durumunda, bu işlerde çalışan iş makinelerinin ekonomik bir şekilde kazı yapabilmesi ve işlerin hızlı bir şekilde sürdürülebilmesi için delme ve patlatma çalışmaları zorunlu olmaktadır.

Bir delme işleminde, delici uçtaki butonlar kayaya dik olarak baskı uygular, uygulanan baskı ve darbe kayanın ezilerek ince toz haline gelmesini sağlar, buraya gömülen buton yükünü çevreye iletir ve oluşan radyal çatlaklar kaya içerisinde ilerleyerek kayayı parçalar (Şekil 1) [1]. Böylece delici uç, kaya içinde ilerleyerek delme işlemini gerçekleştirmektedir. Delme mekanizmasında, darbe etkisinden dolayı basınç ve çekme gerilmeleri, dönme etkisinden dolayı meydana gelen kesme

gerilmeleri ve kayaç malzemesinin elastik özellikleri büyük önem taşımaktadır [1]-[3].



Şekil 1: Döner darbeli delicilerde delme işlemi [1].

Delinebilirlik, delici ucun kayaç içerisinde belirli bir zamanda ilerleme yeteneği olarak açıklanabilmektedir. Bir diğer ifade ile kaya kütlelerinde delik delme kolaylığıdır. Delme hızı ise delicinin kaya içerisinde birim zamanda ilerleme miktarı olarak

belirtilir. Delme hızı ile delinebilirlik aynı kavram olarak tanımlanabilir [4].

Delinebilirliğe etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar makine ve ekipmana bağlı parametreler (makine tipi, dönme hızı, baskı kuvveti, matkap tipi vb.), delme işlemine bağlı parametreler (delme yöntemi, makinenin çalışma performansı ve bakımı, operatörün deneyimi vb.) ile jeolojik parametrelerdir (kaya tipi, kayaların mekanik özellikleri, süreksizlikler, mineral bileşimi vb.). Makine, ekipman ve delme işlemine bağlı parametreler kontrol edilebilir parametreler olup, jeolojik özelliklere bağlı parametreler ise kontrol edilemeyen parametreler olarak sınıflandırılmaktadır [1]-[2].

Delinebilirliğin değerlendirilmesi faaliyet öncesi iş planı oluşturulmasında önemli olmaktadır. Bu amaçla farklı çalışmalara rastlamak mümkündür. Fakat literatür incelendiğinde çok az sayıda arazi verilerine dayalı değerlendirmeler bulunurken daha çok laboratuvar verilerine dayalı değerlendirmeler bulunmaktadır. Karaman [4], yapmış olduğu araştırmada, sert kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri ile DRI arasında bazı ilişkiler bulmuş ve DRI değeri azaldıkça kayacı delmek için gerekli olan spesifik enerji miktarı arttığı, yani yapısal olarak sağlam kayalarda kayacı delmek için gerekli olan enerji miktarının daha fazla olacağını ifade etmiştir. Ekincioglu [5], bazı kireçtaşlarının delinebilirlik indeksi ile fiziksel özelliklerini incelemiş sismik hız ve birim hacim ağırlık değerlerinin artmasıyla porozite değerlerinin azaldığını, buna bağlı olarak kayacın masif hale geldiğini ve SJ değerinin azaldığını belirtmiştir. S₂₀ değerinin artmasıyla SJ değerinin de arttığını ve bununla DRI değerini artırdığını ifade etmiştir. Kandemir [6], kayaç dayanımının ve sertliğinin kayacın delinebilirliğine olan etkisini araştırmış ve çimentolanma derecesi düşük olan kayaçların delinebilirliklerinin yüksek çıktığını gözlemlemiştir. Koçcaz [7], kireçtaşı ocağında yapmış olduğu ölçümler neticesinde DRI değerlerine göre marn kayacının delinebilirliğinin kireçtaşından daha yüksek olduğunu gözlemlemiş ve DRI yükseldikçe pasa irilik katsayısının da yükseldiğini ifade etmiştir. Çapık [3], yapmış olduğu çalışmada kayaç delinebilirliği ile mekanik özellikleri arasında ters yönlü bir ilişki olduğunu belirtmiştir.

Bu çalışma kapsamında kaya özellikleri ile delinebilirlik arasındaki ilişkileri irdelemek amacıyla 6 farklı maden ocağındaki (4 adet kalker, 1 adet kil ve 1 adet feldspat ocağı) delme-patlatma çalışmaları sırasında patlatma delikleri delinirken yerinde net ve brüt delme hızları ölçülmüştür. Yine bu deliklerin delinmesi sırasında deliklerden çıkan kırıntılardan ve kaya kütlesini temsil eden bölgelerden blok numuneler alınarak laboratuvar deneylerine (pasa irilik katsayısı, tek eksenli basınç dayanımı, indirek çekme dayanımı, birim hacim ağırlık, porozite, sismik hız, kırılgenlik ve sievers minyatür delme deneyleri) tabi tutulmuştur. Hem arazi verileri hem de laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek kaya özellikleri ile delinebilirlik arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak irdelemiştir.

2 Materyal ve yöntem

Çalışma kapsamında Tablo 1'de belirtilen 6 farklı açık maden ocağında (4 adet kalker, 1 adet kil ve 1 adet feldspat ocağı) yerinde delme ölçümleri yapılmış ve bu bölgelerden numuneler alınarak bu numuneler üzerinde laboratuvarında kaya mekaniği ve delinebilirlik deneyleri yapılmıştır.

Tablo 1: Delme çalışmalarının yapıldığı ve numunelerin alındığı maden ocakları.

Kayaç Kodu	Kayaç Türü	Yeri
K1	Kireçtaşı	Isparta-Bozanönü
K2	Kireçtaşı	Isparta-Güneykent
K3	Kireçtaşı	Isparta-Güneykent
K4	Kireçtaşı	Isparta-Eğirdir
M	Marn	Burdur-Bucak
G	Gnays	Aydın-Çine

2.1 Delme hızlarının belirlenmesi

Maden ocaklarında üretim amaçlı patlatma delikleri delinirken delme hızlarının yerinde belirlenebilmesi için kronometre yardımıyla delme işlemleri sırasında iki farklı süre ölçülmüştür. Birinci süre ölçümü bir delikte delme işleminin başlangıç ve bitiş zamanı arasındaki farkı gösterirken diğeri ise o delikte tabancanın iş yaptığı yani delicinin net çalıştığı toplam süreyi göstermektedir. İki ayrı zamanın tutulmasının nedeni, toplam delik süresi içinde hem delme işi yapılmakta hem de deliğin temizleme işi de yapılmaktadır. Bu nedenle, net delik delme süresi içinde deliğin temizleme zamanı göz ardı edilip sadece tabancanın iş yaptığı süre dikkate alınmıştır. Bu süreler ve delik boyu kullanılarak Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 ile net ve brüt delme hızları hesaplanmıştır.

$$PR_{net} = H/t_{net} \quad (1)$$

$$PR_{brüt} = H/t_{brüt} \quad (2)$$

Burada; PR_{net} , net delik delme hızını (m/dk.), $PR_{brüt}$, brüt delik delme hızını (m/dk.), t_{net} , net delik delme süresini (dk.), $t_{brüt}$, bir delikte delme işlemi başlangıç-bitiş arasında geçen süreyi (dk.) ve H ise delik boyunu (m) ifade etmektedir. Arazi üzerinde performans ölçümü yapılan 154 delikte toplam 1067 m delik delinmiş ve delik boyları ile delme hızları Tablo 2'de verilmiştir. Brüt delme hızı hesaplanırken delme işlemi toplam süresine tijlerin takma süreleri ve delik temizleme süreleri dahil edilirken net delme hızı hesaplamasında ise sadece delmeye harcanan süre dikkate alınmıştır.

Tablo 2: Arazide ölçülen net ve brüt delme hızları ve pasa irilik katsayısı değerleri.

Kayaç Kodu	Delik Sayısı	Toplam Delik Boyu m	PR _{brüt} m/dk.	PR _{net} m/dk.	PİK
K1	10	175	1.23±0.09	1.43±0.12	364
K2	21	168	1.10±0.06	1.26±0.11	442
K3	25	167	1.42±0.17	1.55±0.20	349
K4	47	233	1.57±0.31	1.64±0.31	380
M	15	216	1.52±0.06	2.01±0.09	444
G	36	108	2.60±0.89	2.62±0.89	224

Altı farklı ocakta yapılan delme işlemlerinde, delici makinenin etkisini ortadan kaldırmak için çalışma parametreleri (darbe miktarı, baskı kuvveti, dönme hızı ve hava miktarları) kabin içindeki kontrol ünitelerinden sabit tutulmuştur. Böylece makineye bağlı çalışma parametreleri açısından her bir delme işleminde aynı koşullar sağlanmıştır. Ayrıca delici ucun etkisini ortadan kaldırmak adına da yeni bir delici uç (89 mm çapta balistik butonlu drop center) alınmış ve her bir delme işleminde aynı uç kullanılmıştır.

Kazı mekaniği çalışmalarında pasanın tane boyut dağılımının belirlenmesinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi pasa

irilik katsayısının (PİK) belirlenmesidir. PİK birimsiz bir sayıdır ve kazılan malzemenin tane boyut dağılımının hesaplanmasıyla bulunmaktadır [8]. Kazılan malzeme belirli bir elek serisinden elenmektedir ve elek üstü malzeme miktarlarının toplamı pasa irilik katsayısını vermektedir. Kullanılacak elek serisinin boyutları kazılan pasanın durumuna göre belirlenmektedir [9]. Pasa irilik katsayısını hesaplamak için araziden alınan kırıntı numuneler, numune azaltma işlemi yapıldıktan sonra 6.7, 2.8, 1.18, 0.6, 0.3, 0.15 mm boyutlarında elekler kullanılarak eleme yapılmıştır. Eleme işlemi, bir elek sarsma makinası ile her numune için 10 dakika boyunca farklı frekanslarda yapılmıştır. Eleme yapıldıktan sonra elek üstleri tartılarak yüzdece ağırlıkları bulunmuş ve her bir yüzde elek üstü değerleri toplanarak Pasa irilik katsayısı (PİK) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 2).

2.2 Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Arazi çalışmaları sırasında kaya kütlelerini temsil eden şekilsiz kayalardan örnekler alınarak Uluslararası Kaya Mekaniği Derneğinin (ISRM) [10] önerdiği geometrilerde numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik özellikleri belirleme deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda numunelerin, birim hacim ağırlığı, görünür porozitesi, P-dalga hızı, tek eksenli basınç dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur. Ayrıca kayaç gevrekliği (β) olarak tanımlanan tek eksenli basınç dayanımının ve Brazilian çekme dayanımına oranı [11] da hesaplanmıştır.

Tablo 3: Numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

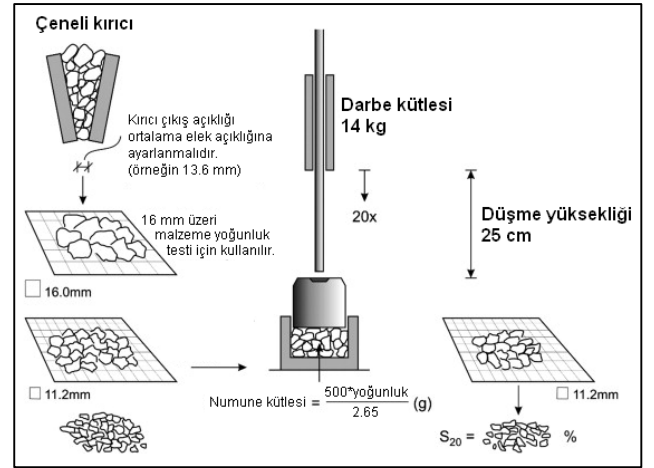
Kayaç Kodu	BHA g/cm ³	GP %	Vp km/s	TEBD MPa	BÇD MPa	β
K1	2.694	0.483	6.30	125.9	7.2	17.5
K2	2.686	0.538	6.22	46.8	9.5	4.9
K3	2.674	0.724	6.02	65.8	7.2	9.1
K4	2.613	1.885	5.90	87.7	8.0	11.0
M	2.399	-	3.25	49.5	13.5	3.7
G	2.553	3.041	1.35	79.4	2.5	31.7

BHA: Birim hacim ağırlık, GP: Görünür porozite, Vp: P-dalga hızı, TEBD: Tek eksenli basınç dayanımı, BÇD: Brazilian çekme dayanımı, β : Kayaç gevrekliği (TEBD/BÇD).

2.3 Delme oranı indeksinin belirlenmesi

Delinebilirlik için kullanılan bir indeks olan delme oranı indeksi (DRI) delici makinaların performans tayininde ve delinecek olan kayanın dayanımı hakkında yaklaşımda bulunmak için geliştirilmiştir. DRI, iki temel laboratuvar deneyine bağlı olarak belirlenmektedir. Bunlardan biri kırılma deneyi (brittleness test, S_{20}) ve diğeri ise Sievers minyatür delme deneyi (Sievers miniature drill-test value, S_j)'dir [12].

Kırılma (S_{20}) değerinin belirlenebilmesi için numuneler çeneli kırıcıdan kırıldıktan sonra elek açıklığı 16.0 ve 11.2 mm olan eleklerden elenerek 16.0-11.2 mm tane boyutu aralığında malzemeden 2.65 g/cm³ yoğunluktaki malzeme için 500 g'a karşılık gelen aynı hacimdeki örnek kütlesi bir havan içine konulur. 25 cm yükseklikten 14 kg ağırlığındaki çekiç havan içindeki malzemeye 20 kez düşürülür. Havan içindeki malzeme elek açıklığı 11.2 mm olan elekten tekrar elenir. Elekten geçen malzeme miktarı, deneyin başında havan içine konulan malzeme miktarına ağırlıkça oranlanır. Yüzde olarak bulunan değer kayanın S_{20} değeridir (Şekil 2).



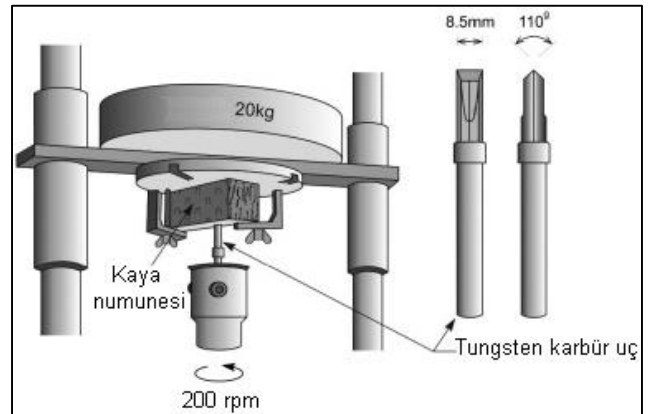
Şekil 2: Kırılma (S_{20}) deneyi şematik görünümü [13].

Bir kayanın S_{20} değeri, aynı koşullarda 3-5 kez tekrar sonucu elde edilen değerlerin ortalaması olarak bulunur [13]. Bulunan sonuçlar Tablo 4'teki sınıflandırmaya göre değerlendirilir. Bu sınıflama Dahl ve diğ. [14] tarafından kaya kırılma kabiliyetini sınıflandırılması veya tekrarlanan etkilerle ezilme kabiliyeti olarak önerilmiştir.

Tablo 4: Kırılma (S_{20}) indeksi sınıflandırması [14].

Sınıf	S_{20} Değeri
Oldukça Düşük	≤ 29.0
Çok Düşük	29.1-34.9
Düşük	35.0-40.9
Orta	41.0-50.9
Yüksek	51.0-59.9
Çok Yüksek	60.0-65.9
Oldukça Yüksek	≥ 66.0

Kayanın Sievers minyatür delme (S_j) değeri ise özel bir matkap 20 kg'lık yük altında dakikada 200 devir yaptırılarak bir dakika boyunca kayayı delmesi sağlanarak ve oluşan deliklerin delik boyları kumpas yardımıyla 1/10 mm olarak ölçülerek belirlenir (Şekil 3). Deneyde, delme işlemi her kaya örneği için 4 ile 8 kez tekrarlanarak ve elde edilen ölçüm değerlerin ortalaması alınarak S_j değeri tanımlanır [13].



Şekil 3: Sievers minyatür delme deneyi şematik görünümü [14].

Sievers minyatür delme değeri (S_j), Dahl ve diğ. [14] tarafından ilerlemeye karşı direnç olarak önerilmiş ve kaya yüzeyinin sertliği olarak bir sınıflama tanımlanmıştır (Tablo 5).

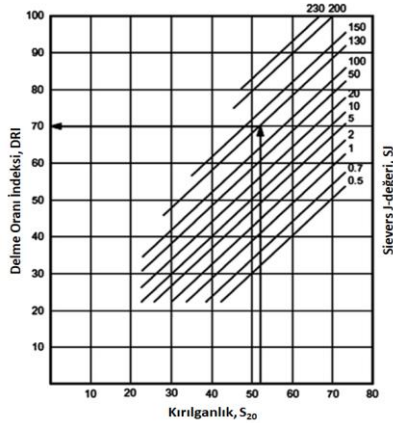
Tablo 5: Kayaç yüzey sertlik (Sj) sınıflandırılması [14].

Sınıf	Sj Değeri
Oldukça Yüksek	≤ 2.0
Çok Yüksek	2.0-3.9
Yüksek	4.0-6.9
Orta	7.0-18.9
Düşük	19.0-55.9
Çok Düşük	56.0-85.9
Oldukça Düşük	≥ 86.0

Kayaların delme oranı indeksi (DRI), Sievers minyatür delme (Sj) değeri ve kırılmalık (S_{20}) değeri yapıldıktan sonra sonuçlarının Şekil 4'te bulunan abakta kesleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu şekilde belirlenen DRI değerleri Tablo 6'da verilen sınıflamaya göre delinebilirlik açısından sınıflandırılmaktadır.

Tablo 6: DRI sınıflandırması [13].

Sınıf	DRI Değeri
Aşırı Düşük	≤ 25
Çok Düşük	26-32
Düşük	33-42
Orta	43-57
Yüksek	58-69
Çok Yüksek	70-82
Aşırı Yüksek	≥ 83



Şekil 4: DRI'nin tayini için kullanılan diyagram [13].

Çalışmada kullanılan kayaların laboratuvar ortamında delinebilirliğini belirleyebilmek için yukarıda belirtilen prensipler çerçevesinde S_{20} ve Sj deneyleri yapılmış, Şekil 4'te verilen abakta bu değerler kesleştirilerek kayaların DRI değerleri belirlenmiş ve Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7: Çalışmada kullanılan kayaların laboratuvarında belirlenen delinebilirlik özellikleri.

Kayaç Kodu	S_{20} %	Sj mm/10	DRI
K1	39.71	71.7	50.5
K2	41.47	64.4	51.5
K3	42.72	71.4	52.5
K4	45.41	57.7	54.5
M	48.32	86.1	59.5
G	77.14	12.9	79.0

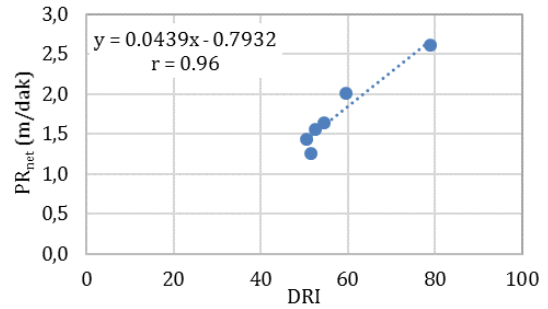
S_{20} sınıflandırmasına göre çalışmada kullanılan kayalardan K1 ve K2'nin düşük, K3, K4 ve M'nin orta sınıfta, G kayacının yüksek sınıfta yer aldığı görülmüştür. Sj yüzey sertlik sınıflandırmasına göre marn kayacının oldukça düşük sınıfta, kireçtaşlarının çok düşük sınıfta ve gnays kayacının orta sınıfta

yer aldığı belirlenmiştir. DRI sınıflandırmasına göre ise çalışmada kullanılan kayalardan kireçtaşlarının orta sınıfta, marn kayacının yüksek sınıfta ve gnays kayacının ise çok yüksek DRI sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir.

3 İstatistiksel değerlendirmeler

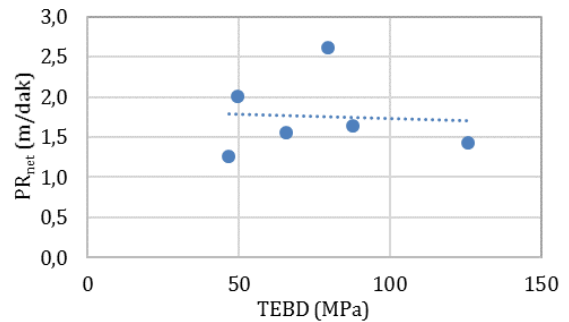
Bu çalışma kapsamında incelenen kayaların yerinde delme hızları, fiziksel ve mekanik özellikleri, laboratuvar ortamında belirlenen delinebilirlik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiş ve elde edilen verilerin değerlendirmesi aşağıda sunulmuştur. Değerlendirmelerde operatör etkisini ortadan kaldırmak adına sadece PR_{net} değerleri dikkate alınmıştır.

Kayaçların delinebilirliğini gösteren, kırılmalık (S_{20}) ve Sievers minyatür delme (Sj) deneylerinden belirlenen delme oranı indeksi (DRI) ile arazide yerinde yapılan delme işlemlerinde yapılan ölçümlerden elde edilen net delme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekilde kayaların DRI değerleri arttıkça delme işlemlerindeki net ilerleme hızları da lineer bir şekilde arttığı $r=0.96$ gibi yüksek bir korelasyon değerleri ile görülmüştür. Bu durum DRI'nin delme hızı tahmininde kullanılabilir önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Özacar [15], döner (rotary) sondajlarda DRI ile net ilerleme hızı arasında benzer sonuçlar elde etmiştir.

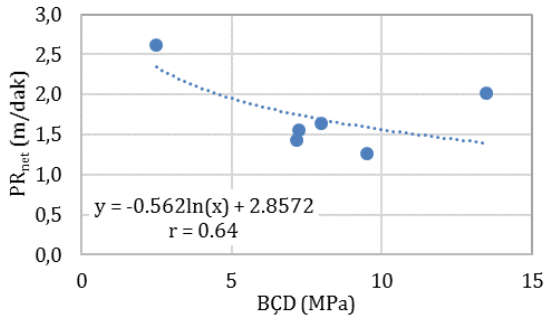


Şekil 5: PR_{net} ile DRI arasındaki ilişki.

Literatür incelendiğinde, tek eksenli basınç dayanımı (TEBD), delinebilirlik tahminine yönelik yapılan modellerde en çok kullanılan parametre olarak dikkate alınmaktadır [16]. Fakat bu çalışmada, TEBD ile net ilerleme hızı değerleri değeri arasında herhangi bir anlamlı sonuç bulunamamıştır (Şekil 6). Brazilian çekme dayanımı (BÇD) ile net ilerleme hızı değerleri arasındaki ilişki Şekil 7'de gösterilmiştir. Buna göre, kayaların BÇD değerleri arttıkça delme işlemlerindeki ilerleme hızı logaritmik bir şekilde azaldığı $r=0.64$ gibi anlamlı bir korelasyon değeri ile gözlemlenmiştir. Kayacın çekme dayanımı arttıkça, delici ucun kayaçtan parça koparma yeteneği azalacağı, kayacın buna direnç göstereceği ve dolayısıyla matkabın ilerleme hızında bir düşüşe neden olacağı düşünülmektedir.

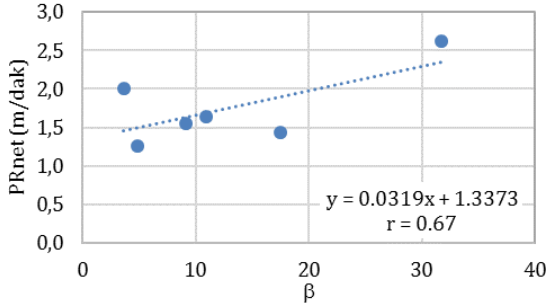


Şekil 6: PR_{net} ile TEBD arasındaki ilişki.



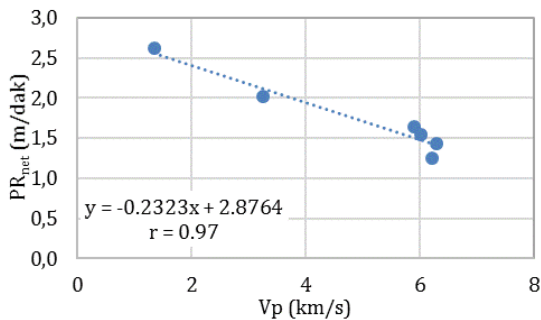
Şekil 7: PR_{net} ile BCD arasındaki ilişki.

Literatürde çok farklı gevreklik (β) tanımlaması bulunmakta olup sıklıkla basınç ve çekme dayanımının oranı kayaç gevrekliği olarak kullanılmaktadır [11]. Bu değerin yüksek olması o kayacın daha gevrek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Kayaç gevrekliğinin yüksek olması aynı zamanda kayacın kırılğan bir yapıya sahip olduğunu ifade etmektedir. Delme hızı ile kayaç gevrekliği arasında yüksek korelasyonlu doğrusal artan bir ilişki tespit edilmiştir (Şekil 8).



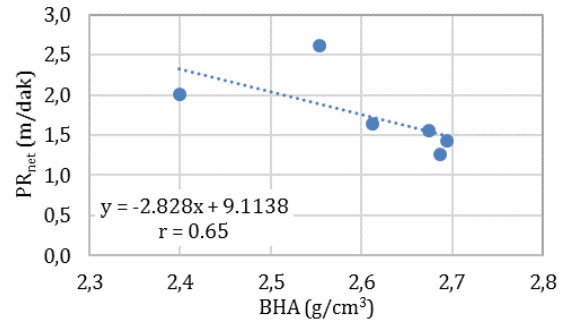
Şekil 8: PR_{net} ile β arasındaki ilişki.

Kayaçların P-dalga hızı (ultrases geçiş hızı, V_p) arttıkça net delme hızlarının en yüksek korelasyon katsayılı doğrusal bir ilişki ile azaldığı belirlenmiştir (Şekil 9). Kayaçlarda, P-dalga hızı değerinin artması ile kayaç içerisindeki porozitenin ve kırık-çatlakların azaldığı anlamına gelip net delme hızını düşürmektedir.

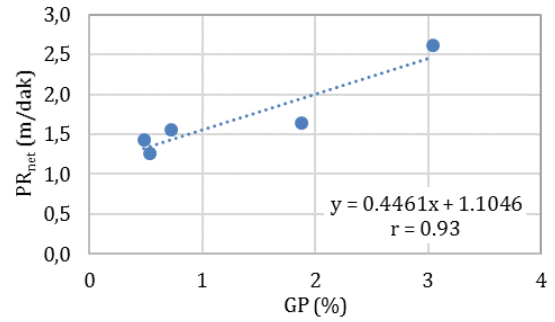


Şekil 9: PR_{net} ile V_p arasındaki ilişki.

Birim hacim ağırlık (BHA) ile net delme hızı ilişkisi Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre BHA ile PR_{net} arasında doğrusal olarak azalan anlamlı bir ilişki gözlemlenmiştir. Benzer şekilde görünür porozite değeri arttıkça net ilerleme hızı da Şekil 11'de görüldüğü gibi $r=0.93$ gibi güçlü bir korelasyon ile doğrusal olarak artmaktadır. Kayalarda porozitenin yüksek olması, delme işleminde darbe ile çatlak oluşumuna olumlu etki ettiği ve buna bağlı olarak kayaçtan parça koparılmasını artırdığı böylece delme hızını da artırdığı düşünülmektedir.



Şekil 10: PR_{net} ile BHA arasındaki ilişki.



Şekil 11: PR_{net} ile GP arasındaki ilişki.

4 Sonuçlar

Delme-patlatma ile üretim yapılan açık işletmelerde delici makinanın delme hızlarının belirlenmesi amacıyla çalışma kapsamında altı farklı maden ocağında (farklı dayanıma sahip 4 kireçtaşı, marn ve gnays) yerinde ölçümler yapılmıştır. Arazi üzerinde toplamda 154 delikte ve 1067 m uzunlukta patlatma deliklerinden performans ölçümleri alınmış olup en yüksek delme hızlarına gnays ocağında ($PR_{net}=2.62$ m/dk.), en düşük delme hızlarına ise K2 kodlu kireçtaşı ocağında ($PR_{net}=1.26$ m/dk.) ulaşılmıştır.

Delme hızı belirleme çalışması yapılan maden ocaklarından alınan örnekler üzerinde kırılğanlık (S_{20}) ve Sievers minyatür delme (S_j) deneyleri yapılmış ve kayaçların delme oranı indeksi (DRI) değerleri belirlenmiştir. Buna göre en yüksek DRI değeri gnays kayacında (79.0) belirlenirken en düşük DRI değeri ise K1 kodlu kireçtaşında (50.5) tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, laboratuvar ortamında belirlenen delme oranı indeksi değerlerinin darbeli delme çalışmalarında ilerleme oranının tahmin edilmesinde güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Çalışmada kullanılan kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Buna göre, gnays kayacında en yüksek görünür porozite ve en düşük sismik hız değerleri gözlenirken, K1 kodlu kireçtaşında en düşük görünür porozite ve en yüksek sismik hız değeri belirlenmiştir. Kayaç bünyesindeki boşlukların göstergesi olan görünür gözeneklilik ve kırık-çatlakların göstergesi olan sismik hızın, delme işleminde ilerleme hızının değerlendirilmesinde kullanılabileceği görülmüştür.

Pasa irilik katsayısı ($PİK$), delme işlemi sırasında kayaçtan kopartılan kırıntıların boyutunun bir ölçüsü olarak delme işleminin performansının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan kayaçlardan gnays oldukça gevrek bir yapıya sahip olması nedeniyle delme hızının yüksek çıkmasına ve aynı zamanda delme işlemi sırasında çok fazla miktarda ince kırıntı çıkmasına sebep olmaktadır.

Kayaç gevrekliği (UCS/BTS) ile delme hızı arasında yüksek korelasyonlu doğrusal bir ilişki elde edilmiş ve kayaç gevrekliğinin de delme işlemlerinin değerlendirilmesinde kullanılabileceği görülmüştür.

5 Kaynaklar

- [1] Thuro K, Spaun G. *Introducing the 'Destruction Work' As a New Rock Property of Toughness Referring to Drillability in Conventional Drill and Blast Tunnelling*. Editor: Barla M. Proceedings of the Eurock'96, Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, 707-713, 1996.
- [2] Plinninger RJ, Spaun G, Thuro K. "Prediction and classification of tool wear in drill and blast tunneling". *Proceedings 9th International IAEG Congress*, Durban, South Africa, 16-20 September 2002.
- [3] Çapık M. Cankurtaran ve Salmankaş Tünellerindeki Kayaçların Delinebilirlik, Aşındırıcılık, Mekanik ve Petrografik Özelliklerinin Araştırılması, Net Delme Hızı ve Bit Tüketimi ile İlişkilendirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye, 2014.
- [4] Karaman E. Sert Kayaçalarda Delinebilirlik Tayini. Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, Türkiye, 2008.
- [5] Ekincioglu G. Çeşitli Kireçtaşlarının Delinebilirlik İndeks Özellikleri ve Kayaç Kesilebilirliği Arasındaki İlişkilerin Değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, Türkiye, 2008.
- [6] Kandemir A. Kayaçların Delinebilirlik, Aşındırıcılık ve Petrografik Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak, Türkiye, 2010.
- [7] Koçcaz CE. Göлтаş (Isparta) Kireçtaşı Ocağında Darbeli Delme Performans Analizi ve Uygun Uç Seçimi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, Türkiye, 2013.
- [8] Roxborough F, Rispin A. "The mechanical cutting characteristics of the lower chalk". *Tunnels and Tunnelling International*, 5(1), 45-67, 1973.
- [9] Kahraman S, Bilgin N, Feridunoğlu C. "Dominant rock properties affecting penetration rate of percussive drills". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 711-723, 2003.
- [10] Ulusay R, Hudson JA. *The Complete ISRM Suggested Methods from Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1997-2006*. Ankara, Turkey, ISRM Turkish National Group, 2007.
- [11] Hucka V, Das B. "Brittleness determination of rocks by different methods". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11, 389-392, 1974.
- [12] Tamrock. *Handbook on Surface Drilling and Blasting*, Painofaktorit. Finland, Division of Tampella Ltd. 1984.
- [13] Dahl F. *DRI, BWI, CLI Standarts*, NTNU Angleggsdrift, Trondheim, Norway, 2003.
- [14] Dahl F, Bruland A, Jakobsen PD, Nilsen B, Grøv E. "Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 150-158, 2012.
- [15] Özacar V. Rotary Sondajlarda Delinebilirliği Etkileyen Faktörlerin Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Doktora Tezi, İzmir, Türkiye, 2016.
- [16] Bilim N, Dünder S, Dursun AE, Kekeç B. "Döner delme sistemi için geliştirilen delinebilirlik tahmin modelleri". *Uluslararası Karadeniz Madencilik ve Tünelcilik Sempozyumu*, Trabzon, Türkiye, 2-4 Kasım 2016.