

An Assessment for the Penetration Rates of Intrusive Magmatic Rocks by using the Direct Rotary and Percussive Drilling Methods According to the Mineral Contents and Densities

Ebubekir Kilic
Programme of Geotechnics, Department of Civil,
Keban Vocational School, Keban / Elazig, Turkey
E-mail: e.kilic@firat.edu.tr

Abstract

Intrusive igneous rocks make up about 95% of the Earth's crust. These rocks are frequently encountered on the foundations of engineering projects such as dams, tunnels, roads, nuclear plants, solid waste repositories, in searching water, mine and oil, and working search and rescue. The aim of this study is the assessment of penetration rates of the granite, diorite, gabbro and peridotite rocks by rotary and percussive drilling methods according to the mineral contents and densities. In this study, the average Mohs hardness, Vicker hardness numbers (VHN) and densities of the rocks obtained by using their primary minerals volumetric rates were used in calculations of penetration rates of intrusive igneous rocks. The highest average Mohs hardness and density values were determined in peridotite, gabbro, diorite and granite rocks, respectively. The highest average Vicker hardness numbers were also determined in peridotite, granite, gabbro and diorite rocks, respectively. It was determined that Vicker hardness numbers increased in rocks with increased quartz and olivine content, so their penetration rates decreased by percussive and rotary drilling methods. The drillability of the rocks was revealed to be inversely proportional to their VHN and densities by both drilling methods. In conclusion, it was determined that the penetration rates of the rocks by both drilling methods were decreased in peridotite, gabbro, diorite and granite, respectively, and penetration rate by percussive drilling method was about 5 times higher than by rotary drilling method. It was assessed that the drilling these rocks by percussive drilling method was more efficient and economical than by rotary drilling method due to the high penetration rate and low risk of drill equipment breaking, when the rocks do not weather. It was also determined that the penetration rate obtained by taking cores from the rocks in rotary drilling was lower than by percussive and uncore rotary drilling methods.

Keywords: Density, penetration rate, hardness, igneous rock, percussive drilling, direct rotary drilling.

Mineral İçeriğine ve Yoğunluğuna Göre Magmatik Derinlik Kayaçlarının Düz Dolaşımli Döner ve Darbeli Sondaj Yöntemleriyle Delinebilirlik Oranının Değerlendirilmesi

Özet

Magmatik derinlik kayaçları, yer kabuğunun yaklaşık %95'ini oluşturmaktadır. Bu kayaçlara genellikle baraj, tünel, yol, nükleer santral ve katı atık depoları gibi mühendislik projelerinin temelinde, su, maden ve petrol aramalarında ve arama kurtarma çalışmalarında sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, granit, diyorit, gabro ve peridotit magmatik derinlik kayaçların mineral içeriklerine ve yoğunluklarına göre düz dolaşımli döner ve darbeli sondaj yöntemleriyle delinebilirlik oranlarının değerlendirilmesidir. Magmatik derinlik kayaçların delinebilirlik oranının hesaplanmasında, kayaçların

birincil minerallerinin hacimsel oranları kullanılarak elde edilen ortalama Mohs sertlikleri, Vicker sertlik sayıları ve yoğunlukları kullanıldı. En yüksek ortalama Mohs sertliği ve yoğunluk değerleri sırasıyla peridotit, gabro, diyorit ve granit kayaçlarında belirlendi. En yüksek ortalama Vicker sertlik sayıları da sırasıyla peridotit, granit, gabro ve diyoritte belirlendi. Kuvars ve olivin içeriği artan kayaçların Vicker sertlik sayılarının da arttığı, dolayısıyla darbeli ve döner sondaj yöntemleri ile delinebilirlik oranının azaldığı tespit edildi. Bu kayaçların delinebilirlik oranının, her iki sondaj yönteminde de VHN ve yoğunluk değerleriyle ters orantılı olduğu belirlendi. Sonuç olarak, kayaçların delinebilirlik oranının darbeli ve döner sondaj yöntemlerinde granit, diyorit, gabro ve peridotite doğru düşüş gösterdiği, delinebilirlik oranının ise darbeli sondaj yönteminde döner sondaj yöntemine göre yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu saptandı. Delinebilirlik oranının yüksek olması ve delme takımlarının kırılma riski düşük olduğundan dolayı, darbeli sondaj yöntemiyle bu kayaçları delmenin, kayaçlar ayrışmadığı sürece döner sondaj yöntemiyle delmekten daha verimli ve ekonomik olduğu değerlendirildi. Döner sondajda kayaçlardan karot alınarak elde edilen delinebilirlik oranlarının, darbeli ve karotsuz döner sondaj yöntemlerindeki delinebilirlik oranlarından daha düşük olduğu saptandı.

Anahtar Kelimeler: Yoğunluk, delinebilme oranı, sertlik, magmatik derinlik kayaç, darbeli sondaj, düz dolaşimli döner sondaj.

1. Giriş

Bir kayacın delinebilirlik oranı, genellikle kayacın delinebilirliği ile benzer bir terim olarak kullanılmaktadır. Kayaçların delinebilirlik oranı, nin hızlı veya yavaş olduğunu gösterirken, delinebilirlik delinmenin kolaylığını veya zorluğunu göstermektedir (Altındag 2004; Ataei ve ark. 2015). Su, petrol, jeoteknik ve maden sondajı çalışmalarında kayaçların kütle kalitesi ve mineral içeriği, kayaçların delinebilirlik oranının belirlenmesinde önemlidir. Gong ve Zhao (2009), kayaç kütle kalitesinin artışının genellikle kayaçların delinebilirlik oranını düşürdüğünü, buna karşın kayaç kütle kalitesinin düşüşünün de delinmeyi kolaylaştırmadığını belirtmektedir. Kayaçların delinmesinde kayaç kütle kalitesinin fiziksel (doku ve tane boyu gibi) ve dayanım (tek eksenli basınç dayanımı ve Mohs sertliği gibi) parametrelerinin, kayaç kütle kalitesinin yapısal parametrelerinden (eklem aralığı, çatlak dolgusu ve çatlak durumu gibi) daha önemli olduğu belirtilmektedir (Hoseinie ve ark. 2008). Sondajlarda toplam maliyet tahmini ve sondaj işlemlerinin planlanması, kayaçlarda delinebilirlik oranının belirlenmesine bağlıdır (Kahraman 1999; Ataei ve ark. 2015). Ayrıca, kayacın delinebilirlik oranının artırılması sondaj maliyetlerini düşürebilmektedir.

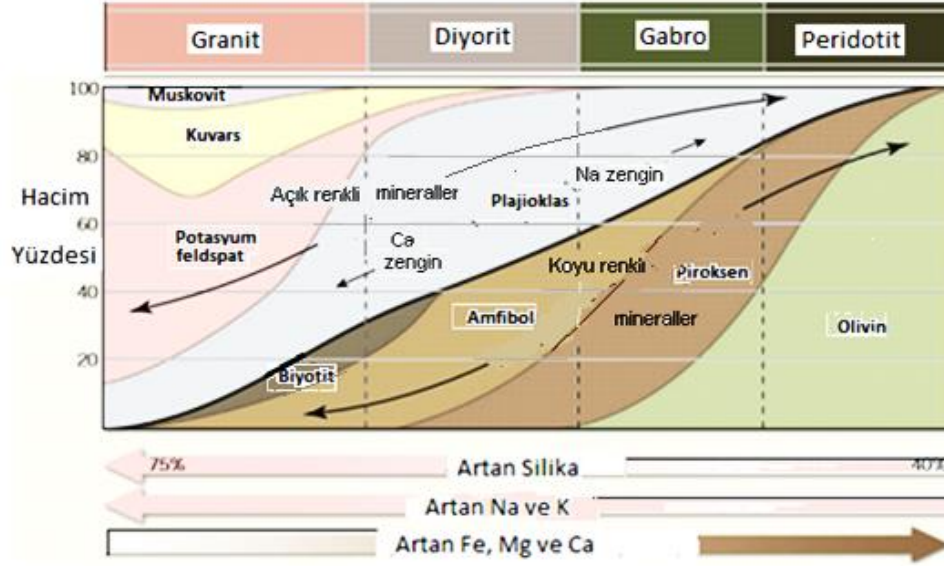
Kayaçlarda sondaj işlemi, çok sert kayaçlarda döner ve darbeli yöntemlerle, orta sert kayaçlarda dönme ve ezme yöntemiyle, yumuşak kayaçlarda ise kesme yöntemiyle gerçekleştirilmektedir (Beste ve ark. 2008). Kayaçların özellikleri ile delinebilirliği arasında sıkı bir ilişkinin bulunduğu ve kayaçların kütle kalitesinin, içerdiği minerallerin ve uygulanan sondaj yöntemlerin, kayaçların delinebilirliğini önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir (Howarth & Rowlands 1987; Kahraman 1999; Kahraman ve ark. 2003; Hoseinie ve ark. 2008). Kayaçların delinebilirlik oranları, jeolojik parametreler (kayacın kökeni, Mohs sertliği, süreksizlikleri, mineral içeriği ve dokusu, çekme dayanımı), makine parametreleri (sondaj makinesi çeşidi, matkap tipi ve çapı, devir sayısı, uygulanan baskı kuvveti ve ağırlık, darbe sayısı) ve sondaj süreci işlemlerinden (delme metodu, makinanın çalıştırılması ve bakımı, sondörün tecrübesi vb.) etkilenmektedir (Bilgesu ve ark. 1997; Kahraman 1999; Tuğrul & Zarif 1999; Altındag, 2004; Hoseinie ve ark. 2008; Gong & Zhao 2009). Magmatik kayaçlarda yüksek doku katsayıları ve dayanımdan dolayı delinebilirlik oranı düşüktür (Howarth & Rowlands 1987). Bu kayaçlarda tane boyu arttıkça kayaç dayanımı azalırken, tane boyu küçüldükçe ve kuvars yüzdesi arttıkça kayaçların dayanımı artmaktadır (Yusof & Zabidi 2016).

Bu çalışmada darbeli ve döner sondaj metotlarıyla sert veya çok sert magmatik derinlik kayaçlar olan granit (G), diyorit (D), gabro (GB) ve peridotitin (P) içerdikleri minerallere ve bunların hacimsel yüzdelere göre Mohs ve Vickers sertlikleri (Vicker Hardnes Number, VHN) ve yoğunlukları kullanılarak delinebilme oranlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Magmatik derinlik kayaçlar olan granit (G), diyorit (D), gabro (GB) ve peridotitin (P) içerdiği minerallere göre sınıflandırılması Şekil 1 (Tarbuck & Lutgens 2014) kullanılarak kayaçların ana mineral hacimsel yüzdeleri belirlenerek yapılmıştır. Bu kayaçlardaki ana minerallerin sertlikleri ve yoğunlukları Mathewson'dan (1981) alınmış olup, ortalama Mohs sertlikleri, Vicker sertlikleri ve ortalama yoğunlukları, Microsoft Excel programında formüller yazılarak bulunmuştur. Kayaçların mekanik özelliklerinden UCS (tek eksenli basınç direnci) değerleri, Heiniö (1999) ve Waltham'dan

(2009) alınmıştır. Darbeli sondajlar için delinebilirlik oranı ve birim zamanda ekonomik olarak delinme derinliği (m), deneysel olarak Huang & Wang (1997) ve Kahraman (1999) tarafından elde edilen formüllerden yararlanılarak Excel programıyla hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Excel programıyla grafik haline dönüştürülmüş ve bu grafikler karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Kayaçların mineral içerikleri ve yüzdesi (Tarbuck & Lutgens, 2014)

3. Bulgular ve Tartışma

Magmatik derinlik kayaçlar, kayaç oluşturan alkali feldspat (ortoklas), plajiyoklas, kuvars, amfibol (hornblend), piroksen (ojit), mika (biotit, muskovit) ve olivin minerallerinden oluşmaktadır. En yaygın magmatik derinlik kayaçlarından olan granitler, iri taneli, holokristalin ve granüler dokuya sahip olup kuvars, alkali feldspat, amfibol, plajiyoklas ve mika ana minerallerinden oluşmuşlardır. Magmatik derinlik kayaçlardan diyoritler granüler dokulu ortaç kayaçlardır ve kuvars, alkali feldspat, plajiyoklas, amfibol, biyotit ve piroksen içerirler. Gabrolar, subhedral veya anhedral granüler dokulu bazik magmatik derinlik kayaçlardır ve piroksen, plajiyoklas, amfibol ve olivinden oluşurlar. Peridotitler de ultrabazik magmatik derinlik kayaçlar olup plajiyoklas, piroksen ve olivin içerirler (Tarbuck & Lutgens 2014).

Yüksek dirençli kristallerin kenetlenmesi kayaçlarda yüksek bir dayanım oluşturmaktadır. Kayaçlarda mineral kristallerin kenetlenmesi boşluklar oluşturmadığından, gerilme-deformasyon ilişkisi elastiktir. Kayaca basınç uygulandığında minerallerindeki sertlik farkından dolayı kayaç plastik deformasyona uğrar (Mathewson 1981). Magmatik derinlik kayaçlarda tane büyüklüğü arttıkça kayaçların delinmeye karşı direnci azalmaktadır. Bu kayaçlarda Fe, Mg ve Ca mineralleri arttıkça ayrışma eğilimi de artmaktadır (Şekil 1). Bu kayaçlarda Fe-Mg'lu mineraller (olivin, piroksen, amfibol ve biyotit) koyu renkli ve nispeten yoğundur. Feldspat, kuvars mika gibi mineraller ise açık renkli ve daha az yoğundur. Yoğunluk, sırasıyla granit, diyorit, gabro ve peridotit kayaçlarına doğru gittikçe artış göstermekte ve renk koyulaşmaktadır (Tarbuck & Lutgens 2014). Şekil 1'de görülen her bir kayaca ait sütunun ortasından olmak üzere minerallerin düşey uzunluklarına göre kayaçların içerdiği minerallerin hacimsel yüzdesi ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 1). Sonra her bir kayacın içerdiği mineral türü, minerallerin yüzdeleri, minerallerin ve kayaçların Mohs sertlikleri, Vickers sertlik sayıları ve yoğunlukları, aşağıda verilen denklem 1 ve 2 kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 1, 2 ve 3).

Sondajın başarılı olması için seçilen makine (açabileceği azami delik çapı ve derinliği, delme hızı), uygun donanımlara, jeolojik koşullara ve kapasitesine göre çalıştırılmalıdır. Düz dolaşimli döner sondaj makineleri motorlar, vinç, dönme aletleri, döner matkaplar ve dolaşım sıvısı araçlarından oluşmaktadır. Sert kayaçların delinmesi işlemlerinde delme takımının uygun çekme, basınç ve akma direncinde olması gerekir. Aksi takdirde döner sondajın zayıf taraflarından biri olan takım kopmasının oluşması kaçınılmazdır. Döner sondajlar, konsolide kayaçları zayıf kısmından kırar ve küçük parçalara öğütür. Konsolide olmayan formasyonlarda ise kayaç bileşenlerini özellikle gevşetir. Darbeli sondajın aksine,

döner sondaj delme takımı kuyuda dönerek litolojiyi kesmektedir. Verimli bir kesme için dönmeye ek olarak düşey basınç uygulanmaktadır.

Döner sondaj için kullanılan donanımlar darbeli sondaj makineleri için de gereklidir. Kuyu içi pnömatik olarak çalışan darbeli matkaplar pahalı olmakla birlikte, delme verimliliğine sahiptir. Dolaşım sıvısı da, döner sondajda olduğu gibi düz olarak dolaşmaktadır. Ayrıca, dolaşım sıvısı ve matkap kompresörle, dönme hareketi de döner düzenek ile çalışmaktadır.

Kayaçların ortalama sertlikleri ve yoğunlukları aşağıdaki formüllerle bulunmuştur:

$$\sum_{i=1}^n A_i \times H_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i \times \sigma_i \quad (2)$$

Burada Σ , 1'den n'inci minerale kadar toplam sertlik veya yoğunluğu; A_i , mineral miktarını (%); H_i , i mineralinin Mohs sertliğini, σ_i , i mineralinin yoğunluğunu; n, kayaçtaki mineral sayısını göstermektedir.

Tablo 1. Magmatik derinlik kayaçların mineral içerikleri ve hacimsel yüzde miktarına göre Mohs sertlikleri

Mineral	Granit			Diyorit			Gabro			Peridotit		
	Ölçek A_i (cm)	H	ΣH	Ölçek A_i (cm)	H	ΣH	Ölçek A_i (cm)	H	ΣH	Ölçek A_i (cm)	H	ΣH
Amfibol	0,5	6	3	3,5	6	21	1	6	6	-	-	-
Piroksen	-	-	-	0,9	6	5,4	4,5	6	27	1,8	6	10,8
Biyotit	0,4	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plajiyoklas	2	6	12	4,9	6	29,4	2,7	6	16,2	0,7	6	4,2
Alkali Feldspat	4,1	6	24,6	0,3	6	1,8	-	-	-	-	-	-
Kuvars	2,2	7	15,4	0,1	7	0,7	-	-	-	-	-	-
Muskovit	0,5	2,5	1,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Olivin	-	-	-	-	-	-	1,5	6,5	9,75	7,2	6,5	46,8
Σ	9,7	-	57,3	9,7	-	58,3	9,7	-	58,95	9,7	-	61,8
Ortalama Sertlik	5,90			6,01			6,08			6,37		

Tablo 2. Mineral içerikleri ve miktarına göre kayaçların yoğunlukları

Mineral	Granit			Diyorit			Gabro			Peridotit		
	A_i (cm)	σ^*	$\Sigma \sigma$	A_i (cm)	σ^*	$\Sigma \sigma$	A_i (cm)	σ^*	$\Sigma \sigma$	A_i (cm)	σ^*	$\Sigma \sigma$
Amfibol	0,5	3,40	1,70	3,5	3,4	11,9	1	3,4	3,4	-	-	-
Piroksen	-	-	0,00	0,9	3,6	3,195	4,5	3,6	15,98	1,8	3,6	6,39
Biyotit	0,4	3,25	1,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plajiyoklas	2	2,76	5,52	4,9	2,76	13,52	2,7	2,76	7,452	0,7	2,76	1,932
Alkali Feldspat	4,1	2,56	10,50	0,3	2,56	0,768	-	-	-	-	-	-
Kuvars	2,2	2,65	5,83	0,1	2,65	0,265	-	-	-	-	-	-
Muskovit	0,5	2,80	1,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Olivin	-	-	-	-	-	-	1,5	4,4	6,585	7,2	4,4	31,608
Σ	9,7	-	26,25	9,7	-	29,65	9,7	-	33,41	9,7	-	39,93
Ortalama Yoğunluk	2,71			3,06			3,44			4,12		

*: σ değerleri Waltham'dan (2009) ve Mathewson'dan (1981) alınmıştır.

Tablo 3. Mineral içeriklerinin yüzdesine göre kayaların ortalama Vicker sertlik sayısı

Mineral	Granit			Diyorit			Gabro			Peridotit		
	A_f (cm)	VHN*	Σ VHN	A_f (cm)	VHN*	Σ VHN	A_f (cm)	VHN*	Σ VHN	A_f (cm)	VHN*	Σ VHN
Amfibol	0,5	600	300	3,5	600	2100	1	600	600	-	-	-
Piroksen	-	-	-	0,9	640	576	4,5	640	2880	1,8	640	1152
Biyotit	0,4	110	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plajjoklas	2	800	1600	4,9	800	3920	2,7	800	2160	0,7	800	560
Alkali Feldspat	4,1	730	2993	0,3	730	219	-	-	-	-	-	-
Kuvars	2,2	1060	2332	0,1	1060	1060	-	-	-	-	-	-
Muskovit	0,5	110	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Olivin	-	-	-	-	-	-	1,5	980	1470	7,2	980	7056
Σ	9,7	-	7324	9,7	-	6921	9,7	-	7110	9,7	-	8768
Ortalama VHN	755,05			713,51			732,99			903,92		

*: Minerallerin VHN değerleri Heiniö'den (1999) alınmıştır.

3.1 Darbeli sondaj ile delme

Söz konusu edilen kayalar için darbeli sondaj yöntemi ile delme oranı m/dk olarak Hoseinie ve ark.'nın (2012) laboratuvarında sert kayalar için $R^2 = 0,9751$ regresyonu ile elde ettiği

$$PR = (1,6962-02523H) \quad (3)$$

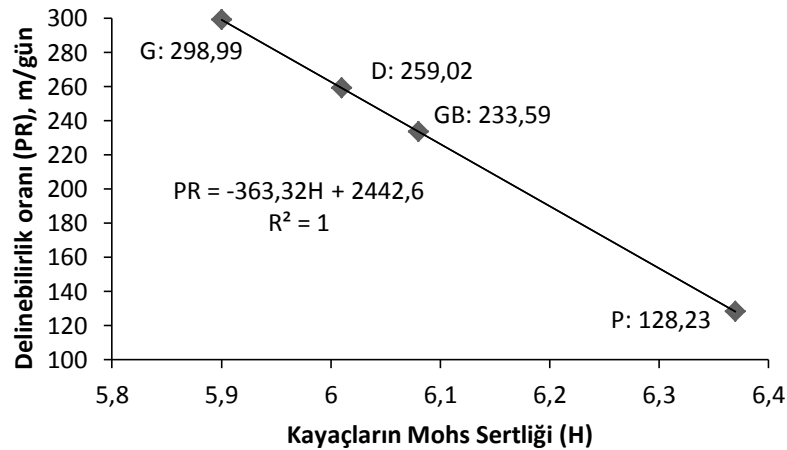
formülü m/güne değiştirilerek aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$PR = (1,6962-02523H) \times 1440 \quad (4)$$

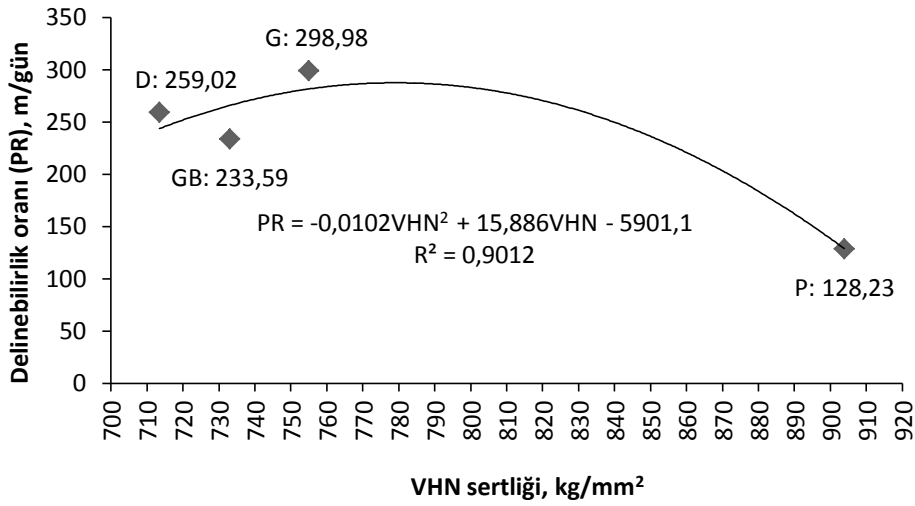
Burada PR delinebilirlik oranını (m/gün); H, kayacın ortalama Mohs sertliğini ifade etmektedir.

Granit (G) için, $PR = (1,6962-02523H) \times 1440 = (1,6962-02523 \times 5,90) \times 1440 = 298,98$ m/gün
Diyorit (D) için, $PR = (1,6962-02523H) \times 1440 = (1,6962-02523 \times 6,01) \times 1440 = 259,02$ m/gün
Gabro (GB) için, $PR = (1,6962-02523H) \times 1440 = (1,6962-02523 \times 6,08) \times 1440 = 233,59$ m/gün
Peridotit (P) için, $PR = (1,6962-02523H) \times 1440 = (1,6962-02523 \times 6,37) \times 1440 = 128,23$ m/gün.

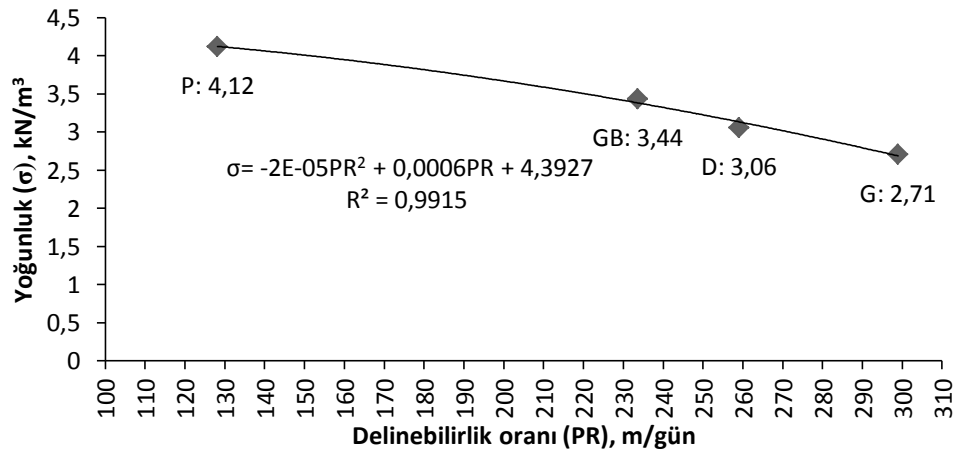
Bu denklemlere göre darbeli sondajda granit, diyorit, gabro ve peridotit kayalarında delinebilirlik oranının Mohs sertliğine göre sırasıyla azaldığı görülmüştür (Şekil 2). VHN ile kayaların delinebilirlik oranları arasındaki ilişki polinomal denklem şeklinde olup, yüksek bir regresyon katsayısı ($R^2 = 0,90$) olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Kayaların Mohs sertliklerini ve Vicker sertlik sayılarını kuvars ve olivin minerallerinin önemli derecede etkilediği söylenebilir (Tablo 1 ve 3). Kayaların hesaplanan yoğunlukları ile delinebilirlik oranları arasındaki ilişki da polinomal denklem halinde olup, regresyon katsayısı (R^2) 0,99 olarak bulunmuştur (Şekil 4).



Şekil 2. Magmatik derinlik kayaların Mohs sertliği ve darbeli sondajla delinebilirlik oranları arasındaki ilişki



Şekil 3. Darbeli sondajda VHN ile delinebilirlik oranları arasındaki ilişki



Şekil 4. Darbeli sondajda kayaların hesaplanan yoğunluğu ile delinebilirlik oranları arasındaki ilişki

3.2 Döner sondaj ile delme

Döner sondaj için karatsız döner sondaj ile delinebilirlik oranı (PR) için Kahraman (1999) tarafından

$$PR = 1,05 \times \frac{W^{0,824} RPM^{1,690}}{D^{2,321} \times \sigma_c^{0,610}} \quad (5)$$

förmülü bulunmuştur. Sondajlarda delinebilirlik oranının m/gün olarak alınması, uygulamada daha kullanışlı olduğundan, yukarıdaki formül m/saat yerine m/gün olarak aşağıdaki şekilde formüle edilebilir:

$$PR = 1,05 \times \frac{W^{0,824} RPM^{1,690}}{D^{2,321} \times \sigma_c^{0,610}} \times 24 \quad (6)$$

Burada PR tahmini delinebilirlik oranını (m/gün), W ağırlığı (kg), RPM dönme hızını (devir/dakika), D matkap çapını (cm) ve σ_c tek eksenli basınç dayanımını (MPa) ifade etmektedir. Magmatik derinlik

kayaçların sağlam kayaç örneklerinden alınan UCS değerleri (Heiniö 1999; Waltham 2009) alınmış olup aşağıda verilmiştir:

Granit için,	UCS = 129,98 MPa
Diyorit için,	UCS = 163,41 MPa
Gabro için,	UCS = 179 MPa
Peridotit için,	UCS = 374,7 MPa

Yukarıdaki formüle göre 12 1/4 inç lik matkap, 1 kg sembolik ağırlık ve 1000 devir/dakika (rpm) uygulanırsa,

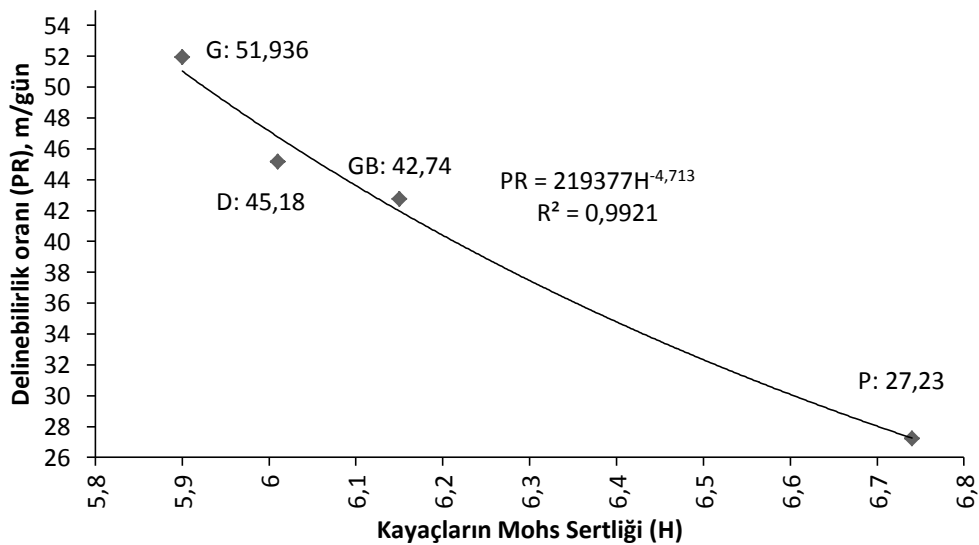
$$\text{Granit için,} \quad \text{PR} = 1,05 \times \frac{1^{0,824} \cdot 1000^{1,690}}{31,15^{2,321} \cdot 129,98^{0,610}} \times 24 = 51,93 \text{ m/gün}$$

$$\text{Diyorit için,} \quad \text{PR} = 1,05 \times \frac{1^{0,824} \cdot 1000^{1,690}}{31,15^{2,321} \cdot 163,41^{0,610}} \times 24 = 45,18 \text{ m/gün}$$

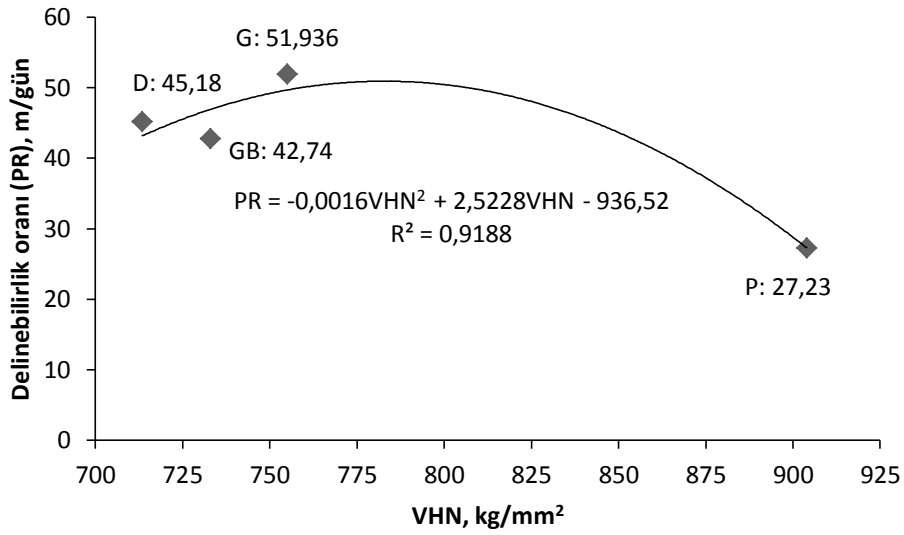
$$\text{Gabro için,} \quad \text{PR} = 1,05 \times \frac{1^{0,824} \cdot 1000^{1,690}}{31,15^{2,321} \cdot 179^{0,610}} \times 24 = 42,74 \text{ m/gün}$$

$$\text{Peridotit için,} \quad \text{PR} = 1,05 \times \frac{1^{0,824} \cdot 1000^{1,690}}{31,15^{2,321} \cdot 374,7^{0,610}} \times 24 = 27,23 \text{ m/gün}$$

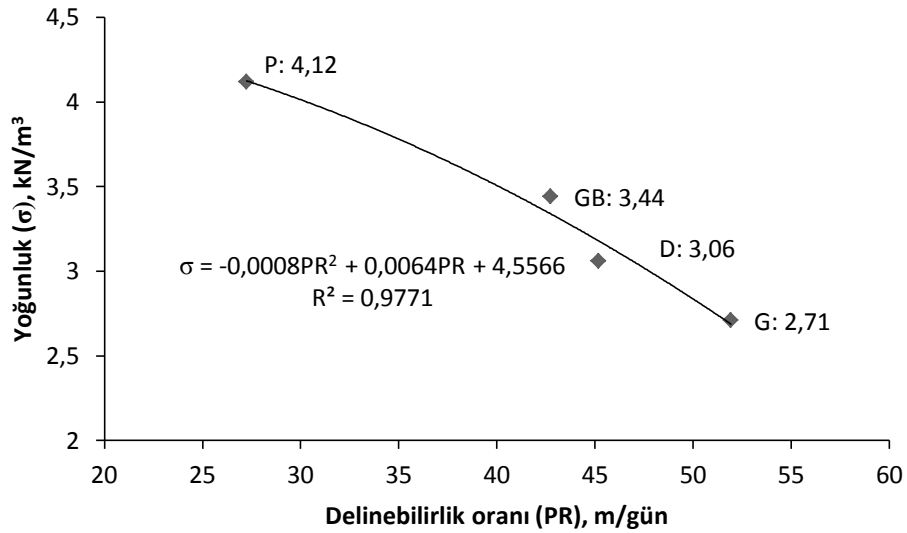
delinebilirlik oranları elde edilir. Bu değerler, tek eksenli sıkışma dayanımı arttıkça delme oranının düştüğünü göstermektedir. Yani, bu denklemlere göre döner sondajda da granit, diyorit, gabro ve peridotit kayaçlarında delinebilirlik oranı Mohs sertliğine göre sırasıyla azaldığı görülmüştür (Şekil 5). Döner sondaj ile VHN arasında delinebilirlik oranı ilişkisi polinomal olup darbeli sondajın regresyon katsayısından biraz daha yüksek ($R^2 = 0,91$) olduğu bulundu (Şekil 6). Kayaçların delinebilirlik oranının azalmasına yol açan Mohs sertlikleri ve Vicker sertlik sayıları kuvars ve olivin minerallerinin içerikleriyle önemli ölçüde etkilenmektedir (Tablo 1 ve 3). Döner sondajda, kayaçların hesaplanan yoğunlukları ile delinebilirlik oranları ters orantılı olup, regresyon katsayısı (R^2) 0,97 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).



Şekil 5. Magmatik derinlik kayaçların Mohs sertliği ve döner sondajla delinebilirlik oranları arasındaki ilişki



Şekil 6. Döner sondajla delinebilirlik oranları ve VHN ilişkisi



Şekil 7. Döner sondajda kayaların hesaplanan yoğunluğu ile delinebilirlik oranları arasındaki ilişki

Bowen reaksiyon serisine göre (Bowen 1956) ayrışma peridotit, gabro, diyorit ve granite doğru görel olarak azalmaktadır. Kuvars miktarı da yukarıdaki kayalar sırasında granite doğru artmaktadır. Bunun nedenlerinden birisi de, kuvarsin dilinimsiz olmasıdır, çünkü dilinim delinebilirlik oranını arttırmaktadır. Bu kayalar kilometrelerce yeraltında yüksek basınç-sıcaklıkta oluşmuş olduklarından, bu koşullarda oluşan mineraller yeryüzü koşullarında düşük basınç ve sıcaklıkta daha kolay ayrışacaklardır (Tarbuck & Lutgens 2014). Bu nedenle söz konusu kayaların döner sondaj ile delinebilirlik oranı Mohs sertliklerinden dolayı peridotitten granite doğru azalma eğilimindedir (Şekil 5).

Huang & Wang (1997), karot olarak yaptığı deneysel çalışmasında tek eksenli basınç direnci (UCS) ile PR (delinebilirlik oranı) arasında aşağıdaki eşitliği bulmuştur:

$$PR = 1,96 e^{-0,01\sigma_c} \text{ (m/saat)} \quad (7)$$

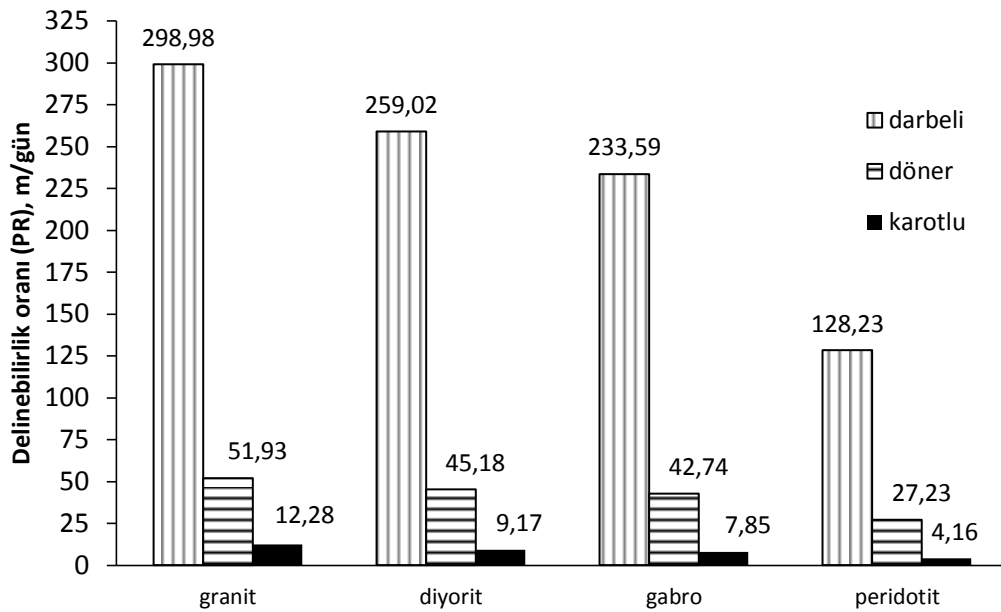
Sondaj uygulamalarında delinebilirlik oranının m/gün olarak alınması daha kullanışlı olduğundan, formüldeki m/saat, m/gün olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$PR = 24 \times 1,96e^{-0,01\sigma_c} \text{ (m/gün)} \quad (8)$$

Mevcut kayalar için UCS değerlerini yerine yazarsak,

Granit için,	$PR = 24 \times 1,96 e^{-0,01 \times 129,98} = 12,282 \text{ m/gün}$
Diyorit için,	$PR = 24 \times 1,96 e^{-0,01 \times 163,41} = 9,17 \text{ m/gün}$
Gabro için,	$PR = 24 \times 1,96 e^{-0,01 \times 179} = 7,85 \text{ m/gün}$
Peridotit için,	$PR = 24 \times 1,96e^{-0,01 \times 374,7} = 4,16 \text{ m/gün}$

karot alınabileceği ortaya çıkmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Magmatik derinlik kayaların darbeli, döner karotsuz ve döner karotlu yöntemlerle delinebilirlik oranlarının karşılaştırılması

Magmatik derinlik kayaların delinebilirlik oranı hesaplandığında, darbeli sondaj yönteminde bu kayaların döner sondaj yönteminden yaklaşık 5 kat daha hızlı delinebileceği ortaya çıkmaktadır (Şekil 8). Darbeli sondaj matkaplarının döner sondaj matkaplarından daha pahalı olmasına rağmen, darbeli sondaj yönteminde delinebilirlik oranı yüksek (Şekil 8) ve delme takımlarının kırılma riski düşüktür. Dolayısıyla darbeli sondaj yöntemiyle bu kayaları delmenin döner sondaj yöntemiyle delmekten daha verimli olduğu söylenebilir. Bu kayalardan döner sondajla karot alınarak elde edilen delinebilirlik oranının da, darbeli ve karotsuz döner sondaj yöntemlerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 8).

4. Sonuç

Bu çalışmada elde edilen değerlere göre magmatik derinlik kayaların ortalama Mohs sertliği granit, diyorit, gabro ve peridotite doğru artarken, darbeli ve döner sondaj yöntemleriyle delinebilirlik oranı azalmaktadır. Mohs sertliği ile delinebilirlik oranı ilişkisi darbeli sondajda doğrusal, döner sondajda üssel olarak değişmektedir. Bu kayaların ortalama VHN sertliği ise diyorit, gabro, granit ve peridotit sırasına göre artış göstermiştir. VHN sertliğinin değişimi, kayaların kuvars ve olivin içeriğinden kaynaklandığı söylenebilir. Kayaların darbeli ve döner yöntemlerle delinebilirlik oranı yaklaşık 770 kg/mm² VHN sertlik değerlerine kadar artış, 800 kg/mm²'den sonra ise düşüş eğilimi göstermiştir.

Kuvars ve olivin içerikleri artan kayaların darbeli ve döner sondaj yöntemleri ile delinebilirlik oranının azaldığı, kayaların ortalama Vicker sertlik sayılarından anlaşılabilir. Bu kayaların her iki sondaj yöntemiyle delinebilirlik oranının VHN ile ters orantılı olduğu belirlendi. Darbeli ve döner sondaj yöntemlerinde, kayaların yoğunlukları ve delinebilirlik oranlarının ters orantılı ve regresyon katsayılarının yüksek olduğu görüldü.

Elde edilen verilere göre, magmatik derinlik kayaların delinebilirlik oranı, darbeli ve döner sondaj yöntemlerinde granit, diyorit, gabro ve peridotite doğru düşüş göstermektedir. Kayaların delinebilirlik oranının darbeli sondaj yönteminde döner sondaj yöntemine göre yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu saptandı. Darbeli sondaj matkaplarının döner sondaj matkaplarından daha pahalı olmasına rağmen, darbeli sondaj yönteminde delinebilirlik oranının yüksek olması ve delme takımlarının kırılma riski düşük olduğundan dolayı, darbeli sondaj yöntemiyle bu kayaları delmenin, kayalar ayrışmadığı sürece döner sondaj yöntemiyle delmekten daha verimli ve ekonomik olduğu söylenebilir. Bu kayalardan karot alınarak elde edilen delinebilirlik oranının, darbeli ve karotsuz döner sondaj yöntemlerine göre en düşük olduğu belirlendi.

5.Kaynaklar

- Altındag, R. (2004), "Evaluation of drill cuttings in prediction of penetration rate by using coarseness index and mean particle size in percussive drilling", *Geotechnical and Geological Engineering* **22**, Kluwer Academic, 417-425.
- Ataei, M., KaKaie R., Ghavidel M. & Saeidi O. (2015), "Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **73**, Elsevier, 130-138.
- Beste, U., Jacobsen, S. & Hogmark, S. (2008), "Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling", *Wear* **264**, Elsevier, 1142-1151.
- Bilgesu, H.I., Tetrick. L.T., Altınış, U., Mohaghegh, S. & Ameri, S. (1997), "A new approach for prediction of rate of penetration (ROP) values", *Society of Petroleum Engineers* **39231**, SPE, 175-179.
- Bowen, N. L. (1956), "The evolution of the igneous rocks", 2nd ed. Dover Publications, USA, New York.
- Gong, Q.M. & Zhao, J. (2009), "Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **46**, Elsevier, 8-18.
- Heiniö, M. (1999), "Rock excavation handbook", Sandvik Tamrock Corporation, Sweden.
- Hoseinie, S.H., Aghababaei, H. & Pourrahimian, Y. (2008), "Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi)", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **45**, Elsevier, 1-10.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M. & Mikael, R. (2012), "Comparison of some rock hardness scales applied in drillability studies", *Arab Journal of Science Engineering* **37**, Springer, 1451-1458.
- Howarth, D. F. & Rowlands J. C. (1987), "Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties", *Rock Mechanics and Rock Engineering* **20**, Springer, 57-85.
- Huang, S. L. & Wang, Z. W. (1997), "The mechanics of diamond core drilling of rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **34**, Elsevier, 134.
- Kahraman, S. (1999), "Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **36**, Elsevier, 981-989.

- Kahraman S., Bilgin N. & Feridunoglu C. (2003), “Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **40**, Elsevier, 711–723.
- Mathewson, C. C. (1981), “Engineering geology”, Charles E. Merrill Publishing Company, USA, Ohio.
- Tarbuck, E. J. & Lutgens, F. K. (2014), “Earth an introduction to physical geology”, 11th ed. Pearson, USA, Boston.
- Tuğrul, A., & Zarif, I.H. (1999), “Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey”, *Engineering Geology* **51**, Elsevier, 303-317.
- Waltham, T. (2009), “Foundations of engineering geology”, 3rd ed. Taylor & Francis, USA, New York.
- Yusof, N.Q.A.M. & Zabidi, H. (2016), “Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor”, *Procedia Chemistry* **19**, Elsevier, 975 – 980.