

Farklı Oranlarda Gözeneklilik ve Olivin Serpantinleşmesi İçeren Bazaltlarda Zayıflık Seviyesini Gösteren Korelasyonların Araştırılması

Investigation of Correlations Indicating the Weakness Level in Basalts with Different Ratios of Porosity and Olivine Serpentinization

Kadir KARAMAN^{*1} , Hasan KOLAYLI²

^{*1} Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Geliş (Received): 21/04/2025 / Düzeltme (Revised): 09/05/2025 / Kabul (Accepted): 23/05/2025

ÖZ

Jeoteknik projelerde kayaçların jeomekanik özelliklerinin mikro yapıları ve alterasyon koşulları açısından değişimlerini anlamak, kaya mühendisliğinin (tüneller, şevler, madencilik vb.) güvenliğini ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak için çok önemlidir. Dolayısıyla, kayaçların jeomekanik özelliklerini doğrudan etkileyen mineral içeriği, dokusu ve gözenekliliği gibi temel faktörlerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Söz konusu faktörlerden biri de su içeriği olduğundan jeoteknik projelerde kullanılan kayaçların su içeriğine bağlı değişimlerinin iyi analiz edilmesi gereklidir. Bu çalışmada, bazaltların jeomekanik özelliklerinin (tek eksenli basınç dayanımı (UCS), ultrasonik dalga hızı (UPV), Brazilian çekme dayanımı (BTS) ve görünür gözeneklilik (n)) doymuş ve kuru koşullardaki ilişkileri incelenmiştir. İlave olarak, kayaçların zayıflık seviyelerini ortaya koyan bazı korelasyonlar (örn. UPV/UCS ve BTS/n) ve doymuş ile kuru durumdaki değerler arasındaki yüzdesel farkın alterasyon dereceleri ve gözeneklilik gibi parametrelerle olan bağlantısı da araştırılmıştır. Çalışmada birbirine komşu olan 3 sahadan litolojik ve mineralojik açıdan yaklaşık aynı olan bazaltlardan 8 adet örnek alınmış ve alterasyon zonlarına göre üç sınıfa (A1, M2 ve M3) ayrılmıştır. Mineralojik-petrografik incelemeler olivinin serpantinleşmesinin A1 bazaltları için en düşük %5 olduğunu M3 bazaltları için ise en yüksek %80 civarında olduğunu göstermiştir. Serpantinleşme ve gözeneklilik değerlerinin bazaltların jeomekanik özellikleriyle yüksek düzeyde ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bazaltlarda serpantinleşme ve gözeneklilik arttıkça, doymuş ve kuru UCS, BTS ve UPV farkları da artmıştır. Ayrıca, bazaltlarda kayaç zayıflığını yansıtan serpantinleşme ve gözeneklilik değerleri arttıkça UPV/UCS oranında artma, BTS/n oranında ise azalma gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bazalt, doymuş ve kuru durum, jeomekanik özellikler, olivin serpantinleşmesi

ABSTRACT

In geotechnical projects, understanding the variations in the geomechanical properties of rocks in terms of their microstructure and alteration is crucial to ensure the safety and long-term sustainability of rock engineering (tunnels, slopes, mines, etc.). Therefore, it is important to determine the basic factors, such as mineral content, texture and porosity, that directly affect the geomechanical properties of rocks. Since water content is one of the factors in question, it is necessary to analyse the water content-dependent changes of rocks used in geotechnical projects. In

this study, the relationships of geomechanical properties (uniaxial compressive strength (UCS), ultrasonic sound velocity (UPV), indirect tensile strength (BTS) and apparent porosity (n)) of basalts in saturated and dry conditions were investigated. In addition, some correlations (e.g. UPV/UCS-BTS/n) revealing the weakness levels of the rocks and the relationships of the percentage difference between values in saturated and dry conditions with parameters such as alteration degree and porosity were also investigated. In the study, 8 basalts nearly similar in lithological and mineralogical terms were taken from 3 neighbouring sites and divided into three categories (A1, M2 and M3) according to the alteration zone. Mineralogical-petrographic studies showed that serpentinization of olivine was minimum 5% for A1 basalts and maximum 80% for M3 basalts. Serpentinization and porosity values were found to be highly correlated with the geomechanical properties of basalts. As serpentinization and porosity increased in basalts, differences between saturated and dry UCS, BTS and UPV values also increased. In addition, an increase in UPV/UCS ratio and a decrease in BTS/n ratio were observed with increasing serpentinization and porosity values, reflecting rock weakness in basalts.

Keywords: Basalt, saturated and dry state, geomechanical properties, olivine serpentinization

GİRİŞ

Kayaçların mühendislik özelliklerinin doymun ve kuru durumda test edilmesi, madencilik ve jeoteknik uygulamalar açısından büyük öneme sahiptir. Bu testler, kaya kütlelerinin davranışlarını farklı su içeriklerinde anlaşılmasını sağlayarak daha güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir projelerin tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Kayaçların basınç, çekme ve kesme dayanımları doymunluk durumuna göre önemli ölçüde değişmektedir. Çünkü su, kayaçlardaki boşlukları doldurarak gözenek suyu basıncını artırmakta ve efektif gerilmeleri azaltarak dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Kuru ve doymun testler, bu dayanım değişimlerini belirleyerek gerçekçi tasarım parametrelerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Katı bileşenler esas olarak kayaların jeolojik isimlendirilmesinde dikkate alınırken, mühendislik açısından gözenekler, alterasyon ve anizotropi daha büyük bir mekanik öneme sahiptir (Franklin, 1970; Karaman ve Kolaylı, 2024). Ayrıca, su içeriği kayaçların jeomekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Erçikdi vd. (2016). Yenice (2002) bazı kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ile diğer malzeme özellikleri arasındaki ilişkileri incelediği çalışmasında marn ve kireçtaşlarını doymun ve kuru durumda test

etmiştir. Yazar, suyun kayaçların dayanımını azalttığını belirtmiş ve suya doymun haldeki marn ve kireçtaşlarının kuru hallerine kıyasla dayanımlarında belirgin azalmalar saptamıştır. Karakul ve Ulusay (2012) farklı türdeki kayaların dayanım özelliklerinin farklı doymunluk koşullarında P-dalga hızından kestirimi ve P-dalga hızının fiziksel özelliklere olan duyarlılığı konusunda araştırma yapmışlardır. Kahraman (2007) kayaçların doymun ve kuru P-dalga hızları arasındaki korelasyonları araştırmış ve çalışmada türettiği denklemlerin kuru kaya P-dalga hızından doymun kaya P-dalga hızının tahmini için kullanılabileceğini belirtmiştir. Peinsitt vd. (2010), mikrodalga ısınlama altında kuru ve suya doymun bazalt, granit ve kumtaşının ısıtma ve zayıflatma etkisini karşılaştırmıştır. Sonuçlar, kuru ve doymun bazalt arasında bir fark olmadığını, doymun granitin kuru örneklerden biraz daha iyi etkiye sahip olduğunu ve doymun kumtaşı örneklerinin kuru olanlardan çok daha iyi ısıtma etkisine sahip olduğunu göstermiştir. Özdemir ve Sarıcı (2017) farklı suya doymunluk derecelerinde bazı sedimanter kayaçların UCS parametresini diğer jeomekanik özelliklerden tahmin etmişler ve %70 ve %100 suya doymunluk koşullarında değişkenler arasında güçlü ilişkilerin olduğunu ($R^2 > 90$) ifade etmişlerdir.

Bazalt, yer kabuğunda sıkça karşılaşılan ve endüstriyel alanda en çok rağbet gören kayalardan biri olup, çeşitli jeoteknik projelerde, örneğin beton agregası yapımında, yol temellerinde, demiryolu balastlarında, kaldırım taşı üretiminde ve baraj dolgularında geniş bir kullanım alanına sahiptir (Goodman, 1993). Bu yaygın kullanım alanı nedeniyle bazaltlar, farklı bilimsel değerlendirmelerle ele alınmış ve bu doğrultuda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Tuğrul ve Gürpınar (1997) Tokat/Niksar yöresinden elde edilen bazalt örneklerinin ayrışma bölgeleri ile mühendislik parametreleri (kuru yoğunluk, porozite, permeabilite, tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri) arasındaki bağlantıları belirlemişlerdir. Güroca ve Kılıç (2005) bazaltlardaki alterasyonun mühendislik davranışına olan etkilerini incelemiş ve alterasyon seviyesi arttıkça kayaların dayanımında belirgin azalmalar tespit etmişlerdir. Tarawneh vd. (2022), jeomekanik özellikleri dikkate aldıkları çalışmada, bazaltın mühendislik uygulamaları için kullanılabilecek iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduğunu bildirmiştir. Erişiş vd. (2019) yaptıkları çalışmada, çeşitli bazalt türlerinin içerik ve yapısal niteliklerinin mekanik tepkileri üzerindeki rolü incelenmiş ve bazaltın yaygınlaşan kullanım alanları göz önüne alındığında, kimyasal, mineralojik, petrografik ve jeomekanik özelliklerinin detaylı bir şekilde anlaşılmasının gerekliliği belirtilmiştir. Sharo ve Al-Tahawa (2019) çok sayıda kayaç türünün dayanım ve diğer jeomekanik özellikleri arasında birçok ilişki kurulmuş olmasına rağmen, bazaltik kayalarda dayanım ve diğer parametreler arasında eşitlikler geliştirmeye hala ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Kıpçak (2024) Van-Süphan Dağı yöresindeki bazalt kayalarının demiryolu balastı olarak potansiyelini ele aldığı çalışmada, saha ve laboratuvar incelemeleri sonucunda bu

bölgedeki bazaltın demiryolu inşasında balast malzemesi olarak uygun olduğunu göstermiştir. Karaman ve Kolaylı (2024) benzer mineralojik içeriği ve farklı alterasyon özellikleri gösteren (%5-%80) birbirine yakın sahalardaki bazaltların jeomekanik ve mineralojik özelliklerini araştırmışlardır. Farklı alterasyon derecesi gösteren bazaltların UCS parametresinin tahminine yönelik eşitlikler önermişlerdir. Ayrıca yazarlar bazaltlardaki farklı alterasyonun nedenlerini mineralojik-petrografik ve SEM analizleri ile örnek noktaları ve çevresinin yapısal unsurlar (fay, volkanizma) açısından analizi ile ortaya koymuşlardır.

Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, bazaltlar hakkında çok sayıda ve değişik konuları kapsayan bilimsel araştırmaların yapıldığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, %5 ile %80 arasında değişen oranlarda olivin serpantinleşmesi sergileyen bazaltların suya doygun ve kuru koşullardaki jeomekanik özelliklerinin korelasyonlarını ele alan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada, söz konusu parametrelerin kendi arasındaki korelasyonundan ilave olarak kuru ve doygun durumdaki parametreler arasındaki farkların gözeneklilik ve serpantinleşme oranı ile korelasyon ilişkisi araştırılacaktır. Ayrıca, bazaltların zayıflık/sağlamlık seviyeleriyle orantılı değişim gösteren korelasyonlar (UPV/UCS, BTS/n vb.) araştırılacaktır.

GENEL JEOLJİ VE ÖRNEKLEME

Bu çalışmada kullanılan bazalt örnekleri Akçakale ve Mersin Mahalleleri (Akçaabat-Trabzon) sınırları içinde kalan üç farklı bölgeden seçilmiştir (Şekil 1). Bazaltlar, Eosen yaşlı bazalt ve piroklastikler içinde prizmatik dayklar şeklinde bulunmaktadır. Daykların kalınlığı 12-15 metre arasında değişmekte olup, her birinin

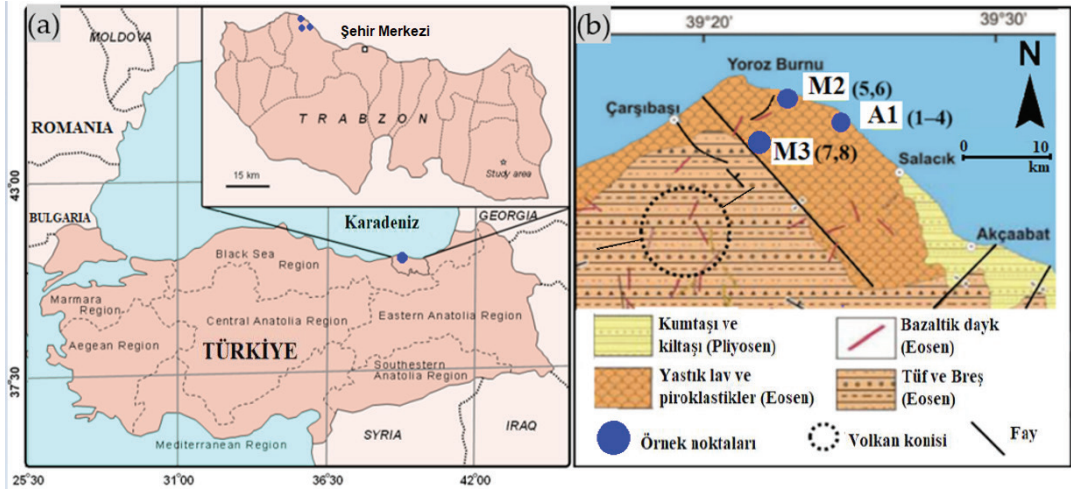
yayılım alanı 1 hektardan fazladır. Akçakale 1 (A1), Mersin 2 (M2) ve Mersin 3 (M3) mahallelerinden alınan bazalt blokları, ayrışma, kırıklar ve çatlaklar gibi makroskobik kusurlar açısından kontrol edilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada üç sahadan toplam sekiz farklı bazalt kaya bloğu laboratuvara getirilmiş, laboratuvar tipi karot alma cihazı ile bloklardan 54.7 mm çapında NX tipi karot örnekler alınmıştır. Deneylerden önce, örneklerin uç kısımları düzeltilerek birbirine tam paralel hale getirilerek karot örneklerinin kesilen yüzeylerinin düzgünlüğü kontrol edilmiştir. Hem kuru hem de suya doymun hale getirilmiş karot örneklerinde UCS, UPV, BTS ve n deneyleri yapılmıştır. Deneyler ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

UCS değerlerinin belirlenmesinde uzunluk/çap (L/D) oranı 2.5-3.0 olan karot örnekleri

kullanılmıştır. Deneyler, bilgisayarlı servo kontrollü 300 ton yük kapasiteli bir pres ile 0.75 MPa/s yükleme hızında yapılmıştır. Ortalama UCS değeri, aynı kaya bloğunda yapılan 5 testin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. UCS testinden önce, PUNDIT plus cihazı kullanılarak karot numunelerine UPV testleri uygulanmıştır. Karotların uçlarına tam temas sağlamak ve numune yüzeyi ile alıcı ve verici başlıklar arasındaki hava boşluğunu gidermek için ince bir tabaka vazelin sürülmüştür. L/D oranı 0.5 olan disk şeklindeki karot örnekleri, 200 N/s'lik sabit bir yükleme hızı altında BTS testine tabi tutulmuştur. UCS ve UPV deneyleri için hazırlanan karot numuneleri, görünür gözeneklilik ($n\%$) tayininde de kullanılmıştır (Eşitlik 1 ve 2). Deneysel çalışmaların detayları ve sekiz örneğin tüm deney sonuçları yayınlanmıştır (Karaman ve Kolaylı, 2024). A1, M2 ve M3 bazaltlarına ait bu özelliklerin kuru ve doymun durumdaki en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Örnekleme sahalarının yer bulduru (a) ve jeolojik haritası (b) (Yücel vd., 2014'ten değiştirilmiştir).

Figure 1. Location (a) and geologic map (b) of the sampling areas (modified from Yücel et al., 2014).

$$\text{Görünür boşluk hacmi (V}_b\text{), cm}^3 = (M_D - M_K) \quad (1)$$

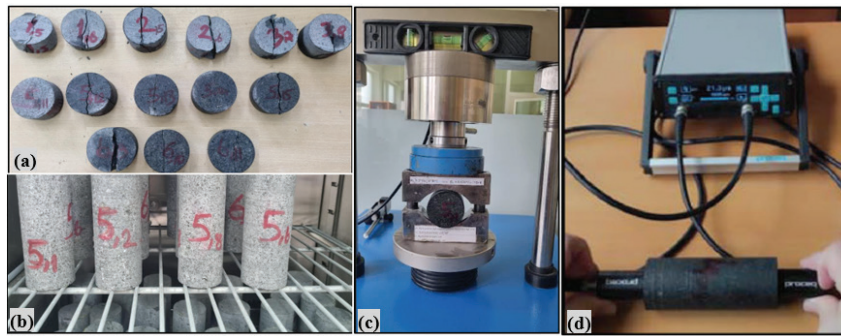
$$\text{Görünür gözeneklilik (\%n)} = (V_b / V_T) \times 100 \quad (2)$$

Burada; M_D = doygun kütle (gr), M_K = kuru kütle (gr) ve V_T = toplam hacimdir (cm^3).

Petrografik İnce Kesit Analizleri

İnce kesit analizleri neticesinde, üç ayrı lokasyondan derlenen kayaçların olivin ojit bazalt

olarak tanımlandığı ve mikrogranüler-mikrolitik porfirik doku özelliği taşıdığı belirlenmiştir (Şekil 3). Çalışılan bazaltların temel mineral içeriğini labradorit, ojit, biyotit, olivin ve opak (magnetit) mineralleri oluşturmaktadır. A1 bazalt örneklerinin ortalama mineral bileşimleri şu şekildedir: labradorit % 48.5, ojit % 26.3, olivin % 19, biyotit % 2.3, opak % 2.5 ve gözeneklilik % 1.5. Olivin minerallerinde serpantinleşme yüzdesi ise ortalama % 8.3 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2. Deneysel çalışmalardan görünüm (a-d).

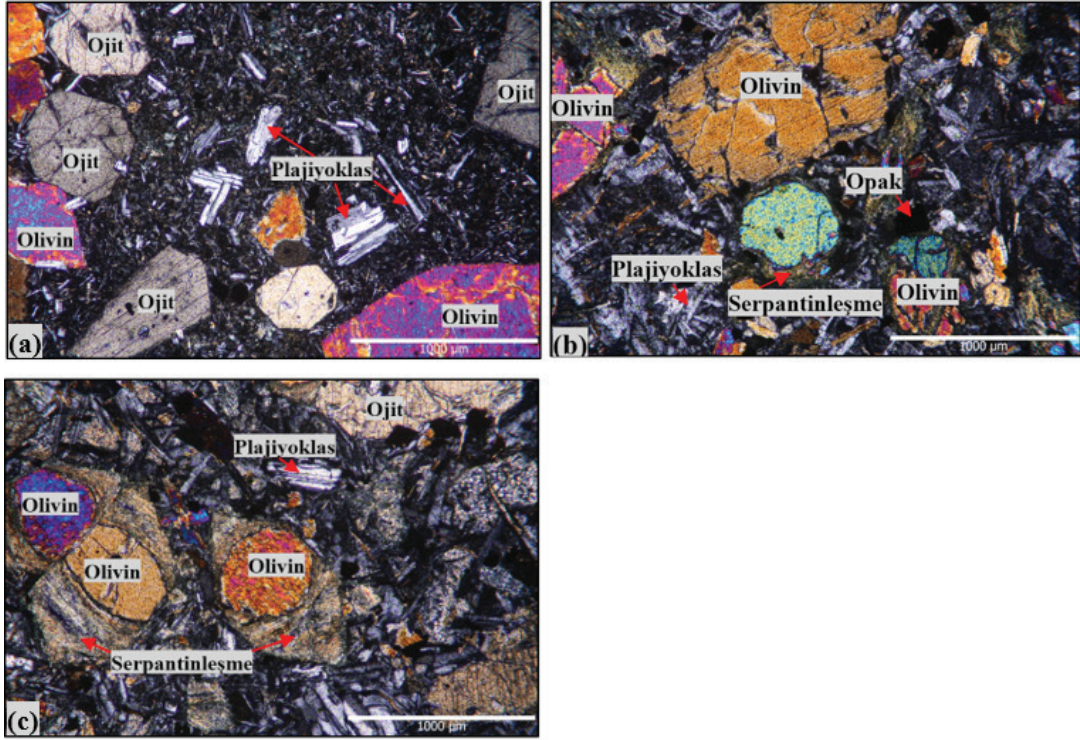
Figure 2. Views of the experimental studies (a-d).

Çizelge 1. A1, M2 ve M3 bazaltlarının kuru ve doygun durumdaki UCS, BTS, UPV ve n değerleri.

Table 1. UCS, BTS, UPV and n values for A1, M2 and M3 basalts in dry and saturated conditions.

Parametre	A1 _{ED-EY}	A1 _{ortalama}	M2 _{ED-EY}	M2 _{ortalama}	M3 _{ED-EY}	M3 _{ortalama}
UCS _{kuru} (MPa)	167-185	179.0	100-139	119.5	51-60	55.5
UCS _{doygun} (MPa)	130-150	139.3	56-69	62.5	25-33	29.0
BTS _{kuru} (MPa)	11.8-14.8	13.2	8.3-8.9	8.6	7.4-8.1	7.8
BTS _{doygun} (MPa)	11.0-14.5	12.3	7.5-7.7	7.6	3.1-5.5	4.3
UPV _{kuru} (m/s)	5665-5932	5852	4567-4945	4756	3365-3856	3611
UPV _{doygun} (m/s)	6088-6131	6113	5394-5653	5524	4430-4671	4551
n (%)	0.65-0.84	0.73	2.5-3.1	2.80	4.2-5.3	4.76

A1: Akçakale, M2 ve M3: Mersin Mahallesinden alınan bazaltlar, ED: En düşük, EY: En yüksek



Şekil 3. A1 (a), M2 (b) ve M3 (c) bazaltlarının mineralojik ince kesit görüntüleri.

Figure 3. Mineralogical thin section images of basalts A1 (a), M2 (b) and M3 (c).

M2 bölgesinden derlenen bazalt örneklerinin mineral içeriği ortalama olarak labradorit % 47, ojit % 25.5, olivin % 19.5, biyotit % 3, opak % 3 ve gözeneklilik % 2'dir. Olivinlerdeki serpantinleşme oranı ortalama % 24 olarak belirlenmiştir. M3 bazaltlarının mineral içeriği ortalama olarak labradorit % 46.5, ojit % 27.5, olivin % 19.5, biyotit % 2.5, opak % 2 ve gözeneklilik % 2'dir. Olivin minerallerinde gözlemlenen serpantinleşme oranı ise ortalama % 75.5'tir. A1, M2 ve M3 bazalt örneklerinde, olivinlerin serpantinleşme seviyesi, toplam kayadaki serpantinleşme seviyesine yakın bir değerdedir (Karaman ve Kolaylı, 2024).

BULGULAR ve İRDELEME

Çizelge 1'deki değerler incelendiğinde, bazaltlara ait jeomekanik özelliklerin kendi içerisinde birbirlerine yakın olduğu anlaşılmaktadır. Deneysel sonuçlara göre, Mersin bazaltları (M2 ve M3) %2.5 ile %5.3 arasında değişen görünür gözeneklilik değerlerinin yanı sıra olivin minerallerinde %24-75.5 arasında değişen alterasyon (serpantinleşme) göstermektedir. A1 bazaltlarında görülen en düşük gözeneklilik (%0.65) M3 bazaltındaki en yüksek gözeneklilikten (%5.23) yaklaşık 8 kat daha düşüktür. Değişken alterasyon seviyelerine sahip bazaltlardan elde edilen tüm veriler göz önünde bulundurulduğunda, ortalama UCS değerleri kuru şartlarda 51 ile 185 MPa

aralığında, doymuş şartlarda ise 25 ile 150 MPa aralığında bulunmuştur. Ayrıca, diğer jeomekanik parametrelerin (BTS ve UPV) de tüm bazaltlar için oldukça değişken olduğu saptanmıştır.

Jeomekanik Özelliklerin Korelasyonu

Benzer kaya türlerinde korelasyon ilişkileri genellikle değerlerin yakınlığı sebebiyle zayıftır. Ancak bu çalışmada, mineralojik ve litolojik açıdan benzer bazaltlar kullanılmasına rağmen, olivin minerallerindeki farklı derecelerdeki serpantinleşme, özellikle görünür gözeneklilik olmak üzere bazaltların jeomekanik özelliklerini değiştirmiştir. Bu nedenle, farklı alterasyon seviyesine sahip bu tür kayaların jeomekanik özellikleri arasında yapılacak korelasyon ilişkileri oldukça önemlidir. Bu çalışmada, parametreler arasında en yüksek korelasyon katsayısını veren ilişkiler araştırılmıştır. İlk olarak görünür gözeneklilik ve serpantinleşme yüzdeleri arasındaki korelasyon ilişkisi araştırılmış ve çok yüksek korelasyon katsayısı elde edilmiştir (Şekil 4a). Olivinin alterasyon için oldukça hassas bir kaya minerali olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Olivinin ana alterasyon formlarından biri olan serpantin, hidrotermal süreçler sonucunda kırık boyunca oluşmakta ve olivin içeren kayaları tamamen serpantin kayalara dönüştürebilmektedir (Schuiling, 2011). Serpantinleşme sırasında kayanın içine büyük miktarlarda su emilir, hacim artar, yoğunluk azalır ve orijinal yapı bozulur. Yüzeye yakın ortamlarda, serpantinleşme ~20 °C ila 400 °C'den yüksek sıcaklıklarda meydana gelebilir. Serpantinleşme esnasında katı hacmin yaklaşık %50 oranında artması beklenmektedir. Bu hacim değişikliğinin serpantinleşme sırasında oluşan akışkan yolu açısından bazı sonuçları vardır. Reaksiyon ürünleri tarafından doldurulan gözeneklilikte bir artışa ve çatlamaya yol açan

gerilme birikimine yol açmaktadır (Streit vd. 2012; Farough vd. 2015). Serpantinleşme kayaların içsel genişlemesine neden olacağından, kayaç içinde oluşan basınç nedeniyle mikro çatlakların geliştiği düşünülmektedir (Karaman ve Kolaylı, 2024). Dolayısıyla, artan serpantinleşme oranı kayacın gözenekliliğinin de artmasına neden olmaktadır.

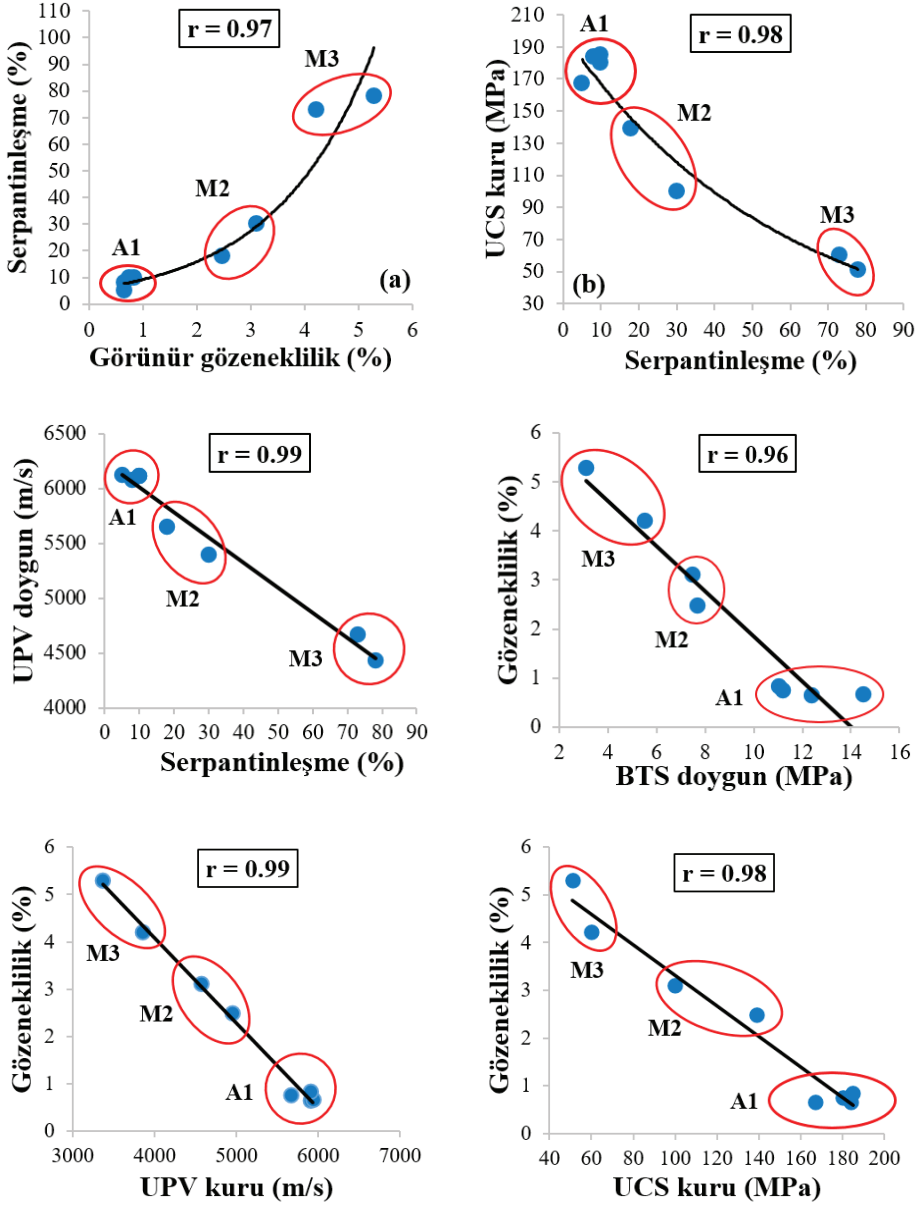
Bu çalışmada, bazaltların jeomekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrenin serpantinleşme ve dolaylı olarak gözeneklilik olduğunun belirlenmesi nedeniyle, korelasyon analizlerinde söz konusu iki parametrenin diğer jeomekanik parametreler ile ilişkileri incelenmiştir. Şekil 4b-f'de bazı korelasyon ilişkilerine yer verilmiş olup, hem serpantinleşme yüzdesinin hem de görünür gözenekliliğin bazaltların jeomekanik özelliklerini etkiledikleri belirlenmiştir. Beklenildiği üzere serpantinleşme ve görünür gözenekliliğin artması bazaltların jeomekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Benzer şekilde, Diamantis vd. (2009) serpantin ve talk gibi bazı ikincil minerallerin artan yüzdeleri, düz katmanları, yarılmalara ve tabakalı veya lifsi kristal yapıları nedeniyle ultramafik kayaların mekanik özelliklerini negatif yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Bazaltların Zayıflık Derecelerine İşaret Eden Korelasyonlar

Kahraman (2007) tarafından gerçekleştirilen ve kayaların doymuş ve kuru P-dalga hızları arasındaki korelasyonları ele alan çalışmada, doymuş ve kuru örneklerden elde edilen UPV değerleri arasındaki farkın (km/s) gözeneklilik ile bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, doymuş ve kuru UPV arasındaki fark (m/s) değerleri ile serpantinleşme (Şekil 5a) ve görünür gözeneklilik (Şekil 5b) arasında yüksek-çok yüksek korelasyon ilişkileri görülmüştür.

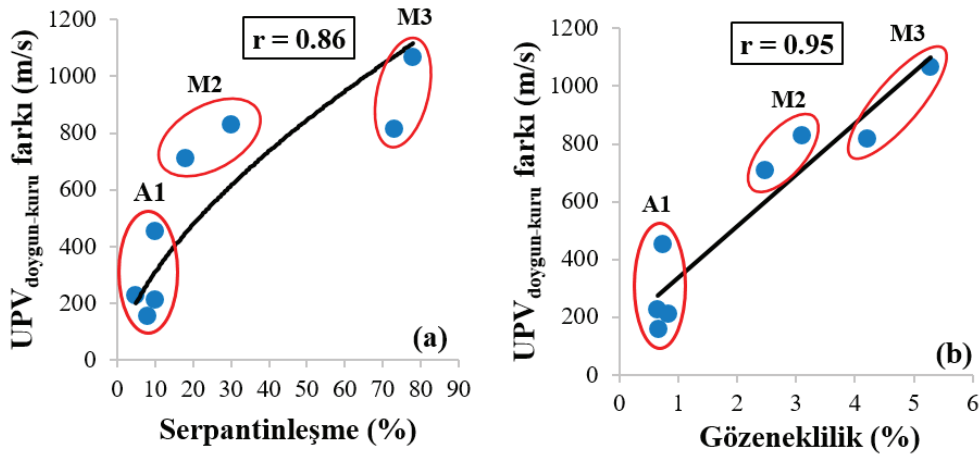
Grafikler incelendiğinde serpantinleşme (%) ve gözeneklilik (%) değerleri arttıkça söz konusu UPV değerleri arasındaki farkların da arttığı (156-1065 m/s) saptanmıştır. Başka bir ifadeyle, serpantinleşme yüzdesi ve gözeneklilik

arttıkça kayaç dayanımı düştüğünden, doygun ve kuru örneklerden elde edilen UPV değerleri arasındaki farkın artması kayacın zayıflamasının bir göstergesidir.



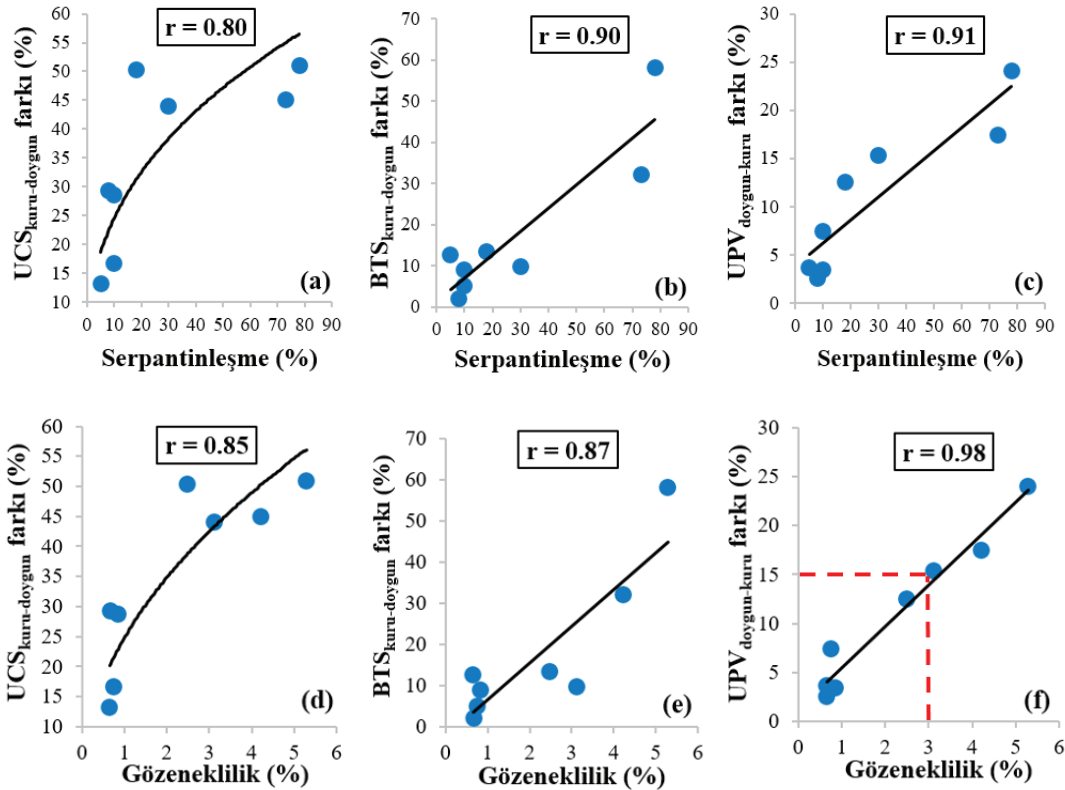
Şekil 4. Serpantinleşme ile gözenekliliğin bazaltların jeomekanik özellikleriyle ilişkisi (a-f).

Figure 4. Relationship between serpentinization and porosity with geomechanical properties of basalts (a-f).



Şekil 5. Serpantinleşme ile gözenekliliğin UPV doymun ve kuru durum farkıyla ilişkisi (a, b).

Figure 5. Relationship between serpentinization and porosity with UPV difference between saturated and dry condition (a,b).



Şekil 6. Serpantinleşme ve gözenekliliğin UCS, BTS ve UPV'nin kuru ve doymun durum % farkı ile ilişkisi (a-f).

Figure 6. Relationship of serpentinization and porosity with the difference between dry and saturated conditions % for UCS, BTS and UPV (a-f).

Serpantinleşme ve görünür gözenekliliğin kayaçların jeomekanik özelliklerini negatif yönde etkilediği bilinmektedir (Karaman ve Kesimal, 2015a; Diamantis vd., 2016; Karaman ve Kolaylı, 2024). Bu nedenle, bu çalışmada bazaltların sağlamlık ve zayıflık seviyelerini anlayabilmek adına çeşitli korelasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bazaltlarda serpantinleşme ve gözeneklilik yüzde değerleri arttıkça doymun ve kuru durumda elde edilen UCS, BTS ve UPV değerleri arasındaki farkların da arttığı anlaşılmaktadır (Şekil 6). Grafikler ışığında, en yüksek korelasyon katsayılarına doymun ve kuru UPV arasındaki yüzde farklılıkların serpantinleşme ve gözeneklilik parametreleriyle olan korelasyonları sonucunda ulaşılmıştır. Karaman ve Kesimal (2015a), görünür gözenekliliğin %1'in altında olduğu durumlarda dahi, diğer parametrelere kıyasla (yoğunluk ve nokta yükü dayanım indeksi, vb.) UPV değerleri üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olabileceğini vurgulamışlardır.

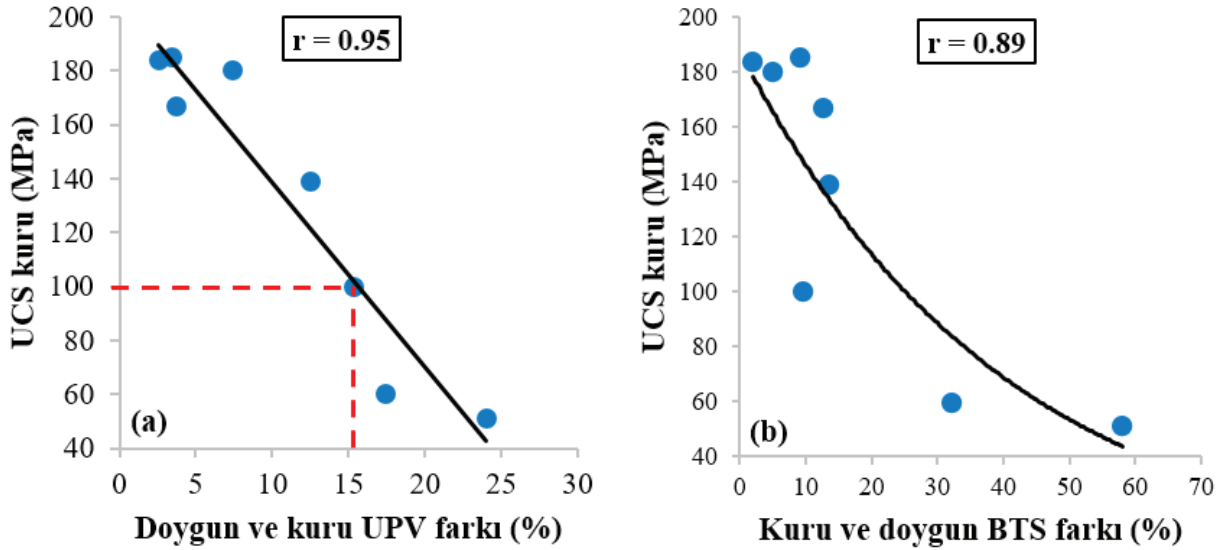
Şekil 6'da sunulan sonuçlara göre, doymun ve kuru durumdaki değerler arasındaki yüzde farkların artmasının bazaltların artan zayıflık seviyelerine işaret ettiği dolaylı olarak anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 7'de doymun ve kuru koşullardaki deneysel veriler arasındaki yüzdesel fark değerleri ve bazaltların dayanım değerleri arasındaki ilişkileri gösteren korelasyon grafikleri oluşturulmuştur. Doymun ve kuru UPV ve BTS farkları arttıkça kuru UCS değerlerinin azaldığı görülmektedir. Doymun ve kuru UPV farkı ve kuru UCS arasındaki ilişki sayısal olarak ifade edilebilir bir korelasyon eğrisi sunmuştur (Şekil 7a). Örneğin; doymun ve kuru UPV arasındaki yüzde fark değerleri yaklaşık % 5 'in altına düştüğünde çok yüksek kayaç dayanımına karşılık geldiği grafikten anlaşılmaktadır. Öte yandan, söz konusu farklar % 15'in üzerine çıktığında nispeten zayıf kayaç

dayanımına işaret etmektedir. Şekil 7a'daki kesikli çizgiler incelendiğinde sadece doymun ve kuru UPV değerleri arasındaki farktan yola çıkarak bu çalışmada incelenen bazaltların dayanımı yaklaşık olarak kestirilebilir. Şekil 6f'de doymun ve kuru UPV değerleri arasındaki %15'lik farkın yaklaşık % 3 gözenekliliğe karşılık geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 4f'deki grafikte ise söz konusu gözeneklilik değerinin yaklaşık 100 MPa dayanımına karşılık geldiği görülmektedir. Dolayısıyla, Şekil 4f ve 6f'deki bulgular Şekil 7a'yı desteklemektedir. Ancak, korelasyon ilişkisinin çok yüksek ($r>0.90$) olduğu durumlarda daha gerçekçi kestirimler yapılabileceği düşünülmektedir.

Karaman ve Kesimal (2015b), UPV/UCS ((m/s)/MPa) oranı ile Schmidt geri sıçrama sertliği (R) değerleri arasındaki sonuçlara dayanarak olası bir sınıflandırma sistemi önermiştir. UPV/UCS ((m/s)/MPa) oranlarının artan R değerleri ile üstel olarak azaldığını belirtmişlerdir. Önerilen sınıflama, kaya sertlik sınıfı gerektiğinde UPV/UCS ((m/s)/MPa) oranını kullanarak kaya sertlik ölçeğini (yumuşak, hafif yumuşak, vb.) tahmin etmede araştırmacılara yol gösterebilmektedir. Bu çalışmada, UPV/UCS ((m/s)/MPa) oranının serpantinleşme ve görünür gözeneklilik ile bir ilişki gösterip göstermediği incelenmiştir (Şekil 8a, b). Elde edilen sonuçlar, UPV/UCS ((m/s)/MPa) oranının hem kuru hem de doymun koşullarda serpantinleşme yüzdesi ve gözeneklilik ile oldukça güçlü korelasyonlar sergilediğini ortaya koymuştur. Serpantinleşme ve gözeneklilik değerlerinin artması kayacın zayıflık derecesinin artmasına işaret ettiğinden UPV/UCS ((m/s)/MPa) oranının yüksek olması (>100) da kayacın zayıflığını göstermektedir. Kayaçların zayıflık seviyelerini ifade eden bir diğer oranın ise BTS/n (MPa/%) olduğu öngörülmüştür. Çünkü kayaçların zayıflaması BTS değerinde bir azalmaya yol açarken, gözeneklilik değerinde

bir artışa sebep olmaktadır. Bu nedenle, zayıf kayalarda daha düşük bir BTS/n (MPa/%) oranı gözlemlenecektir. Beklenildiği gibi, BTS/n

(MPa/%) oranı ile serpantinleşme yüzdesi (Şekil 8c) ve UCS_{kuru} değerleri arasında çok yüksek korelasyon değerleri elde edilmiştir (Şekil 8d).



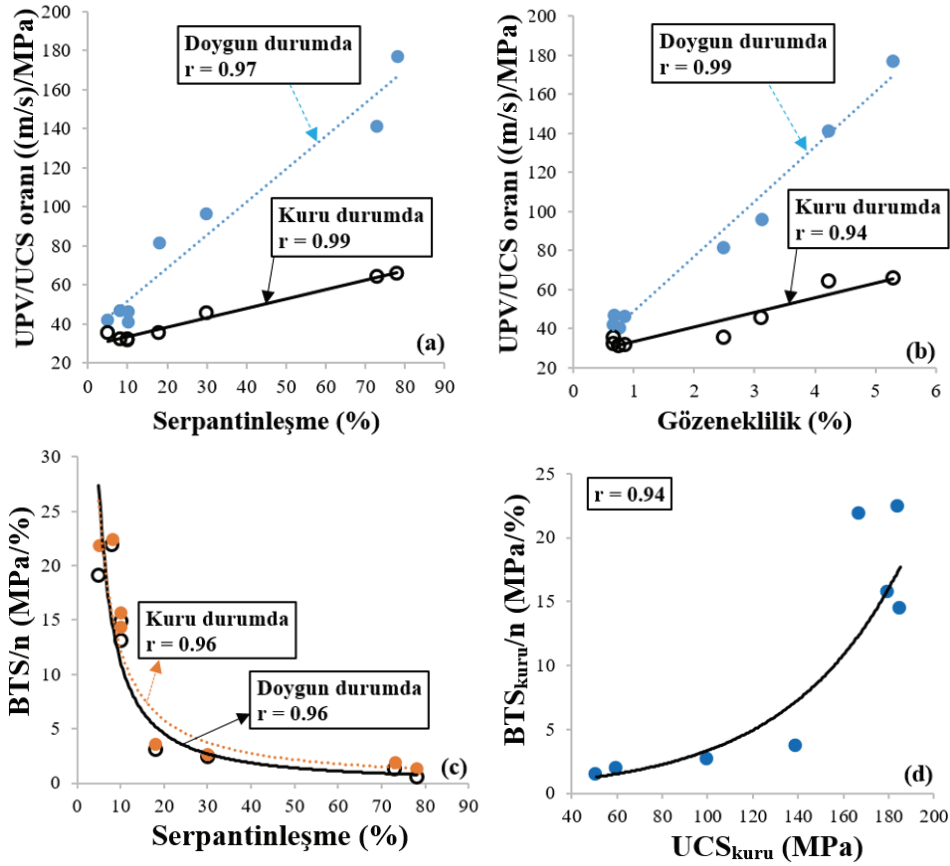
Şekil 7. Bazaltlardaki dayanımın UPV ve BTS'nin doymuş ve kuru durum farkıyla ilişkisi (a, b).

Figure 7. Relationship of strength of basalts to the difference between saturated and dry conditions for UPV and BTS (a, b).

Şekil 4-8'deki grafikler incelendiğinde A1 bazaltları, benzer jeomekanik değerleri ve düşük serpantinleşme oranları nedeniyle daha düzensiz bir dağılım sergilemişlerdir. Ayrıca, A1 bazaltları %1'in altında gözeneklilik değerlerine (%0.65-0.84) sahiptir. Kılıç ve Teymen (2008), yüksek korelasyon katsayıları elde edilse dahi, gözenekliliği %2'nin altında olan kayalar için bu ilişkilerin geçerli olmayabileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Karaman ve Kesimal (2015a), %1'in üzerindeki gözeneklilik değerlerine sahip farklı kayaların jeomekanik özellikleri arasında anlamlı bir ilişki olduğunu, ancak %1'in altındaki değerlerde herhangi bir ilişki saptamadıklarını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte bu çalışmada kullanılan bazaltlar (8 adet) litolojik köken ve mineralojik oranlar açısından

benzer olsa da farklı alterasyon seviyeleri (%5-80) yüksek korelasyonlar sağlamıştır. SPSS korelasyon analizi sonuçlarına göre, incelenen ilişkilerin anlamlılık seviyeleri %95 güven aralığında belirlenen 0.05 eşiğinin altında (0.000 ile 0.017 aralığında) saptandığından, bu ilişkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır (Çizelge 2).

Su, kayaç tanelerini birbirine bağlayan kuvvetleri zayıflatmaktadır. Bu zayıflama, taneler arasındaki katı ve sert tanelerin temaslarının azalmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla taneler eskisi kadar sıkı bir şekilde birbirine kenetlenmez. Sonuç olarak, kayaç gövdesinden geçen ultrasonik dalga hızı düşmektedir (Karaman vd., 2010).



Şekil 8. Kayaçların zayıflık derecelerini gösteren farklı korelasyonlar (a-d).

Figure 8. Different correlations showing the degree of weakness for the rocks (a-d).

Su içeriğindeki artış, kayaçların jeomekanik özelliklerinde (örneğin, UCS, BTS vb.) azalmaya neden olmaktadır. Bu, suyun kayaç yapısını zayıflatıcı etkisinin bir sonucudur. Serpantinleşme (bir tür kimyasal ayrışma süreci) de su içeriği ve gözeneklilikle bağlantılı olduğundan, serpantinleşmiş kayaçların genellikle daha fazla su içerebileceği ve daha gözenekli olabileceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, doymuş ve kuru bazalt örneklerinden elde edilen jeomekanik veriler önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Ayrıca, bu farklılık kayaç zayıfladıkça (daha fazla ayrışma ve mikro-çatlak/gözeneklilik nedeniyle) daha da belirginleşmektedir. Çünkü zayıf

kayaçların suyla etkileşimi daha fazla olmaktadır. Kayaçların mühendislik özelliklerinin hem kuru hem de doymuş halde incelenmesi, mühendislik projeleri için kaya davranışına dair detaylı bilgi sunmaktadır. Bu sayede daha güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir tasarımlar mümkün kılınır, riskler azalır ve kaynak kullanımı optimize edilir. Atmosferik ve yeraltı suyu koşullarının değişim gösterebilmesi nedeniyle, tek bir durumdaki testler yetersiz kalacağından, kayaçların su içeriğine bağlı tepkilerini tam olarak anlamak için her iki durumda da test yapılması önem arz etmektedir.

Çizelge 2. Korelasyon analiz sonuçları.

Table 2. Correlation analysis results.

Korelasyon ilişkisi	Anlamlılık seviyesi	Korelasyon katsayısı, r	Korelasyon ilişkisi	Anlamlılık seviyesi	Korelasyon katsayısı, r
SO-n	0.000	0.97	BTS (%K-D)-n	0.005	0.87
UCS _{kuru} -SO	0.000	-0.98	UPV(%D-K)-n	0.000	0.98
UPV _{doğun} -SO	0.000	-0.99	UCS _{kuru} - UPV(%D-K)	0.000	0.95
BTS _{doğun} -n	0.000	-0.96	UCS _{kuru} - BTS(%K-D)	0.003	0.89
UPV _{kuru} -n	0.000	-0.99	UPV/UCS (D)-SO	0.000	0.97
UCS _{kuru} -n	0.000	-0.98	UPV/UCS (K)-SO	0.000	0.99
UPV(D-K(m/s))-SO	0.006	0.86	UPV/UCS (D)-n	0.000	0.99
UPV(D-K(m/s))-n	0.000	0.95	UPV/UCS (K)-n	0.001	0.94
UCS (%K-D)-SO	0.017	0.80	BTS/n (D)-SO	0.000	0.96
BTS (%K-D)-SO	0.002	0.90	BTS/n (K)-SO	0.000	0.96
UPV(%D-K)-SO	0.002	0.91	BTS _{kuru} /n-UCS _{kuru}	0.001	0.94
UCS (%K-D)-n	0.008	0.85			

SO: Serpantinleşme oranı, n: görünür gözeneklilik, UPV(D-K(m/s)): doğun ve kuru durumda ölçülen UPV değerleri arasındaki fark (m/s), UCS (%K-D): kuru ve doğun durumda ölçülen UCS değerleri arasındaki % fark, BTS (%K-D): kuru ve doğun durumda ölçülen BTS değerleri arasındaki % fark, UPV(%D-K): doğun ve kuru durumda ölçülen UPV değerleri arasındaki % fark, UPV/UCS (D): doğun durumda ölçülen UPV/UCS oranı, UPV/UCS (K): kuru durumda ölçülen UPV/UCS oranı, BTS/n (D): doğun durumda ölçülen BTS'nin gözenekliliğe oranı, BTS/n (D): kuru durumda ölçülen BTS'nin gözenekliliğe oranı

SONUÇLAR

Bu çalışmada, çeşitli alterasyon düzeylerine sahip sekiz bazalt numunesinin temel jeomekanik parametreleri belirlenmiştir. Bütün bazaltlarda gözeneklilik değerleri %0.65 ile %5.3 aralığında ölçülürken, olivin minerallerinin serpantinleşme oranları %5 ile %80 arasında farklılık göstermiştir. Ayrıca, olivin alterasyonunun kayalarındaki gözenekliliğin artışına katkı sağladığı belirlenmiştir. Bazalt örneklerinin kuru ve doğun halde belirlenen jeomekanik özellikleri arasındaki korelasyon ilişkileri incelenmiştir. Ayrıca, doğunluk durumundaki jeomekanik değerlerin kuru duruma göre yüzde değişimlerinin, serpantinleşme yüzdesi ve gözeneklilik değerleriyle ilişkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, serpantinleşme ve gözeneklilik değerleri arttıkça bazaltların dayanımlarının

azaldığını ve doğun-kuru değerler arasındaki farkın arttığını göstermiştir. Ayrıca, serpantinleşme ve gözeneklilik değerleri arttıkça kayaç zayıflığına işaret eden UPV/UCS ((m/s)/MPa) oranında artış, BTS/n (MPa/%) oranında ise düşüş görülmüştür. Çalışma, mineralojik alterasyonun (serpantinleşme) ve gözenekliliğin bazaltların jeomekanik davranışını ve korelasyonunu önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, litolojik ve mineralojik açıdan birbirine yakın özelliklere sahip bazaltların farklı alterasyon seviyeleri, kayda değer korelasyonların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, farklı türdeki kayalar için söz konusu oran ve değişkenlere (UPV/UCS ((m/s)/MPa), BTS/n (MPa/%) ve yüzde fark değerleri) ait korelasyon ilişkilerinin araştırılması bu çalışmada önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Diamantis, K. Gartzos, E. & Migiros, G. (2009). Study on Uniaxial Compressive Strength, Point Load Strength Index, Dynamic And Physical Properties of Serpentinities From Central Greece: Test Results And Empirical Relations, *Engineering Geology*, 108, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.07.002>
- Diamantis, K. Exarhakos, G. Migiros, G. & Gartzos, E. (2016). Evaluating The Triaxial Characteristics Of Ultramafic Rocks From Central Greece Using The Physical, Dynamic and Mechanical Properties. *Open Access Library Journal*, 3, 1–20. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103214>
- Erçikdi, B. Karaman, K. Cihangir, F. Yılmaz, T. Aliyazıcıoğlu, S. & Kesimal, A. (2016). Core Size Effect on The Dry and Saturated Ultrasonic Pulse Velocity of Limestone Samples. *Ultrasonics*, 72, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.006>
- Erişiş, S. Tuğrul, A. Er, S. & Yılmaz, M. (2019). Bazaltik Kayaların Bileşim ve Dokusal Özelliklerinin Mekanik Davranışlarına Etkisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43(2), 259–278. <https://doi.org/10.24232/jmd.655348>
- Farough, A. Moore, D.E. Lockner, D.A. & Lowell, R.P. (2015). Evolution of Fracture Permeability Of Ultramafic Rocks Undergoing Serpentinization at Hydrothermal Conditions: An Experimental Study. *Geochemistry, Geophysics. Geosystems*, 16, 44–55. <https://doi.org/10.1002/2015GC005973>
- Franklin, J.A. (1970). Classification of Rock According to its Mechanical Properties. Ph.D. Dissertation, University of London Imperial College, London, U.K.
- Goodman, R.E. (1993). *Engineering Geology: Rock In Engineering Construction*. Wiley, New York. 412 pp.
- Gürocak, Z. & Kılıç, R. (2005). Effect of Weathering on The Geo-Mechanical Properties of the Miocene Basalts in Malatya, Eastern Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 373–381. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0005-2>
- ISRM. (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing And Monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*. International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, (pp. 628). Ankara, Turkey.
- Kahraman, S. (2007). The Correlations Between The Saturated and Dry P-Wave Velocity of Rocks. *Ultrasonics*, 46(4), 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2007.05.003>
- Karakul, H. & Ulusay, R. (2012). Kayaların Dayanım Özelliklerinin Farklı Doygunluk Koşullarında P-dalga Hızından Kestirimi ve P-Dalga Hızının Fiziksel Özelliklere Olan Duyarlılığı. *Yerbilimleri* 33(3) 141–168.
- Karaman, K. Cihangir, F. Erçikdi, B. & Kesimal, A. (2010). Killi Karbonatlı Kayaçlarda numune Uzunluğunun Ultrasonik P dalga Hızı Üzerindeki Etkisi. *Madencilik Dergisi*, 49(4), 37–45.
- Karaman, K. Kesimal, A. (2015a). Evaluation of The Influence of Porosity on the Engineering Properties of Volcanic Rocks From the Eastern Black Sea Region: NE Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 557–564. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1217-6>
- Karaman, K. & Kesimal, A. (2015b). Correlation of Schmidt Rebound Hardness with Uniaxial Compressive Strength and P-Wave Velocity of Rock Materials. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40 (7), 1897–1906. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1510-z>
- Karaman, K. & Kolaylı, H. (2024). Effects of Olivine Alteration on Micro Internal Structure and Geomechanical Properties of Basalts and Strength Prediction in These Rocks. *Sustainability*, 16, 13, 5490, 1–17. <https://doi.org/10.3390/su16135490>
- Kılıç, A. & Teymen, A. (2008). Determination of Mechanical Properties of Rocks Using Simple Methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 67, 237–244. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0128-3>

- Kıpçak, F. (2024). Van-Süphan Dağı Bölgesinde Bulunan Bazalt Kayaçlarının Demiryolunda Balast Malzemesi Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 15(2), 495–502. <https://doi.org/10.24012/dumf.1367888>
- Özdemir, E. & Sarıcı, D. (2017). Farklı Suya Doygunluk Derecelerinde Bazı Sedimanter Kayaçlarda Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Diğer Fiziko-Mekanik Özelliklerden Kestirimi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 681-691. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.341854>
- Peinsitt, T. Kuchar, F. Hartlieb, P. et al. (2010). Microwave Heating of Dry And Water Saturated Basalt, Granite And Sandstone. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2:18–29. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2010.03181>
- Tarawneh, K. Amaireh, M. Abdelhadi, N. Titi, A. & Dweirj, M. (2022). Characterization of The Physical and Mechanical Properties of the Harrat Ash Shaam Basalt (HASB)/Northeast Jordan. The Open Civil Engineering, 12, 463–475. <https://doi.org/10.4236/ojce.2022.124026>
- Tuğrul, A. & Gürpınar, O. (1997). Proposed Weathering Classification for Basalts and Their Engineering Properties. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 55, 61-71.
- Schuiling, R.D.T. (2011). A Giant Serpentinite Diapir. International Journal of Geosciences, 2, 98–101.
- Sharo, A.A. & Al-Tawaha, M.S. (2019). Prediction of Engineering Properties of Basaltic Rocks in Jordan. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 10(1), 1731-1739. <https://doi.org/10.1007/s10706-0180551-6>.
- Streit, E. Kelemen, P. Eiler, J. (2012). Coexisting Serpentine and Quartz From Carbonate-Bearing Serpentinized Peridotite in the Samail Ophiolite, Oman. Contributions to Mineralogy and Petrology, 164, 821–837. <https://doi.org/10.1007/s00410-012-0775-z>
- Yenice, H. (2002). Bazı Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımları ile Diğer Malzeme Özellikleri Arasındaki İlişkiler. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 65-71.
- Yücel, C. Arslan, M. Temizel, İ. & Abdioğlu, E. (2014). Volcanic Facies and Mineral Chemistry Of Tertiary Volcanics in The Northern Part of The Eastern Pontides, Northeast Turkey: Implications for Pre-Eruptive Crystallization Conditions and Magma Chamber Processes. Mineralogy and Petrology, 108, 439–467. <https://doi.org/10.1007/s00710-0130306-2>.

