

Kayaların Dayanım Özelliklerinin Farklı Doymuluk Koşullarında P-dalga Hızından Kestirimi ve P-Dalga Hızının Fiziksel Özelliklere Olan Duyarlılığı

Prediction of Strength Properties of Rocks at Different Saturation Conditions from P-wave Velocity and Sensitivity of P-wave Velocity to Physical Properties

Hasan KARAKUL¹, Reşat ULUSAY²

¹MTA Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Dairesi, Kaya-Zemin Mekaniği Birimi, Ankara

²Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara

Geliş (received) : 27 Ağustos (August) 2012

Kabul (accepted) : 21 Ekim (October) 2012

Öz

Laboratuvar ortamında kolaylıkla ölçülebilmeleri nedeniyle sismik hızlar (özellikle P-dalga hızı) kullanılarak kayaların dayanım ve deformabilite özelliklerinin kestirimi kaya mekaniği alanında ilgi çekici konular arasında yer almıştır. Günümüze değin birçok araştırmacı tarafından dayanım özelliklerinin P-dalga hızı kullanılarak tahmini amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmalarda doymuluğun etkisi ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Doymuluğun dayanım özelliklerinin P-dalga hızından kestirimi üzerindeki etkisinin dikkate alınması, sözü edilen ilişkilerin farklı doymuluk koşullarının değerlendirilmesinin gerektiği kaya mühendisliği uygulamalarında kullanılabilirliği açısından oldukça önemlidir. Bu husus dikkate alınarak bu çalışmada, kayaların dayanım ve deformabilite özellikleri ile P-dalga hızı arasındaki ilişkiler farklı doymuluk koşulları için araştırılmıştır. Bu amaçla ondört farklı kaya türü kullanılarak bunların dayanım (tek eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı, kohezyon) özellikleri ve elastisite modülleri ile P-dalga hızları farklı doymuluk koşullarında tayin edilmiştir. Deneysel veri esas alınarak, dayanım özellikleri ile P-dalga hızı arasındaki ilişkiler basit ve çok değişkenli regresyon teknikleriyle araştırılmış ve kestirim amaçlı görgül ilişkiler geliştirilmiştir. İstatistiksel analizler, P-dalga hızı, doymuluk ve doymuluktaki etkin kil içeriği (DEKİ) gibi bağımsız değişkenlerin kullanıldığı görgül eşitliklerin yüksek bir kestirim performansına sahip olduğunu göstermiştir. P-dalga hızının gözeneklilikle ters, yoğunlukla doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenirken hareketle, kaya malzemesi içindeki farklı fazların ifade edilebildiği katı tane yoğunluğu ve gözeneklilik özellikleri kullanılarak P-dalga hızının kestirimine olanak sağlayan görgül bir eşitlik de önerilmiştir. Ayrıca, doymuluktaki artışa bağlı olarak, P-dalga hızında artış gözlenen kaya türlerinde kalite indeksi artarken (fisürlülük azalırken), P-dalga hızı azalan kaya türlerinde kalite indeksi de azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: P-dalga hızı, doymuluk, tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı, kohezyon, deformabilite, doymuluktaki etkin kil içeriği, görgül ilişki

ABSTRACT

Since the easy measurement of seismic velocities (particularly P-wave velocity) in laboratory environment, their use to predict the strength and deformability properties of rocks became one of the interesting subjects in rock

* R. Ulusay

E-posta: resat@hacettepe.edu.tr

mechanics. Up to the present, studies on the prediction of strength properties from P-wave velocity have been conducted by a number of investigators. But in these studies, the effect of saturation on the prediction equations has not been investigated. Consideration of saturation on these predictions is important for the use of empirical relationships when the evaluation of different saturation conditions is necessary in rock engineering applications. By considering this issue, in this study, the relationships between the strength and deformability properties and P-wave velocity were investigated at different saturation conditions. For this purpose, strength (uniaxial and tensile strengths and cohesion), modulus of elasticity and P-wave velocity of fourteen different rock types were determined at different saturation conditions. Based on the experimental data, the relationships between strength properties and P-wave velocity were investigated using simple and multiple regression techniques and prediction equations were developed. The statistical analyses indicated that the empirical equations including independent variables such as P-wave velocity, saturation and effective clay content on saturation (ECCS) have high prediction performance. Based on the observation that the P-wave velocity has negative and positive correlations with porosity and density, respectively, using the grain density and porosity, an empirical relationship for the prediction of P-wave velocity was also recommended. In addition, depending on increase in saturation, quality index increases in rock types having increasing P-wave velocity, while it decreases for rock types having decreasing P-wave velocity.

Keywords: P-wave velocity, saturation, uniaxial compressive strength, tensile strength, cohesion, deformability, effective clay content on saturation, empirical relationship

GİRİŞ

Laboratuvar ortamında kolaylıkla ölçülebilmesi nedeniyle, P-dalgı hızı (V_p) kullanılarak kaya malzemelerinin dayanım, deformabilite ve fiziksel özelliklerinin tahmini kaya mekaniği alanında ilgi çekici araştırma konularından biri olmuştur. Günümüze değin, bazı araştırmacılar V_p ile dayanım özellikleri arasındaki ilişkileri incelerken (D'Andrea vd. 1965; Ohkubo ve Teresaki 1977; Aydan vd., 1992, 1993, 1996; Sato vd., 1995; Apuani vd., 1997; Lal, 1999; Kahraman, 2001; Yaşar ve Erdogan, 2004; Karakuş ve Tütmez 2006; Chang vd., 2006; Erguler, 2007; Vasconcelos vd., 2008; Çobanoğlu and Çelik 2008; Erguler and Ulusay, 2009; Khandelwal ve Singh 2009; Török ve Vászrhelyi, 2010; Sarkar vd., 2011), bazı araştırmacılar (Wyllie vd., 1956; Gardner vd., 1974; Fourmaintraux, 1975, 1976; Saito, 1981; Han, 1986; Klimentos, 1991; Kahraman vd., 2005.; Kahraman, 2007; Kahraman ve Yeken, 2008; Török ve Vászrhelyi, 2010) ise fiziksel özelliklerle P-dalgı hızı arasındaki ilişkiler üzerine yoğunlaşmıştır.

Wyllie vd. (1956), V_p ile gözeneklilik arasındaki ilişkileri kaya içerisindeki farklı fazları dikkate alarak incelemişler ve zaman ortalama eşitliğini

önermişlerdir. Fourmaintraux (1975); kireçtaşı, kumtaşı ve granit örnekleri üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada V_p 'nin gözeneklilikle ters orantılı olarak değıştiğini belirlemiştir. Gardner vd. (1974), kumtaşı, şeyl, kireçtaşı, dolomit gibi kayalarda V_p ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi araştırmış ve V_p 'nin yoğunlukla doğru orantılı olarak değıştiğini belirlemiştir. Han (1986), kuru ve tam doygun koşullarda V_p 'nin gözeneklilik ve kil içeriğine karşı duyarlılığını çok değışkenli regresyon analizleriyle incelemiş ve her iki parametredeki artışın V_p 'de bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur. Doygun kumtaşı örneklerinde V_p 'nin kil içeriğiyle değışimini araştıran Klimentos (1991), kil içeriğindeki artışa bağlı olarak V_p 'de azalma olduğunu belirlemiştir. Kahraman vd. (2005) traverten örnekleri üzerinde gerçekleştirdikleri deneylerde yoğunluk, gözeneklilik, ağırlıkça su emme ve boşluk oranı gibi fiziksel özelliklerle V_p arasındaki ilişkileri araştırmışlar ve tahmine yönelik görgül ilişkiler önermişlerdir. Traverten örnekleri üzerinde çalışan Török ve Vasarhelyi (2010) kuru ve doygun koşullar için V_p , yoğunluk ve gözeneklilik arasında ilişkileri belirlemişler ve V_p 'nin yoğunlukla doğru, gözeneklilikle ters orantılı olarak değıştiğini vurgulamışlardır.

Gerek dayanım ve deformabilite özellikleri, gerekse V_p kayaların doymunluğundan etkilenmektedir. Dayanım özelliklerinin doymunluğa veya su içeriğine bağlı olarak gösterdiği azalım (Dyke ve Dobereiner, 1991; Hawkins, 1998; Lashkari-pour, 2002; Vasarhelyi, 2005; Ergüler, 2007; Török ve Vásárhelyi, 2010) ile doymunluğa veya su içeriğine bağlı olarak V_p 'deki değişim (Wyllie vd., 1956; Nur ve Simmons, 1969; Gregory, 1976; Saito, 1981; Han, 1986; Cadoret vd., 1995; King vd., 2000; King, 2009; Kahraman, 2007) bazı araştırmacılarca incelenmiştir. Saito (1981) andezit, dasit, bazalt, kuvars diyorit gibi kaya türlerinde, Han (1986) ve Wyllie vd. (1956) de kumtaşlarında doymunluğa bağlı olarak V_p 'nin arttığını belirlemişlerdir. Cadoret vd. (1995) homojen kireçtaşlarında doymunluğun belirli bir düzeye ulaşana değin V_p 'de önemli bir değişiklik olmadığını, bu düzeyin aşılması halinde ise belirgin bir artışın kaydedildiğini saptamışlardır. King vd. (2000) ve King (2009) düşük kil içeriğine sahip kumtaşlarında doymunluğa bağlı olarak V_p 'de artış gerçekleştiğini ifade etmiştir. Nur ve Simmons (1969) granitlerde doymunluktaki azalmaya bağlı olarak P-dalga hızında azalma gerçekleştiğini vurgulamışlardır. Gregory (1976) yaptığı ölçümler sonucunda doymunluğa bağlı olarak V_p değerlerinde artış ve azalma gösteren kaya türlerinin varlığını belirlemiştir. Kahraman (2007), 41 farklı kaya türü kullandığı çalışmasında sedimenter, mağmatik ve metamorfik kaya türleri için kuru ve doymun koşullarda V_p değerleri arasındaki ilişkileri ayrı ayrı incelemiş ve görgül ilişkiler önermiştir.

V_p ile dayanım ve deformabilite özellikleri arasındaki ilişkilere yönelik çalışmaların büyük çoğunluğu tek eksenli sıkışma dayanımının V_p 'den kuru koşulda kestirimi ile ilgili olup, doymunluğun etkisi, dolayısıyla farklı doymunluklarda kayanın jeomekanik özelliklerinin V_p 'den tahmini konusu incelenmemiştir. Sadece Ergüler (2007), Ergüler ve Ulusay (2009) ve Török and Vásárhelyi (2010) kuru ve tam doymun koşullar için tek eksenli sıkışma dayanımının V_p 'den kestirimine yönelik görgül eşitlikler önermişlerdir. Ergüler (2007) ve Ergüler ve Ulusay (2009) dayanım özellikleri ile V_p arasındaki ilişkileri kil içeren kayalar için kuru, doymun ve %90-100 bağıl nem koşulları için araştırmış ve dayanımın V_p 'den tahmini amacıyla görgül ilişkiler

önermiştir. Török ve Vasarhelyi (2010), iki farklı traverten türü için tek eksenli sıkışma dayanımı ve V_p arasındaki ilişkileri kuru ve doymun koşullar için incelemiştir. Ancak bu çalışmalar, benzer kaya türlerinde ve sadece iki farklı doymunluk koşulu dikkate alınarak gerçekleştirilmiş olduğu için, farklı kaya türleri için doymunluğun dayanım özellikleri ve V_p arasındaki ilişkiler üzerindeki etkisinin incelenmesi gereksinimi doğmuştur.

Griffith yenilme ölçütüne göre bir kaya malzemesinde yenilmenin gerçekleşmesi için gereken çekilme gerilmesi mikro çatlak boyunun karekökü ile ters orantılı olarak değişim göstermektedir (Hudson ve Harrison, 1997). V_p üzerinde de mikro çatlak yoğunluğunun olumsuz etkileri söz konusudur. Bu nedenle bu iki özellik arasında mikro çatlakların yoğunluk ve boyutlarının bu özelliklere olan etkileri dikkate alındığında çok önemli benzerliklerin varlığı söz konusudur. Çekilme dayanımının V_p 'den kestirimi ile ilgili olarak ise, çok az sayıda (Apuani et al., 1997; Khandelwal ve Singh, 2009; Vasconcelos vd., 2008) ve sadece kuru koşulda gerçekleştirilmiş çalışmalar bulunmaktadır. Vasconcelos vd. (2008)'nin granitler, Khandelwal ve Singh (2009)'in ise kömür içeren kayalar için çekilme dayanımı ile V_p arasında belirledikleri yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler ile Apuani vd. (1997)'nin gnayslar için özellikle foliasyon düzlemlerine paralel yöndeki farklı doğrultularda belirledikleri V_p ve çekilme dayanımı değerlerinde yönelime bağlı değişimlerin neredeyse bire bir örtüştüğüne ilişkin saptamaları, yukarıdaki kuramsal yaklaşımı destekleyici niteliktedir.

Öte yandan çok az sayıda araştırmacı V_p ile makaslama dayanımı parametreleri arasındaki ilişkileri incelemiştir (Lal, 1999; Chang vd., 2006; Khandelwal ve Singh, 2009). Lal (1999) şeyller üzerinde yapılmış üç eksenli deneylerin sonuçları ile aynı birimler için belirlenmiş V_p değerlerini karşılaştırmış ve tahmin edilen ve deneysel olarak belirlenen en büyük makaslama dayanımı değerlerinin birbirlerine yakın olduğunu ortaya koymuştur. Chang vd. (2006), Lama ve Vutukuri (1978) ve Carmichael (1982) tarafından elde edilmiş laboratuvar verileri ile Lal (1999) tarafından içsel sürtünme açısı ve V_p arasında geliştirilmiş ilişkinin kestirim performansını karşılaştırmış ve laboratuvar verilerinin eğri etrafında çok geniş

bir saçılım sergilediğini belirtmiştir. Khandelwall ve Singh (2009) kömür, şeyl ve kumtaşları için makaslama dayanımı ile V_p arasında yüksek korelasyon katsayısına sahip bir ilişki belirlemişlerdir. Ancak bu araştırmacılar makaslama dayanımının hangi normal gerilme için belirlendiğini ifade etmemişlerdir.

Makaslama dayanımı parametrelerinden kohezyon sıfır normal gerilme altındaki makaslama dayanımı olarak tanımlanırken, içsel sürtünme açısı normal gerilmeye bağımlı olarak dayanım artışı düzeyini kontrol etmektedir. Makaslama dayanımında normal gerilmedeki artışa bağlı olarak gerçekleşen dayanım artışı mikro çatlak yoğunluğundan olumsuz yönde etkilenen V_p değerlerinde her zaman bir artışa karşılık gelmemektedir. Bunun nedeni ise, uygulanan normal gerilmenin (üç eksenli deney için yanıl gerilme) her zaman mikro çatlakları kapatıcı etki gerçekleştirilememesi, bazen de mikro çatlakların yönelimlerine bağlı olarak mikro çatlakların genişlemesine de neden olabileceği için V_p 'de bir azalmaya neden olmasıdır. Bu nedenle mekanik olarak makaslama dayanımı ile V_p arasında bir ilişki önerilmesi doğru bir yaklaşım olarak gözükmemektedir. Bu nedenle normal gerilmenin sıfır olması durumunda makaslama dayanımını ifade eden kohezyon ile V_p arasındaki ilişkinin araştırılması daha uygundur.

Yukarıda kısaca değinilen önceki çalışmaların sonuçları dikkate alındığında, kayaların dayanım özelliklerinin farklı doyumluk koşulları için V_p 'den tahmininin ve V_p 'nin kayaların fiziksel özelliklerine karşı duyarlılığının farklı türde kayalar için araştırılmasının konuya katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Bu gerekçeden hareketle bu çalışmada; (i) tek eksenli sıkışma dayanımı, Brazilian çekilme dayanımı, kohezyon, elastisite modülü ve V_p 'nin doyumluğa bağlı değişiminin araştırılması, (ii) V_p 'nin gözeneklilik, yoğunluk gibi bazı fiziksel özelliklere karşı olan duyarlılığının incelenmesi ve V_p 'nin bu özelliklerden tahmini amacıyla görgül eşitliklerin önerilmesi (iii) farklı doyumluk koşulları için dayanım özelliklerinin V_p 'den tahmin edilmesi ve (iv) doyumluğun modül oranı, dayanım oranı ve fisürlülük sınıflamaları üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Yukarıda belirtilen amaçlar doğrultusunda; Türkiye'nin değişik yerlerinden derlenen farklı kaya türleri kaya mekaniği laboratuvar deneylerine tabi tutularak yukarıda sözü edilen mekanik ve fiziksel özellikler farklı doyumluk koşulları için tayin edilmiştir. Tek eksenli sıkışma ve Brazilian çekilme dayanımı verileri kullanılarak kayaların Mohr Coulomb yenilme zarfları çizilmiş ve kullanılan kaya türlerinin farklı doyumluk koşullarındaki kohezyonları belirlenmiştir. Farklı doyumluk koşulları için dayanım özelliklerinin V_p 'den tahmin edilmesi amacıyla basit ve çok değişkenli regresyon analizleri yapılarak görgül eşitlikler önerilmiştir. Çok değişkenli regresyon analizleri ile belirlenen görgül eşitliklere ait regresyon katsayılarının önemlilik dereceleri t- ve F- testleriyle incelenmiş ve model yeterlilikleri kontrol edilmiştir. Bu çalışma kapsamında fiziksel özelliklerden V_p 'nin tayini amacıyla da bir görgül eşitlik önerilmiştir. Ayrıca, farklı doyumluk koşulları dikkate alınarak, çalışmada kullanılan tüm kaya türleri için modül oranı, dayanım oranı ve fisürlülük sınıflamaları da gerçekleştirilmiştir.

ÖRNEKLEME ÇALIŞMALARI VE LABORATUVAR DENEYLERİ

Bu çalışmada doyumluk derecesi önem taşıdığı için gözenekliliği ihmal edilecek düzeyde düşük ve gözenekler arası bağlantısız olan kaya türleri (özellikle derinlik kayaları ve metamorfik kayalar) dikkate alınmamış ve doyurulmaya uygun olan volkanik, volkano-sedimanter ve sedimanter toplam 14 kaya türünden örnekler Türkiye'nin değişik bölgelerinden derlenmiştir (Çizelge 1). Derlenen örneklerde deneyde kullanılacak örnek boyutları dikkate alınarak herhangi bir zayıflık düzleminin bulunmamasına ve kaya türlerinin çok düşükten çok yükseğe kadar değişik kil içeriklerine sahip birimlerden seçilmesine özen gösterilmiştir.

Derlenen kaya türleri için mineralojik-petrografik çözümlenmeler (ince kesit çözümlenmeleri) ve X-ışınları kırınım (XRD) çözümlenmeleri Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. XRD difraktogramları Philips PW-1140 model difraktometreye çekilmiş olup, tüm kayacık çözümlenmelerinde difraktogramlardaki piklerin

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan kaya türleri, alındıkları yerler ve jeolojik yaşları.

Table 1. Rock types used in the study, their sampling locations and geological ages.

| Kaya türü | Örnek no. | Alındığı yer | Jeolojik yaş |
|-----------------|-----------|----------------------------------|----------------------------|
| Marn | 1 | Milas (Muğla) | Orta Miyosen (1) |
| Kumtaşı | 2 | Yatağan (Muğla) | Üst Miyosen (1) |
| Andezit-1 | 3 | Ankara Merkez | Orta-üst Miyosen (2) |
| Killi kireçtaşı | 4 | Milas (Muğla) | Orta Miyosen(1) |
| Andezit-2 | 5 | Gölbaşı (Ankara) | Orta-üst Miyosen (2) |
| Tüf | 6 | Nevşehir Merkez | Neojen (3) |
| İgnimbirit | 7 | Avanos (Nevşehir) | Üst Miyosen-Pliyosen (4) |
| Andezit-3 | 8 | İncesu (Kayseri) | Üst Miyosen-Kuvaterner (5) |
| Kireçtaşı | 9 | Gölbaşı-Haymana Yolu | Permo-Triyas (2) |
| Kumtaşı | 10 | Gölbaşı-Haymana Yolu | Kretase-Paleosen (2) |
| Killi kireçtaşı | 11 | Haymana (Ankara) | Üst Kretase (2) |
| Kumtaşı | 12 | Üzülmaz (Zonguldak) | Namuriyen (6) |
| Kilitaşı | 13 | Üzülmaz (Zonguldak) | Namuriyen (6) |
| Marn | 14 | Ereğli-Akçakoca Yolu (Zonguldak) | Üst Kretase-Eosen (7) |

Atalay (1980); (2) Erol (1954); (3) Pisoni (1961); (4) Temel (1992); (5) Innocenti vd. (1975)
Yergök vd. (1987); (7) Altun ve Aksay (2002)

tanımladığı minerallerin belirlenmesi için ASTM (1972)'nin kartoteksleri kullanılmıştır. Difraktogramlardaki piklerin yüzdeleri ise, Gündoğdu (1982) tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir. İnce kesit ve XRD çözümlenmelerinden elde edilen sonuçlara göre kaya türleri için petrografik adlandırma yapılmış ve tayin edilen mineral içerikleri Çizelge 2 'de verilmiştir.

Araziden derlenerek laboratuvara nakledilen kaya bloklarından NX (54.7 mm) ve NQ (47.6 mm) çaplı karot örnekleri alınarak bu örnekler üzerinde farklı doyumluk koşullarında tek eksenli sıkışma dayanımı, Brazilian çekme dayanımı, elastisite modülü ve V_p 'nin yanı sıra, bazı fiziksel özellikler (kuru birim hacim ağırlık, gözeneklilik, ağırlıkça su emme) tayin edilmiştir.

Farklı doyumluk koşulları için ($S_r=0$, $S_r=0.2$, $S_r=0.5$, $S_r=0.7$, $S_r=1$) kaya türlerinin kohezyonları

söz konusu doyumluk için belirlenmiş ortalama Brazilian çekilme dayanımı ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerine ait Mohr dairelerinin ortak teğetinden tayin edilmiştir (Şekil 1).

Tüm kaya mekaniği deneylerinde ISRM (2007) tarafından önerilmiş yöntemler ve ağırlıkça su emme tayinlerinde ise ASTM (2001) standartları dikkate alınmıştır. Farklı doyumluk koşullarında yapılan deneylerde, ISRM (2007) tarafından önerilmiş olan doyum ve taşıma teknikleri ile gözeneklilik/yoğunluk tayin yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde karot örnekleri vakum altında su emme yöntemiyle doyurulmaktadır.

Kullanılan kaya türleri için tayin edilmiş olan fiziksel özelliklere ait istatistiksel değerlendirme Çizelge 3'te, farklı doyumluk koşulları altında tayin edilen mekanik özelliklere ait istatistiksel değerlendirme ise Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 2. X-ışınları kırınım analizi sonuçları.
Table 2. XRD analysis results.

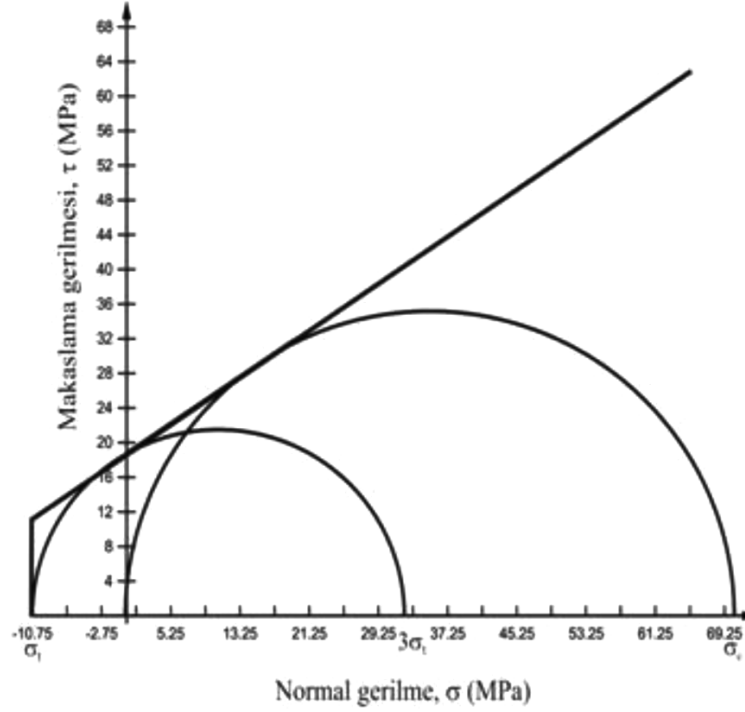
| Kaya türü | Tüm kayaç analizi (%) | | | | | | | | | Kil fraksiyonu analizi (%) | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------|-----------|--------|---------|----------|-------|-------------|--------|---------|----------------------------|---------|----------|---------------|-------|--------|----------------|
| | Kalsit | Feldispat | Kuvars | Dolomit | Aragonit | Mika | Kristobalit | Zeolit | Biyotit | Kil | Smektit | Kaolinit | İllit-Smektit | İllit | Klorit | Smektit-Klorit |
| Kumtaşı (Örnek 2) | 43.19 | 19.65 | 1.99 | 1.9 | - | - | - | - | - | 33.27 | 100 | - | - | - | - | - |
| Marn (Örnek 1) | 2.79 | - | 2.32 | - | 53.47 | 12.78 | - | - | - | 28.64 | - | 86.45 | 6.45 | 7.1 | - | - |
| Andezit-1 (Örnek 3) | - | 30.89 | - | - | - | - | 45.2 | - | - | 23.91 | 100 | - | - | - | - | - |
| Killi kireçtaşı (Örnek 4) | 70.02 | - | 3.01 | - | - | - | - | - | - | 26.97 | 100 | - | - | - | - | - |
| Andezit-2 (Örnek 5) | - | 31.58 | - | - | - | - | 48.61 | - | - | 19.81 | 56 | - | - | 44 | - | - |
| Tüf (Örnek 6) | - | 18.53 | 6.51 | - | - | - | - | 44.09 | - | 30.87 | 100 | - | - | - | - | - |
| İğnimbirit (Örnek 7) | 3.85 | 7.03 | 11.47 | - | - | 14.17 | - | - | - | 63.48 | - | 87 | 6 | 7 | - | - |
| Kumtaşı (Örnek 10) | 29 | 15 | 9 | - | - | - | - | - | - | 47 | 87 | 5 | - | 3 | 5 | - |
| Kireçtaşı (Örnek 9) | 100 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Killi kireçtaşı (Örnek 11) | 35 | 5 | 5 | - | - | - | - | - | 19 | 36 | 53 | 18 | - | 29 | - | - |
| Kumtaşı (Örnek 12) | - | 27 | 14 | - | - | 17 | - | - | - | 42 | - | 49 | - | 27 | - | 24 |
| Marn (Örnek 14) | 33 | 8 | 7 | - | - | 10 | - | - | - | 42 | 76 | - | - | 24 | - | - |
| Kiltaşı (Örnek 13) | - | 12 | 9 | - | - | 27 | - | - | - | 52 | - | 43 | - | 39 | 18 | - |

MEKANİK ÖZELLİKLERİN DOYGUNLUĞA BAĞLI DEĞİŞİMİ

Bu çalışmada öncelikle, mekanik özelliklerin doygunluğa bağlı değişimi araştırılmıştır. Farklı doygunluk koşullarında belirlenen dayanım özellikleri, elastisite modülü ve V_p tayinleri sonucunda dayanım özelliklerinin (tek eksenli sıkışma, çekilme dayanımı, kohezyon) doygunluğa bağlı olarak genelde üstel karakterde bir azalım

sergilediği belirlenmiştir (Şekil 2) Dayanım özelliklerinde gözlenen doygunluğa bağlı bu azalma eğilimi, önceki bazı çalışmalarda belirlenen eğilimlerle uyum içerisindedir (Gunsallus ve Kulhawy, 1984; Lashkaripour, 2002; Vasarhelyi ve Van 2006; Romana ve Vasarhelyi, 2007; Ergüler, 2007).

Kuramsal olarak V_p üzerinde doğrudan etkisi olan elastisite modülünün doygunluğa bağlı



Şekil 1. Andezit için tek eksenli sıkışma ve Brazilian çekme dayanımı verileri kullanılarak kohezyonun belirlenmesi.
Figure 1. Estimation of cohesion using uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength data for andesite.

değişimi de bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Şekil 3'den görüleceği gibi, kullanılan kaya türleri arasında doygunluk arttıkça elastisite modülünde en fazla düşüş gözlenen kaya türü % 80.7 ile ignimbirit (Örnek 7) en az düşüşün gözleendiği kaya türü ise %20.6 ile andezit (Örnek 3)'tir. Doymunluğa bağlı olarak elastisite modülü değerlerinde belirlenen azalma Ergüler (2007) ve Kwasnievski ve Oitaben (2009) tarafından belirlenen eğilimlerle uyumludur.

Farklı doymunluklarda gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, doymunluk artışına bağlı olarak, V_p 'de artma ve azalma şeklinde iki eğilim belirlenmiştir (Şekil 3). Kullanılan kaya türlerinin 8 tanesi için doymunluk artışına bağlı olarak V_p 'de artış, 6 tanesi için ise doymunlukta artışa bağlı olarak V_p 'de azalma gözlenmiştir. Bu durum, doymunluğa bağlı olarak V_p 'de artış gerçekleştiğini belirleyen araştırmacılar ile kil içeriğine bağlı olarak V_p 'deki azalmaya dikkat çeken araştırmacıların saptamalarının birlikte yorumlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bir sonraki bölümde

V_p 'nin doymunluğa bağlı değişiminin mekanik anlamda açıklaması tartışılmıştır.

DOYGUNLUKTAKİ ETKİN KİL İÇERİĞİ VE P-DALGA HIZI KAVRAMLARI VE BUNLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DOYGUNLUĞA BAĞLI DEĞİŞİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

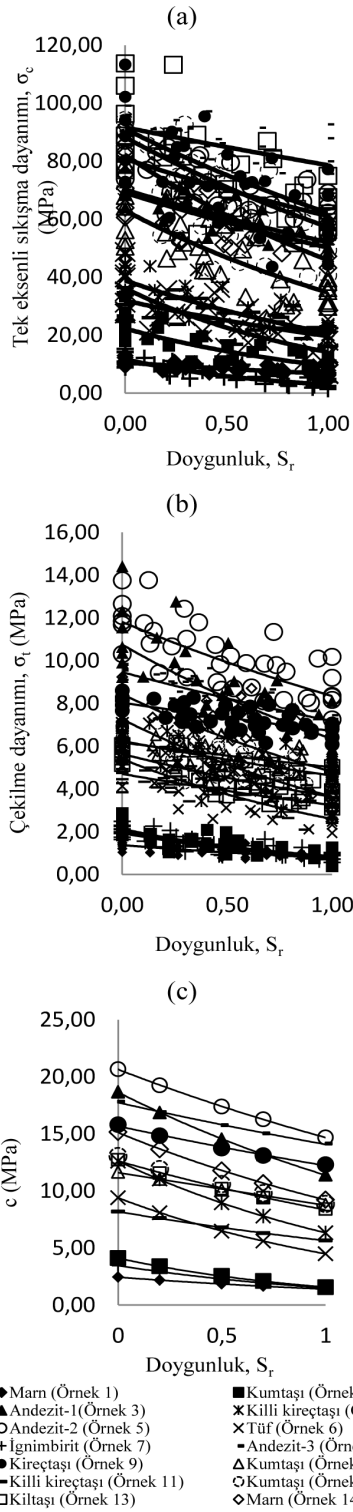
Kil içeren kaya türlerinin dayanım özelliklerinde doymunlukta artışa bağlı olarak gözlenen azalım diğer kaya türlerinden daha fazladır (Goodman, 1989). Ancak bu çalışmada doymunlukta artışa bağlı olarak dayanım özelliklerinde düşük derecede azalmanın gözleendiği kaya türlerinin (Andezit-1/Örnek 3, Andezit-2/Örnek 5, Andezit-3/Örnek 8, Kireçtaşı/Örnek 9, Kumtaşı/Örnek 10, Killi Kireçtaşı/Örnek 11) kil içerikleri %0 ile %47 gibi geniş bir aralık içerisinde değişmektedir. Ayrıca kil içeriği daha düşük (% 26.97) olan kaya türü için (Killi Kireçtaşı/Örnek 4) kil içeriği daha yüksek (% 47) olan kaya türüne (Kumtaşı/Örnek 10) göre dayanım özelliklerinde

Çizelge 3. Fiziksel özelliklere ait istatistiksel değerlendirme.
Table 3. Statistical evaluation for physical properties.

| Kaya türü | Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³) | | | | | | Gözeneklilik (%) | | | | | | Ağırlıkça su emme (%) | | | | | | | |
|----------------------|---|----------|----------|----------|----------------|---------------|------------------|----------|----------|----------------|---------------|----------|-----------------------|----------|----------------|---------------|----------|----------|----------|----------------|
| | Deneysel sayı | En küçük | En büyük | Ortalama | Standart sapma | Deneysel sayı | En küçük | En büyük | Ortalama | Standart sapma | Deneysel sayı | En küçük | En büyük | Ortalama | Standart sapma | Deneysel sayı | En küçük | En büyük | Ortalama | Standart sapma |
| Marn (1) | 10 | 14.19 | 15.08 | 14.49 | 0.29 | 10 | 27.53 | 36.74 | 32.42 | 2.97 | 10 | 19.12 | 24.33 | 21.72 | 2.97 | 10 | 19.12 | 24.33 | 21.72 | 1.6 |
| Kumtaşı (2) | 10 | 20.66 | 22.17 | 21.29 | 0.52 | 10 | 12.26 | 16.18 | 14.15 | 1.31 | 10 | 6.89 | 10.02 | 8.4 | 1.31 | 10 | 6.89 | 10.02 | 8.4 | 0.98 |
| Andezit-1 (3) | 10 | 19.83 | 20.45 | 20.12 | 0.22 | 10 | 3.34 | 5.17 | 4.15 | 0.63 | 10 | 2.42 | 3.03 | 2.78 | 0.63 | 10 | 2.42 | 3.03 | 2.78 | 0.19 |
| Killi kireçtaşı (4) | 10 | 20.88 | 21.36 | 21.13 | 0.15 | 10 | 14.09 | 15.42 | 14.88 | 0.37 | 10 | 5.25 | 7.08 | 6.05 | 0.37 | 10 | 5.25 | 7.08 | 6.05 | 0.54 |
| Andezit-2 (5) | 10 | 20.92 | 21.93 | 21.60 | 0.37 | 10 | 3.16 | 4.25 | 3.66 | 0.36 | 10 | 2.27 | 2.63 | 2.45 | 0.36 | 10 | 2.27 | 2.63 | 2.45 | 0.13 |
| Tüf (6) | 10 | 16.10 | 17.49 | 16.85 | 0.49 | 10 | 13.30 | 15.06 | 14.34 | 0.63 | 10 | 9.36 | 13.08 | 10.94 | 0.63 | 10 | 9.36 | 13.08 | 10.94 | 1.18 |
| İgnimbirit (7) | 10 | 14.42 | 15.19 | 14.83 | 0.20 | 10 | 23.67 | 27.84 | 25.75 | 1.37 | 10 | 16.22 | 20.12 | 17.87 | 1.37 | 10 | 16.22 | 20.12 | 17.87 | 1.32 |
| Andezit-3 (8) | 10 | 21.55 | 22.02 | 21.75 | 0.14 | 10 | 4.43 | 5.22 | 4.80 | 0.22 | 10 | 2.01 | 2.30 | 2.17 | 0.22 | 10 | 2.01 | 2.30 | 2.17 | 0.09 |
| Kireçtaşı (9) | 10 | 25.44 | 26.30 | 25.82 | 0.23 | 10 | 0.51 | 0.74 | 0.62 | 0.07 | 10 | 0.14 | 0.36 | 0.24 | 0.07 | 10 | 0.14 | 0.36 | 0.24 | 0.08 |
| Kumtaşı (10) | 10 | 24.41 | 25.67 | 25.02 | 0.46 | 10 | 2.71 | 4.05 | 3.22 | 0.35 | 10 | 0.94 | 1.52 | 1.26 | 0.35 | 10 | 0.94 | 1.52 | 1.26 | 0.21 |
| Killi kireçtaşı (11) | 10 | 21.91 | 25.23 | 23.97 | 1.05 | 10 | 4.37 | 7.93 | 6.05 | 1.08 | 10 | 2.07 | 3.15 | 2.47 | 1.08 | 10 | 2.07 | 3.15 | 2.47 | 0.31 |
| Kumtaşı (12) | 10 | 24.70 | 25.58 | 25.20 | 0.26 | 10 | 3.31 | 4.43 | 4.00 | 0.34 | 10 | 1.17 | 1.94 | 1.56 | 0.34 | 10 | 1.17 | 1.94 | 1.56 | 0.25 |
| Kıltaşı (13) | 10 | 25.80 | 27.04 | 26.41 | 0.44 | 10 | 1.62 | 2.42 | 1.92 | 0.23 | 10 | 0.49 | 1.04 | 0.71 | 0.23 | 10 | 0.49 | 1.04 | 0.71 | 0.17 |
| Marn (14) | 10 | 25.20 | 26.08 | 25.62 | 0.29 | 10 | 0.74 | 1.23 | 0.98 | 0.13 | 10 | 0.26 | 0.68 | 0.40 | 0.13 | 10 | 0.26 | 0.68 | 0.40 | 0.13 |

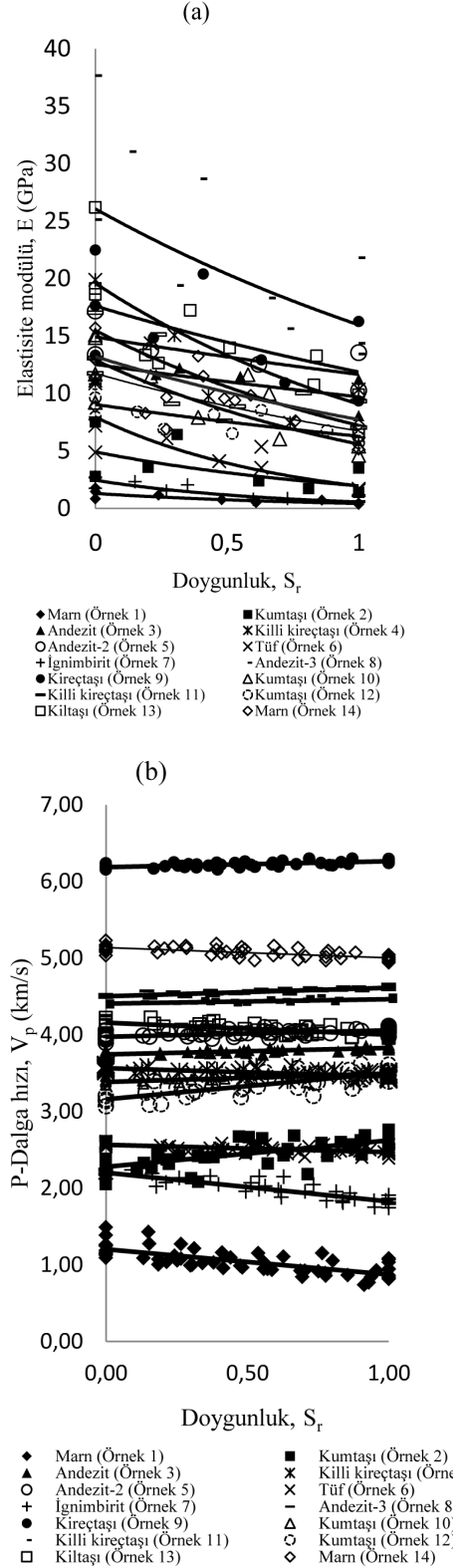
Çizelge 4. Farklı doygunluk koşullarında ($S_r=0-1$) tayin edilen mekanik özelliklere ait istatistiksel değerlendirme.
Table 4. Statistical evaluation for mechanical properties determined at different saturation conditions ($S_r=0-1$).

| Kaya türü | Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa) | | | Brazilian çekme dayanımı (MPa) | | | P-dalga hızı (V_p) (km/s) | | | Elastisite Modülü (GPa) | | |
|----------------------|------------------------------------|----------|----------|--------------------------------|----------|----------|-------------------------------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|
| | Deneysel sayı | En küçük | En büyük | Deneysel sayı | En küçük | En büyük | Deneysel sayı | En küçük | En büyük | Deneysel sayı | En küçük | En büyük |
| | Marm (1) | 32 | 4.58 | 12.85 | 55 | 0.55 | 1.87 | 71 | 0.74 | 1.49 | 9 | 0.7 |
| Kumtaşı (2) | 28 | 6.78 | 33.28 | 44 | 0.39 | 2.86 | 55 | 2.05 | 2.76 | 8 | 1.38 | 7.52 |
| Andezit-1 (3) | 31 | 47.27 | 77.60 | 39 | 5.26 | 14.42 | 46 | 3.69 | 3.87 | 7 | 8.07 | 13.34 |
| Kıllı kireçtaşı (4) | 35 | 16.37 | 47.89 | 38 | 2.73 | 8.26 | 48 | 3.39 | 3.61 | 8 | 5.62 | 19.88 |
| Andezit-2 (5) | 32 | 54.79 | 90.52 | 40 | 7.25 | 13.77 | 57 | 3.89 | 4.11 | 6 | 10.24 | 17.17 |
| Tüf (6) | 35 | 6.55 | 48.61 | 39 | 1.94 | 6.62 | 56 | 2.39 | 2.61 | 9 | 1.57 | 10.88 |
| İgnimbirit (7) | 37 | 1.32 | 15.21 | 45 | 0.56 | 2.48 | 44 | 1.74 | 2.25 | 11 | 0.51 | 2.71 |
| Andezit-3 (8) | 35 | 70.05 | 99.10 | 42 | 6.83 | 9.85 | 41 | 4.48 | 4.66 | 11 | 13.43 | 37.66 |
| Kireçtaşı (9) | 34 | 43.6 | 113.32 | 42 | 6.08 | 8.60 | 46 | 6.16 | 6.3 | 10 | 9.34 | 22.48 |
| Kumtaşı (10) | 38 | 25.32 | 79.03 | 41 | 4.26 | 7.13 | 41 | 3.32 | 3.54 | 11 | 4.59 | 15.07 |
| Kıllı kireçtaşı (11) | 31 | 11.05 | 36.29 | 50 | 2.09 | 5.20 | 41 | 4.36 | 4.51 | 10 | 7.02 | 17.03 |
| Kumtaşı (12) | 41 | 36.16 | 94.25 | 43 | 4.03 | 7.08 | 40 | 3.07 | 3.62 | 12 | 5.71 | 10.83 |
| Kılıtaşı (13) | 33 | 51.63 | 113.64 | 44 | 3.11 | 6.16 | 44 | 3.96 | 4.22 | 11 | 6.7 | 26.19 |
| Marm (14) | 31 | 43.16 | 82.33 | 36 | 3.64 | 9.55 | 45 | 4.94 | 5.23 | 15 | 5.15 | 13.25 |



Şekil 2. Dayanım özelliklerinin (a. tek eksenli sıkışma dayanımı, b. çekme dayanımı, c. kohezyon) doymunluğa bağlı değişimi.

Figure 2. Variation of strength properties (a. uniaxial compressive strength, b. tensile strength, c. cohesion) with saturation.



Şekil 3. (a) Elastisite modülü ve (b) P-dalga hızının doymunluğa bağlı değişimi.

Figure 3. Variation of (a) modulus of elasticity and (b) P-wave velocity with saturation.

doygunluğa bağlı olarak daha yüksek oranda bir azalma gözlenmiştir.

Yukarıda ifade edilen bulgudan hareketle, doygunluğa bağlı olarak dayanım özelliklerinde gözlenen azalmanın değerlendirilmesi açısından sadece mineralojik bir yaklaşımın yetersiz olduğu kanısına ulaşılmaktadır. Kuramsal olarak, doygunluğun kil içeren kaya türlerinde dayanım azalımı üzerinde etkili olması kil mineralleri ile su molekülleri arasında bir etkileşimin varlığıyla mümkün olup, kaya malzemeleri için bu temas gözenekliliğinin izin verdiği ölçüde olanaklı olabilmektedir. Dolayısıyla dayanım ve deformabilite özelliklerinde doygunluktaki artışa bağlı olarak gerçekleşen azalma üzerinde gözenekliliğin ve kil içeriğinin ortak etkisinin düşünülmesi daha doğru olacaktır.

Bu ortak etki, bu çalışmada Doygunluktaki Etkin Kil İçeriği (DEKİ) şeklinde adlandırılmış ve aşağıdaki eşitlikte verilen parametre tarafından tanımlanmıştır.

$$\text{DEKİ} (\%) = n \times \text{cl} (\%) \quad (1)$$

Burada; n gözeneklilik, cl ise kayanın kil içeriğidir.

Doygunluğa bağlı olarak kayaların dayanım ve deformabilite özelliklerinde meydana gelen azalma ile DEKİ arasındaki ilişkilerin verildiği Şekil 4'den görüleceği gibi DEKİ, dayanım ve deformabilite özelliklerinde doygunluğa bağlı olarak gelişen azalma üzerinde etkilidir.

Doygun ve kuru koşullarda ölçülen V_p değerleri arasındaki fark (ΔV_p ; m/s) (Kahraman, 2007) aşağıdaki eşitlikten belirlenmektedir.

$$\Delta V_p = V_{p(\text{doygun})} - V_{p(\text{kuru})} \quad (2)$$

DEKİ ile ΔV_p arasındaki ilişki Şekil 5 ve Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$\text{DEKİ} = 6 \cdot 10^{-5} \Delta V_p^2 - 0.012 \Delta V_p + 0.94$$

$$(R^2 = 0.83) \quad (3)$$

DEKİ'nin doygun ve kuru koşullarda elde edilen V_p değerleri arasındaki fark kullanılarak oldukça yüksek bir belirleme katsayısı veren Eşitlik 3'ten tayin edilebileceği anlaşılmaktadır.

P-DALGA HIZININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERDEN KESTİRİMİ

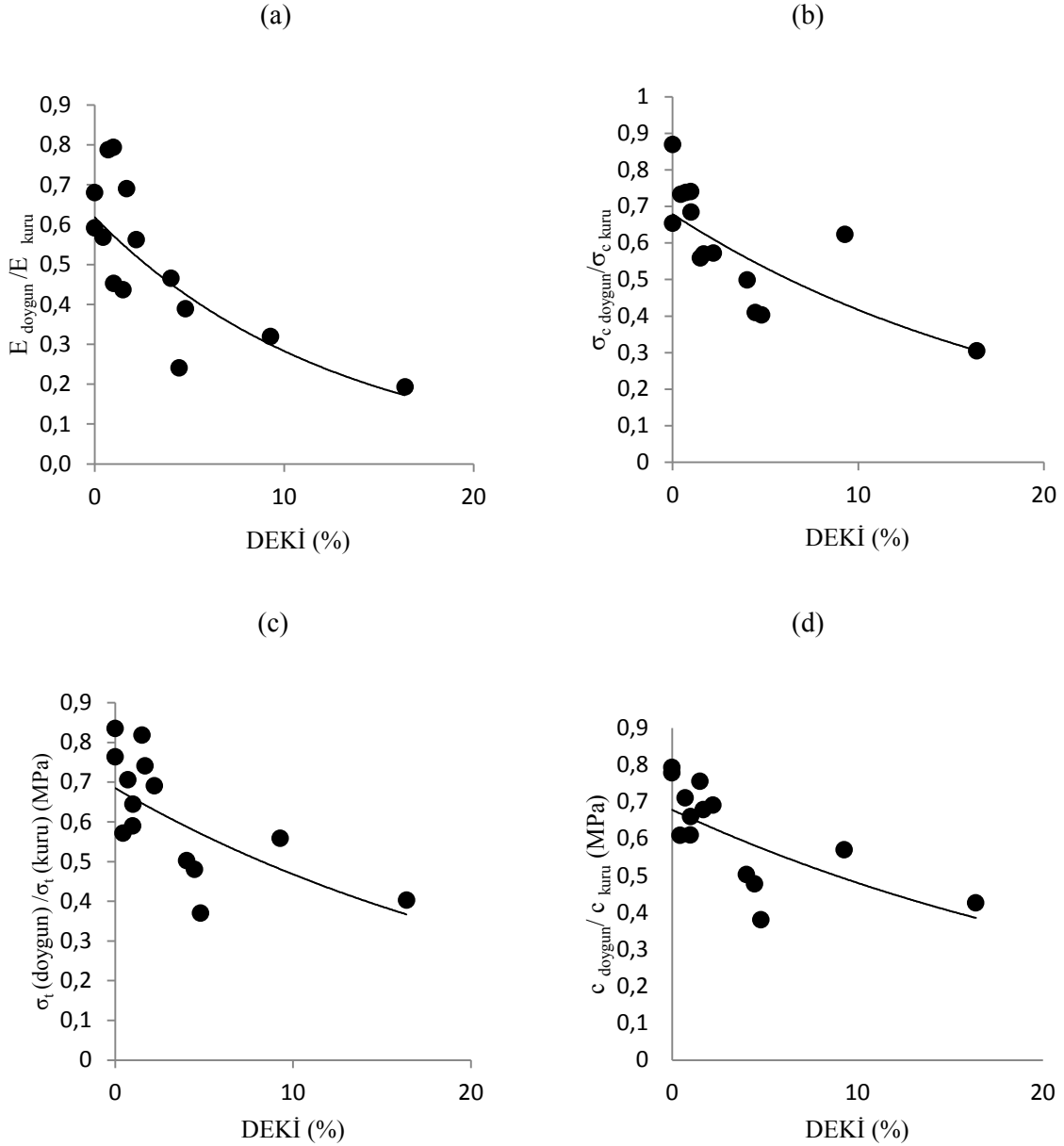
Bu çalışmada kullanılan kaya türleri için V_p 'nin gözeneklilik ve yoğunluğa bağlı değişimleri de incelenmiştir. Şekil 6'dan görüleceği gibi, Giriş bölümünde değinilmiş olan önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olarak, V_p gözeneklilikle ters, yoğunlukla doğru orantılı bir ilişki içerisindedir.

Şekil 6'da V_p ile ilişkilendirilen fiziksel özelliklerden gözeneklilik ve yoğunluk kaya içerisindeki farklı fazları dikkate almamaktadır. Ancak kayalarda yayılan sismik dalgalar kaya içerisindeki farklı fazların özelliklerinden ve oransal dağılımlarından önemli düzeyde etkilenmektedir. Bu durumu formülize eden Wyllie vd. (1956) "zaman ortalama eşitliği" adıyla anılan aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir.

$$\frac{1}{V_p} = \frac{1-n}{V_{ps}} + \frac{n}{V_{pf}} \quad (4)$$

Burada; V_p P-dalga hızı, V_{ps} katı içinden geçen P-dalga hızı, V_{pf} akışkan içinden geçen P-dalga hızı, n ise gözenekliliktir.

Eşitlik 4'de tanımlandığı gibi, bir kaya içerisinde geçen P-dalgasının hızı kaya içerisindeki katı ve akışkan kısımların oransal dağılımından etkilenmektedir. Bu nedenle, V_p 'nin kayaların fiziksel özelliklerinden kestirimiyle ilgili olarak kaya içerisindeki farklı zonlara ait özelliklerinin dikkate alınması ve bu amaçla kullanılacak fiziksel özellikler arasında V_p üzerindeki etkileri açısından örtüşme olmaması son derece önemlidir. Hem katı hem akışkan fazı içeren kaya malzemesi için belirlenen yoğunluk ve gözeneklilik birbirine bağımlı (birbirlerini etkileyen) özellikler olup, kaya içerisindeki farklı fazların özelliklerini tanımlama yeteneğine sahip değişimlerdir. Diğer



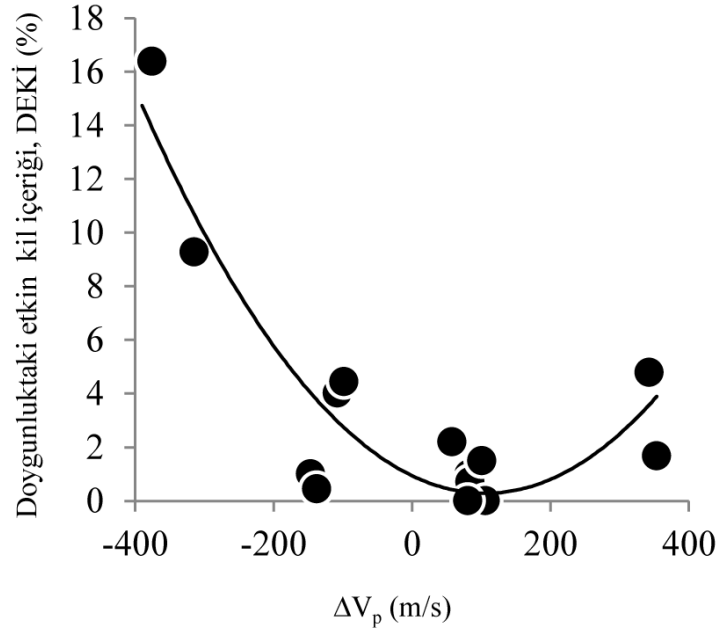
Şekil 4. Deformabilite (a. elastisite modülü) ve dayanım (b. tek eksenli sıkışma dayanımı, c. çekme dayanımı, d. kohezyon) özelliklerinin doygunlukta etkin kil içeriği (DEKİ)'ne bağlı değişimleri.

Figure 4. Variation of deformability (a. modulus of elasticity) and strength (b. uniaxial compressive strength, c. tensile strength, d. cohesion) properties with effective clay content on saturation (ECCS).

bir ifadeyle, genel olarak çok yoğun kayalar az gözenekli ve çok gözenekli kayalar da az yoğundur. Bu nedenle V_p 'nin kestirimi amacıyla katı tane yoğunluğu (katı fazı tanımlayan) ve gözeneklilik (akışkan fazı tanımlayan) özelliklerinin kullanılması, ayrı ayrı fazları tanımlayan fiziksel özellikler olmaları açısından çok daha yerinde

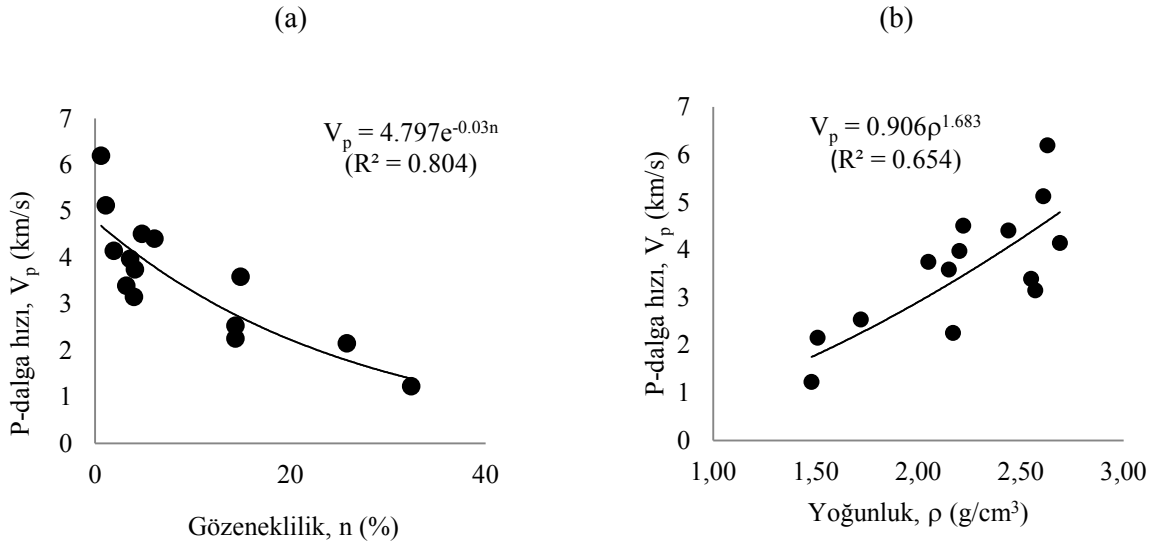
olacaktır. Burada katı tane yoğunluğu kayanın katı kısmındaki V_p 'yi tanımlayan bir indeks iken, gözeneklilik ise akışkan fazın (kuru koşulda hava) varlığı nedeniyle katı faza ait V_p 'deki oransal azalmayı kontrol etmektedir.

Katı tane yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir (ISRM, 2007).



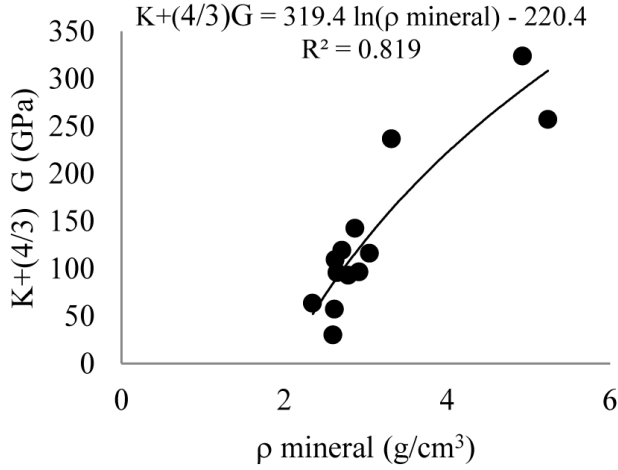
Şekil 5. Doygunlukta etkin kil içeriği (DEKI) ve P-dalga hız farkı (ΔV_p) arasındaki ilişki.

Figure 5. Relationship between effective clay content on saturation (ECCS) and P-wave velocity difference (ΔV_p).



Şekil 6. P-dalga hızının (a) gözeneklilik ve (b) yoğunluğa bağlı değişimi.

Figure 6. Variation of P-wave velocity with (a) porosity and (b) density.



Şekil 7. K+4/3G parametresinin mineral yoğunluğuna bağlı değişimi.
Figure 7. Variation of K+4/3G parameter with mineral density.

$$\rho_s = \frac{100 \rho_d}{100-n} \quad (5)$$

Burada; ρ_s tane yoğunluğu, ρ_d kuru yoğunluk ve n gözenekliliktir.

Şekil 7’de bazı minerallerin (kuvars, kalsit, muskovit, plajiyoklaz, feldispat, kil, dolomit, jips, biyotit, olivin, pirit, hematit, aragonit) K+4/3G değerlerinin yoğunluklarına (Mavko vd., 2009) bağlı değişimleri görülmektedir. Şekil 7’den görüleceği gibi, söz konusu parametreler arasında yüksek belirleme katsayısına sahip bir ilişki söz konusu olup, kaya malzemesinin katı kısmındaki hızı denetleyen K+4/3G parametresi katı tane yoğunluğu ile dolaylı olarak ifade edilebilmektedir. Dolayısıyla kaya içerisindeki katı ve akışkan kısmın V_p üzerindeki etkilerinin birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla $\rho_{\text{tane}}/(1+n(\%))$ oranının (azaltılmış tane yoğunluğu) kullanılmasının oldukça açıklayıcı olacağı düşünülerek, bu oranın V_p ile ilişkisi Şekil 8’de verilmiştir. Gözenekliliğin sıfır olması koşulunda azaltılmış tane yoğunluğunun paydası 1 değerini alacak (sıfıra bölünme sorunu yaşanmayacak) ve V_p tamamen katı tane yoğunluğuna bağlı olarak tahmin edilecektir. Gözenekliliğin sıfırdan büyük olması koşulunda ise, V_p üzerinde gözeneklilikle doğru orantılı bir azaltma uygulanmış olacaktır.

$$V_p = 1.136 \ln\left(\frac{\rho_s}{1+n(\%)}\right) + 4.81 \quad (6)$$

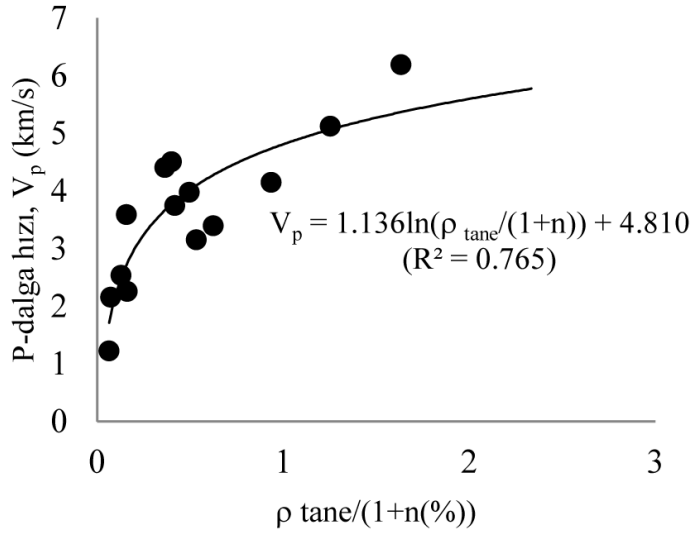
Burada; V_p P-dalga hızı (km/s), ρ_s tane yoğunluğu, n (%) gözenekliliktir.

Şekil 8’den görüleceği gibi, kuru koşuldaki V_p ile $\rho_{\text{tane}}/(1+n(\%))$ oranı arasında yüksek belirleme katsayısına sahip bir ilişki bulunmaktadır. Azaltılmış tane yoğunluğu ($\rho_{\text{tane}}/(1+n(\%))$) kullanılarak aynı zamanda katı ve akışkan fazın V_p değeri üzerindeki etkilerinin ikisinin de değerlendirilmesine alınması sağlanmaktadır. Bu ilişki yardımıyla kuru koşuldaki V_p ’nin fiziksel özellikler kullanılarak çok düşük bir hata payı ile kestirimi olanaklı olmaktadır.

Gözeneklerin doygun olması koşulunda V_p ’deki değişim farklı kaya türleri için farklı eğilimlere sahip olmaktadır. Şekil 5’de tanımlanan ΔV_p -DEKİ ilişkisi bu eğilimleri oldukça düşük bir hata yüzdesi ile açıklayabilmektedir.

DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN FARKLI DOYGUNLUKLARDA P-DALGA HIZINDAN KESTİRİMİ

Bu çalışmada dayanım özelliklerinin (tek eksenli sıkışma, çekilme dayanımları ve kohezyon) farklı doygunluk koşullarında V_p ’den kestirimi



Şekil 8. P-dalga hızının azaltılmış tane yoğunluğuna ($\rho_{\text{tane}}/(1+n(\%))$) bağlı değişimi.
Figure 8. Variation of P-wave velocity with reduced grain density ($\rho_{\text{tane}}/(1+n(\%))$).

ile ilgili olarak görgül ilişkiler geliştirilmiştir. Bu amaçla incelenen kaya türlerine ait fiziksel özelliklerdeki farklılıkların dikkate alınmadığı basit regresyon analizlerinin yanı sıra, birden fazla sayıda değişkenin dikkate alındığı çok değişkenli doğrusal regresyon analiz yöntemlerinden de yararlanılmıştır.

Basit Regresyon Analizleri

Basit regresyon analizleri kullanılarak tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c), çekilme dayanımı (σ_t) ve kohezyonun (c) V_p 'den kestirimi amacıyla beş farklı doyumluk durumu için görgül ilişkiler geliştirilmiştir.

Kuru ve farklı doyumluk koşullarındaki σ_c - V_p , σ_t - V_p ve c - V_p ilişkilerinin aynı şekil üzerinde gösterildiği Şekil 9'dan görüleceği gibi, kuru koşullardan doyumlu koşula geçildikçe eğrisel ilişkiler yataylaşmaktadır. Bu durum doyumluktaki artışa bağlı olarak dayanım özelliklerindeki azalmanın V_p 'deki azalımdan oransal olarak çok daha fazla olduğuna işaret etmektedir.

Çizelge 5'de tek eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı ve kohezyon ile V_p arasında beş farklı doyumluk koşulu için basit regresyon analizleriyle belirlenmiş ilişkiler verilmiştir. Bu eşitlikler Eşitlik 7, 8 ve 9'da verilen formatta

olup, bu eşitliklerdeki a ve b katsayılarının doyumluğa bağlı değişimleri tek eksenli sıkışma dayanımı için Eşitlik 10 ve Eşitlik 11'de, çekilme dayanımı için Eşitlik 12 ve Eşitlik 13'de ve kohezyon için ise Eşitlik 14 ve 15'de verilmiştir.

$$\sigma_c = a_s V_p^{b_s} \quad (7)$$

$$\sigma_t = a_t V_p^{b_t} \quad (8)$$

$$c = a_c V_p^{b_c} \quad (9)$$

$$a_s = 6.987e^{-0.64S_r} \quad (R^2 = 0.99) \quad (10)$$

$$b_s = 1.608e^{0.064S_r} \quad (R^2 = 0.96) \quad (11)$$

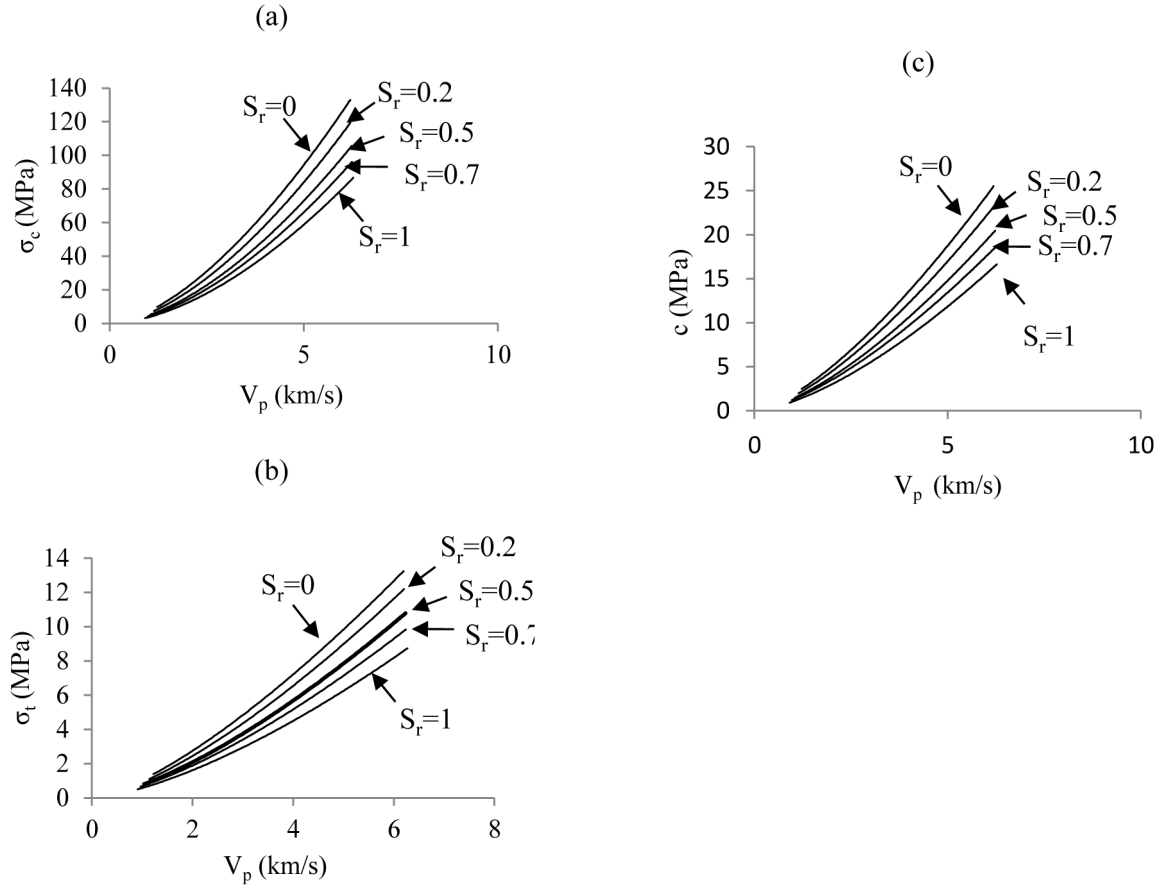
$$a_t = 1.039 e^{-0.58S_r} \quad (R^2 = 0.99) \quad (12)$$

$$b_t = 1.395 e^{0.055S_r} \quad (R^2 = 0.96) \quad (13)$$

$$a_c = 1.822 e^{-0.54 S_r} \quad (R^2 = 0.99) \quad (14)$$

$$b_c = 1.444 e^{0.035S_r} \quad (R^2 = 0.86) \quad (15)$$

Dayanım özellikleri için yukarıdaki eşitlikler kullanılarak farklı doyumluklar için kestirilen



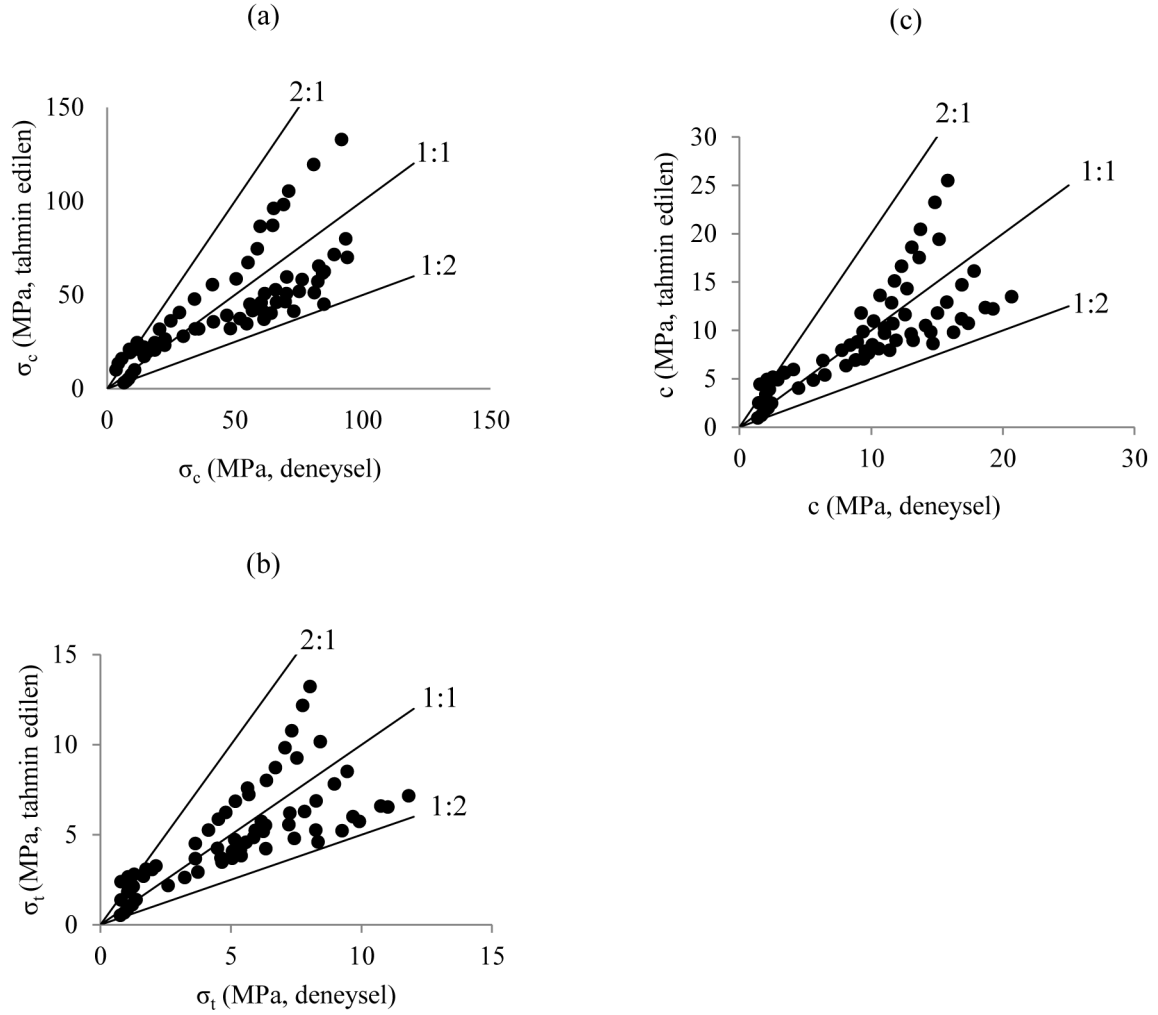
Şekil 9. Basit regresyon analizlerinden farklı doygunluk (S_r) koşulları için belirlenen dayanım özellikleri (a. Tek eksenli sıkışma dayanımı, b. çekme dayanımı, c. kohezyon) ile P-dalgı hızı arasındaki ilişkiler.

Figure 9. The relationships between the strength properties (a. uniaxial compressive strength, b. tensile strength, c. cohesion) and P-wave velocity at different saturation (S_r) conditions based on simple regression analyses.

Çizelge 5. Farklı doygunluk dereceleri için dayanım özelliklerinin V_p 'den kestirimi amacıyla basit regresyon analizleriyle belirlenen görgül ilişkiler.

Table 5. Empirical relationships determined for the prediction of strength properties from V_p by simple regression analyses.

| Doygunluk, S_r | Tek eksenli sıkışma dayanımı, s_c (MPa) | Çekilme dayanımı, s_t (MPa) | Kohezyon, c (MPa) |
|------------------|---|--------------------------------|-------------------------|
| | σ_c - V_p ilişkisi | σ_t - V_p ilişkisi | c - V_p ilişkisi |
| 0 | $\sigma_c = 7.182 V_p^{1.600}$ | $\sigma_t = 1.050 V_p^{1.389}$ | $c = 1.838 V_p^{1.442}$ |
| 0.2 | $\sigma_c = 6.070 V_p^{1.633}$ | $\sigma_t = 0.919 V_p^{1.416}$ | $c = 1.620 V_p^{1.459}$ |
| 0.5 | $\sigma_c = 4.937 V_p^{1.673}$ | $\sigma_t = 0.767 V_p^{1.444}$ | $c = 1.371 V_p^{1.477}$ |
| 0.7 | $\sigma_c = 4.401 V_p^{1.684}$ | $\sigma_t = 0.694 V_p^{1.447}$ | $c = 1.265 V_p^{1.467}$ |
| 1 | $\sigma_c = 3.774 V_p^{1.706}$ | $\sigma_t = 0.583 V_p^{1.473}$ | $c = 1.053 V_p^{1.502}$ |



Şekil 10. Farklı doygunluk koşulları için basit regresyon analizlerinden elde edilen eşitliklerden tahmin edilmiş dayanım özelliklerinin (a. tek eksenli sıkışma dayanımı, b. çekme dayanımı, c. kohezyon) deneysel değerlerle karşılaştırılması.

Figure 10. Comparison of the strength properties (a. uniaxial compressive strength, b. tensile strength, c. cohesion) estimated from the equations derived from simple regression analyses and those determined experimentally.

değerlerin deneysel değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 10). Bununla birlikte, 1:1 doğrusundan belirli düzeylerde sapmaların varlığı da dikkat çekmektedir.

Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizleri

Basit regresyon analizleriyle belirlenen ilişkilerden tahmin edilen dayanım değerleri deneysel değerlerle genel olarak uyumlu olmakla birlikte,

belirli düzeylerde sapmaların söz konusu olması nedeniyle, dayanım özelliklerinin V_p 'den daha hassas bir şekilde kestirimi ancak dayanım özellikleri üzerinde etkili olan çok sayıda değişkenin dikkate alınması ile olanaklı olabilecektir. Bu amaçla çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri de yapılarak görgül ilişkiler belirlenmiştir.

Analizlerde bağımsız değişkenler olarak V_p , doygunluk ve DEKİ parametreleri seçilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal

ilişkilerin kurulabilmesi amacıyla tek eksenli sıkışma ve çekilme dayanımları, kohezyon ve V_p değerlerinin on tabanına göre logaritmaları alınmıştır. Çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri kullanılarak belirlenen görgül ilişkiler Eşitlik 16, 17 ve 18'de verilmiştir.

$$\log(\sigma_c) = 1.368 + 0.794\log(1 + V_p) - 0.201S_r - 0.056DEKİ \quad (R^2 = 0.911) \quad (16)$$

$$\log(1 + \sigma_t) = 0.412 + 0.787\log(1 + V_p) - 0.153S_r - 0.023DEKİ \quad (R^2 = 0.865) \quad (17)$$

$$\log(c) = 0.487 + 1.03\log(1 + V_p) - 0.196S_r - 0.035DEKİ \quad (R^2 = 0.914) \quad (18)$$

Burada; σ_c tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa), σ_t çekilme dayanımı (MPa), c kohezyon (MPa), V_p P-dalga hızı (km/s), S_r doygunluk (kesirsel), DEKİ doygunluktaki etkin kil içeriği (%)'dir.

Şekil 11'den görüleceği gibi, yukarıdaki eşitliklerden tahmin edilen dayanım özellikleri ile deneysel olarak tayin edilmiş değerler arasında oldukça iyi bir uyum bulunmakta olup, çok değişkenli analizlerle elde edilen kestirim eşitliklerinin basit regresyon analizleriyle elde edilenlerinkine göre çok daha yüksek bir kestirim performansı söz konusudur.

Eşitlik 16, 17 ve 18'de verilen ilişkilerdeki regresyon katsayılarının önemlilik dereceleri t- ve F-testleriyle incelenmiş ve sonuçlar her dayanım özelliği için Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelge 6'daki tüm t değerlerine karşılık gelen anlamlılık düzeyleri 0.000 olarak belirlenmiş olup, bu değerler $\alpha=0.05$ yanılma düzeyinden küçüktür. Bu nedenle tek eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı ve kohezyonun kestirimi için kullanılan çok değişkenli görgül eşitliklerdeki regresyon katsayıları sıfırdan farklı olup, bağımlı değişkenle tek tek bağımsız değişkenler arasında doğrusal ilişkilerin var olduğu anlaşılmaktadır.

Öte yandan, modelin genel olarak anlamlılığıyla ilgili olarak birlikte değerlendirilen tüm bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenle doğrusal

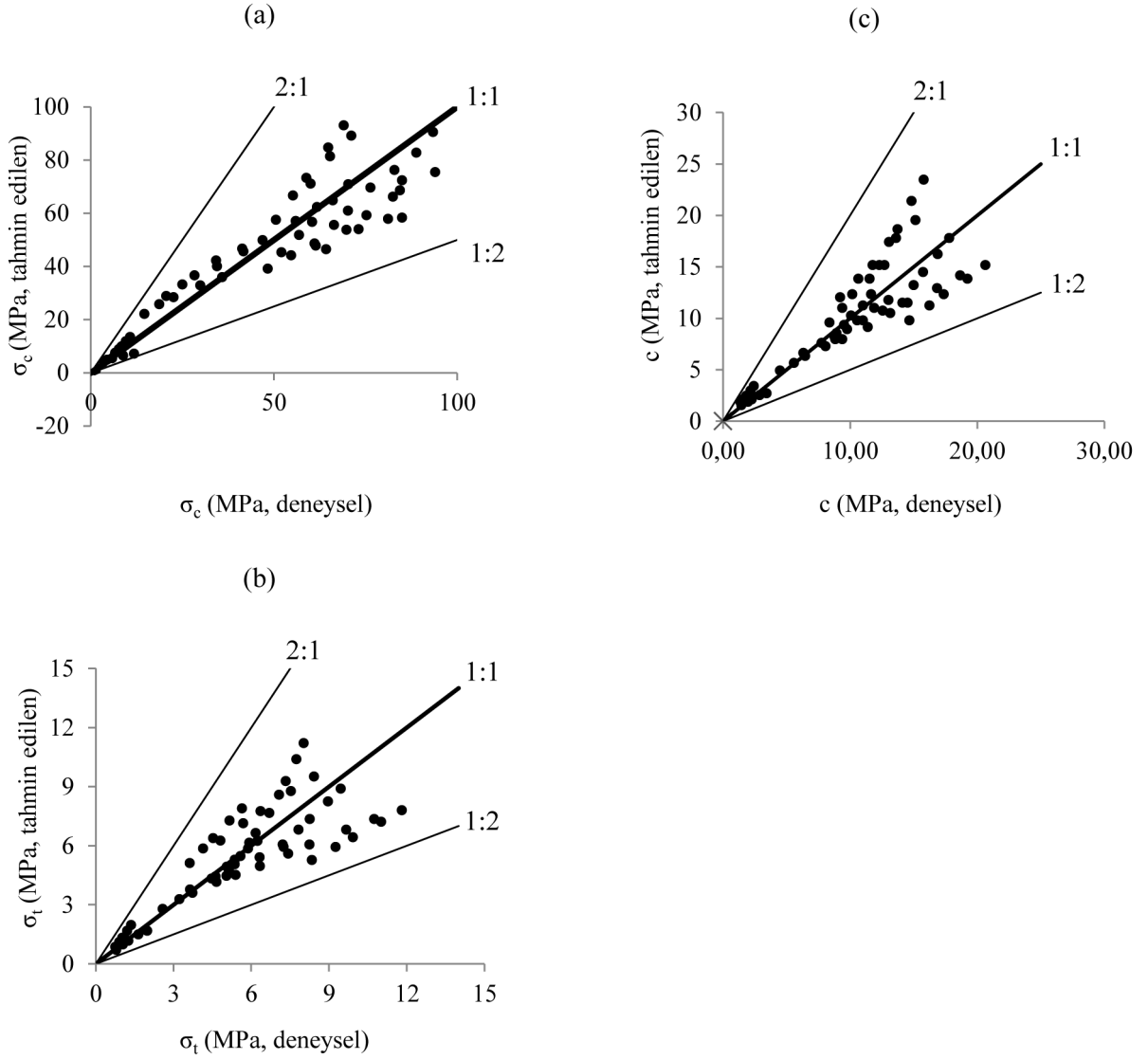
bir ilişkiye sahip olup olmadığının belirlenmesinde F-testinden yararlanılmaktadır. Tek eksenli sıkışma dayanımı, çekilme dayanımı ve kohezyon için yapılan çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri için sırasıyla $F=1345.501$, $F=1031.747$ ve $F=197.866$ (Çizelge 7) değerleri hesaplanmıştır. Bu F değerlerine karşılık gelen anlamlılık düzeylerinin tümü $\alpha=0.05$ yanılma düzeyinden küçük olduğu için, regresyon katsayılarının tümünün sıfır olduğu hipotezi reddedilerek en az bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde etki sahibi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla t- ve F- testleri sonucunda bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında kurulan ve eşitlik 16, 17 ve 18'de verilen doğrusal ilişkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır.

FARKLI DOYGUNLUK KOŞULLARININ MODÜL ORANI, DAYANIM ORANI VE FİSÜRLÜLÜK SINIFLAMALARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bu çalışmada ayrıca, kullanılan kaya türleri farklı doygunluk dereceleri dikkate alınarak, mevcut modül oranı, dayanım oranı ve fisürlülük sınıflamaları açısından da değerlendirilmiştir. Söz konusu değerlendirmeler, modül ve dayanım oranı sınıflamaları için kuru ($S_r=0$) yarı doygun ($S_r=0.5$) ve tam doygun ($S_r=1$), fisürlülük sınıflaması için ise kuru ve tam doygun koşullar dikkate alınarak yapılmıştır.

Modül Oranı Sınıflaması

Bu çalışmada kullanılan kaya türleri için Deere ve Miller (1966)'in önerdikleri ve Şekil 12'de verilen modül oranı abağı kullanılarak, üç farklı doygunluk derecesine göre değerlendirme yapılmıştır. Verinin Şekil 12'deki abak üzerindeki konumu dikkate alınarak, kullanılan kaya türlerinin genel olarak düşük ve orta modül oranına sahip oldukları belirlenmiştir. Doygunluktaki artışa bağlı olarak, kumtaşı (Örnek 2), andezit-1 (Örnek 3), andezit-2 (Örnek 5) ve kireçtaşı (Örnek 9) birimlerinin modül oranlarında sınırlı bir artış, diğer kaya türlerinin modül oranlarında ise doygunluğa bağlı belirgin bir azalma gözlenmiştir. Şekil 12'de doygunluktaki artışa bağlı olarak marn (Örnek 1) için modül oranındaki azalma sürekli çizilmiş okla, kumtaşındaki



Şekil 11. Farklı doygunluk koşulları için çok değişkenli regresyon analizlerinden elde edilen eşitliklerden tahmin edilmiş dayanım özelliklerinin (a. tek eksenli sıkışma dayanımı, b. çekme dayanımı, c. kohezyon) deneysel değerlerle karşılaştırılması.

Figure 11. Comparison of the strength properties (a. uniaxial compressive strength, b. tensile strength, c. cohesion) estimated from the equations derived from multiple regression analyses and those determined experimentally.

(Örnek 2) doygunluğa bağlı modül oranındaki sınırlı artış ise kesikli okla çizilerek örnek olarak gösterilmiştir. Bununla birlikte, incelenen kaya türleri için belirlenen bu farklı eğilimler dikkate alınarak, modül oranının doygunluğa bağlı değişiminin daha fazla sayıda kaya türü kullanılarak kapsamlı bir şekilde araştırılmasında yarar vardır.

Dayanım Oranı Sınıflaması

Gerçek ve Özarslan (2011) tarafından önerilmiş olan birleştirilmiş dayanım sınıflaması çizeneği kullanılarak bu çalışmada kullanılan 14 farklı kaya türü için dayanım oranı sınıflaması yapılmıştır. Şekil 13'den görüleceği gibi, kullanılan kaya türleri genellikle düşük ve orta dayanım oranlarına sahiptir.

Çizelge 6. Dayanım özelliklerinin kestirimi için çok değişkenli regresyon analizleriyle geliştirilen eşitlikler için yapılan t-testlerinin sonuçları.

Table 6. t-test results for the equations derived by multivariate regression analyses performed for the prediction of strength properties.

(a) Tek eksenli sıkışma dayanımı:

| Model | Standartlaştırılmamış katsayılar | | Standartlaştırılmış katsayılar | t | p (Anlamlılık) |
|-----------------|----------------------------------|---------------|--------------------------------|---------|----------------|
| | B | Standart Hata | Beta | | |
| Sabit | 1.368 | 0.047 | | 29.160 | 0.000 |
| Log (V_p+1) | 0.794 | 0.063 | 0.300 | 12.694 | 0.000 |
| DEKİ | -0.056 | 0.002 | -0.679 | -28.759 | 0.000 |
| S_r | -0.201 | 0.016 | -0.192 | -12.756 | 0.000 |

(b) Çekme dayanımı:

| Model | Standartlaştırılmamış katsayılar | | Standartlaştırılmış katsayılar | t | p (Anlamlılık) |
|-----------------|----------------------------------|---------------|--------------------------------|---------|----------------|
| | B | Standart Hata | Beta | | |
| Sabit | 0.412 | 0.032 | | 13.075 | 0.000 |
| Log (V_p+1) | 0.787 | 0.042 | 0.495 | 18.688 | 0.000 |
| DEKİ | -0.023 | 0.001 | -0.472 | -17.803 | 0.000 |
| S_r | -0.153 | 0.012 | -0.220 | -13.157 | 0.000 |

(c) Kohezyon:

| Model | Standartlaştırılmamış katsayılar | | Standartlaştırılmış katsayılar | t | p (Anlamlılık) |
|-----------------|----------------------------------|---------------|--------------------------------|--------|----------------|
| | B | Standart Hata | Beta | | |
| Sabit | 0.487 | 0.104 | | 4.703 | 0.000 |
| Log (V_p+1) | 1.030 | 0.139 | 0.463 | 7.426 | 0.000 |
| DEKİ | -0.035 | 0.004 | -0.520 | -8.358 | 0.000 |
| S_r | -0.196 | 0.034 | -0.223 | -5.691 | 0.000 |

Genel olarak doygunluktaki artışa bağlı olarak dayanım oranlarında çok önemli değişiklikler gözlemlenmemekle birlikte, küçük çaplı artış ve azalış eğilimlerinin varlığı da dikkati çekmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan kaya türleri için doygunluk artışının tek eksenli sıkışma ve çekilme dayanımları üzerindeki azaltıcı etki düzeyinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Fisürlülük Sınıflaması

Fourmaintraux (1976) kayaların fisür veya gözenek içermediği koşullardaki P-dalga hızının Eşitlik 19'dan tayin edilebileceğini ifade etmiştir.

$$\frac{1}{V_{I^*}} = \sum \frac{C_i}{V_{I,i}} \quad (19)$$

Çizelge 7. Dayanım özelliklerinin kestirimi için çok değişkenli regresyon analizleriyle geliştirilen eşitlikler için yapılan F-testi sonuçları.

Table 6. F-test results for the equations derived by multivariate regression analyses for the prediction of strength properties.

(a) Tek eksenli sıkışma dayanımı:

| Model | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F | p (Anlamlılık) |
|-----------|-----------------|---------------------|--------------------|----------|----------------|
| Regresyon | 48.840 | 3 | 16.280 | 1345.501 | 0.000 |
| artık | 4.791 | 396 | 0.012 | | |
| toplam | 53.632 | 399 | | | |

(b) Çekme dayanımı:

| Model | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F | p (Anlamlılık) |
|-----------|-----------------|---------------------|--------------------|----------|----------------|
| Regresyon | 24.17 | 3 | 8.057 | 1031.747 | 0.000 |
| artık | 3.772 | 483 | 0.008 | | |
| toplam | 27.941 | 486 | | | |

(c) Kohezyon:

| Model | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Kareler ortalaması | F | p (Anlamlılık) |
|-----------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|----------------|
| Regresyon | 5.297 | 3 | 1.766 | 197.866 | 0.000 |
| artık | 0.500 | 56 | 0.009 | | |
| toplam | 5.797 | 59 | | | |

Burada; V_{li} ci hacimsel oranında kaya içerisinde bulunan minerale ait P-dalga hızıdır. Kalite indeksi ise, Eşitlik 20'de verilmiştir (Goodman, 1989).

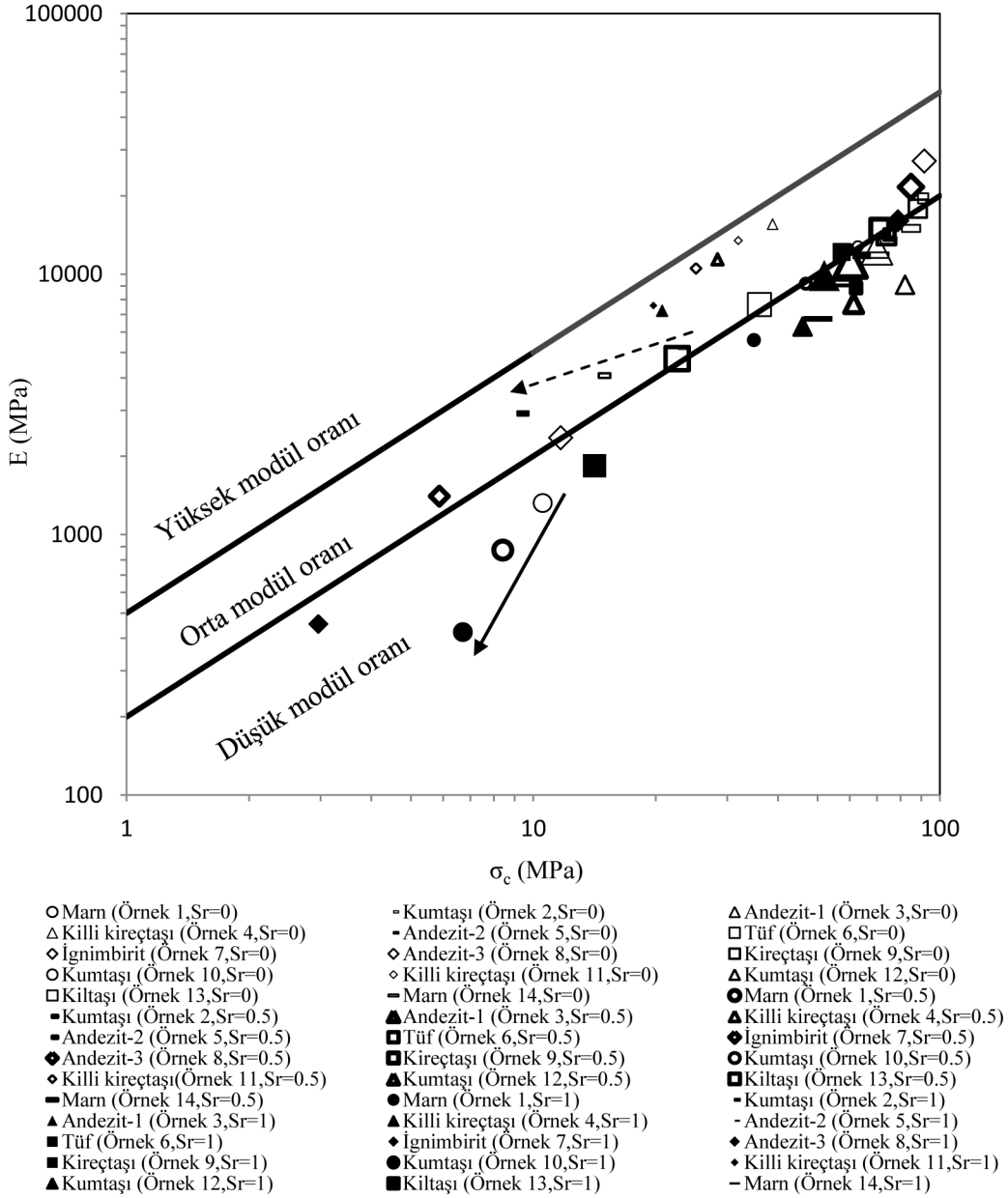
$$IQ(\%) = \frac{V_l}{V_{l*}} 100(\%) \quad (20)$$

Burada; IQ(%) kalite indeksi, V_{l*} ve V_l sırasıyla yukarıdaki eşitlikten belirlenen ve deneysel olarak ölçülen P-dalga hızlarıdır.

Bu çalışmada kullanılan kaya türlerindeki mineral içeriği için Mavko vd. (2009)'nden derlenen V_p değerleri kullanılarak hesaplanan ve ölçülen V_p değerleri ile söz konusu kaya türleri için belirlenen kalite indeksi değerleri Çizelge 8'de verilmiştir. Marn (Zonguldak) için belirlenen %105.5'lik IQ oranı, minerallere ait P-dalga hızlarının tek bir değerden çok belirli bir aralıkta

ifade edilmesi nedeniyle, literatürden seçilen değerle minerale ait gerçek V_p değeri arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Çizelge 8'de verilen kalite indeksi değerleri kullanılarak yapılan ve Fourmaintraux (1976) tarafından önerilen fisürlülük sınıflaması Şekil 14'de verilmiştir. Bu şekilde görüleceği gibi, kullanılan kaya türleri genel olarak fisürlü veya az fisürlü ile az-orta derecede fisürlü sınıflarında, kumtaşı, marn ve tuf kaya türleri ise orta-ileri derecede fisürlü sınıfında yer almaktadırlar.

Doygun koşullar için yapılan değerlendirmede kalite indeksi değerlerinde sınırlı bir değişim belirlenmiştir. Doygunluğa bağlı olarak V_p değerlerinde artış gözlenen kaya türleri için kalite indeksi değerlerinde de artış gözlenirken, doyunluğa bağlı olarak V_p 'de azalma gözlenen kaya türleri için ise kalite indeksi değerlerinde azalma gözlenmiştir.



Şekil 12. Farklı doygunluk koşullarına göre incelenen kaya türlerinin modül oranı sınıflaması.

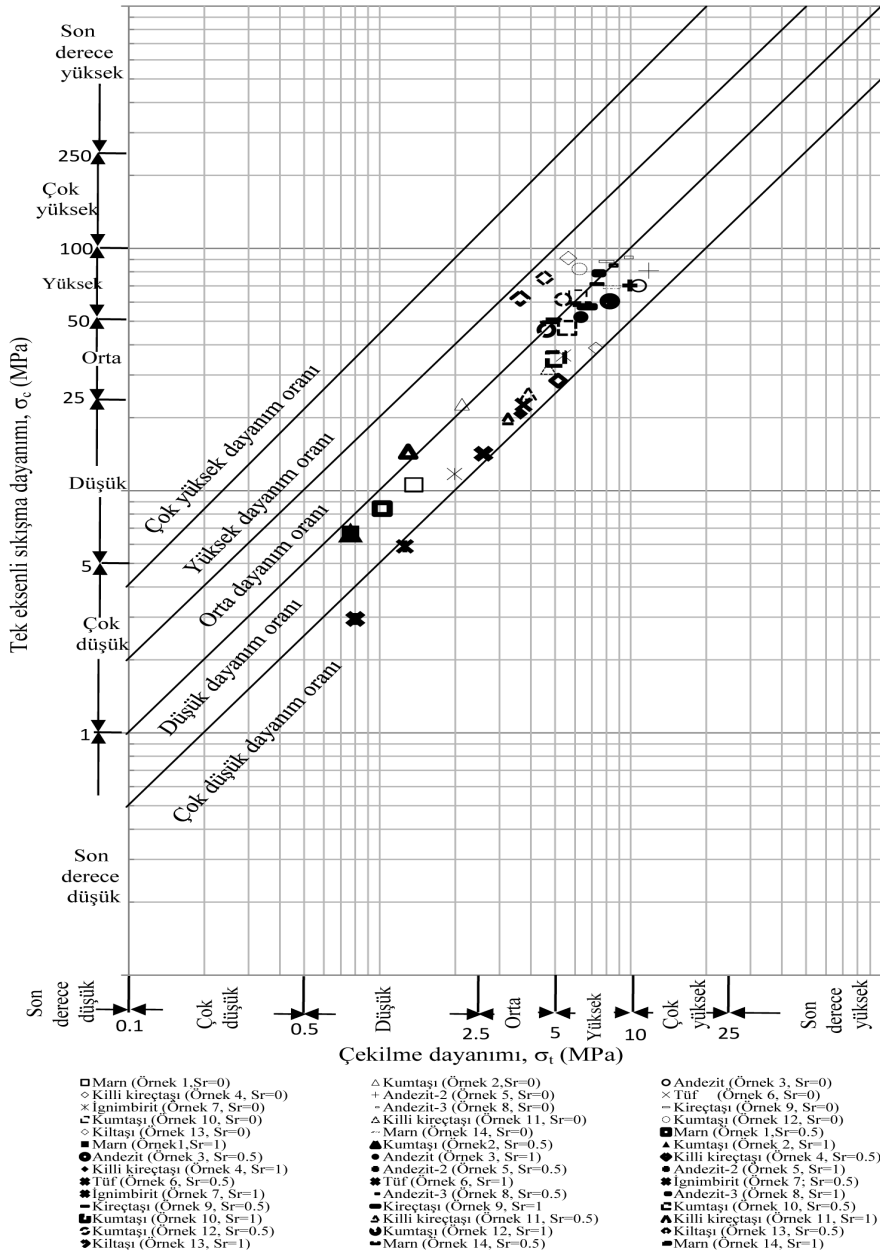
Figure 12. Modulus ratio classification for the rock types investigated based on different saturation conditions.

IQ ile n arasında Fourmaintraux (1976) tarafından belirlenen doğrusal ilişki ile bu çalışmada belirlenen üstel ilişkinin genel olarak birbirleriyle uyum içerisinde olduğu Şekil 15'de görülmektedir. Ancak kalite indeksi eşitliğinden görüleceği gibi, incelenen kaya türleri için ölçülen V_p 'nin kuramsal olarak pozitif değerler alacağı olgusundan hareketle, kalite indeksi değerinin her zaman pozitif olacağı sonucuna ulaşılabilmektedir. Dolayısıyla Fourmaintraux (1976)

tarafından önerilen doğrusal eşitlik yerine, $y=0$ doğrusuna asimptotik olarak yaklaşan ve bu çalışmada belirlenen üstel ilişkinin tercih edilmesi önerilmektedir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, kayalar için P-dalgı hızı kullanılarak farklı doygunluk koşullarında dayanım özelliklerinin ve fiziksel özellikler kullanılarak



Şekil 13. Kullanılan kaya türleri için dayanım oranı sınıflaması.
Figure 13. Strength ratio classification for the rock types investigated.

V_p 'nin kestirimi amaçlanmıştır. Ayrıca çalışmada, fiziksel özelliklerden olan katı tane yoğunluğu ve gözeneklilik gibi özellikler kullanılarak V_p 'nin kestirimini olanaklı kılan görgül bir eşitlik de önerilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

Deneysel sonuçlar; doygunluktaki artışa bağlı olarak, incelenen kayaların dayanım (σ_c , σ_t , c)

ve deformabilite özelliklerinde azalma gerçekleşirken, V_p 'de ise azalma ve artma şeklinde farklı iki eğilimin olduğunu göstermiştir. Dayanım ve deformabilite özelliklerindeki doygunluğa bağlı azalma ile V_p 'de gelişen doygunluğa bağlı değişimin gözeneklilik ve kil içeriğinin ortak etkisini temsil eden ve bu çalışmada önerilen Doygunluktaki Etkin Kil İçeriği (DEKİ) parametresi ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 8. Çalışmada kullanılan kaya türleri için deneyle tayin edilen P-dalga hızları ile Eşitlik 19 ve 20'den hesaplanan P-dalga hızı ve kalite indeksi değerleri.

Table 8. The values of P-wave velocity determined experimentally and from Equations 19 and 20, and quality index values.

| Kaya türü | V_p^* (km/s) | V_{pkuru} (km/s) | $V_{pdoygun}$ (km/s) | IQ (%) | IQ _{doy} (%) |
|----------------------------|----------------|--------------------|----------------------|--------|-----------------------|
| Kumtaşı (Örnek 2) | 4.99 | 2.26 | 2.60 | 45.19 | 52.06 |
| Marn (Örnek 1) | 5.04 | 1.23 | 0.91 | 24.31 | 18.07 |
| Andezit-1(Örnek 3) | 4.71 | 3.75 | 3.83 | 79.56 | 81.31 |
| Killi kireçtaşı (Örnek 4) | 5.52 | 3.59 | 3.48 | 65.01 | 63.06 |
| Andezit-2 (Örnek 5) | 4.78 | 3.98 | 4.06 | 83.23 | 84.99 |
| Tüf (Örnek 6) | 4.91 | 2.53 | 2.44 | 51.58 | 49.58 |
| İgnimbirit (Örnek 7) | 4.33 | 2.16 | 1.78 | 49.77 | 41.1 |
| Kumtaşı (Örnek 10) | 4.67 | 3.39 | 3.49 | 72.55 | 74.72 |
| Kireçtaşı (Örnek 9) | 6.64 | 6.19 | 6.27 | 93.26 | 94.48 |
| Killi kireçtaşı (Örnek 11) | 5.08 | 4.41 | 4.47 | 86.81 | 87.96 |
| Kumtaşı (Örnek 12) | 4.54 | 3.15 | 3.50 | 69.47 | 77.27 |
| Marn (Örnek 14) | 4.86 | 5.12 | 4.99 | 105.51 | 102.68 |
| Kiltaşı (Örnek 13) | 4.47 | 4.15 | 4.00 | 92.75 | 89.47 |

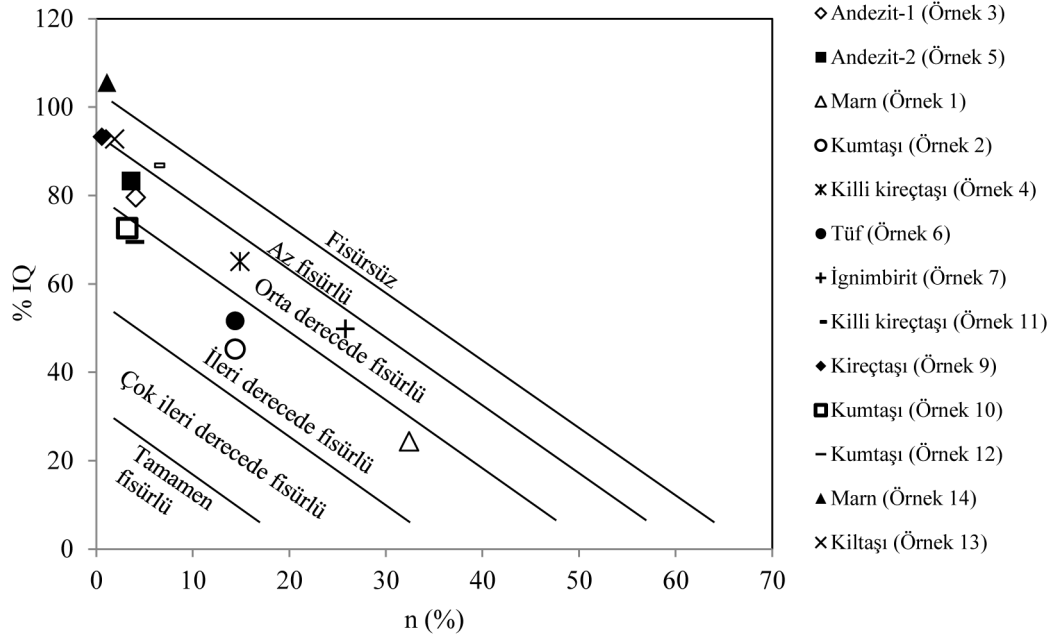
V_p^* :Eşitlik 19'dan hesaplanan P-dalga hızı; V_{pkuru} : Deneysel olarak kuru koşulda belirlenen P-dalga hızı; $V_{pdoygun}$: Deneysel olarak doymuş koşulda belirlenen P-dalga hızı; IQ (%): Kuru koşuldaki kalite indeksi; IQ_{doy} (%): Doymuş koşuldaki kalite indeksi

V_p 'nin farklı fiziksel özelliklere olan duyarlılığı da araştırılmış ve V_p 'nin gözeneklilikle ters, yoğunlukla doğru orantılı olarak değiştiğine ilişkin önceki çalışmalarda elde edilen bulgular bu çalışmada da teyit edilmiştir. Bu olgudan hareketle, kaya malzemesi içindeki farklı fazların ifade edilebildiği katı tane yoğunluğu ve gözeneklilik özellikleri kullanılarak V_p 'nin kestirimine olanak sağlayan yüksek belirleme katsayısına sahip bir görgül eşitlik önerilmiştir.

Yapılan basit ve çok değişkenli regresyon analizleriyle elde edilen görgül ilişkiler kullanılarak farklı doymuşluk koşulları için dayanım özelliklerinin V_p 'den kestiriminin mümkün olduğu anlaşılmıştır. Çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinde V_p , doymuşluk (S_r) ve DEKi bağımsız değişkenleri kullanılarak dayanım özelliklerinin kestirimi olanaklı olmuştur. Deneysel verilerle görgül eşitliklerden kestirilen dayanım

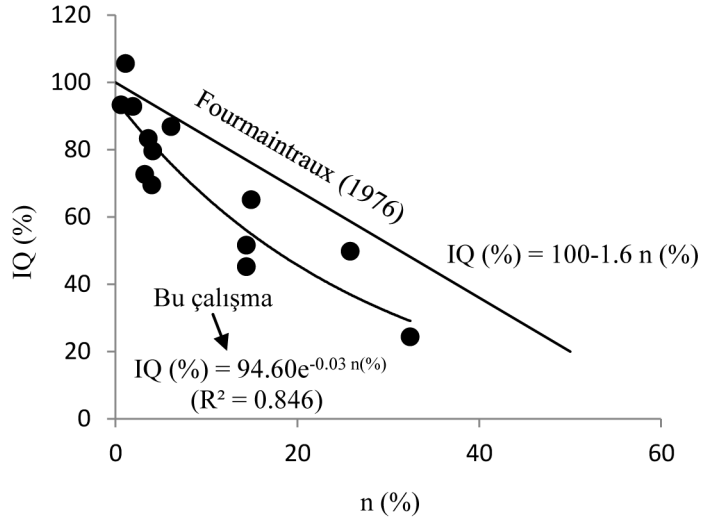
değerlerinin karşılaştırılması sonucunda çok değişkenli regresyon analizlerinden türetilen eşitliklerin kestirim performansının basit regresyon analizlerinden türetilen eşitliklerinkinden çok daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Yapılan t- ve F-testleri, çok değişkenli regresyon analizleriyle elde edilen kestirim eşitliklerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir.

Farklı kaya türleri için doymuşluğun modül oranları üzerindeki etkisinin değişken, dayanım oranları üzerindeki etkisinin ise ihmal edilebilir olduğu anlaşılmıştır. Doymuşluktaki artışa bağlı olarak, V_p değerlerinde artış gözlenen kaya türlerinde kalite indeksi artarken (fisürlülük azalırken), V_p değeri azalan kaya türlerinde kalite indeksi de azalmakta dolayısıyla fisürlülük artmaktadır.



Şekil 14. Kullanılan kaya türlerinin Fourmaintraux (1976) tarafından önerilen fisürlülük sınıflaması abağı üzerindeki dağılımı.

Figure 14. Distributon of the rock types investigated on the classification scheme for fissuring developed by Fourmaintraux (1976).



Şekil 15. Kalite indeksi (IQ) ile gözeneklilik (n) arasındaki ilişki.

Figure 15. The relationship between the quality index (IQ) and porosity (n).

KATKI BELİRTME

Yazarlar; çalışmayla ilgili önerilerinden dolayı Prof. Dr. Hasan Gerçek (B. Ecevit Üniversitesi), Doç. Dr. Ergün Tuncay, Prof. Dr. Harun Sönmez ve Prof. Dr. Bahtiyar Ünver (Hacettepe Üniversitesi) ile Prof. Dr. Micheal S. King (Imperial College, İngiltere)'e ve ayrıca XRD ve ince kesit çözümlenmeleriyle ilgili katkılarından dolayı Prof. Dr. Abidin Temel ve Dr. Erdal Şen (Hacettepe Üniversitesi)'e teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

- Altun, İ.E. ve Aksay, A., 2002. Türkiye jeoloji haritaları No:27 Ereğli-F26 paftası. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Apuani, T., King, M.S., Butenuth, C., and De Freitas, M.H., 1997. Measurements of the relationship between sonic wave velocities and tensile strength in anisotropic rock. In: Developments in Petrophysics, Geological Society Special Publication No. 122, pp. 107-119.
- ASTM, 1972. Inorganic index to the powder diffraction file. Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Philadelphia, 1432 p.
- ASTM, 2001. Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Section-4, Construction, V. 04.08. ASTM Publication, Philadelphia, 972 p.
- Atalay, Z., 1980. Muğla-Yatağan ve yakın dolay karasal Neojen'in stratigrafi araştırması. TJK Bülteni, 23 (1), 93-99.
- Aydan, Ö., Akagi, T., Ito, T., and Kawamoto, T., 1992. Prediction of behaviour of tunnels in squeezing ground. Journal of Geotechnical Engineering, 448, 73-82.
- Aydan, Ö., Akagi, T., and Kawamoto, T., 1993. The squeezing potential of rock around tunnels: Theory and prediction. Rock Mechanics and Rock Engineering, 26 (2), 137-163.
- Aydan, Ö., Akagi, T., and Kawamoto, T., 1996. The squeezing potential of rock around tunnels: Theory and prediction with examples taken from Japan. Rock Mechanics and Rock Engineering, 29 (3), 125-143.
- Cadoret, T., Marion, D., and Zinsner, B., 1995. Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones. Journal of Geophysical Research, 100, 9789-9803.
- Chang, C., Zoback, M.D., and Khaksar, A., 2006. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering, 51, 223-237.
- Carmichael, R.S., 1982. Handbook of Physical Properties of Rocks, Volume II. CRC Press, Boca Raton.
- Çobanoğlu, İ., Çelik, S.B., 2008. Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67, 491-498.
- D'Andrea, D.V., Fischer, R.L., and Fogelson, D.E., 1965. Prediction of compressive strength from other rock properties. US Bureau of Mines Report of Investigation 6702.
- Deere, D.U., and Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock, Tech. Rept. No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico, 308 p.
- Dyke, C.G., and Dobreiner, L., 1991. Evaluating the strength and deformability of sandstones. Quarterly Journal of Engineering Geology, 24, 123-134.
- Ergüler, Z.A., 2007. Su içeriğinin kil içeren kayaların mühendislik davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış).
- Ergüler, Z.A., and Ulusay, R., 2009. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46 (2), 355-370.

- Erol, O., 1954. Ankara ve civarının jeolojisi hakkında rapor. MTA Rapor No: 2491, Ankara.
- Fourmaintraux, D., 1975. Quantification des discontinuités des roches et des massifs rocheux. *Rock Mechanics*, 7, 83-100.
- Fourmaintraux, D., 1976. Characterization of rocks; laboratory tests, Chapter IV in *La Mecanique des roches appliquee aux ouvrages du genie civil* by Marc Panet et al. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., and Gregory, A.R., 1974. Formation velocity and density- the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39, 770-780.
- Gregory, A.R., 1976. Fluid saturation effects on dynamic elastic properties of sedimentary rocks. *Geophysics*, 41, 895-921.
- Gerçek, H. ve Özarslan, A., 2011. Kaya malzemesinin çekme dayanımı sınıflaması. KAYAMEK 2011-X. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 105-116.
- Goodman, R.E., 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 562 p.
- Gunsallus, K.L., and Kulhawy, F.H., 1984. A comparative evaluation of rock strength measures. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 21 (5), 233-248.
- Gündoğdu, M.N., 1982. Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış).
- Han, D., 1986. Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments. PhD Thesis, Stanford University, USA (unpublished).
- Hawkins, A.B., 1998. Aspects of rock strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57, 17-30.
- Hudson, J.A., and Harrison, J.P., 1997. *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Elsevier Science, Oxford.
- Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, G., Radicati, F., and Villari, L., 1975. The Neogene calc-alkaline volcanism of Central Anatolia; Geochronological data on Kayseri-Niğde area. *Geological Magazine*, 112 (4), 349-360.
- ISRM, 2007. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, R.Ulusay and J.A.Hudson (eds.), Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628 p.
- Kahraman, S., 2001. A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 729-733.
- Kahraman, S., 2007. The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics*, 46, 341-348.
- Kahraman, S., Yeken, T., 2008. Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 277-281.
- Kahraman, S., Söylemez, M., Günaydin, O., and Fener, M., 2005. Determination of the some physical properties of travertines from ultrasonic measurement. *Proceedings of 1st International Symposium on Travertine, Denizli, Turkey*, pp. 231-234.
- Karakuş, M., and Tütmez, B., 2006. Fuzzy and multiple regression modelling for evaluation of intact rock strength based on point load, Schmidt hammer and sonic velocity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39 (1), 45-57.
- Khandelwal, M., and Singh, T.N., 2009. Correlating static properties of coal measures rocks with P-wave velocity. *International Journal of Coal Geology*, 79, 55-60.

- King, M.S., 2009. Recent developments in seismic rock physics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 1341-1348.
- King, M.S., Marsden, J.R., and Dennis, J.W., 2000. Biot dispersion for P and S wave velocities in partially and fully saturated sandstones. *Geophysical Prospection*, 48, 1075-1089.
- Klimentos, T., 1991. The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves. *Geophysics*, 56, 1930-1939.
- Kwaśniewski, M., and Oitaben, P.R., 2009. Effect of water on the deformability of rocks under uniaxial compression. *ISRM Regional Symposium EUROCK 2009 Rock Engineering in Difficult Ground Conditions-Soft Rock and Karst*, Dubrovnik, Cavtat, Croatia, pp. 271-276.
- Lal, M., 1999. Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Caracas, Venezuela (on CD).
- Lama, R.D., and Vutukuri, V.S., 1978. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, Vol. II. Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- Lashkaripour, G.R., 2002. Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 73-77.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J., 2009. *The Rock Physics Handbook*. Cambridge University Press, New York.
- Nur, A., and Simmons, G., 1969. The effect of saturation on velocity in low porosity rocks. *Earth Planetary Science Letter*, 7, 183-193.
- Ohkubo, T., and Teresaki, A., 1971. Oyo Corporation, Technical Note RP-479.
- Pisoni, C., 1961. Ortaköy (Aksaray), Nevşehir, Avanos ve İncesu bölgeleri jeolojisi ve petrol imkanları (75/4-76/3,4 Paftaları). MTA Rapor No: 2839, Ankara.
- Romana, M., and Vásárhelyi, B., 2007. A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples. *Proceedings of the 11th congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, Portugal, Vol. 1, pp. 139-142.
- Saito, T., 1981. Variation of physical properties of igneous rock in weathering. *Proceedings of International Symposium on Weak Rocks*, Tokyo, Vol.1, pp. 191-196.
- Sarkar, K., Vishal, V., and Singh, T.N., 2011. An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (2), 469-479.
- Sato, J., Itoh, J., Aydan, Ö., and Akagi, T., 1995. Prediction of time-dependent behaviour of a tunnel in squeezing rocks. *Proceedings of FMGM'95, 4th International Symposium*, Bergamo, Italy, pp. 47-54.
- Temel, A., 1992. Kapadokya eksplozif volkanizmasının petrolojik ve jeokimyasal özellikleri. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış).
- Török, A., and Vasarhelyi, B., 2010. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*, 115, 237-245.
- Vasarhelyi, B., 2005. Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38 (1), 69-76.
- Vásárhelyi, B., and Van, P., 2006. Influence of water content on the strength of rock. *Engineering Geology*, 84, 70-74.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S., and Pamplona, J., 2008. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*, 48, 453-466.

- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21, 41-70.
- Yergök, A.F., Akman, Ü., İplikçi, E., Karabalık, N.N., Keskin, İ., Mengi, H., Umut, M., Armağan, F., Erdoğan, K., Kaymakçı, H. ve Çetinkaya, A., 1987. Batı Karadeniz Bölgesinin jeolojisi (I). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, Derleme No:8273, Ankara.

