

**YÖNSER KOŞULLARDA KAYALARIN DAYANIM VE  
DEFORMABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ULTRASONİK DALGA  
HIZINDAN TAHMİNİNE YÖNELİK GÖRGÜL İLİŞKİLERİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF EMPIRICAL RELATIONSHIPS FOR  
THE ESTIMATION OF STRENGTH AND DEFORMABILITY  
PROPERTIES OF ROCKS FROM ULTRASONIC WAVE  
VELOCITY UNDER ANISOTROPIC CONDITIONS**

**MESUT GÖKHAN GÜMRÜK**

**Prof. Dr. REŞAT ULUSAY**

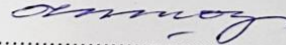
**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

Mayıs, 2019

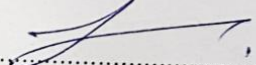
MESUT GÖKHAN GÜMRÜK'ün hazırladığı "Yönser Koşullarda Kayaların Dayanım ve Deformabilite Özelliklerinin Ultrasonik Dalga Hızından Tahminine Yönelik Görgül İlişkilerin Geliştirilmesi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüsnü AKSOY  
Başkan



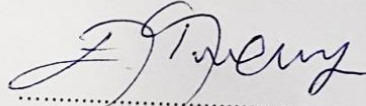
.....

Prof. Dr. Reşat ULUSAY  
Danışman



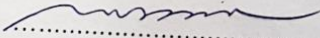
.....

Prof. Dr. Ergün TUNCAY  
Üye



.....

Doç. Dr. Hasan KARAKUL  
Üye



.....

Doç. Dr. Hakan NEFESLİOĞLU  
Üye



.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak ...../...../..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17.10.2019

MESUT GÖKHAN GÜMRÜK



## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

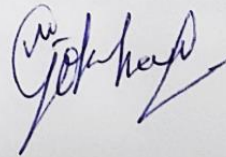
- Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ..... ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

17.06.2019

(İmza)

Öğrencinin Adı SOYADI

Mesut Gökhan GÖMÜRK



## ÖZET

# YÖNSER KOŞULLARDA KAYALARIN DAYANIM VE DEFORMABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ULTRASONİK DALGA HIZINDAN TAHMİNİNE YÖNELİK GÖRGÜL İLİŞKİLERİN GELİŞTİRİLMESİ

**Mesut Gökhan GÜMRÜK**

**Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Reşat ULUSAY**

**2019, 55 sayfa**

Kayalar, özellikle içerdikleri farklı yönelimlere sahip tabakalanma, şistozite, eklem vb. gibi zayıflık düzlemlerinin varlığı nedeniyle genel olarak farklı düzeylerde yönserliğe (anizotropiye) sahip olup, bunların mekanik özellikleri de yönserlikten etkilenecek yönlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Yönserlikle ilişkili olarak gözlenen bu farklılıklar nedeniyle kayaların dayanım ve deformabilite özellikleri, kaya mühendisliği uygulamalarının tasarım aşamasında yönserlik durumu da gözeticilerle dikkate alınması gereken özelliklerdir. Bu durum, araştırmacıları kayaların dayanım ve deformabilite özelliklerinin farklı yöntemler kullanılarak tahmin edilmeleri konusunda çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Sağlam kaya malzemesi özellikleriyle ilişkilendirilebilmesi, laboratuvar ortamında tayin edilmesinin kolay olması ve tayin edilmesi sırasında deney örneklerinin herhangi bir yenilmeye maruz kalmaması gibi özellikleri nedeniyle ultrasonik dalga hızından ( $V_p$ ) yararlanılması daha da popüler olmuştur. Günümüze değin yapılan çalışmalarda kayaların dayanım ve deformabilite özellikleri ile ultrasonik dalga hızları ( $V_p$  ve  $V_s$ ) arasındaki ilişkiler ayrıntılı bir şekilde araştırılmasına rağmen, yönserliğe neden olan zayıflık düzlemlerinin yönserlik etkisinin dikkate alındığı çalışmalar oldukça

sınırlı sayıdadır. Ayrıca yönserliğin dikkate alındığı çalışmalar az sayıda örnek üzerinde yapılmış olup, dayanım ve deformabilite özellikleri ile ultrasonik dalga hızları arasında yönserlik açısının da dikkate alındığı tahmin (kestirim) ilişkileri geliştirilmemiştir. Bu durum gözetilerek, bu çalışma; yönserliğe sahip zayıflık düzlemlerini içeren kaya bloklarından hazırlanmış 6 kaya türüne ait örneklerin, farklı yönserlik açılarında ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) dayanım ve deformabilite özelliklerinin P-dalga hızından yararlanılarak tahmin edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS), dolaylı çekme dayanımı ( $\sigma_t$ ), elastisite modülü (E) ve P-dalga hızı ( $V_p$ ) deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları esas alınarak UCS'ye bağlı yönserlik tipi araştırılmış ve UCS,  $\sigma_t$ , E ve  $V_p$  değerlerinin yönserlik açısına bağlı olarak değişimi değerlendirilmiştir. Kaya örneklerinin eğimli süreksizlikler içermesi halinde UCS,  $\sigma_t$  ve E değerlerinin tahmini amacıyla bu değerlerin  $V_p$  değerleri ile aralarında geçiş sağlayan bazı görgül ilişkiler önerilmiştir. Geliştirilen bu basit regresyon ilişkilerinin tahmin performansının düşük olması nedeniyle çalışmanın son aşamasında çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri yapılarak üretilen görgül ilişkilerin tahmin performansı artırılmıştır. Ayrıca bu ilişkiler kullanılarak tahmin edilen değerler, deneylerden belirlenen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler ve karşılaştırmalar sonucunda; söz konusu görgül ilişkilerin bu çalışmada kullanılan düşük-orta derecede yönserliğe sahip kayalarda UCS ve  $\sigma_t$ 'nin yönserlik açısına göre  $V_p$ 'den tahmin edilmesinde yüksek bir tahmin performansı ( $R^2$  sırasıyla; 0.89 ve 0.97) sergilerken, E'nin tahmininde ise,  $R^2=0.98$  olmasına rağmen, tahmin edilen verinin 1:1 doğrusu etrafındaki dağılımına göre tahmin performansının düşük olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yönserlik, tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı, ultrasonik P-dalga hızı, elastisite modülü, görgül ilişki

## **ABSTRACT**

# **DEVELOPMENT OF EMPIRICAL RELATIONSHIPS FOR THE ESTIMATION OF STRENGTH AND DEFORMABILITY PROPERTIES OF ROCKS FROM ULTRASONIC WAVE VELOCITY UNDER ANISOTROPIC CONDITIONS**

**Mesut Gökhan GÜMRÜK**

**Master of Science, Geological Engineering Department**

**Supervisor: Prof. Dr. Reşat ULUSAY**

**2019, 55 pages**

Rocks, particularly due to the presence of the weakness surfaces, such as bedding, schistosity, joint etc., generally have anisotropy in different degrees, and therefore, their mechanical properties are influenced by anisotropy and exhibit directional changes. Due to these anisotropy dependent differences, the strength and deformability properties of rocks are important properties which should be taken into consideration with their anisotropy conditions in the design stage of rock engineering applications. This situation has oriented the researchers to carry out studies on the estimation of strength and deformability properties using different methods. Due to the facts that it has relationships with intact rock material properties, can be easily determined in laboratory and is a nondestructive test, the use of ultra-sonic wave velocity ( $V_p$ ) has become more popular. Although the relationships between the strength and deformability properties and ultrasonic

wave velocities ( $V_p$ ,  $V_s$ ) of rocks have been investigated in detail, the number of studies in which the effect of anisotropy due to weakness planes have been considered, are considerably limited. Besides, these studies have been conducted on limited number of specimens and no empirical equation to estimate the relationships between the strength and deformability properties and P-wave velocity ( $V_p$ ) based on anisotropy conditions, has been recommended. By considering this gap in literature, in this study, it was aimed to estimate the strength and deformability properties from  $V_p$  at different anisotropy angles ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  and  $90^\circ$ ) using the specimens prepared from six rock types. For this purpose, uniaxial compressive strength (UCS), indirect Brazilian strength ( $\sigma_t$ ), modulus of elasticity (E) and P-wave velocity ( $V_p$ ) tests were carried out. Based on the test results, types of anisotropy for UCS and variation of UCS,  $\sigma_t$ , E and  $V_p$  with respect to the anisotropy angle were assessed. In order to indirectly estimate UCS,  $\sigma_t$  and E, when rocks include inclined weakness planes, empirical relationships using  $V_p$  were suggested. Since the prediction performance of these relationships are not strong, multiple regression analyses were carried out and the prediction performance of these new relationships was assessed. In addition, the values predicted from these analyses were compared with those obtained from the experiments. The assessments indicated that these final empirical relationship with high coefficient of determination ( $R^2= 0.89$  and  $0.97$ , respectively) well predict the UCS and  $\sigma_t$  from  $V_p$  for different anisotropy angles. Although the empirical equations developed for the estimation of modulus of elasticity has high  $R^2$  ( $0.98$ ) value, according to the distribution of the estimated data around 1:1 line, its prediction performance is not well.

**Key words:** Anisotropy, uniaxial compressive strength, tensile strength, ultrasonic P-wave velocity, modulus of elasticity, empirical relationship



## TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca, çalışmanın ilerlemesi, geliştirilmesi ve derinleştirilmesi ile ilgili tüm katkılarından dolayı değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a,

Tez çalışması kapsamında yapılan arazi çalışmaları için birikimini paylaşan ve tezin farklı aşamalarında görüşlerini esirgemeyen Doç. Dr. Hasan KARAKUL'a,

Tezin savunması sırasında görüş ve değerlendirmelerinden yararlandığım jüri üyeleri; Prof. Dr. Hüsnü AKSOY, Prof. Dr. Ergün TUNCAY ve Doç. Dr. Hakan NEFESLİOĞLU'na

Mineralojik-petrografik analizlerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. H. Evren ÇUBUKÇU'ya,

Laboratuvar çalışmaları esnasında yardımını esirgemeyen Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı teknisyeni Özgür EROL'a,

Kaya örneklerini toplamak amacıyla yapılan yoğun arazi çalışmaları esnasında yardımlarını esirgemeyen lise arkadaşlarım; Yasin ERDEM, Hasan Buğra YILDIRIM, Umut Burak ESENER, Yusuf YAŞAR ve Latif SEYHAN'a,

Tez çalışması boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen ağabeyim Jeo. Yük. Müh. Oğuzhan GÜMRÜK ve eşi Jeo. Yük. Müh. Tuğba EROĞLU GÜMRÜK'e,

Çalışmanın her aşamasında gösterdiği yardım ve desteğinden dolayı eşim ve meslektaşım Jeo. Yük. Müh. Merve ŞAHİN GÜMRÜK'e,

Tüm eğitim hayatım boyunca desteğini hiç esirgemeyen annem Asiye CANAYDIN'a,

TEŞEKKÜR EDERİM.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	4
3. ÇALIŞMADA KULLANILAN KAYA TÜRLERİ VE ÖZELLİKLERİ.....	17
3.1. Kaya Türü Seçimi ve Örnekleme .....	17
3.2. Mineralojik ve Petrografik Analizler .....	20
4. KAYA MEKANİĞİ LABORATUVAR DENEYLERİ .....	27
4.1. Yönlü Karot Örneklerinin Hazırlanması.....	27
4.2. Birim Hacim Ağırlık Tayinleri .....	29
4.3. P-Dalga Hızı Tayinleri .....	29
4.4. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Tayinleri.....	32
4.5. Dolaylı Çekme Dayanımı Tayinleri.....	34
4.6. Elastisite Modülü Tayinleri .....	36
5. YÖNSERLİK KOŞULUNDA DAYANIM ve DEFORMABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN P-DALGA HIZINDAN TAHMİNİ.....	39
5.1. Dayanım ve Deformabilite Özellikleri ile P-Dalga Hızı Arasındaki İlişkiler...39	

5.2. Dayanım ve Deformabilite Özelliklerinin Yönserlik Açısına Bağlı Değişiminin Basit Regresyon Analizleriyle Belirlenmesi .....	41
5.3. Dayanım ve Deformabilite Özelliklerinin Yönserlik Açısına Bağlı Değişiminin Çok Değişkenli Regresyon Yöntemi Kullanılarak Tahmin Edilmesi .....	44
5.4. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizleri İçin Model Yeterliliğinin Kontrolü .....	48
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	51
KAYNAKLAR .....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	56

# ÇİZELGELER

## Sayfa

Çizelge 2.1. Ramamurthy (1993)'nin ilksel yönselik sınıflaması.....	6
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan kaya türlerinin lokasyonları, jeolojik yaşları ve tanımları .....	19
Çizelge 4.1. Tez kapsamında yapılan kaya mekaniği deneylerinin sonuçları .....	30
Çizelge 4.2. Birim hacim ağırlık tayinlerinin sonuçları .....	31
Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan kaya türlerinin Ramamurthy (1993)'ye göre yönselik sınıflaması.....	32
Çizelge 5.1. UCS için yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen regresyon katsayıları ve t-testi sonuçları .....	48
Çizelge 5.2. Dolaylı çekme dayanımı için yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen regresyon katsayıları ve t-testi sonuçları.....	49
Çizelge 5.3. UCS ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen F-testi (varyans analizi) sonuçları.....	49
Çizelge 5.4. Dolaylı çekme dayanımı ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen F-testi (varyans analizi) sonuçları.....	49
Çizelge 5.5. Elastisite modülü için yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen regresyon katsayıları ve t-testi sonuçları .....	50
Çizelge 5.6. Elastisite modülü ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen F-testi (varyans analizi) sonuçları..	50

# ŞEKİLLER

## Sayfa

- Şekil 2.1. Akai (1971)'nin 3 farklı şist örneği üzerinde belirlediği UCS'nin yükleme doğrultusuyla zayıflık düzlemleri arasındaki açığa (yönserlik açısı) bağlı değişimi ..... 5
- Şekil 2.2. Kayalarda gözlenen yönserlik tipleri (Ramamurthy (1993)'den) ..... 7
- Şekil 2.3. Ajalloeian ve Lashkaripour (2000)'nin çalışmalarında kullandıkları örnekler için yükleme doğrultusuyla yönserlik düzlemleri arasındaki açığa bağlı olarak (a) UCS'nin ve (b) P-dalga hızının ( $V_p$ ) değişimi..... 9
- Şekil 2.4. Nasserı, Raob ve Ramamurthy (2003)'ün çalışmada kullandıkları kaya türleri için yükleme doğrultusuyla yönserlik düzlemleri arasındaki açığa bağlı olarak (a) UCS'nin ve (b) elastisite modülünün değişimi..... 10
- Şekil 2.5. Cho ve ark. (2012)'nin kullandıkları örnekler için yönserlik açısına bağlı olarak (a) UCS'nin, (b) elastisite modülünün ve (c) çekme dayanımının değişimi ..... 12
- Şekil 2.6. Kim ve ark. (2012)'nin çalışmalarında kullandıkları örneklerin elastik dalga hızlarının yükleme doğrultusuyla zayıflık düzlemleri arasındaki açığa bağlı olarak değişimi ..... 13
- Şekil 2.7. Khanlari ve ark. (2014)'nin kullandıkları örneklerin yönserlik açısına bağlı olarak (a) UCS, (b)  $V_p$  ve (c) çekme dayanımının değişimi ..... 15
- Şekil 2.8. Choi, Lee ve Jeon (2016)'un çalışmalarında kullandıkları örneklerin yükleme doğrultusuyla yönserlik düzlemleri arasındaki açığa bağlı olarak (a) UCS, (b)  $V_p$ , (c) elastisite modülü ve (d) çekme dayanımının değişimi ..... 16
- Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılması planlanarak araziden ve taş satan kuruluşlardan derlenen kaya türlerinin orijinal yerlerini gösteren harita 18
- Şekil 3.2. Çamurtaşında (Örnek No. 1) (a) sık aralıklarla tekrarlanan tabakaların genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikelde görüntüsü (Q: Kuvars, Fs: Feldispat, Chl: Klorit) ..... 21

Şekil 3.3. Kumtaşında (Örnek No. 2) (a) tabakalanmanın genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü (Xpl: litarenit, Ppl: Feldispatik litarenit) .....	22
Şekil 3.4. Travertende (Örnek No. 3) (a) sık aralıklarla tekrarlanan tabakaların genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü.....	23
Şekil 3.5. Jipste (Örnek No. 4) (a) sık aralıklarla tekrarlanan tabakaların genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü .....	24
Şekil 3.6. Mika şistte (Örnek No. 5) (a) sık aralıklarla tekrarlanan şistozite düzlemlerinin genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü (Bio: Biyotit, M: Muskovit, Chl: Klorit, Q: Kuvars, Fs: Feldispat) .....	25
Şekil 3.7. (a) Mermerin (Örnek No. 6) içerdiği organik malzemedan ve bantlanmadan görünüm, (b) kayacın tek nikolde görüntüsü ve (c) X-ışınları kırınım analizi sonucu (difraktogram).....	26
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan (a) açılı karot alma makinesi ve (b) çamurtaşına ait blok örneğin karotlar alındıktan sonraki görünümü .....	28
Şekil 4.2. Farklı yönserlik açılarına göre (a) UCS, E, $V_p$ ve (b) dolaylı çekme deneyleri için karot örneklerinin hazırlanmasının şematik gösterimi (Cho ve ark. (2012)'dan düzenlenmiştir) .....	28
Şekil 4.3. P-dalga hızı ( $V_p$ ) deney düzeneği ve deneyden bir görünüm.....	29
Şekil 4.4. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için $V_p$ 'nin yönserlik açısına bağlı değişimi.....	31
Şekil 4.5. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için UCS'nin yönserlik açısına bağlı değişimi.....	33
Şekill 4.6. (a) Yükleme presi kullanılarak yapılan dolaylı çekme dayanımı deneyinden bir görünüm ve (b) $90^\circ$ yönserlik açısı için jips örneği üzerinde deneyin yapılması .....	34
Şekil 4.7. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için dolaylı çekme dayanımının yönserlik açısına bağlı değişimi .....	35

Şekil 4.8. (a) UCS deneyinde kullanılan birim deformasyon ölçerlerin traverten örneği üzerine yapıştırılmasından bir görünüm ve (b) deney örnekleri üzerine birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılması yönteminin şematik gösterimi (Cho ve ark. (2012)'dan düzenlenmiştir) .....	37
Şekil 4.9. Elastisite modülünün tayini için kullanılan bilgisayar kontrollü deney düzeneği ve deneyin yapılışından bir görünüm .....	37
Şekil 4.10. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için elastisite modülünün yönserlik açısına bağlı değişimi ....	38
Şekil 5.1. P-dalga hızı değerleri ile (a) UCS, (b) dolaylı çekme dayanımı ve (c) elastisite modülü arasındaki ilişkiler.....	40
Şekil.5.2. Tez kapsamında tayin edilen UCS ve $V_p$ değerlerine bağlı olarak (a) $\sigma_c$ , (b) $\sigma_c/V_p$ ve (c) $\sigma_c/V_p^2$ oranları ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler ....	42
Şekil.5.3. Tez kapsamında tayin edilen tüm E ve $V_p$ değerlerine bağlı olarak (a) E, (b) $E/V_p$ ve (c) $E/V_p^2$ oranları ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler .....	43
Şekil.5.4. Tez kapsamında tayin edilen tüm dolaylı çekme dayanımı ve $V_p$ değerlerine bağlı olarak (a) $\sigma_t$ ve (b) $\sigma_t/V_p$ oranı ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler .....	45
Şekil 5.5. Çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinden tahmin edilen ve deneysel olarak tayin edilen (a) UCS, (b) dolaylı çekme dayanımı ( $\sigma_t$ ) ve (c) elastisite modülü (E) değerlerinin karşılaştırılması .....	47

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

D	Karot çapı (mm)
E	Elastisite modülü (GPa)
F	F-testi değeri
L	Örnek boyu (mm)
NQ	Çapı 47.6 mm olan silindirik örnek
$p$	Anlamlılık düzeyi
r	Yarıçap (mm)
r	Korelasyon katsayısı
R <sup>2</sup>	Belirleme katsayısı
R <sub>c</sub>	Yönserlik oranı
t	t-testi değeri
V <sub>p</sub>	P-dalga hızı (km/s)
V <sub>s</sub>	S-dalga hızı (km/s)
$\gamma$	Birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
$\sigma_c$	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
$\sigma_{cmax}$	En büyük tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
$\sigma_{cmin}$	En küçük tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
$\sigma_t$	Dolaylı çekme dayanımı (MPa)
$\alpha$	Yönserlik açısı (derece)

### Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Birliği (American Society for Testing and Materials)
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği ve Kaya Mühendisliği Birliği (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering)
UCS	Tek eksenli sıkışma dayanımı



# 1. GİRİŞ

Kayalar genel olarak küçük ya da büyük ölçüde yönserliğe (anizotropiye) sahip olup, kayaların mekanik özellikleri bundan farklı düzeylerde etkilenmektedir. Ancak kayaların farklı mekanik özelliklerinin (dayanım, deformabilite özellikleri, elastik dalga hızları) farklı deney koşullarında (statik ya da dinamik) yönserlikten etkilenme düzeyleri de önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Yönserliğe bağlı olarak gözlenen bu farklılıkların varlığı nedeniyle, dayanım ve deformabilite özellikleri kaya mühendisliği uygulamalarında tasarım aşamasında yönserlik durumu da gözetilerek dikkate alınması gereken özelliklerdir. Ancak yönserliğe sahip kayalardan deneylerde kullanılmak üzere farklı yönserlik açılarında ve standartlara (ASTM, 2000) ya da önerilmiş yöntemlere (ISRM, 2007) uygun nitelik ve nicelikte örneklerin hazırlanması genellikle güç bir işlem olup, çoğu kez örnek kayıplarıyla sonuçlanmaktadır. Bu durum, bu konuda çalışan araştırmacıları ve uygulamacıları kayaların dayanım ve deformabilite özelliklerinin farklı yöntemler kullanarak tahmin edilmesi konusunda çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Bu amaçla son yıllarda, sağlam kaya malzemesi özellikleri ile yakın ilişkisinin bulunması, laboratuvarında tayin edilmesinin kolay olması ve deney örneğine herhangi bir hasar vermemesi gibi özellikleri dikkate alınarak elastik dalga hızından (P-dalga hızı) ( $V_p$ ) yararlanılması oldukça yaygınlaşmıştır. Günümüze değin yapılan çalışmalarda araştırmacılar, dayanım özellikleri ile elastik dalga hızları arasındaki ilişkileri ayrıntılı bir şekilde araştırmalarına rağmen, yönserlik açısının dikkate alındığı çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan kaya türü ve örnek sayıları oldukça sınırlı sayıdadır. Bunun yanı sıra, söz konusu bu çalışmalarda; elastik dalga hızı ve yönserlik açısı arasında söz konusu olabilecek görgül ilişkilerin varlığı ve bu ilişkilerden yararlanılarak mekanik özelliklerin dolaylı şekilde tahmin edilmesi konusu da yeterince araştırılmamıştır.

Yukarıda belirtilen hususlar ve önceki çalışmalar değerlendirilerek belirlenmiş olan eğilimler esas alınarak, bu tez çalışması kapsamında; kayaların başlıca dayanım ve deformabilite özelliklerinin (tek eksenli sıkışma dayanımı-UCS, çekme dayanımı ve elastisite modülü) yönserlik açısına bağlı olarak değişiminin araştırılması ve yönserlik açısının değişimiyle birlikte kayaların dayanım (UCS ve çekme dayanımı)

ve elastisite modülündeki değişimin P-dalga hızından tahmin edilmesine yönelik görgül ilişkilerin araştırılması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda bu tez çalışması aşağıda tanımlanan aşamalar izlenerek yürütülmüştür:

1. Çalışmada kullanılmak üzere Türkiye'nin farklı yerlerinden ve yönserlik özelliği yaratacak şekilde tabakalanma, lamina, şistozite yüzeyi vb. gibi süreksizlikleri içeren farklı kaya türlerine ait blok örnekler derlenmiş ve öncelikle petrografik değerlendirmeler yapılarak bu kayalar petrografik anlamda adlandırılmışlardır.
2. Laboratuvarda açılı karot alma makinesi kullanılarak blok örneklerden dayanım ve deformabilite deneylerinde örneklerin içerdęi süreksizliklerin yükleme yönüyle 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° gibi yönserlik açıları yapacak şekilde karot örnekleri hazırlanmıştır. Bu örnekler üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS), çekme (Brazilian) dayanımı, elastisite modülü ve P-dalga hızı ( $V_p$ ) tayini deneyleri yapılmıştır.
3. Deneysel çalışmayı izleyen bir sonraki aşamada; öncelikle her mekanik özelliğin yönserlik açısına ve  $V_p$ 'ye bağlı değişimi değerlendirilmiş, daha sonra da farklı istatistiksel modeller kullanılarak tayin edilen dayanım ve deformabilite özelliklerinin yönserlik açısına bağlı değişiminin  $V_p$ 'den tahmin edilmesine yönelik görgül (ampirik) ilişkiler geliştirilmiş olup, bunlar arasında istatistiksel anlamda en güçlü tahmin performansını veren ilişkiler belirlenmiştir.

Altı bölümden oluşan bu tezin, çalışmanın amaç ve kapsamını içeren "Giriş" başlıklı birinci bölümünü izleyen 2. Bölüm'ünde; yönserliğe sahip kayalarda dayanım ve deformabilite özelliklerinin yönserlik açısına bağlı değişimi ile ilgili önceki çalışmalar sunulmuştur. 3. Bölüm'de; bu tez çalışmasında kullanılan kumtaşı, jips, traverten, çamurtaşı, şist ve mermer kaya türleri ana hatlarıyla tanıtılmış, minerolojik-petrografik özelliklerine değinilmiş ve ayrıca çalışmada izlenen örnekleme ve uygulanan açılı karot alma yöntemleri hakkında bilgi

verilmiştir. Tezin 4. Bölüm'ünde; örneklenen kaya türlerinin fiziksel, dayanım ve deformabilite özelliklerinin tayini amacıyla kullanılan deney yöntemlerine ana hatlarıyla değinilmiş ve deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. 5. Bölüm; yönserliğe bağlı olarak incelenen kaya türlerinin P-dalga hızı, dayanım ve deformabilite özelliklerinin yönserlik açısına bağlı değişimleri ile ilgili hem basit regresyon hem de çok değişkenli doğrusal regresyon analiz teknikleri kullanılarak geliştirilen görgül eşitlikler ve bunların söz konusu mekanik özelliklerin tahmin edilmesiyle ilgili performanslarını içermektedir. 6. Bölüm'de ise, bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

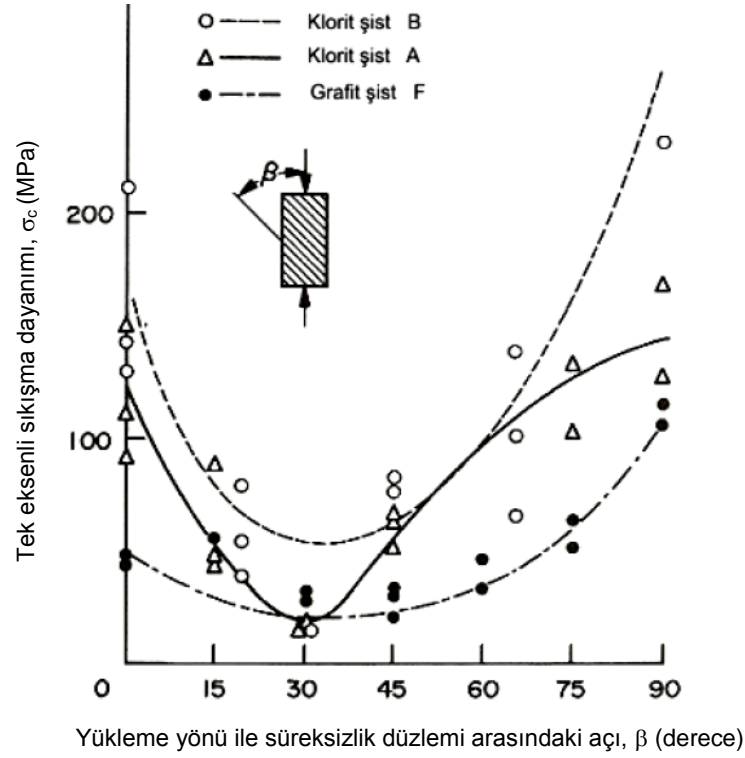
## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde sadece; yönserliğe (anizotropiye) sahip kayalarda başlıca dayanım ve deformabilite özellikleri ve P-dalga hızının yönserlik açısına bağlı değişimi ve dayanım ve deformabilite özelliklerinin farklı yönserlik açıları için  $V_p$ 'den tahminine yönelik amaçlarla gerçekleştirilmiş önceki çalışmalar ve bunlardan elde edilen başlıca sonuçlar özetle sunulmuştur.

Obert ve Duvall (1967), yönserlik açısı  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  arasında değişen 14 farklı kaya türü üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu deneylerin sonuçlarına göre araştırmacılar, kayaların dayanım ve elastik özelliklerinin, zayıflık düzlemlerinin yönelimine bağlı olarak değiştiğini ve özellikle sedimanter kayalar ile foliasyon içeren kayalarda, yüklemenin zayıflık düzlemlerine dik yönde yapılması koşulunda (yönserlik açısı:  $90^\circ$ ), bu düzlemlere paralel yönde yapılan (yönserlik açısı:  $0^\circ$ ) yüklemeye göre daha küçük dolaylı çekme (Brazilian) ve bükülme dayanımları ile elastisite modülünün elde edildiğini belirlemişlerdir.

Akai (1971), klorit ve grafit şistlerde yükleme doğrultusu ile şistozite düzlemleri arasındaki açıya (yönserlik açısı) bağlı olarak UCS'nin değişimini araştırmış ve UCS ile yönserlik açısı arasında Şekil 2.1'deki ilişkiyi elde etmiştir. Şekil 2.1'den görüleceği gibi, yükleme doğrultusu ile süreksizlik düzlemi arasındaki  $30^\circ$ 'lik açıda en küçük dayanım,  $90^\circ$ 'lik açıda ise en yüksek dayanım elde edilmiştir. Ancak bu çalışmada tek bir kaya türünün (şist) kullanılmış olması, bir genelleme yapılmasına olanak vermemektedir.

Singh, Ramamurthy ve Rao (1989), 3 fillit örneği üzerinde yaptıkları çalışmada, en yüksek UCS'nin yönserlik açısının  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  olması durumlarında, en küçük UCS'nin ise  $30^\circ$ 'lik yönserlik açısı için elde edildiğini belirtmişlerdir. Ancak bu araştırmacılar, yönserliğin UCS dışında diğer jeomekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmamışlardır.



Şekil 2.1. Akai (1971)'nin 3 farklı şist örneği üzerinde belirlediği UCS'nin yükleme doğrultusuyla zayıflık düzlemleri arasındaki açığa (yönserlik açısı) bağlı değişimi

Ogunsanwo (1991), mika şistler için yükleme yönelimi ile şistozite düzlemleri arasında farklı açılarının olduğu durumlarda ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ ) gerçekleştirdiği UCS deneyleri sonucunda en büyük UCS değerinin şistozite düzlemlerine dik, en düşük UCS'nin ise yükleme yönünün şistozite düzlemleri ile  $45^\circ$ 'lik açı yapması durumunda elde edildiğini belirlemiştir. Ayrıca araştırmacı; elastik dalga hızındaki değişimi üç farklı yönserlik açısı için de araştırmış olup, en düşük dalga hızını  $90^\circ$ 'lik, en büyük dalga hızını ise  $0^\circ$ 'lik yönserlik açısı için belirlemiştir. Ancak bu araştırmacı, çalışmasında tek tip kaya türü kullanmış ve değerlendirmelerini sadece 3 farklı yönserlik açısı için yapmıştır.

Yönserliği, ilksel ve ikincil yönserlik olarak ikiye ayıran Ramamurthy (1993), ilksel yönserlikte zayıflık düzlemlerinin (tabakalanma, foliasyon ve şistozite düzlemleri) kayanın kökeni ile ilgili, ikincil yönserlikte ise kayanın oluşumundan sonra gelişen gerilme yönserliği, eklemler, çatlaklar, makaslama düzlemleri ve fayların etkili olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı,  $\sigma_{cmax} / \sigma_{cmin}$  (en yüksek ve en düşük UCS

değerlerinin oranı) olarak tanımladığı yönserlik oranı için Çizelge 2.1'deki sınıflamayı önermiştir.

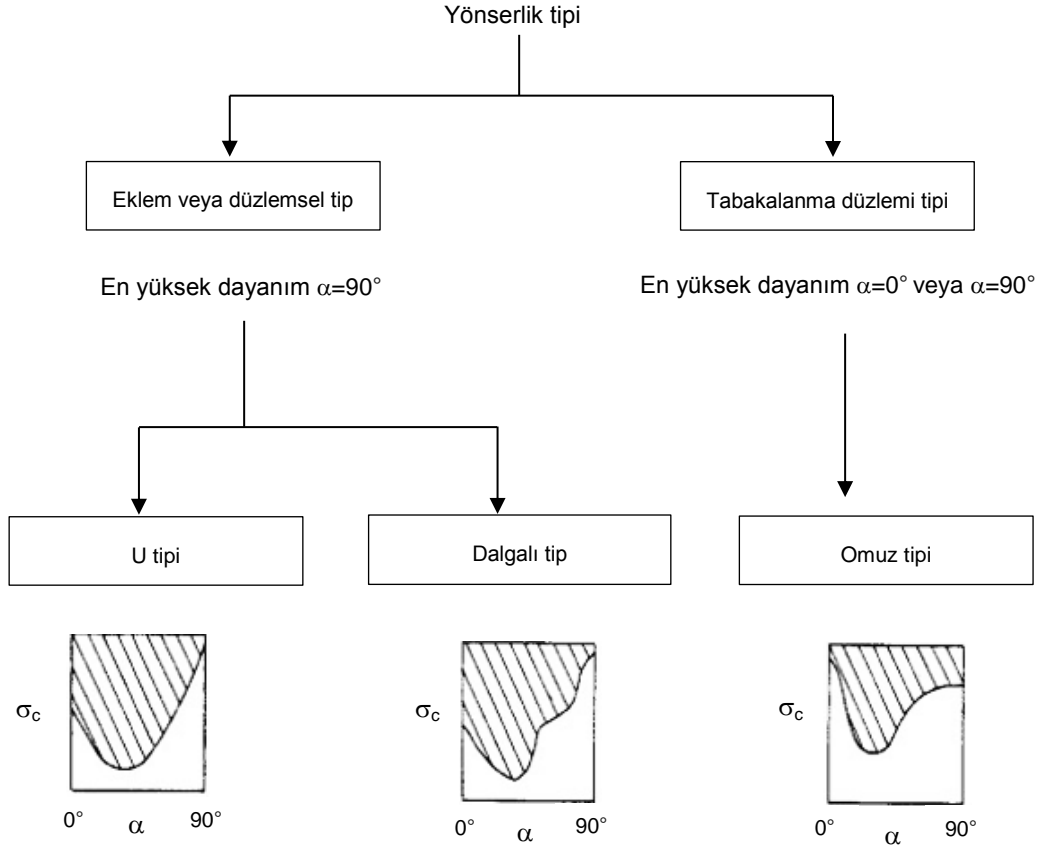
Çizelge 2.1. Ramamurthy (1993)'nin ilksel yönserlik sınıflaması

Yönserlik oranı (Dayanım yönserliği) $R_c (\sigma_{cmax}/\sigma_{cmin})$	Yönserlik sınıfı
1.0 - 1.1	İzotrop (yönsemez)
1.1 -2.0	Düşük yönserlik
2.0 -4.0	Orta yönserlik
4.0 -6.0	Yüksek yönserlik
>6.0	Çok yüksek yönserlik

$\sigma_{cmax}$  : En büyük UCS değeri;  $\sigma_{cmin}$  : En küçük UCS değeri

UCS ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiyi temsil eden eğrinin şeklini dikkate alan sınıflamaya göre, yönserlik üç gruba ayrılmıştır. Şekil 2.2'de verilen bu sınıflamaya göre; U tipi yönserlik tipinde en büyük UCS değeri  $\alpha=90^\circ$ 'de ve en küçük UCS değeri ise  $\alpha=30^\circ$ 'de elde edilmektedir. Omuz tipi yönserlikte UCS  $\alpha=0^\circ$ 'de en büyük değerini alırken,  $\alpha$ 'nın  $15^\circ$  ve  $30^\circ$  arasındaki değerlerde ise en küçük dayanıma ulaşmaktadır. Dalgalı tip yönserlikte ise, en büyük UCS  $\alpha=90^\circ$ 'de ve  $\alpha=30^\circ$ 'de ise en küçük UCS değeri elde edilmektedir. UCS ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiyi tanımlayan eğrinin şekli, UCS'nin yönserliğinin doğasını ifade etmektedir.

Apuani ve ark. (1997), gnayslar için çekme dayanımı ve P-dalga hızının farklı yönserlik açılara bağlı değişimini araştırmışlardır. Bu çalışmada, sadece çekme dayanımı ve P-dalga hızının yönserliğe bağlı olarak değişimleri grafiksel olarak sunulmuş, ancak çekme dayanımının yönserlik koşulunda  $V_p$ 'den tahmin edilmesine yönelik görgül bir ilişkinin varlığı araştırılmamıştır.



Şekil 2.2. Kayalarda gözlenen yönerlik tipleri (Ramamurthy (1993)'den)

Al-Harhi (1998), kumtaşı örnekleri üzerinde UCS ve elastik dalga hızlarının ( $V_s, V_p$ ) oranının 7 farklı yönerlik açısına ( $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) bağlı değişimini araştırmıştır. Araştırmacı,  $V_s/V_p$  oranının yönerlik açısının  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye doğru artmasıyla artış gösteren bir eğilim sergilediğini, UCS'nin ise  $0^\circ$  ve  $90^\circ$ 'de en yüksek, genel olarak  $15-30^\circ$  aralığında ise en düşük değeri aldığını belirlemiştir. Ancak bu çalışmada, bu iki özelliğin yönerlik koşulunda  $V_p$  veya  $V_s$ 'den tahmini amacıyla herhangi bir görgül ilişki önerilmemiştir.

Ajalloeian ve Lashkaripour (2000), 2 şeyl örneği üzerinde 7 farklı yönerlik açısı ( $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) için gerçekleştirdikleri UCS deneyleri sonucunda yükleme yönü ile yönerlik düzlemleri arasındaki açının  $90^\circ$  olduğu koşulda en büyük UCS değerini belirlerken,  $30^\circ$  yönerlik açısı için ise en küçük UCS'yi elde etmişlerdir (Şekil 2.3a). Araştırmacılar ayrıca, P-dalga hızı için en büyük değer yönlerlik düzlemine paralel, en küçük değer ise dik yönde elde edildiğini belirlemişlerdir (Şekil 2.3b). Bu çalışmanın sonucunda araştırmacılar,

dayanımın yönserlik açısına bağlı değişimine yönelik tahmin eşitliklerini önermişlerdir. Ancak bu çalışma sınırlı sayıda örnek üzerinde gerçekleştirilmiş olup, görgül eşitlikler için regresyon katsayıları da verilmemiştir.

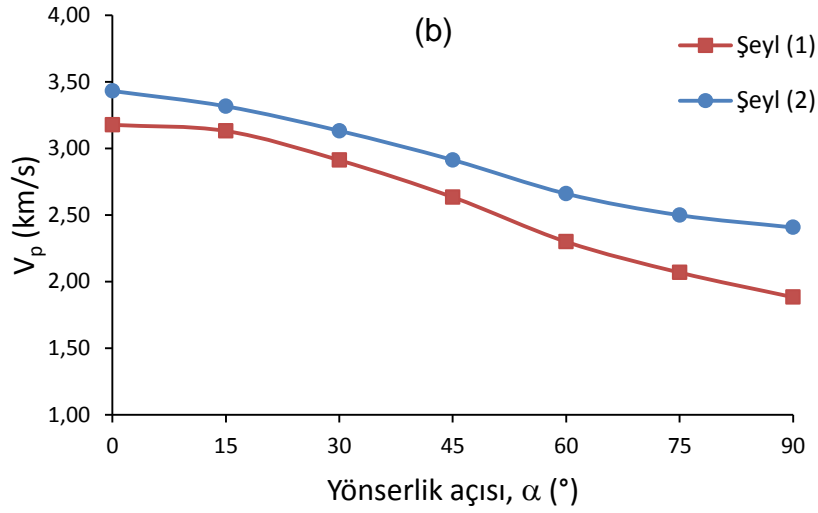
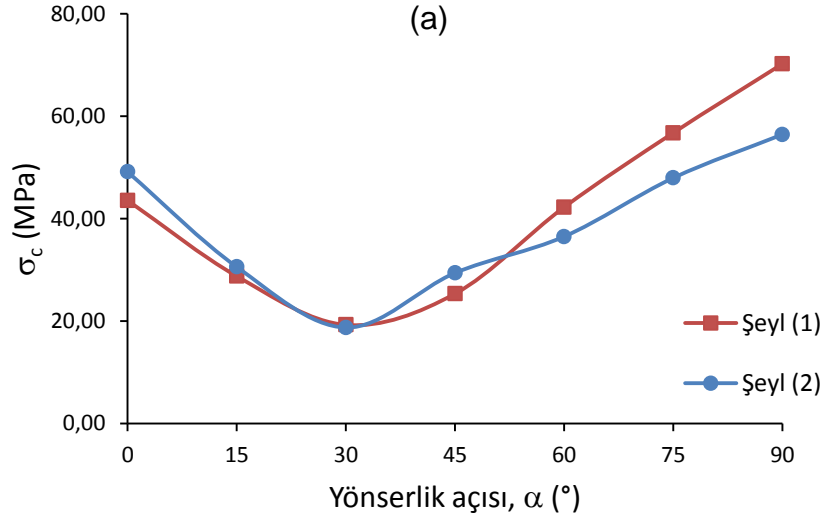
Foliasyon düzlemlerini içeren mermerler üzerinde Brazilian çekme deneyleri yapan Chen ve Hsu (2001), yüklemenin foliasyon düzlemine dik yönde yapıldığı koşuldan paralel yönde yapıldığı duruma doğru çekme dayanımı değerlerinde önemli ölçüde bir azalmanın gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Nasseria, Raob ve Ramamurthy (2003), kuvars şist, klorit şist, kuvars-mika şist ve biyotit şist örnekleri üzerinde farklı yönserlik açılara ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) göre yaptıkları deneylerde UCS ve elastisite modüllerini tayin etmişlerdir. Araştırmacılar, UCS ve elastisite modülünün yönserliğe bağlı değişimiyle ilgili grafikleri deney sonuçlarının ortalamasını kullanarak oluşturmuşlardır. UCS deneylerinde yönserlik açısına bağlı olarak, yaklaşık U-tipi eğriler elde etmişler ve örneklerin  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  yönserlik açılarında en yüksek,  $30^\circ$ 'de ise en düşük UCS değerine sahip olduklarını belirlemişlerdir (Şekil 2.4a). Ayrıca araştırmacılar, elastisite modülündeki değişiminin örnekten örneğe oldukça değişken olduğunu, bazı örneklerde yönserlik açısı ile elastisite modülleri arasında 'U tipi' bir ilişki gözlenirken, diğer bir örnekte  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye doğru azalım eğilimi olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.4b).

Bayrak (2005), yönserliğin Niğde Masifi'ndeki şistlerden oluşan temel kayalarının dayanım ve deformasyon özellikleri üzerindeki etkisini incelediği çalışmasında, şistozite yüzeylerinin eğimleri  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  olacak şekilde hazırlanmış 42 mm çaplı, 98 adet silindirik örnek üzerinde UCS deneyleri yapmıştır. Çalışma sonucunda, sadece  $30^\circ$  yönserlik açısında en küçük,  $90^\circ$  yönserlik açısında ise en büyük UCS değerleri elde edilmiştir.

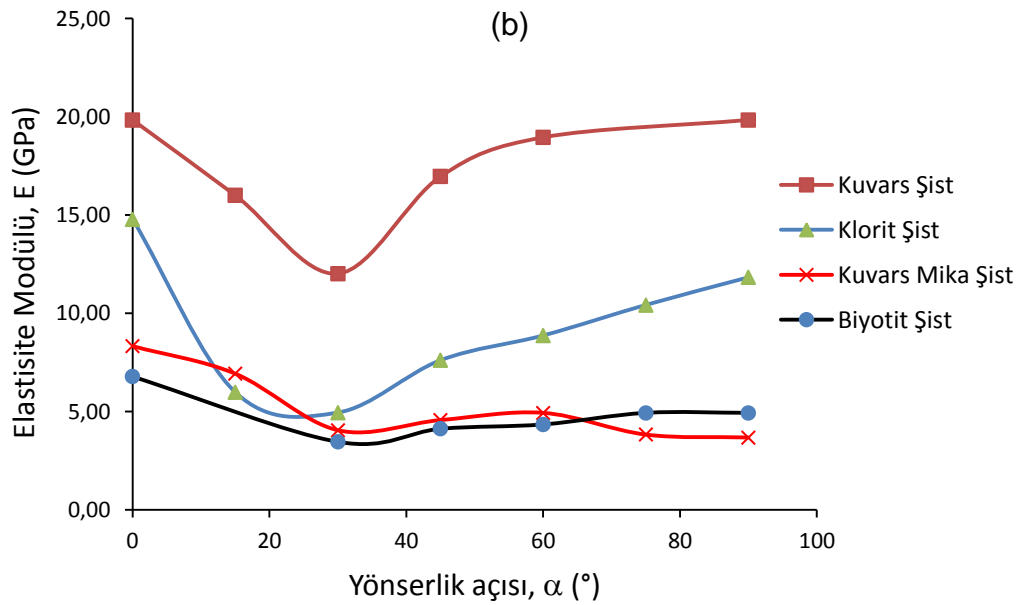
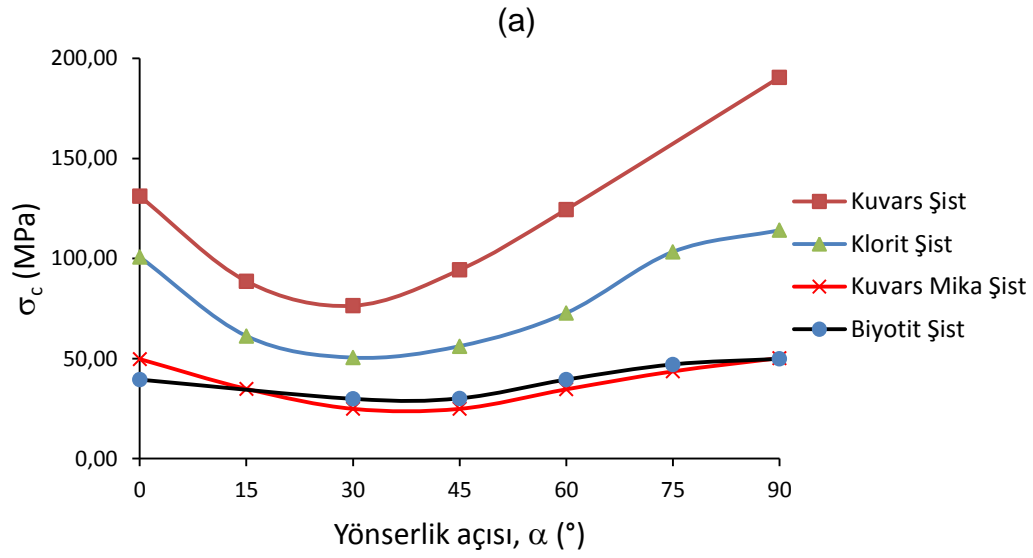
Rodriguez-Sastre ve Calleja (2006), suya doygun sleyt örneklerinde yaptıkları deneylerde, foliasyon düzlemlerine paralel yönde dik yöndekine oranla daha büyük ultrasonik dalga hızı ve dinamik Young modülü değerleri elde etmişlerdir.





Şekil 2.3. Ajalloeian ve Lashkaripour (2000)'nin çalışmalarında kullandıkları örnekler için yükleme doğrultusuyla yönerlik düzlemleri arasındaki açya bağlı olarak (a) UCS'nin ve (b) P-dalga hızının ( $V_p$ ) değişimi

Tavallali ve Vervoort (2008), kumtaşı üzerinde gerçekleştirdikleri Brazilian çekme dayanımı deneyleri sonucunda, yükleme tabakalanmaya paralel yönde yapıldığında en büyük, dik doğrultuda yapıldığında ise en küçük çekme dayanımının elde edildiğini belirlemişlerdir.



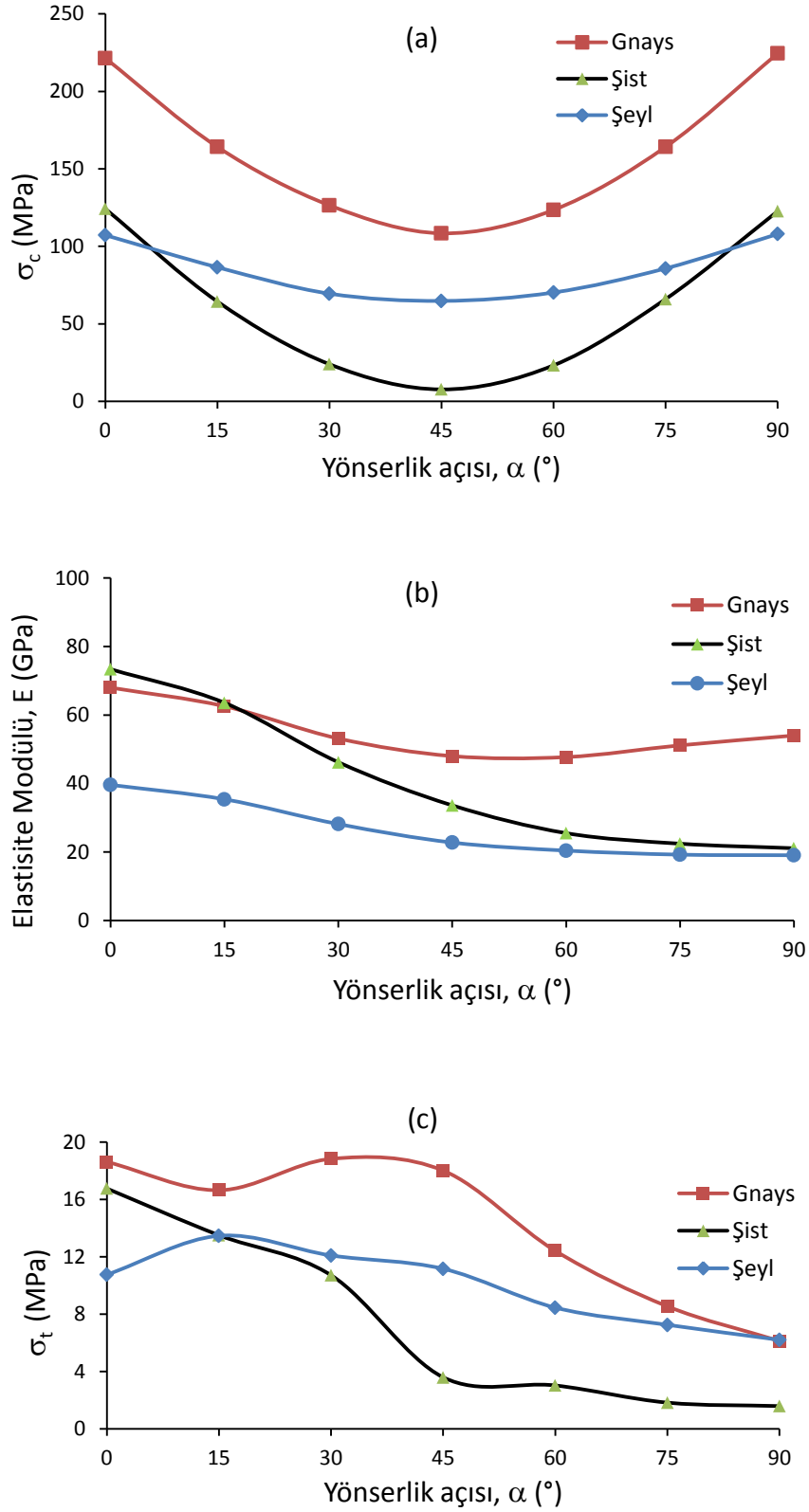
Şekil 2.4. Nasser, Raob ve Ramamurthy (2003)'ün çalışmada kullandıkları kaya türleri için yükleme doğrultusuyla yönserlik düzlemleri arasındaki açıya bağlı olarak (a) UCS'nin ve (b) elastisite modülünün değişimi

Karakul, Ulusay ve Işık (2010), sedimanter ve metamorfik kaya gruplarına ait 6 farklı kaya türü için UCS ve disk makaslama dayanım indeksi (BPI) değerlerini yükleme yönelimi ile zayıflık düzlemleri arasında seçtikleri 5 farklı yönserlik açısı

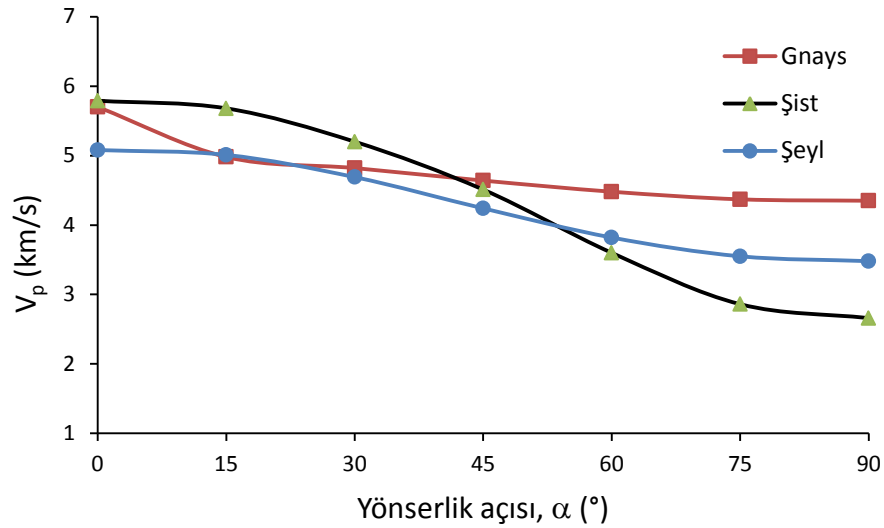
(0°, 30°, 45°, 60° ve 90°) için araştırmışlardır. Araştırmacılar, tayin edilen değerlerin U tipi yönserlik sınıfı ile uyum gösterdiğini belirlemişler ve BPI değerlerini kullanarak farklı yönserlik açıları için UCS'nin tahmin edilmesi amacıyla görgül ilişkiler önermişlerdir. Ayrıca bu ilişkiler kullanılarak tahmin edilen değerler deneylerden belirlenen sonuçlarla karşılaştırılmış ve söz konusu ilişkilerin bu çalışmada kullanılan ve Ramamurthy (1993)'nin önerdiği yönserlik sınıflamasına göre orta-düşük derecede yönserliğe sahip kayalarda UCS'yi tahmin performansının iyi olduğunu göstermiştir.

Cho ve ark. (2012), şist, şeyl ve gnays örnekleri üzerinde UCS'nin, çekme dayanımının ve Young modülünün 7 farklı yönserlik açısına (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) göre değişimini araştırmışlar ve deney sonuçlarını grafiksel olarak değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, UCS'nin yönserlik açısına bağlı değişiminde dalgalanmalar olmakla birlikte, UCS-yönserlik açısı ilişkisi için yaklaşık U-tipi eğriler elde edilmiştir (Şekil 2.5a). 0°'de ve 75°-90° aralığında en yüksek, 15°-45° aralığında ise en düşük UCS değerleri tayin edilmiştir. Araştırmacılar, yönserlik açısına bağlı olarak elastisite modüllerinin hem 0°'den 90°'ye doğru azaldığını, hem de 'U tipi' yönserlik gösterdiğini (Şekil 2.5b) belirlemişlerdir. Çekme dayanımında yönserliğe bağlı değişimin ise, 0°'den 90°'ye doğru azalış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.5c).

Kim ve ark. (2012), Cho ve ark. (2012)'nin çalışmasına ek olarak aynı veri grubuna P-dalga hızı verisini de dahil ederek yeni bir değerlendirme yapmışlardır. Araştırmacılar, yönserliğe sahip gnays, şeyl ve şist gibi kaya türleri üzerinde değişik yönserlik açılarında (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) P-dalga hızlarını tayin etmişler ve  $V_p$ 'nin 0°'den 90°'ye doğru artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Şekil 2.6.). Ancak bu iki çalışmanın sonucunda da araştırmacılar ilgili özelliklerin  $V_p$  ve yönserlik açısı kullanılarak pratik yoldan tahmin edilmesine yönelik herhangi bir yaklaşım önermemişlerdir.



Şekil 2.5. Cho ve ark. (2012)'nin kullandıkları örnekler için yönerlik açısına bağlı olarak (a) UCS'nin, (b) elastisite modülünün ve (c) çekme dayanımının değişimi



Şekil 2.6. Kim ve ark. (2012)'nin çalışmalarında kullandıkları örneklerin elastik dalga hızlarının yükleme doğrultusuyla zayıflık düzlemleri arasındaki açıya bağlı olarak değişimi

Karakul ve Ulusay (2013), dayanım özellikleri ile P-dalga hızı arasındaki ilişkileri sedimanter, volkano-sedimanter ve volkanik kaya gruplarına ait 14 farklı kaya türü için farklı doygunluk koşullarında incelemiştir. Araştırmacılar bu ilişkilerin doygunluğa bağlı olarak değişim gösterdiğini ve bu değişimin doygunluk düzeyi ve etkin kil içeriği parametreleriyle kontrol edildiğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda dayanım özelliklerinin (UCS,  $\sigma_t$  ve  $c$ ) tahmini ile ilgili olarak çok değişkenli görgül eşitlikler önermişler ve bu ilişkilerin tahmin performanslarının oldukça yüksek olduğunu belirlemiştir.

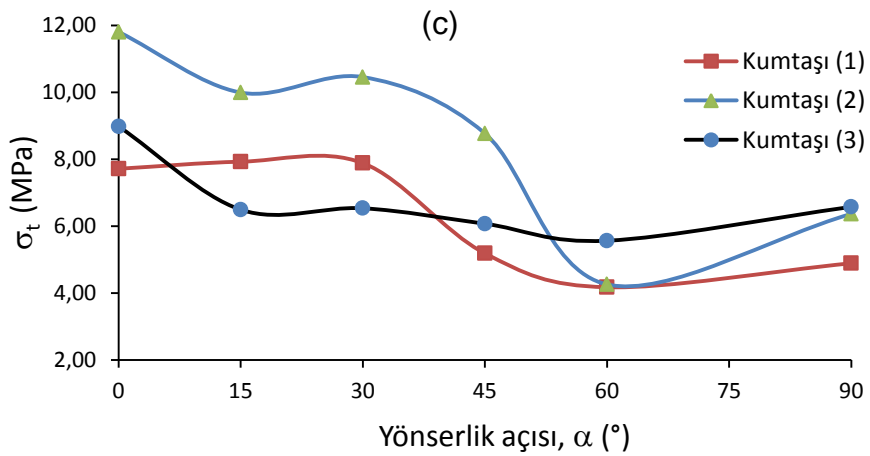
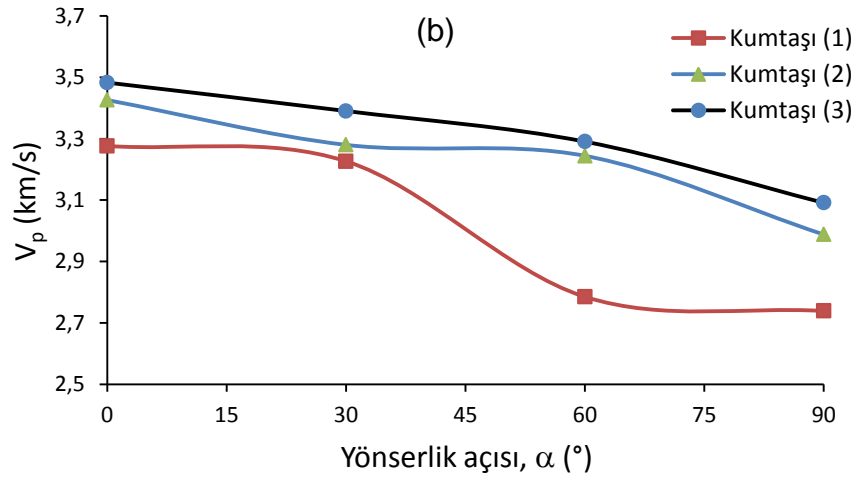
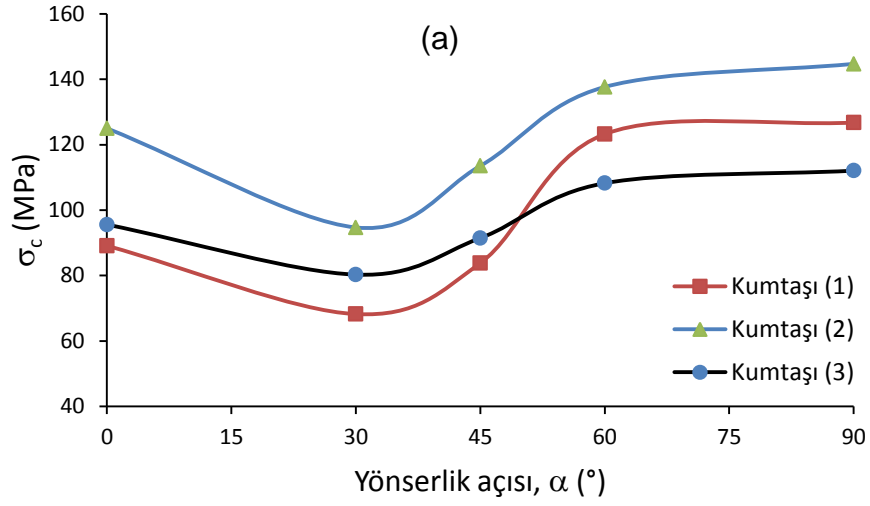
Khanlari, Rafiei ve Abdi-lor (2014), yönserlik özelliğine sahip 3 farklı kumtaşı üzerinde ve farklı yönserlik açılarında (0°, 30°, 45°, 60° ve 90°) UCS, çekme dayanımı, P-dalga hızı tayinleri yapmışlar ve bu özelliklerin yönserlik açısına bağlı değişimini istatistiksel yöntemlerle değerlendirmişlerdir. UCS-yönserlik ilişkisiyle ilgili olarak yönserlik açısına bağlı olarak dalgalanmalar olmakla birlikte, yaklaşık olarak U-tipi eğriler elde etmişlerdir. Araştırmacılar bu kumtaşlarının UCS değerlerinin 0°, 75° ve 90°'de en yüksek, 30°'de ise en düşük olduğunu (Şekil 2.7a) ve  $V_p$  değerlerinin ise 0°'den 90°'ye doğru genel olarak azalım eğilimi gösterdiğini (Şekil 2.7b) belirlemiştir. Yönserlik düzlemiyle çekme doğrultusu

arasındaki değişik açılara bağlı olarak yapılan dolaylı çekme deneylerinde çekme dayanımında 0°'den 90°'ye doğru bir azalım eğilimi söz konusudur (Şekil 2.7c). Ancak bu çalışmada da ilgili özelliklerin  $V_p$ 'den ve yönserlik açısından tahminine yönelik herhangi bir yaklaşım önerilmemiştir.

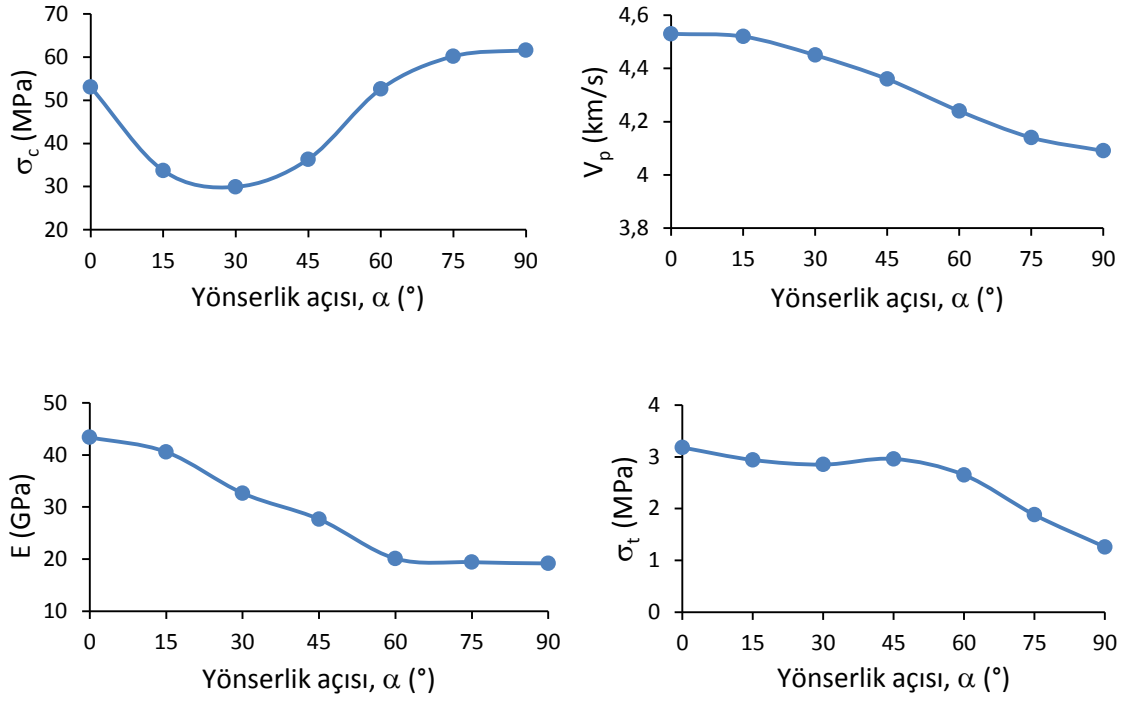
Khanlari ve ark. (2013), 5 farklı metamorfik kaya türü üzerinde Brazilian çekme dayanımı ve nokta yükü dayanım indeksi deneyleri yaparak bu iki özelliğin 7 farklı yönserlik açısına (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) bağlı değişimini araştırmışlardır. Araştırmacılar, en yüksek  $\sigma_t$  değerlerini tüm örnekler için yükleme yönü ile yönserlik düzlemleri arasındaki açının 90° olduğu koşulda elde ederken, en düşük  $\sigma_t$  değerlerinin ise 0°-45° aralığında olduğunu belirlemişlerdir.

Choi, Lee ve Jeon (2016), yapay yönserlik düzlemleri oluşturarak hazırladıkları çimentodan hazırlamış oldukları örnekler üzerinde 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'lik yönserlik açılarında UCS, dolaylı çekme dayanımı, elastik dalga hızı ve elastisite modüllerini tayin etmişlerdir. Araştırmacılar, UCS'nin yönserliğe bağlı değişiminin yaklaşık U-tipinde ve zayıflık düzlemlerinin yükleme yönüyle 90°'lik açı yapması durumunda en yüksek, 15°-30°'lik açı aralığında ise en düşük değeri aldığını belirlemişlerdir (Şekil 2.8a). Ayrıca araştırmacılar, yönserlik açısının 0°'den 90°'ye doğru artışıyla  $V_p$ , E ve  $\sigma_t$  değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir (Şekil 2.8b, c ve d).

Önceki paragraflarda değinilen çalışmalardan anlaşılacağı üzere, kayaların başlıca dayanım ve deformabilite özelliklerinin yönserliğe bağlı değişimi çoğu kez aynı kaya türü ve sınırlı sayıda örnek üzerinde araştırılmıştır. Bunun yanı sıra, farklı yönserlik açılarında söz konusu özelliklerin tahmin edilebilmesinde kullanılmak üzere basit indeks özelliklerin esas alındığı yaklaşımlar da çok azdır. İndeks özelliklerden biri olan P-dalga hızının da tayin edildiği ve değerlendirildiği yönserlik konulu çalışmalar ise, son derece sınırlı sayıda olup, bu çalışmalarda  $V_p$ 'den yararlanılarak farklı yönserlik açılarında dayanım ve deformabilite özelliklerini tahmin etmek amacıyla kullanılabilecek görgül ilişkiler üzerinde durulmamıştır.



Şekil 2.7. Khanlari ve ark. (2014)'nin kullandıkları örneklerin yönerlik açısına bağlı olarak (a) UCS, (b)  $V_p$  ve (c) çekme dayanımının değişimi



Şekil 2.8. Choi, Lee ve Jeon (2016)'un çalışmalarında kullandıkları örneklerin yükleme doğrultusuyla yönerlik düzlemleri arasındaki açığa bağlı olarak (a) UCS, (b)  $V_p$ , (c) elastisite modülü ve (d) çekme dayanımının değişimi



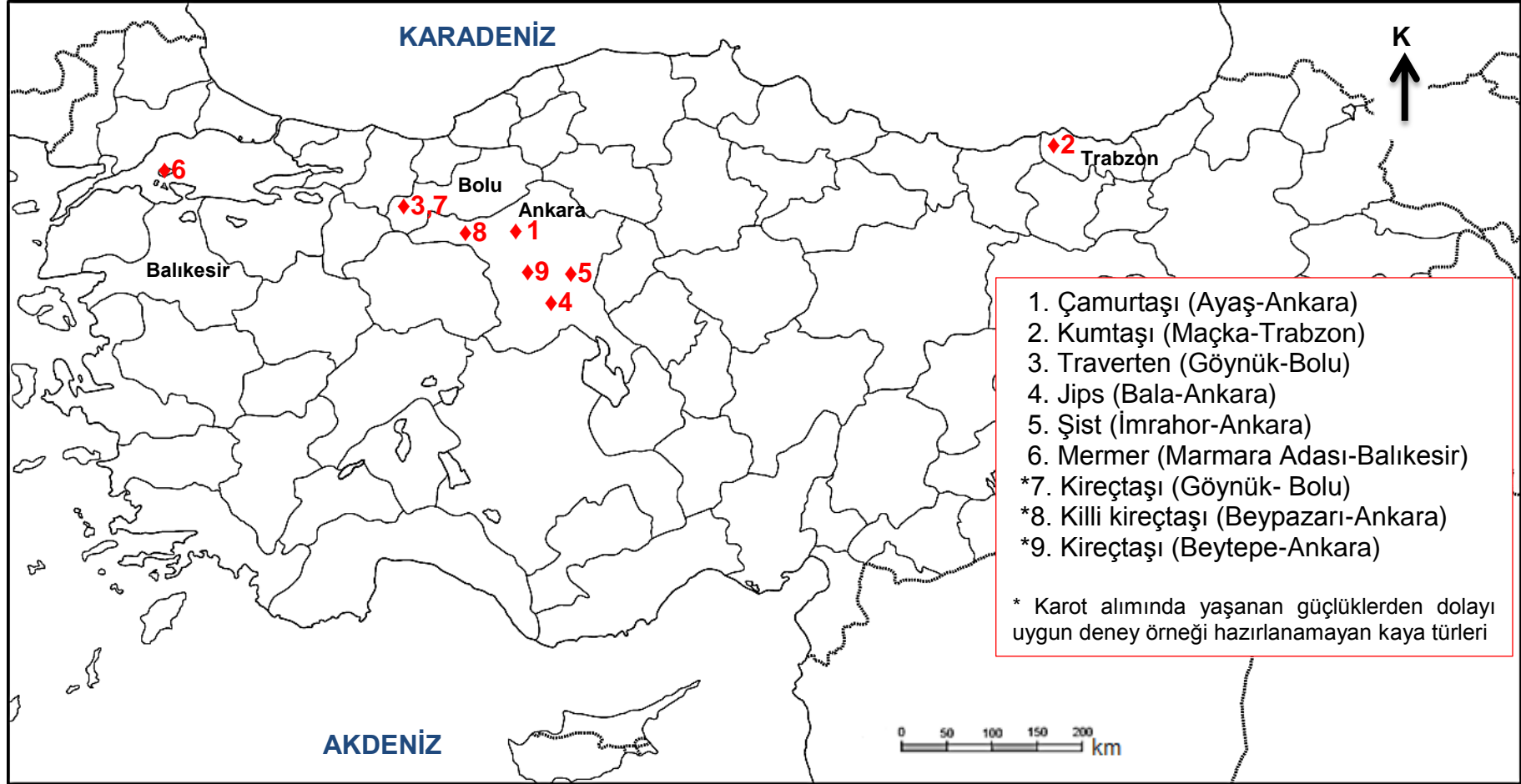
### 3. ÇALIŞMADA KULLANILAN KAYA TÜRLERİ VE ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. Kaya Türü Seçimi ve Örnekleme

Arazi çalışmaları kapsamında; laboratuvarında yapılacak deneyler için gerekli olan yönserlik düzlemlerine sahip değişik türde kaya örneklerinin toplanması ve laboratuvara nakli için gerekli çalışmalar yürütülmüştür. Tezin amacına uygun ince veya kalın tabakalanma, şistozite ve laminasyon vb. gibi süreksizlikleri içeren kaya türlerinin temini amacıyla MTA Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmış 1/25.000 ölçekli jeoloji haritaları esas alınarak yönserlik düzlemlerini içerebilecek kayaların bulunduğu bazı bölgeler belirlenmiş ve bu bölgelere gidilip tezin amacına uygun görülen blok örnekler seçilip Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarı'na getirilmiştir.

Tez kapsamında deneye tabi tutulacak kaya türleri Ankara, Bolu ve Trabzon illerinde araziden (1-5, 7-9 no.lu örnekler, Şekil 3.1) ve bir örnek (6 no.lu örnek, Şekil 3.1) ise kaya bloğu satışı yapan bir yerden temin edilmiştir. Örnek temini ve karot örneklerinin hazırlanması aşamalarında toplam 9 farklı kaya türü üzerinde çalışılmış, ancak bu kaya türlerinden bazılarının (7, 8, 9 no.lu kaya türleri, Şekil 3.1) çok zayıf ve yönserlik düzlemlerinden kolayca ayrılabilen bir yapıya sahip olmalarından dolayı deneylere tabi tutulacak nitelik ve nicelikte karot örneğinin alınabilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasına 6 farklı kaya türü kullanılarak devam edilmiştir. Bu araştırma kapsamında kullanılan kaya türlerinin jeolojik yaşları ve mühendislik tanımlamaları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Alınan tüm kaya türü örneklerinin taze veya en fazla az bozunmuş olmasına dikkat edilmiş olup, bunların yaklaşık 40x40x50 cm boyutlarında prizmatik bloklar şeklinde çıkarılmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca örneklenen kaya türlerinde gözlenen tabakalanma, şistozite ve foliasyon gibi yönserliğe neden olan süreksizlik düzlemleri arasındaki uzaklığın 1 ile 9 mm arasında değiştiği ölçülmüştür (Şekil 3.2-3.7 a-b).



Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılması planlanarak araziden ve taş satan kuruluşlardan derlenen kaya türlerinin orijinal yerlerini gösteren harita

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan kaya türlerinin lokasyonları, jeolojik yaşları ve tanımları

Kaya Türü	Örnek No.	Lokasyon (Örnekleme Şekli)	Jeolojik Yaş	Kaya Tanımı
Çamurtaşı	1	Ankara (Ayaş) (Kaya Yüzleği)	Orta Eosen <sup>(1)</sup>	Kırmızı, çok az bozunmuş, sık tabakalı, orta dayanımlı
Kumtaşı	2	Trabzon (Maçka) (Kaya Yüzleği)	Üst Kratase <sup>(1)</sup>	Koyu yeşil-kahverenkli, az bozunmuş, orta tabakalı, yüksek dayanımlı
Traverten	3	Bolu (Göynük) (Taş Ocağı)	Kuvaterner <sup>(1)</sup>	Açık sarımsı beyaz, çok az bozunmuş, sık tabakalı, orta derece dayanımlı
Jips	4	Ankara (Bala) (Taş Ocağı)	Permotriyas <sup>(1)</sup>	Beyaz-bej, çok az bozunmuş, sık tabakalı, çok düşük dayanımlı
Şist	5	Ankara (İmrahor) (Kaya Yüzleği)	Triyas <sup>(1)</sup>	Koyu kahverenkli yeşilimsi, az bozunmuş, sık tabakalı, orta derece dayanımlı
Mermer	6	Balıkesir (Marmara Adası) (Taş Satış Mağazası)	Üst Triyas <sup>(1)</sup>	Beyaz-gri, çok az bozunmuş, orta tabakalı, orta derece dayanımlı

<sup>(1)</sup> MTA (2017)

### 3.2. Mineralojik ve Petrografik Analizler

Arazide önce makro olarak adlandırılmış olan kaya örneklerinin ayrıca ince kesitleri de hazırlanarak petrografik incelemeler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mineraloji ve Petrografi Anabilim Dalı'nda yapılmış ve nihai kaya türü adlandırmaları bu incelemelere göre kesinlik kazanmıştır. İncelenen örneklerle ait bloklar ile ince kesit (tek nikol) görüntüleri Şekil 3.2-7'de verilmiştir.

Ankara-Ayaş'tan alınan 1 no.lu örnek çamurtaşı olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.2a,b). Örnek; bol miktarda kuvars, daha az oranda feldispat ve klorit mineralleri içermektedir (Şekil 3.2c). Taneler çok ince-ince kum boyutları arasında değişmekte olup, orta köşeli ve az yuvarlaktır.

Trabzon-Maçka'dan alınan 2 no.lu örnek kumtaşı olarak adlandırılmış (Şekil 3.3a,b) olup, bir miktar altere, feldispatik litarenit ve litarenitten oluşmaktadır (Şekil 3.3c). Örnek içerisinde birbirine paralel akma yapıları gözlenmektedir.

Bolu, Göynük'ten alınan 3 no.lu örnek traverten olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.4a,b). Örnek; çubuksu şekilde gelişmiş karbonat tanelerinden oluşmakta ve az-orta boşluklu olup, belirli bir yönelimdeki mineral dizilimine sahiptir (Şekil 3.4c).

Ankara-Bala'dan alınan 4 no.lu örnek jips olarak adlandırılmış olup, makro düzeyde siyah bantlar içermekte (Şekil 3.5a,b) ve kalsiyum sülfattan oluşmaktadır (Şekil 3.5c).

Ankara-İmrahor'dan alınan 5 no.lu örnek mika şist olarak adlandırılmış olup, içerisinde belirgin yönlü doku ve yönlenmeyle uyumlu kalın çatlak dolgularını içermektedir (Şekil 3.6a-b). Örnek; biyotit, muskovit, klorit, kuvars ve feldispat minerallerini içermektedir (Şekil 3.6c).

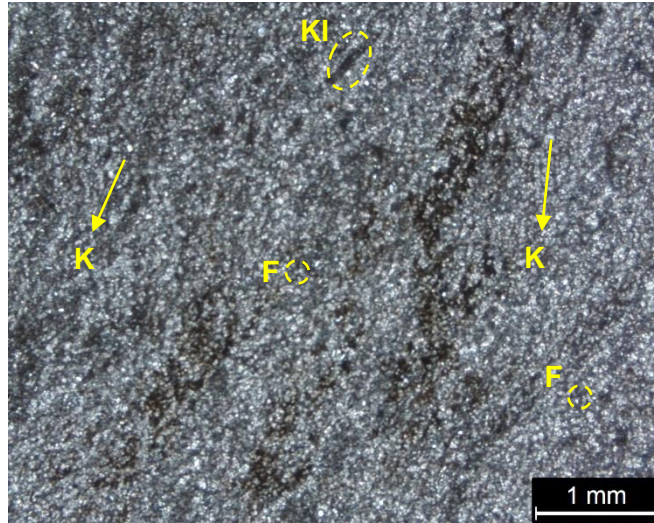
(a)



(b)



(c)



Şekil 3.2. Çamurtaşında (Örnek No. 1) (a) sık aralıklarla tekrarlanan tabakaların genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü (K: Kuvars, F: Feldispat, Kl: Klorit)

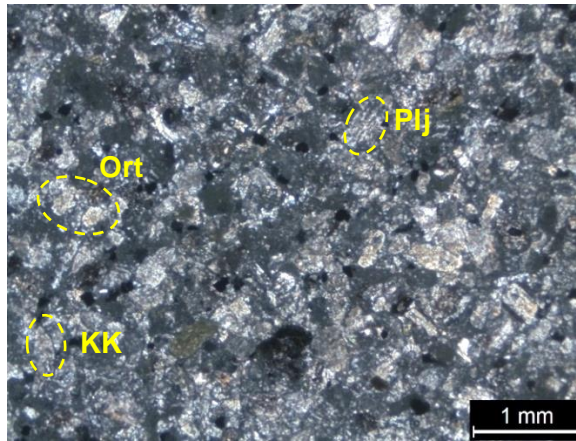
(a)



(b)



(c)



Şekil 3.3. Kumtaşında (Örnek No. 2) (a) tabakalanmanın genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikelde görüntüsü (Plj: Plajiyoklaz, Ort: Ortoklaz, KK: Kayaç kırıntısı)



(a)



(b)



(c)



Karbonat mineralleri

1 mm

Şekil 3.4. Travertende (Örnek No. 3) (a) sık aralıklarla tekrarlanan tabakaların genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü

(a)



(b)



(c)



Şekil 3.5. Jipste (Örnek No. 4) (a) sık aralıklarla tekrarlanan tabakaların genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü



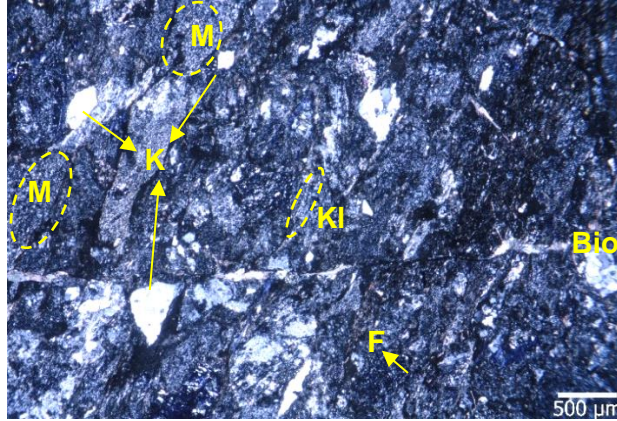
(a)



(b)



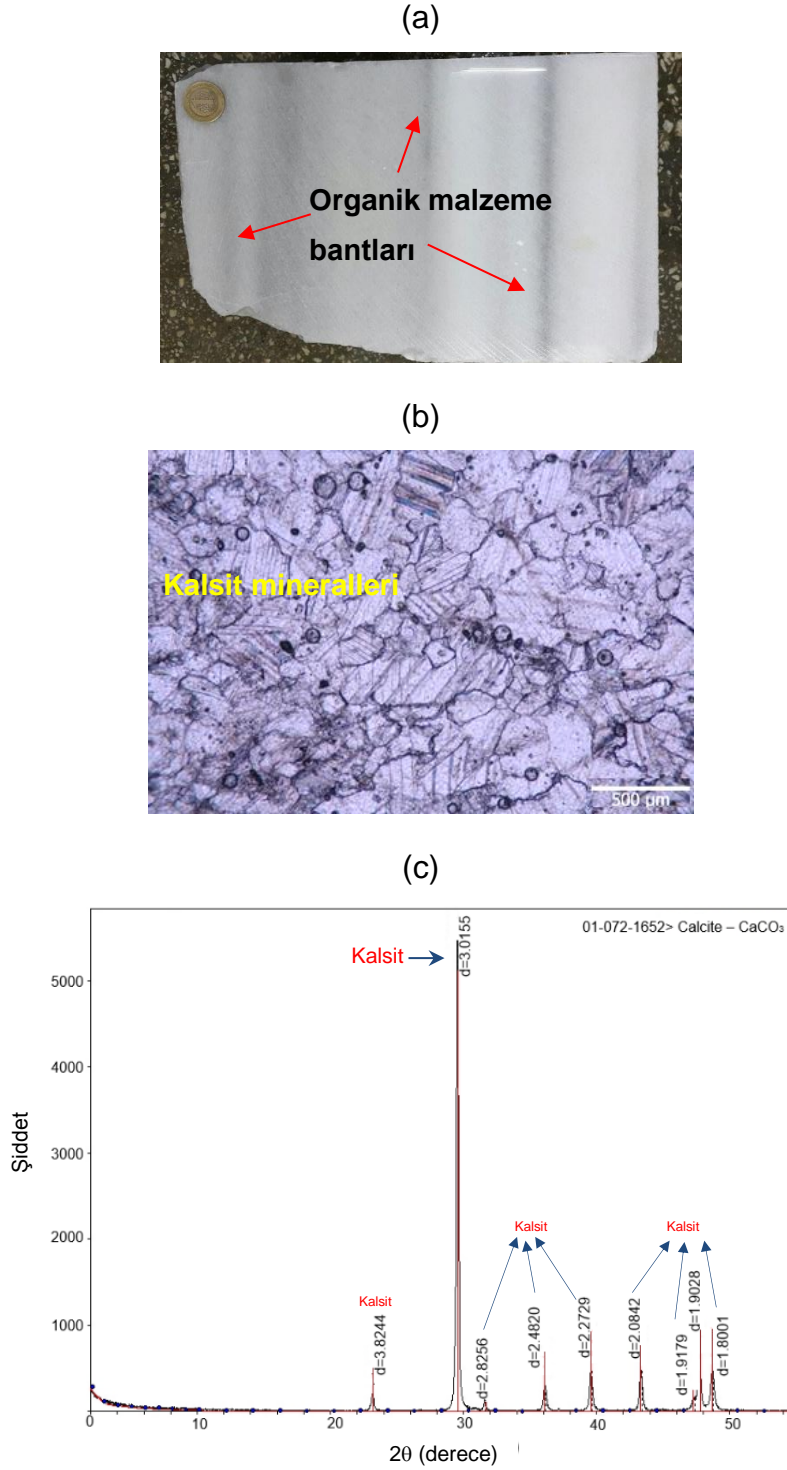
(c)



Şekil 3.6. Mika şistte (Örnek No. 5) (a) sık aralıklarla tekrarlanan şistozite düzlemlerinin genel ve (b) yandan ve (c) kayacın tek nikolde görüntüsü (Bio: Biyotit, M: Muskovit, Kl: Klorit, K: Kuvars, F: Feldispat)

Lokasyonu Balıkesir'in Marmara Adası olup taş satan bir dükkandan temin edilen 6 no.lu örnek mermer olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.7a). Örnek; kristo blastik

dokulu ve tamamen kalsit minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 3.7b). Ayrıca örnek içerisindeki siyah bantların bileşiminin tayin edilmesi amacıyla X-ışınları kırınımı analizleri (XRD) yapılmış ve bu bantların ince siyah organik malzeme bantları olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.7c).



Şekil 3.7. (a) Mermerin (Örnek No. 6) içerdiği organik malzemeden ve bantlanmadan görünüm, (b) kayacın tek nikelde görüntüsü ve (c) X-ışınları kırınım analizi sonucu (difraktogram)

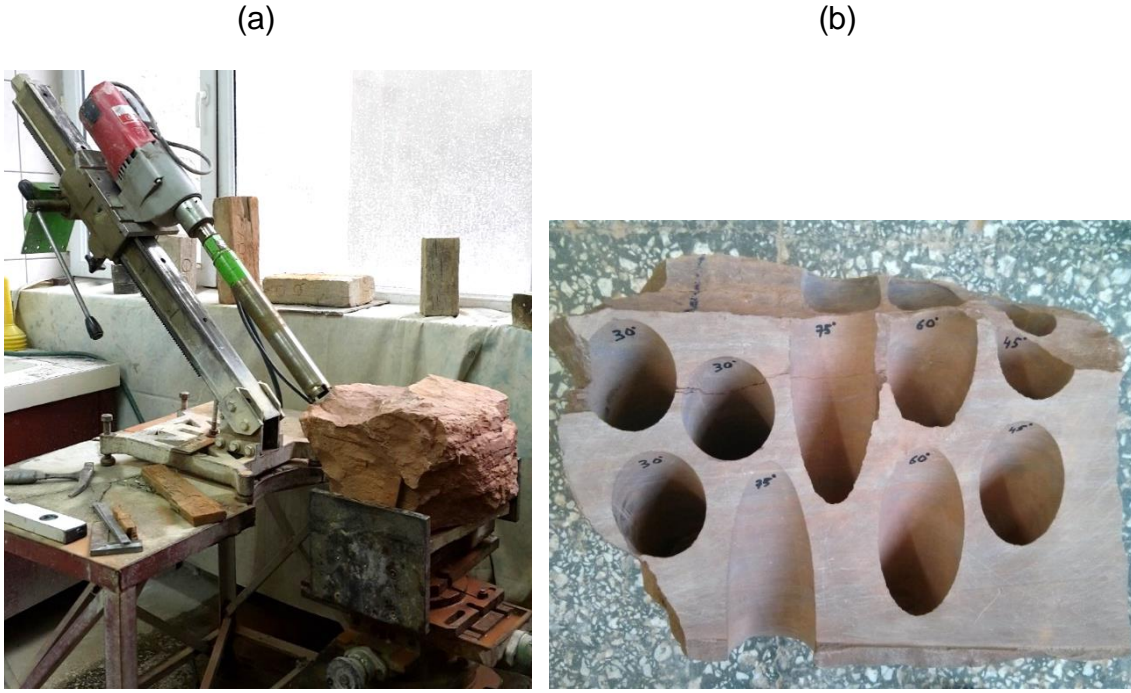
## 4. KAYA MEKANİĞİ LABORATUVAR DENEYLERİ

### 4.1. Yönlü Karot Örneklerinin Hazırlanması

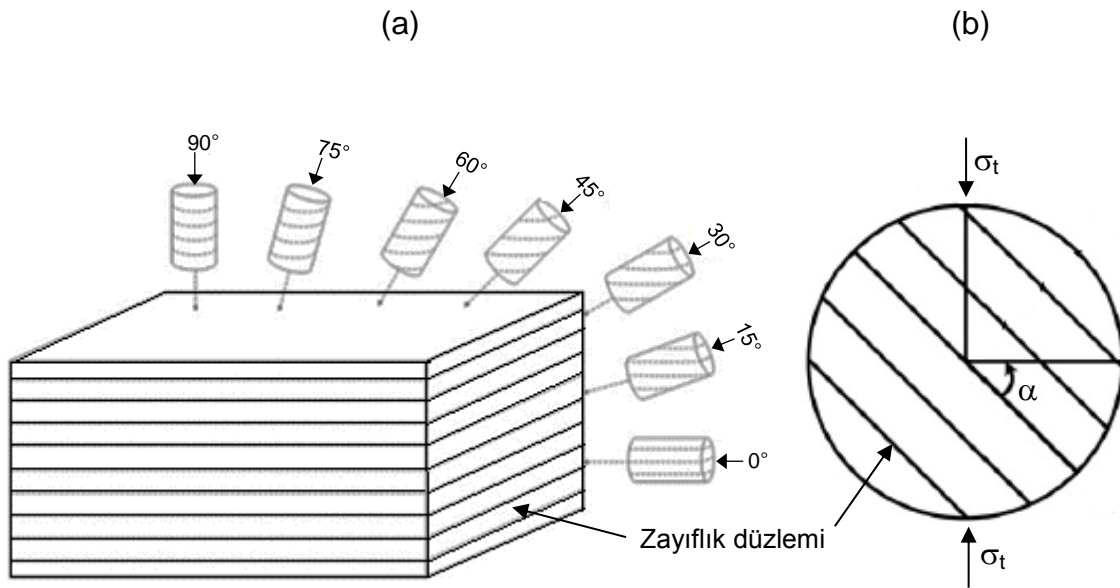
Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'na getirilen blok örneklerden deneylerde kullanılmak üzere ISRM (2007) tarafından önerilen boyutlar (boy ve çap) esas alınarak karot örnekleri hazırlanmış ve bu örnekler üzerinde gerekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada tek eksenli sıkışma dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, elastisite modülü ve P-dalga hızı üzerinde yönserliğin etkisinin araştırılması ve ilgili görgül tahmin ilişkilerinin önerilmesi amaçlandığı için, bloklardan uzun eksenleri tabakalanma ve şistozite düzlemleriyle 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° açılar (yönserlik açısı) yapacak şekilde örnekler karot alma makinesi kullanılarak alınmış olup, karot kesme ve düzleme makinesiyle de örnekler deneylere uygun hale getirilmiştir.

Açılı karot alma (Şekil 4.1a) yöntemiyle gerçekleştirilen işleme örnek olarak çamurtaşı bloğundaki uygulama Şekil 4.1b'de gösterilmiştir. Kaya bloklarından karot alınarak UCS, E,  $V_p$  ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri için farklı yönserlik açılarına göre örneklerin hazırlanmasına ilişkin şematik gösterim ise Şekil 4.2a-b'de verilmiştir.

Tez kapsamında değerlendirilen yönserlik içeren kaya bloklarından örnek alma ve hazırlama aşamaları sırasında karşılaşılan güçlükler nedeniyle, UCS ve  $V_p$  deneyleri her yönserlik açısı için 3'er örnek, elastisite modülü tayini deneyi birer örnek ve dolaylı çekme deneyi ise 5'er örnek üzerinde gerçekleştirilmiş olup, değerlendirmeler sırasında bu örneklerden tayin edilen değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Deneye hazır hale getirilmiş örneklerin gerek arazideki doğal koşullardaki nem içeriklerindeki farklılık, gerekse karot alma işlemi süresince ıslanmaları nedeniyle, aynı nem koşulları altında deneye tabi tutulmalarını sağlamak amacıyla örnekler deneylerin öncesinde oda sıcaklığında (~21C°) kurutulmuşlardır.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan (a) açılı karot alma makinesi ve (b) çamurtaşına ait blok örneğin karotlar alındıktan sonraki görünümü



Şekil 4.2. Farklı yönserlik açılarına göre (a) UCS, E,  $V_p$  ve (b) dolaylı çekme deneyleri için karot örneklerinin hazırlanmasının şematik gösterimi (Cho ve ark. (2012)'dan düzenlenmiştir)



## 4.2. Birim Hacim Ağırlık Tayinleri

Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanmış olan tüm örnekler üzerinde ISRM (2007) tarafından önerilen kompas yöntemi uygulanarak boy/çap ölçümleri yapılmış ve tartı ile bunların ağırlıkları belirlenerek birim hacim ağırlık tayinleri yapılmıştır. Tüm kaya türlerine ait sonuçların verildiği Çizelge 4.2'den birim hacim ağırlıkların  $21.45 \text{ kN/m}^3$  (jips) ile  $27.33 \text{ kN/m}^3$  (kumtaşı) arasında değiştiği görülmektedir.

## 4.3. P-Dalga Hızı Tayinleri

P-dalga hızı değerleri bu çalışmada kullanılan tüm kaya türleri için dayanım özelliklerinin kestiriminde kullanılması amacıyla tayin edilmiştir. NQ çaplı örnekler üzerinde farklı yönserlik koşullarında ve ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilen P-dalga hızı ölçümlerinde Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'ndaki sonik hız ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.3.). Deneylerle tüm kaya türleri için belirlenmiş olan P-dalga hızı değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, literatürde yer alan sınırlı sayıdaki çalışmalarla uyumlu şekilde yönserlik açısının incelenen kaya türlerinin tümü için  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye doğru artmasıyla  $V_p$  değerlerinde bir azalış eğilimi olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.3. P-dalga hızı ( $V_p$ ) deney düzeneği ve deneyden bir görünüm

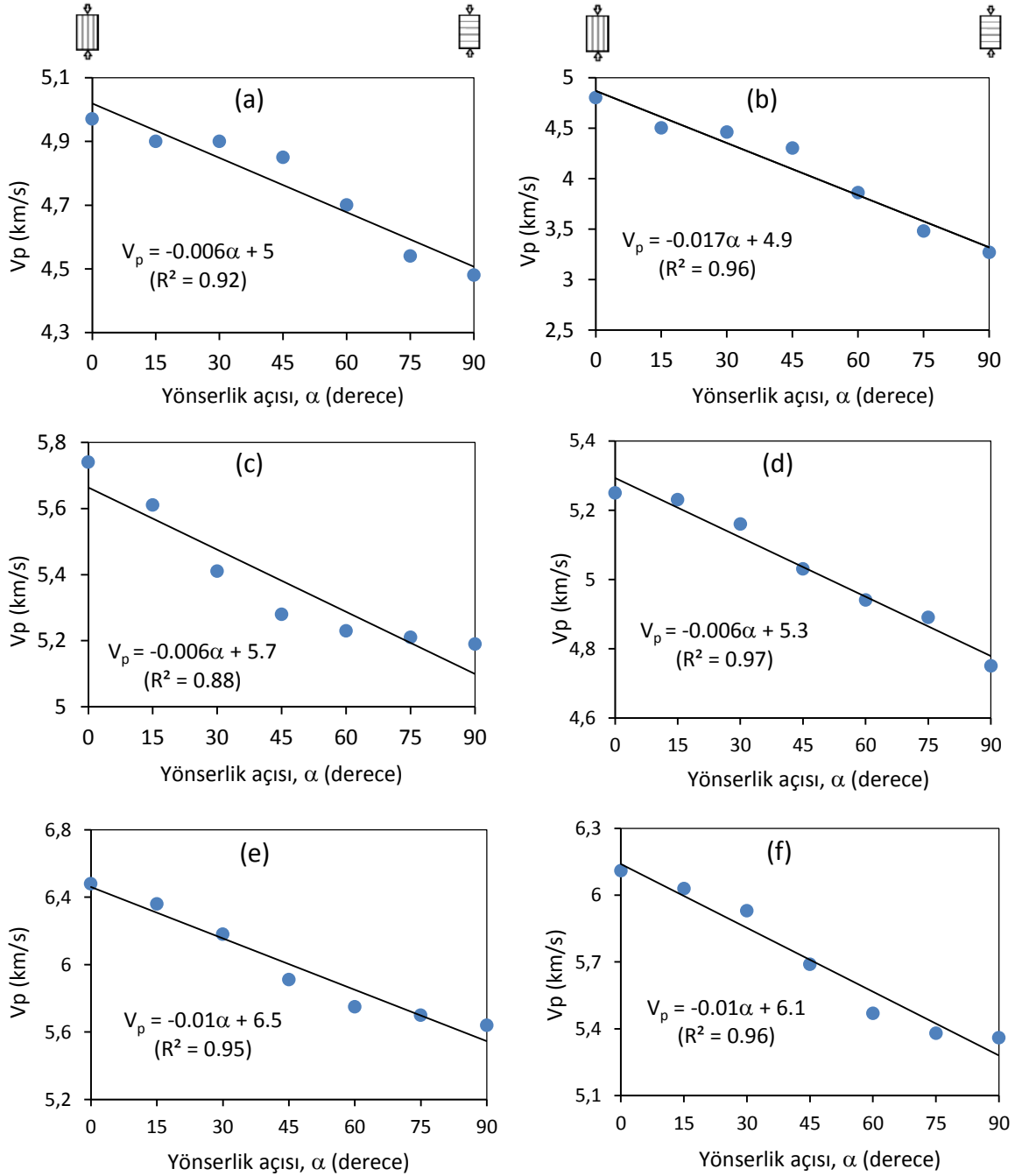
Çizelde 4.1. Tez kapsamında yapılan kaya mekaniği deneylerinin sonuçları

Kaya Türü	Yönserlik Açısı (°)	$V_p$ (km/s)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	E (GPa)
Kumtaşı	0	6.17	134.89	13.02	52.0
	15	6.06	121.72	12.90	54.0
	30	5.93	97.98	11.53	53.0
	45	5.87	115.98	10.53	46.0
	60	5.62	130.97	9.72	44.0
	75	5.42	139.36	9.56	40.0
	90	5.29	160.31	8.03	37.5
Jips	0	4.03	25.71	2.56	28.0
	15	3.99	20.68	2.30	25.5
	30	3.71	17.06	2.15	17.0
	45	3.38	16.10	2.10	22.5
	60	3.20	16.76	2.09	27.7
	75	3.09	23.45	2.02	34.0
	90	3.03	29.21	1.94	35.3
Traverten	0	4.69	47.95	4.87	77.7
	15	4.66	36.42	4.47	55.5
	30	4.49	32.49	4.31	40.0
	45	4.28	30.52	3.90	36.4
	60	4.11	41.56	3.79	55.0
	75	4.01	47.95	3.52	67.5
	90	3.94	58.85	3.21	88.0
Çamurtaşı	0	4.88	51.10	5.27	32.0
	15	4.83	49.51	5.15	21.5
	30	4.51	39.90	4.36	15.5
	45	4.46	37.70	4.23	20.0
	60	4.14	42.24	4.19	21.3
	75	3.99	52.49	3.87	24.0
	90	3.69	63.21	3.69	26.3
Şist	0	5.45	70.38	9.09	42.7
	15	5.33	62.48	8.82	38.3
	30	5.15	58.56	8.24	29.0
	45	4.88	55.47	8.04	45.0
	60	4.25	60.92	7.52	56.6
	75	4.12	66.66	5.74	61.3
	90	4.02	79.09	4.63	70.0
Mermer	0	5.15	51.16	6.18	63.7
	15	5.01	47.52	5.80	41.6
	30	4.89	45.70	5.59	39.9
	45	4.59	45.24	5.38	47.5
	60	4.44	49.40	4.93	48.2
	75	4.19	52.36	4.77	62.1
	90	4.01	68.15	4.37	67.5

Çizelde 4.2. Birim hacim ağırlık tayinlerinin sonuçları

	Kumtaşı	Jips	Traverten	Çamurtaşı	Şist	Mermer
Birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	25.91-27.33 (26.78)	21.45-22.61 (22.17)	23.11-24.08 (23.54)	24.64-25.36 (25.02)	26.61-26.95 (26.88)	26.15-26.81 (26.49)

Parantez içindeki değerler ortalama değerlerdir.



Şekil 4.4. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için  $V_p$ 'nin yönserlik açısına bağlı değişimi

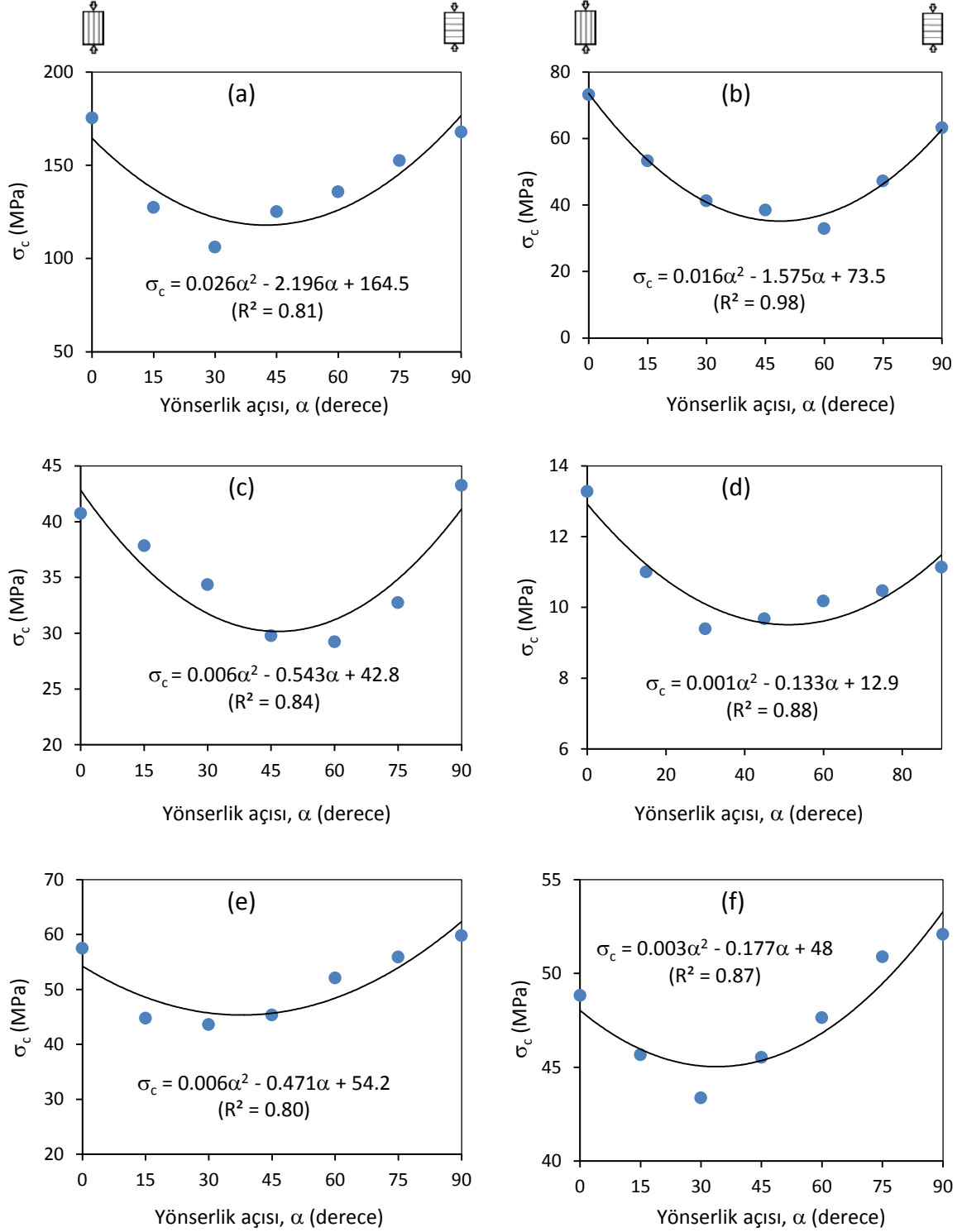
#### 4.4. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Tayinleri

UCS deneyleri ISRM (2007) tarafından önerildiği gibi, boy/çap oranı 2.5-3 arasında değişen karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 0° ile 90° arasında değişen 7 farklı yönserlik açısında yapılmış olup, bu amaçla Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda bulunan 500 kN yükleme kapasiteli ve otomatik hız kontrollü hidrolik pres kullanılmıştır. UCS deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiş olup, UCS'nin yönserlik açısına bağlı değişimi de grafiksel olarak Şekil 4.5'te sunulmuştur. Şekil 4.5'ten görülebileceği üzere, en büyük UCS değeri 0° ve 90° yönserlik açılarında elde edilirken, yaklaşık 30°-45° aralığında en düşük UCS değerleri elde edilmiştir. Belirlenen bu değişimler, 2. Bölüm'de de değinildiği üzere, sınırlı sayıda örnek üzerinde yapılan önceki çalışmalarda belirtilen eğilimlerle uyum içerisindedir. Bu deneyler sonucunda incelenen kaya türlerinin Ramamurthy (1993)'nin önerdiği sınıflamaya göre genel olarak düşük-orta yönserliğine sahip oldukları belirlenmiştir (Çizelge 4.2.)

Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan kaya türlerinin Ramamurthy (1993)'ye göre yönserlik sınıflaması

Örnek Türü	Yönserlik Oranı (Dayanım Yönserliği) $R_c (\sigma_{cmax}/\sigma_{cmin})$	Yönserlik Sınıfı
Mermer	1.31	Düşük Yönserlik
Jips	1.80	Düşük Yönserlik
Traverten	1.87	Düşük Yönserlik
Şist	2.06	Orta Yönserlik
Kumtaşı	2.14	Orta Yönserlik
Çamurtaşı	3.20	Orta Yönserlik

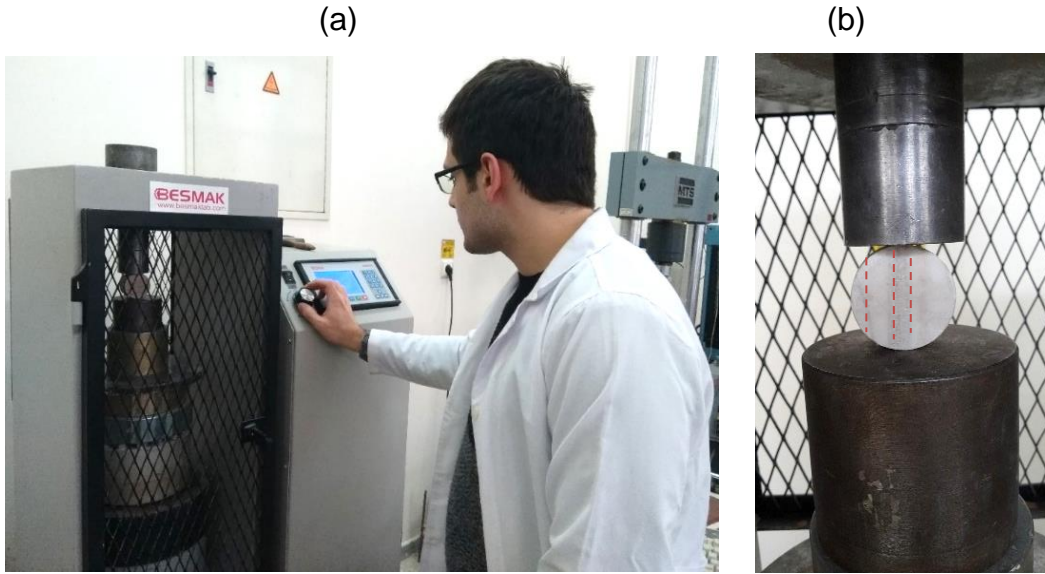




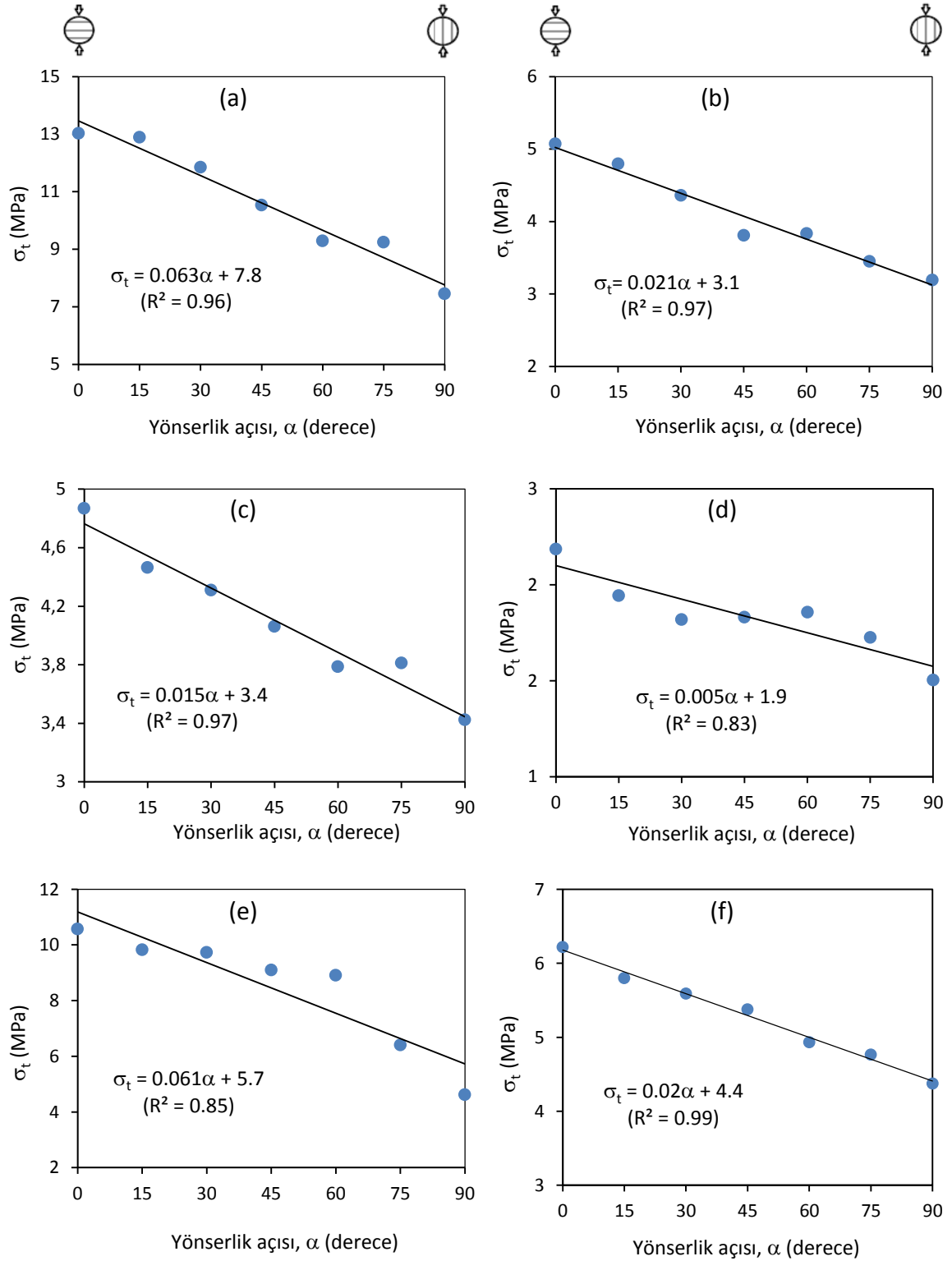
Şekil 4.5. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için UCS'nin yönserlik açısına bağlı değişimi

#### 4.5. Dolaylı Çekme Dayanımı Tayinleri

Çekme dayanımı deneylerinde de UCS deneylerinde kullanılan 500 kN yükleme kapasiteli otomatik hız kontrollü hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 4.6a). Deneyler, NQ çaplı ve kalınlığı yarıçapına yaklaşık eşit olan silindirik örnekler üzerinde (Şekil 4.6b) ve ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.2’de sunulmuş, çekme dayanımının yönserlik açısına bağlı değişimi ise Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.7’den 0°’den 90°’ye doğru artmasıyla  $\sigma_t$  değerlerinin azalım eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu eğilim 2. Bölüm’de değinilen sınırlı sayıdaki çalışmada gözlenen eğilimler ile uyum göstermektedir.



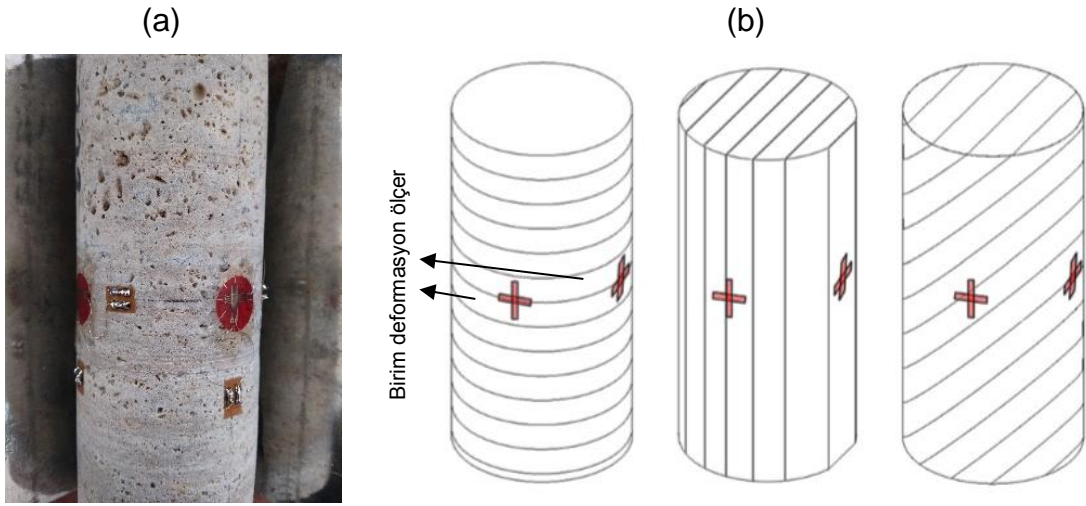
Şekill 4.6. (a) Yükleme presi kullanılarak yapılan dolaylı çekme dayanımı deneyinden bir görünüm ve (b) 90° yönserlik açısı için jips örneği üzerinde deneyin yapılması



Şekil 4.7. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için dolaylı çekme dayanımının yönserlik açısına bağlı değişimi

#### 4.6. Elastisite Modülü Tayinleri

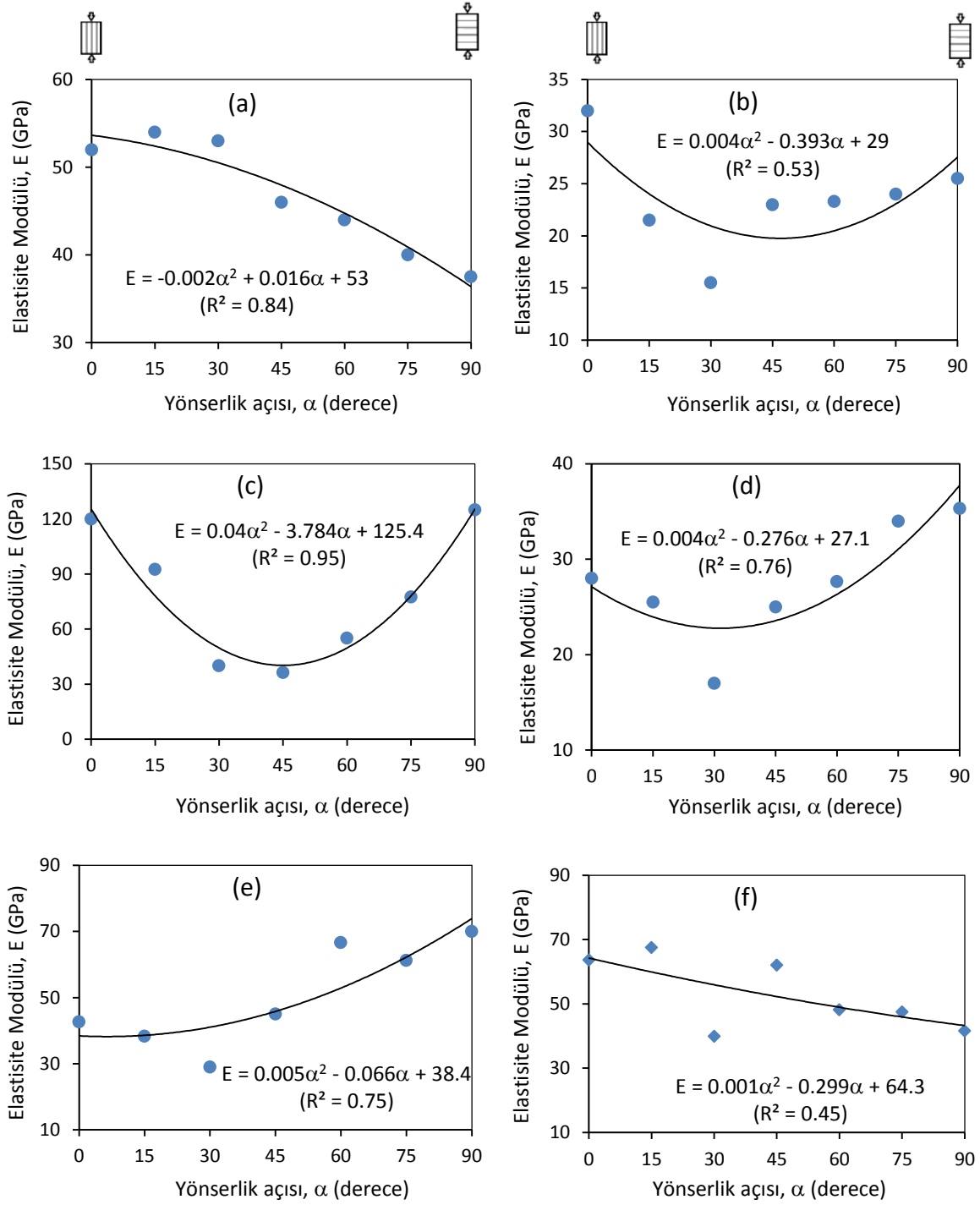
Yönerlik açısının değişimine bağlı olarak "ortalama modül" değerlerinin tayini amacıyla bu tez çalışmasında elastisite modülü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem esas alınmıştır. Deneylerde farklı yönerlik açlarına sahip karot örnekleri için yatay ve düşey yönlerdeki deformasyonların birlikte ölçülmesine olanak sağlayan birim deformasyon ölçerler kullanılmış (Şekil 4.8a) ve bu deformasyon ölçerlerin deney örnekleri üzerine yapıştırılmaları 3 yönerlik açısı ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ ) için şematik olarak Şekil 4.8b'de gösterilmiştir. Elastisite modülü tayinleri toplam 7 yönerlik açısı için birer örnek kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.9'da ise, elastisite modülü deneyinden bir görünüm ve kullanılan bilgisayar kontrollü deney düzeneği görülmektedir. Deneylerde UCS deneylerinde kullanılan 500 kN yükleme kapasiteli otomatik hız kontrollü hidrolik presten yararlanılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm kaya türleri için birer örnek üzerinde tayin edilen "ortalama elastisite modülü" değerleri Çizelge 4.1'de verilmiş olup, bunların yönerlik açısına bağlı değişimi de grafiksel olarak Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneylerin sonuçları ve önceki çalışmaların sonuçları incelendiğinde yönerlik açısına bağlı olarak elastisite modüllerinin değişiminde ortak bir eğilim yoktur. Bu durumun muhtemel nedeni aşağıdaki gibi açıklanabilir. Kayalarda yönerliğe neden olan düzlemlerin P-dalga hızı üzerindeki etkisi bu yüzeylerin kalınlıklarının ölçüm yapılan toplam yüzey (ana kaya+zayıflık düzlemleri) kalınlığına oranı düzeyinde etkili olup, bu etki oldukça sınırlıdır. Ancak elastisite modülü üzerinde bu etki dolgunun sağlam ve zayıf olması durumunda çok yüksektir. Çünkü tek eksenli yüklemde gelişen deformasyonlar daha çok zayıf zonlarda gerçekleşecektir. Örneğin; çok sağlam bir kayada zayıf kil bantlarının bulunması halinde, bu bantlara dik yöndeki bir yükleme sonucu birim deformasyonlar söz konusu kil bantları boyunca yoğunlaşarak kayanın çok düşük elastisite modüllü göstermesine neden olur ve yönerlik etkisi daha büyüktür.



Şekil 4.8. (a) UCS deneyinde kullanılan birim deformasyon ölçerlerin traverten örneği üzerine yapıştırılmasından bir görünüm ve (b) deney örnekleri üzerine birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılması yönteminin şematik gösterimi (Cho ve ark. (2012)'dan düzenlenmiştir)



Şekil 4.9. Elastisite modülünün tayini için kullanılan bilgisayar kontrollü deney düzeneği ve deneyin yapıışından bir görünüm



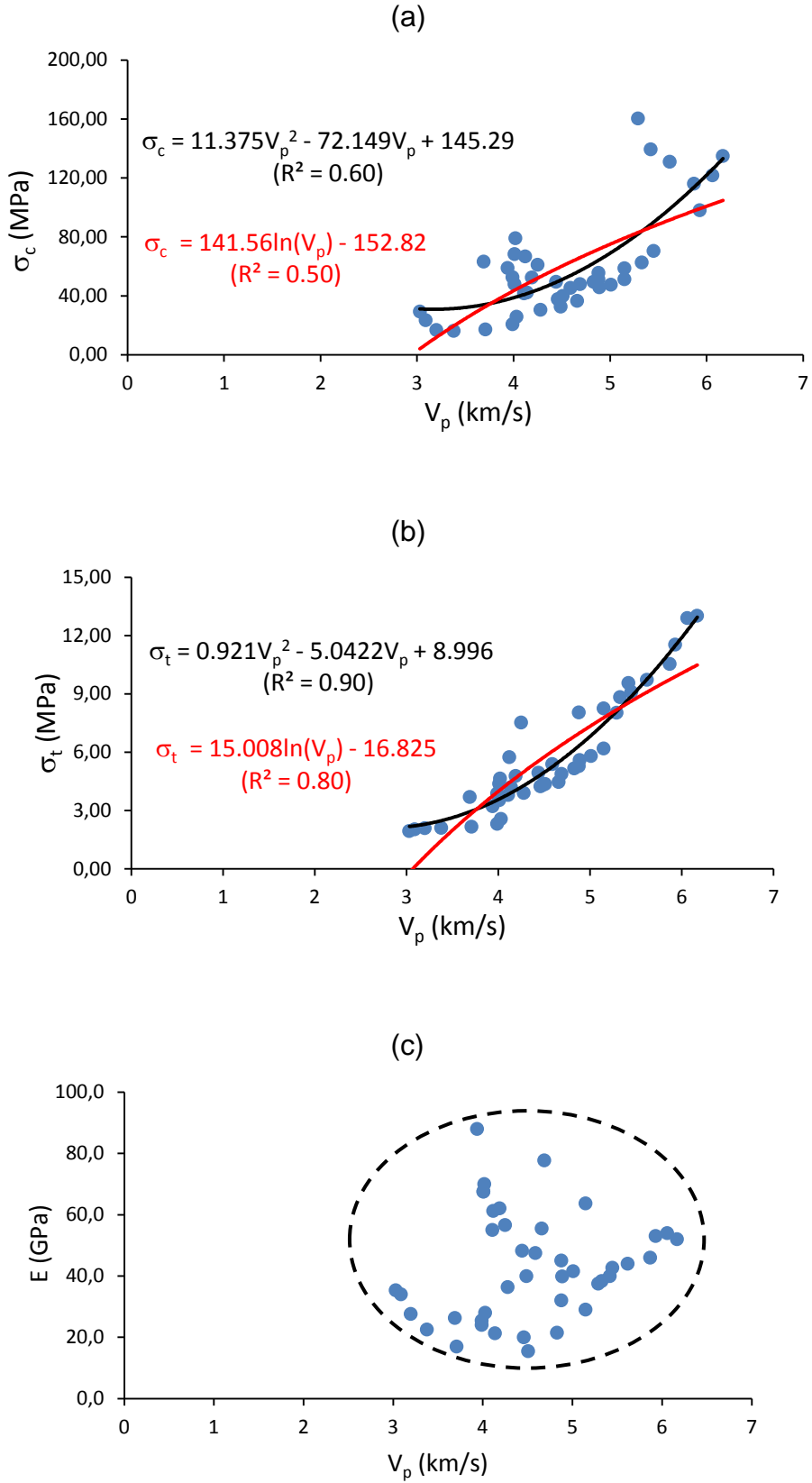
Şekil 4.10. (a) Kumtaşı, (b) çamurtaşı, (c) traverten, (d) jips, (e) şist ve (f) mermer örnekleri için elastisite modülünün yönserlik açısına bağlı değişimi

## 5. YÖNSERLİK KOŞULUNDA DAYANIM ve DEFORMABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN P-DALGA HIZINDAN TAHMİNİ

Bu yüksek lisans tezinin başlıca konusu olan dayanım ve deformabilite özelliklerinin P-dalga hızından ( $V_p$ ) tahmini ile ilgili olarak iki farklı yaklaşım izlenmiştir. Öncelikle dayanım ve deformabilite özellikleri ile P-dalga hızı arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. İlk yaklaşımda, farklı yönserlik açıları için P-dalga hızından dayanım ve deformabilitenin özelliklerinin kestirimi için basit regresyon analiz yönteminden yararlanılmıştır. Ancak bu yaklaşımla dayanım ve deformabilite iyi bir performansla tahmin edilebilmesi mümkün olamamıştır. İkinci yaklaşım kapsamında ise, çok değişkenli doğrusal regresyon analiz yönteminden yararlanılarak dayanım ve deformabilite özelliklerinin çok daha yüksek bir korelasyon katsayısıyla kestirimine olanak sağlayan görgül ilişkiler belirlenmiştir.

### 5.1. Dayanım ve Deformabilite Özellikleri ile P-Dalga Hızı Arasındaki İlişkiler

Tez kapsamında tayin edilen UCS, dolaylı çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleriyle  $V_p$  değerleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için Şekil 5.1'de sunulan grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden görüleceği üzere, UCS ile  $V_p$  arasındaki ilişkinin belirleme katsayısı ( $R^2$ ) polinomsal ilişki için 0.60 ve logaritmik ilişki için ise 0.50 olup, biraz düşüktür (Şekil 5.1a).  $\sigma_t$ 'nin  $V_p$  ile arasındaki polinomsal ilişkide  $R^2$  0.90 ve logaritmik ilişki için ise 0.80 gibi oldukça yüksek değerlere sahiptir (Şekil 5.1b). Her iki ilişki için de bu özellikler arasında polinomsal bir eğilim vardır. UCS- $V_p$  ve  $\sigma_t$ - $V_p$  arasındaki basit regresyon ilişkileri yüksek  $R^2$  değerleri verdikleri için bu ilişkilerin çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri ile tahmin performansının artırılması mümkün olmuştur. Elastisite modülü ile  $V_p$  arasındaki ilişki değerlendirildiğinde ise, verinin neredeyse dairesel bir dağılım gösterdiği (Şekil 5.1c) belirlenmiştir.



Şekil 5.1. P-dalga hızı değerleri ile (a) UCS, (b) dolaylı çekme dayanımı ve (c) elastisite modülü arasındaki ilişkiler



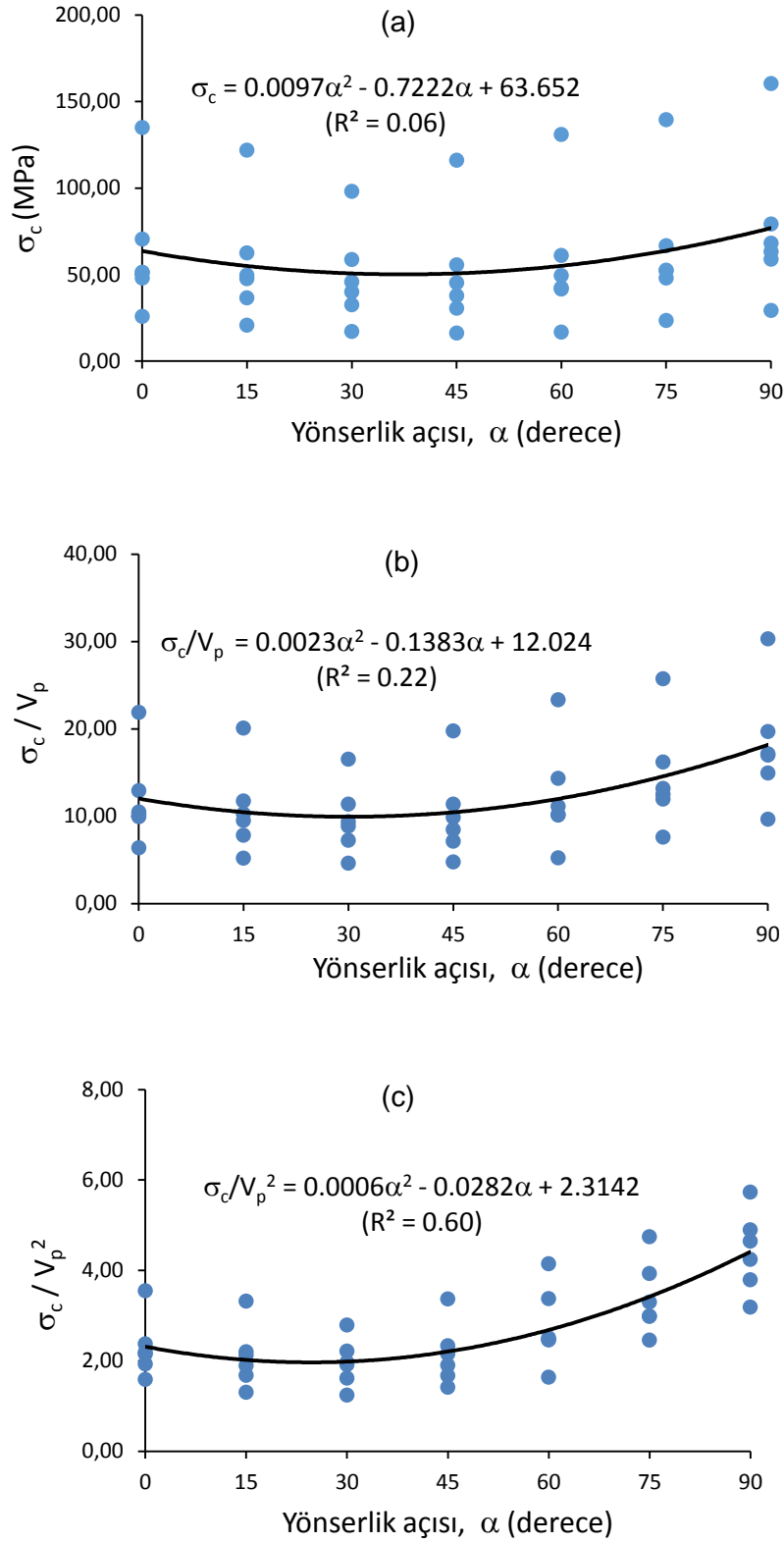
## 5.2. Dayanım ve Deformabilite Özelliklerinin Yönserlik Açısına Bağlı Değişiminin Basit Regresyon Analizleriyle Belirlenmesi

Günümüze değin değişik araştırmacılar tarafından farklı kaya türleri için dayanım ve deformabilite özellikleri ile P-dalga hızı arasında basit regresyon analizleriyle belirlenmiş görgül eşitlikler geliştirilmiştir. Ancak bu çalışmaların birçoğunda yönserlik etkisi dikkate alınmamıştır. Sınırlı sayıda örnek üzerinde gerçekleştirilen ve yönserliğin dikkate alındığı çok az sayıdaki çalışmada ise, dayanım ve deformabilite özelliklerinin tahminine yönelik ilişkiler önerilmemiştir. 6 farklı türde kayanın kullanıldığı ve 7 farklı yönserlik koşulunun dikkate alındığı bu çalışmada da pratikliği nedeniyle tercih edilen basit regresyon analizleri ile belirlenmiş görgül eşitlikler geliştirilmiştir. Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4'ten görüleceği üzere, basit regresyon analizleri yapılarak UCS, dolaylı çekme dayanımı ve elastisite modüllerinin belirli bir yönserlik açısı için P-dalga hızından tahmin edilmesi amacıyla tez kapsamında elde edilen tüm deney sonuçları bir bütünlük içerisinde değerlendirilmiş ve bu parametreler arasında ilişkiler geliştirilmiştir.

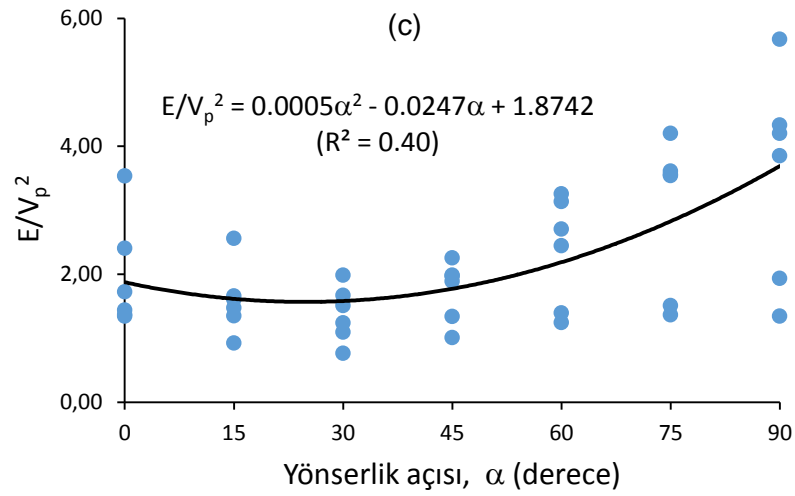
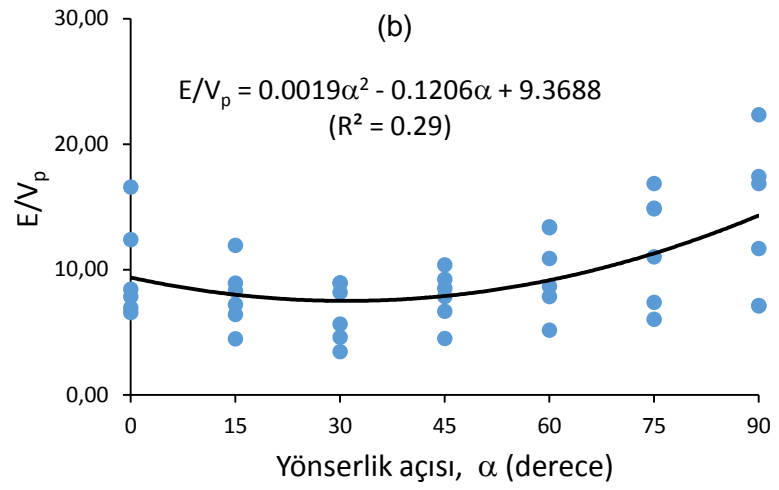
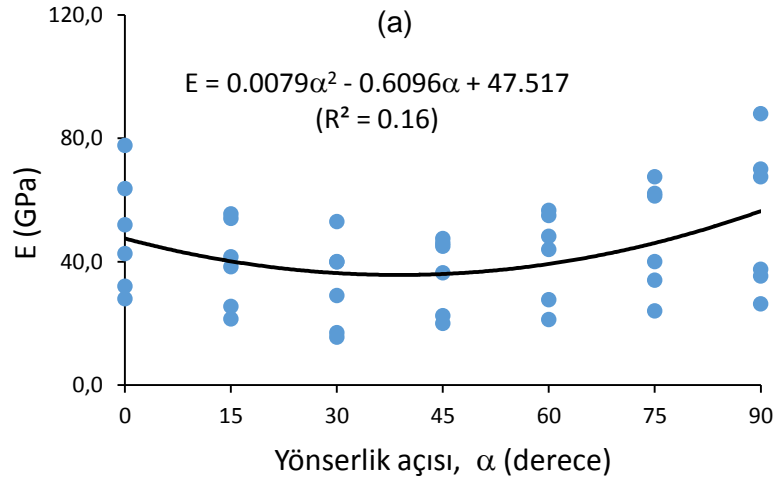
Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlere göre, UCS ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler  $\sigma_c-\alpha$ ,  $(\sigma_c/V_p)-\alpha$  ve  $(\sigma_c/V_p^2)-\alpha$  oranları kullanılarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre hazırlanmış ve Şekil 5.2a,b ve c'de verilen grafiklerden görüleceği üzere, hem UCS hem de  $\sigma_c/V_p$  ile yönserlik açısı arasındaki ilişki polinomsal bir karakter sergilemektedir. Şekil 5.2'den görülebileceği üzere,  $\sigma_c-\alpha$  ilişkisinden çok düşük  $R^2$  değeri elde edilirken, ilişkiye  $V_p$  değerinin özellikle de  $V_p^2$  parametresinin dahil edilmesiyle  $\sigma_c/V_p^2-\alpha$  ilişkisinde 0.60 gibi bir  $R^2$  değeri elde edilmiştir. Ancak basit regresyon analiziyle hesaplanan bu belirleme katsayısı çok yüksek olmamasına rağmen bu parametre çok değişkenli doğrusal regresyon analiziyle değerlendirildiğinde çok daha yüksek belirleme katsayıları elde edilmiş olup, bir sonraki bölümde bu hususa ayrıntılı olarak değinilecektir.

Elastisite modülü ile P-dalga hızı arasındaki ilişkiler de  $E-\alpha$ ,  $(E/V_p)-\alpha$  ve  $(E/V_p^2)-\alpha$  ilişkileri ile değerlendirilmiştir. Şekil 5.3a,b,c'de verilen bu ilişkilerden görüleceği üzere, elastisite modülü ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler de genel olarak

polinomsal bir karakter sergilemektedir. Ancak bu parametre için basit regresyon



Şekil.5.2. Tez kapsamında tayin edilen UCS ve  $V_p$  değerlerine bağlı olarak (a)  $\sigma_c$ , (b)  $\sigma_c/V_p$  ve (c)  $\sigma_c/V_p^2$  oranları ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler



Şekil.5.3. Tez kapsamında tayin edilen tüm E ve  $V_p$  değerlerine bağlı olarak (a) E, (b)  $E/V_p$  ve (c)  $E/V_p^2$  oranları ile yönerlik açısı arasındaki ilişkiler

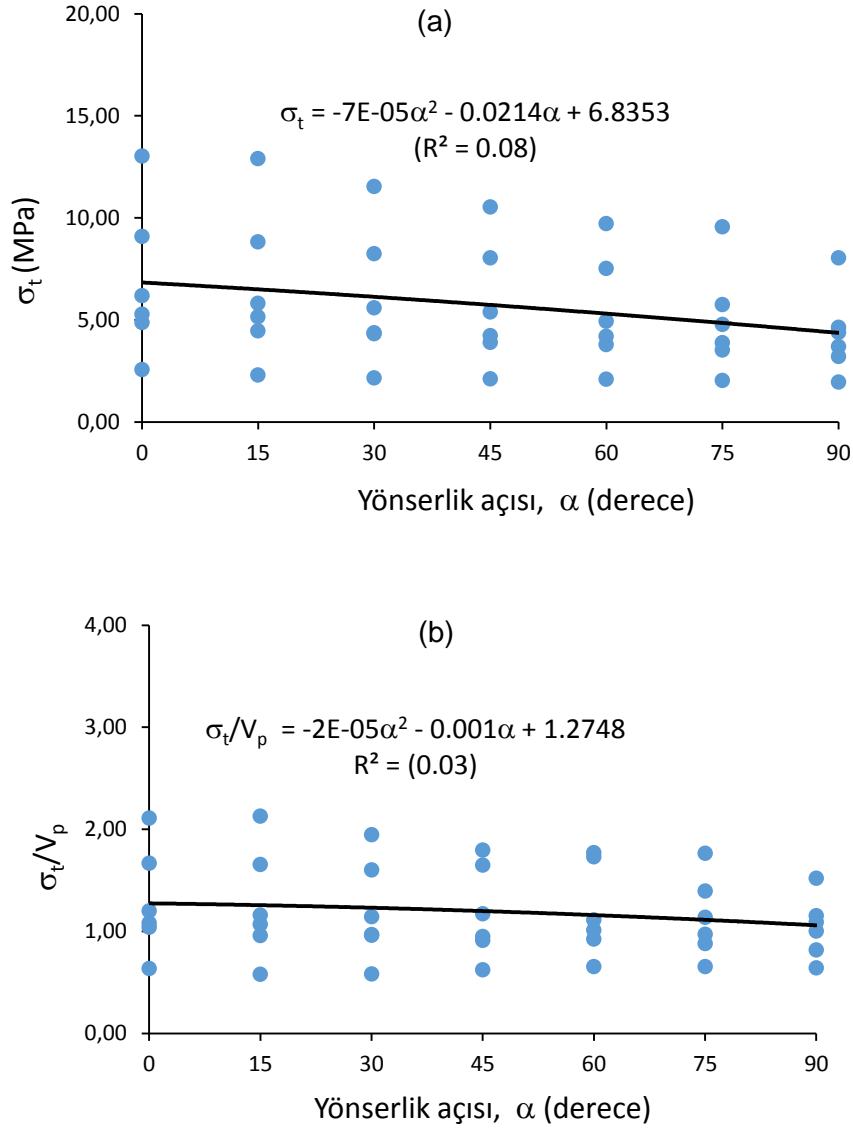
analizlerinde yüksek belirleme katsayısı elde edilemediği gibi, çok değişkenli analiz yöntemi kullanıldığında da düşük belirleme katsayıları elde edilmiştir. Bu durumun muhtemel nedenine Bölüm 4.6'da detaylı olarak değinilmiştir.

Öte yandan, dolaylı çekme dayanımı ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler  $\sigma_t-\alpha$  ve  $(\sigma_t/V_p)-\alpha$  oranlarıyla değerlendirildiğinde basit regresyon analizlerinden çok düşük regresyon katsayıları elde edilmiştir (Şekil 5.4a,b). Ancak bir sonraki bölümde de değinileceği üzere, bu parametre için çok değişkenli doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak analiz yapıldığında yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir.

### **5.3. Dayanım ve Deformabilite Özelliklerinin Yönserlik Açısına Bağlı Değişiminin Çok Değişkenli Regresyon Yöntemi Kullanılarak Tahmin Edilmesi**

Önceki bölümlerde basit regresyon yönteminin kullanıldığı analizlerde değinildiği gibi, yönserliğe sahip kayalarda dayanım ve deformabilite özellikleri ile P-dalga hızı ( $V_p$ ) arasındaki ilişki birden çok sayıda özelliğin değişimine karşı duyarlıdır. Bu nedenle bu ilişkilerin oluşturulmasında çok değişkenli analizlerin yapılması kaçınılmaz hale gelmektedir. Aşağıda dayanım ve deformabilite özelliklerinin tahmininde öne çıkan özelliklere değinilmiş ve SPSS (2006) programı kullanılarak yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda önerilen görgül ilişkiler sunulmuştur.

Çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri bir bağımlı değişkenin birden çok sayıda bağımsız değişkene bağlı değişimlerinin araştırılmasında kullanılmaktadır. Dayanım ve deformabilite özelliklerinin P-dalga hızından tahmininin hassas bir şekilde yapılabilmesi için birden çok sayıda değişkenin dayanım ve deformabilite özellikleri üzerindeki etkisinin dikkate alınması oldukça önemlidir. Bu husus dikkate alınarak, çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri yapılmış olup, bu analizler de dayanım ve deformabilite özelliklerinin kestirimi için kullanılan bağımsız değişkenler (P-dalga hızı ve yönserlik açısı) laboratuvarında kolaylıkla belirlenebilmektedir.



Şekil.5.4. Tez kapsamında tayin edilen tüm dolaylı çekme dayanımı ve  $V_p$  değerlerine bağlı olarak (a)  $\sigma_t$  ve (b)  $\sigma_t/V_p$  oranı ile yönserlik açısı arasındaki ilişkiler

Analizler 6 farklı kaya türü için herhangi bir gruptandırma yapılmaksızın gerçekleştirilmiş olup, bağımlı değişkenle bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri doğrusal hale getirmek için bazı logaritmik dönüşümler yapılmıştır. Bu dönüşümler çerçevesinde dayanım özellikleri ( $\sigma_c$  ve  $\sigma_t$ ) ve elastisite modülünün 10 tabanına göre logaritması alınmıştır. Yapılan logaritmik dönüşümler sonucunda dayanım ve deformabilite özellikleri ile  $V_p$  ve yönserlik açısı arasında elde edilen doğrusal ilişkiler Eşitlik 5.1-5.3'te verilmiş olup, bu ilişkilerin  $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$  ve elastisite modülünü tahmin etmedeki performansları değerlendirilmiştir.

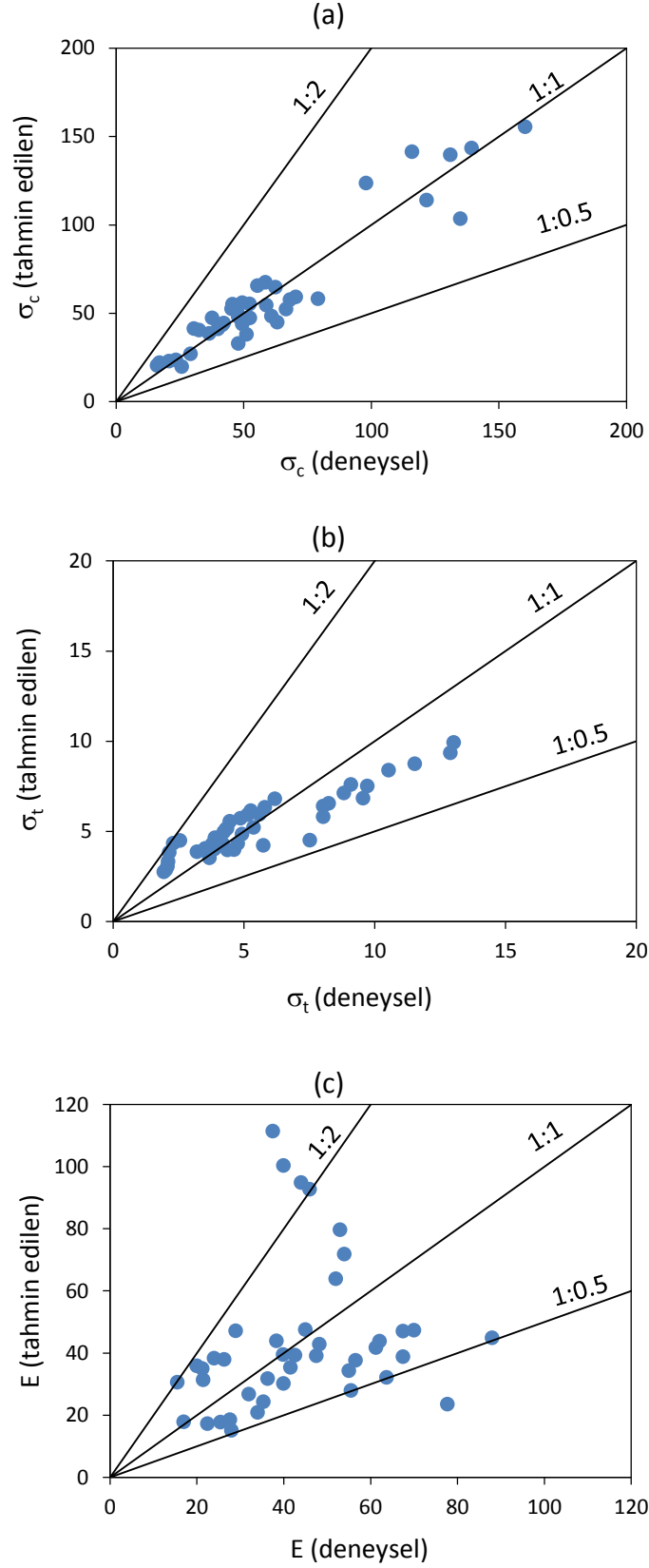
$$\log \sigma_c = -0.0629 + 0.0053\alpha + 0.3367V_p \quad (R^2=0.89) \quad (5.1)$$

$$\log \sigma_t = -0.00055\alpha + 0.16158V_p \quad (R^2=0.97) \quad (5.2)$$

$$\log E = 0.0055\alpha + 0.2926V_p \quad (R^2=0.98) \quad (5.3)$$

Burada;  $\sigma_c$  tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa),  $\sigma_t$  dolaylı çekme dayanımı (MPa),  $V_p$  P-dalga hızı (km/s),  $E$  elastisite modülü (GPa),  $\alpha$  yönserlik açısı (derece) ve  $R^2$  belirleme katsayısıdır.

Eşitlik 5.1, 5.2 ve 5.3 yardımıyla, bu çalışmada incelenen kaya türlerinin farklı yönserlik açıları için ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$ ), ortalama  $V_p$  değerleri kullanılarak tahmin edilen UCS,  $\sigma_t$  ve  $E$  değerleri ile deneysel olarak belirlenen UCS,  $\sigma_t$  ve  $E$  değerlerinin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 5.5'te verilmiştir. Tahminlerin hata düzeylerinin daha net anlaşılması için 1:2 ve 1:0.5 doğruları da bu grafiklerin üzerinde gösterilmiştir. Veri noktaları UCS ve  $\sigma_t$  için 1:1 doğrusunun çok yakınında yoğunlaşırken, elastisite modülü değerlerinde ise 1:1 doğrusundan sapmalar gözükmemektedir. Bu sonuçlara göre; UCS ve dolaylı çekme dayanımlarının çok değişkenli doğrusal regresyon analizleriyle belirlenmiş görgül ilişkilerden yararlanılarak çok düşük bir hata payı ile tahmin edilebilecekleri ancak elde edilen görgül ilişkinin elastisite modülünün tahmininde yüksek tahmin performansı sağlayamadığını göstermektedir. Basit regresyon analizlerinden farklı olarak, dayanım ve deformabilite özelliklerinin farklı bağımsız değişkenden tahmin edilmeye çalışılması, bu analizlerin ürettiği sonuçların tahmin performansının UCS ve  $\sigma_t$  için çok daha yüksek olmasını sağlamıştır.



Şekil 5.5. Çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinden tahmin edilen ve deneysel olarak tayin edilen (a) UCS, (b) dolaylı çekme dayanımı ( $\sigma_t$ ) ve (c) elastisite modülü (E) değerlerinin karşılaştırılması

#### 5.4. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizleri İçin Model Yeterliliğinin Kontrolü

Çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinden elde edilen ilişkilerin belirleme katsayılarının önemlilik dereceleri t- ve F-testleriyle araştırılmıştır. UCS ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri için t değerleri sırasıyla; kesim noktası için -0.638,  $\alpha$  değişkeni için 10.753 ve  $V_p$  değişkeni için 18.014 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.1). Dolaylı çekme dayanımı ile ilgili olarak yapılan analizlerde ise, t değerleri sırasıyla; kesim noktası için 0,  $\alpha$  değişkeni için -1.008 ve  $V_p$  değişkeni için 25.123 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.2). Bu t değerlerine karşılık gelen anlamlılık düzeylerinin (dolaylı çekme dayanımı sabiti hariç,  $p=0.319$ ) tümü 0.000 olarak belirlenmiştir. Bu anlamlılık düzeylerinin 0.05 yanılma düzeyinden küçük olduğu belirlenmiştir.

Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenle doğrusal bir ilişkiye sahip olup olmadığının belirlenmesinde F-testi kullanılmaktadır. UCS ve dolaylı çekme dayanımları için yapılan çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri için sırasıyla  $F=164.786$  (Çizelge 5.3) ve  $F=168.588$  (Çizelge 5.4) değerleri hesaplanmıştır. Bu F değerlerine karşılık gelen anlamlılık düzeyleri ( $p$  değerleri) 0.000 olarak belirlenmiş olup, 0.05 yanılma düzeyinden küçük ve en az bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde etki sahibi olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.1. UCS için yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen regresyon katsayıları ve t-testi sonuçları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p (Anlamlılık)
	B	Standart Hata	Beta		
Sabit	-0.063	0.098		-0.638	0.053
$\alpha$	0.0053	0.001	0.618	10.753	0.000
$V_p$	0.0367	0.019	1.059	18.014	0.000



Çizelge 5.2. Dolaylı çekme dayanımı için yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen regresyon katsayıları ve t-testi sonuçları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p (Anlamlılık)
	B	Standart Hata	Beta		
Sabit	0	-	-	-	-
$\alpha$	-0.0006	0.001	0.234	-1.008	0.319
$V_p$	0.1616	0.006	1.036	25.123	0.000

Çizelge 5.3. UCS ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen F-testi (varyans analizi) sonuçları

Model	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F	p (Anlamlılık)
Regresyon	2.268	2	1.134	164.786	0.000
Artık toplam	0.268	39	0.006		
	2.536	41			

Çizelge 5.4. Dolaylı çekme dayanımı ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen F-testi (varyans analizi) sonuçları

Model	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F	p (Anlamlılık)
Regresyon	21.928	2	10.964	739.017	0.000
Artık toplam	0.593	40	0.014		
	22.522	42			

Elastisite modülü ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri için t değerleri sırasıyla; kesim noktası için 0,  $\alpha$  değişkeni için 5.507 ve  $V_p$  değişkeni için 24.792 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.5). Elastisite modülü için yapılan çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri için  $F=1067.109$  (Çizelge 5.6) değeri hesaplanmıştır. Bu F değerlerine karşılık gelen anlamlılık düzeyi (p

değerleri) 0.000 (<0.05) olarak belirlenmiş olup, 0.05 yanılma düzeyinden küçük ve en az bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde etki sahibi olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.5. Elastisite modülü için yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen regresyon katsayıları ve t-testi sonuçları

Model	Standartlaştırılmamış katsayılar		Standartlaştırılmış katsayılar	t	p (Anlamlılık)
	B	Standart Hata	Beta		
Sabit	0	-	-	-	-
$\alpha$	0.0055	0.001	0.345	5.507	0.000
$V_p$	0.2926	0.012	0.426	24.792	0.000

Çizelge 5.6. Elastisite modülü ile ilgili olarak yapılan çok değişkenli regresyon analizleri sonucunda belirlenen F-testi (varyans analizi) sonuçları

Model	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F	p (Anlamlılık)
Regresyon	106.629	2	53.314	1067.109	0.000
Artık	1.9984	40	0.0499		
toplam	108.627	42			

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye'nin farklı kesimlerinden derlenen 6 farklı kaya türünün kullanıldığı bu çalışmada; 7 farklı yönserlik açısında ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) dayanım ve deformabilite özelliklerinin P-dalga hızından tahmin edilebilmeleri için görgül tahmin eşitliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) Bu çalışmada kullanılan 6 farklı kaya türü için UCS, dolaylı çekme dayanımı, elastisite modülü ve P-dalga hızının yönserlik açısına bağlı değişimleri araştırılmış olup, dolaylı çekme dayanımı ve P-dalga hızı yönserlik açısının  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye doğru artmasıyla bir azalma eğilimi göstermektedir. UCS ve elastisite modülü için ise, yönserliğe bağlı olarak yaklaşık 'U-tip' bir değişim saptanmıştır. Bu iki özelliğin  $0^\circ$  ve  $90^\circ$ 'de en yüksek, genel olarak  $30^\circ$ - $45^\circ$  aralığında ise en düşük değerlerini aldıkları belirlenmiştir.

2) Dayanım ve deformabilite özellikleri ile P-dalga hızı arasında görgül ilişkiler geliştirilmiştir. Buna göre; UCS ve dolaylı çekme dayanımı ile  $V_p$  arasında yüksek regresyon katsayısına sahip polinomsal bir ilişki elde edilirken, elastisite modülü ile  $V_p$  arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunamamış olup, çok düşük regresyon katsayısı elde edilmiştir. Bu durumun muhtemel nedeni aşağıdaki gibi açıklanabilir. Kayalarda yönserliğe neden olan düzlemlerin P-dalga hızı üzerindeki etkisi bu yüzeylerin kalınlıklarının ölçüm yapılan toplam yüzey (ana kaya+zayıflık düzlemleri) kalınlığına oranı düzeyinde etkili olup, bu etki oldukça sınırlıdır. Ancak elastisite modülü üzerinde bu etki dolgunun sağlam ve zayıf olması durumunda çok yüksektir. Çünkü tek eksenli yüklemde gelişen deformasyonlar daha çok zayıf zonlarda gerçekleşecektir. Örneğin; çok sağlam bir kayada zayıf kil bantlarının bulunması halinde, bu bantlara dik yöndeki bir yüklem sonucu birim deformasyonlar söz konusu kil bantları boyunca yoğunlaşarak kayanın çok düşük elastisite modüllü göstermesine neden olur ve yönserlik etkisi daha büyüktür.

3) Basit regresyon analizlerinin yapılıp, dayanım ve deformabilite özelliklerinin farklı yönserlik koşullarında P-dalga hızı kullanılarak tahmin edilmesinin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır. Bununla birlikte, sadece yönserlik açısına bağlı olarak dayanım ve deformabilite özelliklerinin değişiminin araştırıldığı bu analizlerde belirli düzeylerde tahmin hatalarının varlığı da söz konusudur. Bu nedenle P-dalga hızının karesi ( $V_p^2$ ) de analizlere dahil edilerek tahmin performansı biraz daha yükseltilmiş olmakla birlikte, yeterli olmamıştır.

4) Basit regresyon analizlerinin yanı sıra, daha yüksek tahmin performansına sahip olabilecek görgül eşitliklerin üretilebilmesi için çok sayıda değişkenin dayanım özellikleri üzerindeki etkilerinin tanımlandığı çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler üzerinde gerçekleştirilen logaritmik dönüşümler aracılığıyla doğrusal ilişkiler kurulmuştur. Bağımsız değişkenler olarak,  $V_p$  ve yönserlik açısının kullanıldığı analizlerde UCS ve dolaylı çekme dayanımları için tahmin performansları çok yüksek olan çok değişkenli eşitlikler geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemle de elastisite modülünün benzer şekilde tahmini için yüksek korelasyon katsayısına sahip bir eşitlik elde edilmesine rağmen veriler 1:1 doğrusu üzerinde yoğunlaşmamıştır. Geliştirilen eşitlikler için yapılan model yeterlilik kontrolleri, UCS ve dolaylı çekme dayanımı için önerilen çok değişkenli modellerin yeterli olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneyler genel olarak düşük-orta dayanım yönserliğine sahip kaya türleri üzerinde gerçekleştirilebilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada önerilen görgül ilişkiler düşük-orta dayanım yönserliğine sahip kaya türleriyle sınırlı olmuştur. Gelecekte bu konuyla ilgili olarak yapılacak çalışmalarda; bu tez çalışmasında kullanılan kaya türleri için yönserlik koşulları dikkate alınarak yapılan deneylerin sonuçları ve önerilen görgül tahmin ilişkilerinin, yönserliğe sahip farklı kaya türleri ve daha çok sayıda örnek kullanılarak değerlendirilmesi önerilir.

## KAYNAKLAR

- Ajalloeian R. and Lashkaripour G.R., Strength anisotropies in mudrocks. Bull. Eng. Geol. Env., 59, 195-199, **2000**.
- Akai K., The failure surface of isotropic and anisotropic rocks under multiaxial stresses. Journal of Society Material Sciences, 20, 122-128, **1971**.
- Al-Harhi A.A., Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyah sandstone, Saudi Arabia, Engineering Geology, 50, 49–57, **1998**.
- Apuani T., King M.S., Butenuth C. and De Freitas M.H., Measurements of the relationship between sonic wave velocities and tensile strength in anisotropic rock. In: Developments in Petrophysics, Geological Society Special Publication No. 122, 107-119, **1997**.
- ASTM (Annual Book of ASTM Standards), Soil and Rock (I), Section 4, Construction. ASTM Publications, Conshohockem, USA, **2000**.
- Bayrak Y.R., Niğde Masifi temel kayalarının anizotropik dayanım ve deformasyon özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 100 s, **2005**.
- Chen C.S. and Hsu S.C., Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test, Rock Mechanics and Rock Engineering, 34 (4), 293-321, **2001**.
- Cho J., Kim H., Jeon S. and Min K., Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 50, 158-169, **2012**.
- Choi S., Lee S. and Jeon S., Experimental study on cracking behavior of a transversely isotropic material, Proceeding of the ISRM International Symposium – EUROCK2016, Cappadocia, Turkey, Ulusay, R., Aydan, Ö., Gerçek, H., Hindistan, M.A., Tuncay, E. (eds.), Vol.1, 283-288, CRC Press, **2016**.
- ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, eds: Ulusay R. and Hudson J.A., Kozan Ofset, Ankara, **2007**.

Karakul H. and Ulusay R., Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 981-999, **2013**.

Karakul H., Ulusay R. and Işık N.S., Empirical models and numerical analysis for assessing strength anisotropy based on block punch index and uniaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (4), 657-665, **2010**.

Khanlari G.R., Rafiei B. and Abdi-lor Y., Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones, *Arabian Journal of Geosciences*, **2014**.

Khanlari G.R., Heidari M., Sepahi A.A. and Fereidooni D., Quantification of strength anisotropy of metamorphic rocks of the Hamedan province, Iran, as determined from cylindrical punch, point load and Brazilian tests, *Engineering Geology*, 169, 80-90, **2013**.

Kim H., Cho J., Song I. and Min K., Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea, *Engineering Geology*, 147–148, 68-77, **2012**.

MTA, 1:500 000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> (Erişim tarihi: **15 Eylül 2017**).

Nasseria M.H.B, Raob K.S. and Ramamurthy T., Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 3-23, **2003**.

Obert L. and Duvall W.I., *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. New York: Wiley, 65 p., **1967**.

Ogunsanwo O., Influence of schistosity on the strength and wave velocity characteristics of a mica schist saprolite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43 (1), 75-79, **1991**.

Ramamurthy T., Strength and modulus responses of anisotropic rocks. *Comprehensive Rock Engineering 1*, Chapter 13, J.A Hudson (ed), 313-329, **1993**.

Rodriguez-Sastre M.A. and Calleja L., The determination of elastic modulus of slates from ultrasonic velocity measurements. IAEG 2006, Paper number: 775, United Kingdom, **2006**.

Singh J., Ramamurthy T. and Rao G.V., Strength anisotropies in rocks. Indian Geotech J., 19, 147-166, **1989**.

SPSS, Statistical Package for the Social Sciences, SPSS v.15.0 for Windows. SPSS Inc., Chicago, **2006**.

Tavallali A. and Vervoort A., Failure of transversely isotropic rock material: Effect of layer orientation and material properties. Abstract 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, Cape Town, p. 317, **2008**.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 17/06/2019

Tez Başlığı / Konusu: Yönser Koşullarda Kayaların Dayanım ve Deformabilite Özelliklerinin Ultrasonik Dalga Hızından Tahminine Yönelik Görgül İlişkilerin Geliştirilmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 55 sayfalık kısmına ilişkin 17/06/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5 'tir.

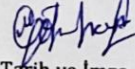
Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimededen daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

17.06.2019

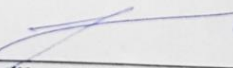
  
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Mesut Gökhan Gümrük  
Öğrenci No: N14225072  
Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği  
Programı: Jeoloji Mühendisliği - Yüksek Lisans  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Reşat Ulusay

  
(Unvan, Ad Soyad, İmza)



# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Mesut Gökhan Gümrük

Doğum tarihi: 30.11.1991

Doğum yeri: Altındağ / ANKARA

Medeni hali: Evli

Askerlik: Yapıldı

E-posta: mggumruk@gmail.com

Adres: Çarşı Mah. Akın Cad. Sevgi Sok. No: 17/2 Yenimahalle/ANKARA

## Eğitim

Lisans (2010-2014): Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yüksek lisans (2014-2019): Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Bitirme Projesi (2013-2014): "Kızılay-Çayyolu Metrosu Çayyolu Tren Deposu Sahasında Açılacak Kazı Şevlerinin Duraylılığının Araştırılması" (Danışman; Prof. Dr. Reşat ULUSAY)

## Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (IELTS Academic, Overall: 6.0)

## İş Deneyimi

Akademi Proje (2017-2018)