

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

SÜREKSİZLİKLERİN MAKASLAMA DAYANIMINI BELİRLEMEDE
KULLANILAN PATTON ÖLÇÜTÜNÜN FARKLI BİR YAKLAŞIMLA
DEĞERLENDİRİLMESİ

Muhammet BEYHAN

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

SÜREKSİZLİKLERİN MAKASLAMA DAYANIMINI BELİRLEMEDE KULLANILAN PATTON ÖLÇÜTÜNÜN FARKLI BİR YAKLAŞIMLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Muhammet BEYHAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kamil KAYABALI

Kaya kütlelerine gelen yüklerde daha çok süreksizliklerin tepkisi öne çıkar. Süreksizliklerin kesme dayanımı (SKD) konusunda yapılan önemli çalışmaların ilki Patton (1966) tarafından gerçekleştirilmiş; ilerleyen zamanlarda pek çok araştırmacı tarafından deneysel ve masabaşı modelleriyle irdelenmiştir. Laboratuvar deneyleriyle SKD'nın sağlıklı bir şekilde belirlenmesi için en az 5-6 adet özdeş numuneye ihtiyaç vardır. Amaca uygun özdeş yüzeylerin bulunması, numune alınması ve bunların deneye hazırlanması sırasında karşılaşılan güçlükler araştırmacıları SKD'nı kısa yoldan belirlemeye yönelik çalışmalara zorlamıştır. Önceki çalışmaların birinde (Habibzadeh 2020) SKD için Patton çift eğrili modelinin iyi çalıştığı ve zarfların çoğunlukla 2 MPa'lık normal gerilme değerinde kesiştiği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın hipotezi, Patton modelinin iki zarfını tiltmetre ve profilometre deneyleriyle üretmek; elde edilen zarfları 2 MPa'da kesiştirerek dolgusuz yapay süreksizlikler için bir yenilme modeli geliştirmek ve modelin uygulanabilirliğini geleneksel doğrudan kesme deney (GDKD) sonuçlarıyla karşılaştırarak test etmektir. Araştırma hipotezinin başarılı olamaması halinde alternatif yöntem olarak, çok sayıda numuneye ait geniş bir veri tabanı ile çok aşamalı doğrudan kesme deneyinin (ÇADKD) güvenilirliğinin irdelenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada 30 farklı kaya türünün mineralojik-petrografik özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımları, temel sürtünme açıları ve pürüzlülük açıları belirlenmiş olup, farklı normal gerilmeler altında GDKD ve ÇADKD gerçekleştirilmiştir. Araştırmada 30 kayanın 26'sında Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının 2 MPa'lık normal gerilme değeri civarında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Tiltmetre ve profilometre deneyleriyle Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının oluşturulmasında kısmen başarılı sonuçlar elde edilmiştir. SKD'nın belirlenmesi amacıyla regresyon katsayısı 0,92 olan ampirik bir ilişki geliştirilmiştir. ÇADKD'de pürüzlülüklerin tıraşlanması sonucunda GDKD'den elde edilen sonuçlara kıyasla genel olarak daha düşük kesme dayanımı elde edilmiştir.

Kasım 2024, 196 sayfa

Anahtar Kelimeler: Süreksizlik, kesme dayanımı, pürüzlülük açısı, temel sürtünme açısı, toplam sürtünme açısı, geleneksel doğrudan kesme, çok aşamalı doğrudan kesme

ABSTRACT

PhD Thesis

EVALUATION OF THE PATTON CRITERION FOR SHEAR STRENGTH OF DISCONTINUITIES USING A DIFFERENT APPROACH

Muhammet BEYHAN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kamil KAYABALI

When rock masses are loaded, the response of discontinuities becomes more pronounced. Patton's (1966) study was a pioneering work on shear strength of discontinuities (SSD), followed by extensive experimental and desktop modeling approaches. Accurate determination of SSD through laboratory experiments requires at least 5-6 identical samples. Difficulties in finding suitable surfaces, sampling and preparing them for testing have driven researchers to seek more practical methods. Previous research by Habibzadeh (2020) concluded that the Patton bilinear-curve model performs well for SSD, with envelopes generally intersecting at 2 MPa normal stress.

This study hypothesizes generating two envelopes of the Patton model using tiltmeter and profilometer experiments, developing a failure model for artificial discontinuities by intersecting the envelopes at 2 MPa; and testing the model's applicability by comparing it with results from conventional direct shear tests (DST). Should the hypothesis fail, the alternative approach aims to evaluate the reliability of multi-stage direct shear tests (MSDST) using an extensive database of numerous samples. This research determined the mineralogical-petrographic properties, uniaxial compressive strengths, friction angles, and roughness angles of 30 rock types, performed DST and MSDST under different normal stresses. It was observed that Patton's (1966) bilinear failure envelopes clustered around a normal stress of 2 MPa in 26 out of 30 rocks. Tiltmeter and profilometer tests yielded partially reliable results for constructing these envelopes. An empirical relationship with a regression coefficient of 0.92 was developed to determine the SSD. Compared to results from DST, the shear strength was generally lower following roughness trimming in MSDST.

November 2024, 196 pages

Keywords: Discontinuity, shear strength, roughness angle, basic friction angle, total friction angle, conventional direct shear, multi-stage direct shear

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak süreci daha verimli hale getiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Kamil KAYABALI'ya gönülden teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, çalışma boyunca sabrı, desteği ve teşvik edici yaklaşımı ile bana ilham kaynağı olmuş ve bu süreci başarıyla tamamlamamda büyük bir katkı sağlamıştır.

Bu araştırmanın değerlendirilmesi ve geliştirilmesi sürecinde katkılarını esirgemeyen, yapıcı eleştirileri ve önerileriyle çalışmanın daha ileri bir seviyeye taşınmasında katkıda bulunan değerli tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü), Prof. Dr. Halim MUTLU (Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü) ve katkılarından dolayı Dr. Koray ULAMIŞ (Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü) hocalarıma teşekkür ediyorum.

Kayaların mineralojik-petrografik özelliklerinin belirlenmesinde katkıda bulunan Doç. Dr. Kıymet DENİZ YAĞCIOĞLU (Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü) hocama teşekkür ediyorum.

Doktora süreci boyunca desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Muhittin GÖRMÜŞ (Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü), Prof. Dr. Mustafa FENER (Ankara Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü), yol gösterici önerileriyle katkılarda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Turgay BEYAZ (Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü) hocalarıma ve çalışmalarımız esnasında fikir alışverişi yaptığımız dostum Mehmet YAKUT'a (DSİ Genel Müdürlüğü, TAKK Daire Başkanlığı) teşekkür ediyorum.

Tez çalışması için gerekli olan küptaşların bir kısmını bedelsiz olarak temin eden sayın Seyfettin ALTINTAŞ'a (Ahlat Taşı), sayın Huzeyfe AKTÜRK'e (Aksaray Taş), sayın Hayri KORAL'a (Bayburt Taşı), sayın Bahadır UYSAL'a (Efesus Stone, İscehisar), sayın Mehmet EYRET'e (Emek Mermer, İscehisar), sayın Hüseyin GÜLHAN'a (Hastaş Andezit, Ankara) ve sayın Serkan ÇELİKTEN'e (Çelikten Mermer, İscehisar) şükranlarımı sunarım.

Kayada statik ve dinamik kesme cihazını Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne bağışlayarak bu araştırmayı mümkün kılan Eren Holding Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Ahmet EREN'e hassaten teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme en derin saygı ve sevgilerimi sunarım.

Muhammet BEYHAN
Ankara, Kasım 2024



İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ	11
2.1 Süreksizliklerin Kesme Dayanımının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar	11
2.2 Temel Sürtünme Açısının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar	18
2.3 Pürüzlülük Açısı ve Süreksizlik Yüzey Geometrilerinin Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar	20
2.4 Çok Aşamalı Doğrudan Kesme Deneyleri ile Süreksizliklerin Kesme Dayanımının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar.....	24
3. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER.....	27
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler	27
3.1.1 Kaya numuneleri.....	28
3.1.2 Karot alma ve karot kesme makinaları	29
3.1.3 Baltalı pres	30
3.1.4 Profilometre	31
3.1.5 Tiltmetre.....	32
3.1.6 Doğrudan kesme deney seti	33
3.1.7 SPSS yazılımı	35
3.1.8 DATAFIT yazılımı	36
3.2 Çalışmada Kullanılan Yöntemler	37
3.2.1 Mineralojik-Petrografik özelliklerin belirlenmesi	37
3.2.2 Tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi	37
3.2.3 Yapay süreksizlik yüzeylerinin elde edilmesi	39
3.2.4 Pürüzlülük açılarının belirlenmesi	41
3.2.5 Temel sürtünme açılarının belirlenmesi	46
3.2.6 Doğrudan kesme deneyleri	50
3.3 Süreksizliklerin Kesme Dayanımına Dair Önerilen Modeller	54
3.3.1 Mohr-Coulomb yöntemi	55
3.3.2 Patton yöntemi.....	57
3.3.3 Ladanyi ve Archambault yöntemi	60
3.3.4 Jaeger yöntemi.....	61
3.3.5 Barton yöntemi	62
3.3.6 Maksimoviç yöntemi	64
3.3.7 Bu çalışmada benimsenen yöntem	65
4. BULGULAR	67
4.1 Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri	67

4.2 Tek Eksenli Sıkışma Deneyi	69
4.3 Süreksizliklerin Temel Sürtünme Açıları	73
4.4 Süreksizliklerin Pürüzlülük Açısı	75
4.5 Doğrudan Kesme Deneyleri	77
4.5.1 Geleneksel doğrudan kesme deneyi	77
5. ÇALIŞMA HİPOTEZİNİN İRDELENMESİ	91
6. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER VE SÜREKSİZLİKLERİN KESME DAYANIMININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK AMPİRİK BİR İLİŞKİNİN GELİŞTİRİLMESİ	96
6.1 SPSS Yazılımı ile Yapılan İstatistiksel Analizler	97
6.1.1 Patton (1966) çift eğrili zarf için ayrı ayrı gerçekleştirilen regresyon analizleri	101
6.2 DATAFIT Yazılımı ile Yapılan İstatistiksel Analizler	106
6.2.1 DATAFIT yazılımı ile gerçekleştirilen doğrusal analizler	106
6.2.2 DATAFIT yazılımı ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler	108
6.3 İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	110
7. ÇOK AŞAMALI DOĞRUDAN KESME DENEYİ	114
8. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR	128
EKLER	142
EK 1 TEK EKSENLİ SIKIŞMA DENEYİ SONUÇLARI	143
EK 2 TEMEL SÜRTÜNME AÇILARI	152
EK 3 PROFİLOMETRE DENEY SONUÇLARI	155
EK 4 PATTON (1966) ÇİFT EĞRİLİ YENİLME ZARFLARI	165
EK 5 PATTON (1966) YENİLME ÖLÇÜTÜNÜN FARKLI YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ	173
EK 6 REGRESYON ANALİZ SONUÇLARI	177
EK 7 ÇOK AŞAMALI DENEY SONUÇLARI	187
ÖZGEÇMİŞ	196

SİMGELER DİZİNİ

c	Kohezyon (MPa)
D	Karot çapı (mm)
E	Elastisite modülü (MPa)
F	Kuvvet (kN)
i	Pürüzlülük açısı ($^{\circ}$)
L	Karot boyu (mm)
R^2	Belirleme (regresyon) katsayısı
ε	Birim deformasyon
ν	Poisson oranı
ϕ	Sürtünme açısı ($^{\circ}$)
ϕ_b	Temel sürtünme açısı ($^{\circ}$)
ϕ_{b+i}	Toplam sürtünme açısı ($^{\circ}$)
ϕ_r	Kalıntı (rezidüel) sürtünme açısı ($^{\circ}$)
σ_c	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
σ_n	Normal gerilme (MPa)
δ	Kesme deformasyonu (mm)
τ	Kesme dayanımı/gerilmesi (MPa)
τ_p	Doruk kesme dayanımı/gerilmesi (MPa)

Kısaltmalar

ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
CNL	Sabit normal yük
CNS	Sabit normal rijitlik
GPa	Gigapaskal
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu
JCS	Süreksizlik yüzeyi sıkışma dayanımı
JRC	Süreksizlik pürüzlülük katsayısı
kPa	Kilopaskal
LDMDs	Sınırlı yer değiştirmeli çok aşamalı doğrudan kesme deneyi
MPa	Megapaskal
PFC2D	İki boyutlu parçacık akış kodu
RMR	Kaya kütle puanlaması
UCS	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Süreksizliklerin örtüşmesinin gösterimi a: Tam örtüşen süreksizlik b: Örtüşmeyen süreksizlik	21
Şekil 3.1 Tez çalışmasında takip edilen eylem akış şeması	28
Şekil 3.2 Çalışmada kullanılan karotiyerden (a) ve karot kesme makinasından (b) görünüm	30
Şekil 3.3 Baltalı pres cihazı ve aparatları	31
Şekil 3.4 Profilometre deney cihazının detayları; 1) Kaide, 2) Aşağı yukarı ayarlama kolu, 3) İnce ayar düğmesi, 4) Ölçüm ünitesinin -45'ten +45 derecelik eğimini sağlayan düğmesi, 5) Açık paneli, 6) Açma kapama düğmesi, 7) Ölçüm iğnesi, 8) Ölçüm iğnesinin monte edildiği ikinci kol, 9) İkinci kolu ileri geri hareket ettiren ana kol ünitesi (Habibzadeh, 2020)	32
Şekil 3.5 Taşınabilir tiltmetre deney düzeneği, 1) Numune yerleştirme tablası, 2) Döndürme kolu, 3) Eğim ölçme skalası, 4) Dijital eğim ölçer	33
Şekil 3.6 Kesme kutusu düzeneği, a) Numunenin plakalar ile sabitlenmesi, b) Yükseltme aparatının yerleştirilmesi, c) Üst plakaların yerleştirilmesi, d) Üst kutunun ve tutacakların yerleştirilmesi	34
Şekil 3.7 Araştırmada kullanılan kesme kutusu cihazının değişik açılardan görünümü. 35	
Şekil 3.8 Tek eksenli sıkışma deneyine hazır hale getirilen numuneler	38
Şekil 3.9 Tek eksenli sıkışma deney düzeneğinin görünümü	39
Şekil 3.10 Baltalı pres düzeneğinde kübik numunelerde yapay süreksizlik oluşturulması	40
Şekil 3.11 Yapay süreksizliklerin oluşturulması a) Eğrisel yüzeyli yapısından dolayı deneye uygun olmayan numune, b) ve c) Deneye uygun numuneler	41
Şekil 3.12 Birinci ve ikinci derece süreksizlikler (Patton, 1966'dan değiştirilerek düzenlenmiştir).....	42
Şekil 3.13 Süreksizliklerin pürüzlülük ölçümü a) Pürüzlülük ölçümü için basit profilograf (Shigui vd., 2009) b) Süreksizliklerde pürüzlülük ölçmek için marangoz tıraşının kullanılması c) Süreksizliklerin dalgalılığını ölçmek için teğet düzlem yönteminin kullanılması (Milne vd. 1991).....	43
Şekil 3.14 Fotogrametri prensibi ile pürüzlülük haritalaması (Birch 2006, Gaich vd. 2006)	44
Şekil 3.15 Profilometre cihazı ile süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının ölçülmesi; a) Elektromekanik profilometre genel görünümü, b) Ölçüm tablasına yerleştirilmiş numune, c) Süreksizliklerde ölçüm alınan hatlar, d) Yüzey taramaları sonucunda elde edilen profil.....	45

Şekil 3.16 Deney çalışmalarında tiltmetre testi için kullanılan farklı kurulumlar a) Uzunlamasına kesilmiş karot kurulum, b) Dikdörtgen blok kurulum c) Üç karot kurulumu ve d) yatay olarak kesilmiş karot kurulum (Alejano vd. 2012).....	47
Şekil 3.17 Karot numunelerinde tiltmetre ölçümü.....	48
Şekil 3.18 Düz yüzeyli numunelerde tiltmetre ölçümü.....	49
Şekil 3.19 Temel sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla kesilmiş ve zımparalanmış numuneler.....	50
Şekil 3.20 CNL yöntemi (solda) ve CNS yöntemi (sağda) ile kaya kesme dayanımının belirlenmesi (Brady ve Brown 2005).....	51
Şekil 3.21 Kesme kutusu deneyi için hazırlanan numuneler	52
Şekil 3.22 Kesme deneyine hazırlık aşamaları	53
Şekil 3.23 Mohr-Coloumb yöntemi a) Normal gerilme ve kesme gerilmesi uygulanmasının gösterimi, b) Mohr-Coulomb yenilme grafiği, c) Kalıntı (rezidüel) dayanım ve pik (doruk) dayanıma ait normal gerilme ve kesme gerilme grafiği.....	56
Şekil 3.24 Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının sınıflandırılması (Wyllie ve Mah, 2004).....	57
Şekil 3.25 Testere dişli numunelere uygulanan kesme gerilme sonucu oluşan hacimsel artış (genleşme veya dilasyon) (Hoek ve Bray, 1981).....	58
Şekil 3.26 Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı kesme gerilmesi	59
Şekil 3.27 Ladanyi ve Archambault (1969) tarafından önerilen yenilme ölçütünün kavramsal görünümü (S: Pürüzlülüğün kesilmesi için gereken kesme kuvveti, A: Numune yüzey alanı, N: Uygulanan yük, i : Pürüzlülük açısı).....	60
Şekil 3.28 Jaeger (1971) ampirik kesme dayanım modeli; a) kesme dayanımı - normal gerilme grafiği, b) $\log(p)$ - normal gerilme grafiği	62
Şekil 3.29 Kaya süreksizliklerinin kesme dayanımının açısall bileşenleri (Barton 1971a)	63
Şekil 3.30 Maksimoviç (1996) tarafından önerilen doğrusal olmayan yenilme zarfı.....	65
Şekil 4.1 Kaya malzemesinde elastisite modülünün belirlenmesi, a) Kaya malzemesinde σ - ϵ ilişkisinin belirlenmesi b) Tanjant elastisite modülü c) Ortalama elastisite modülü, d) Sekant (kiriş) elastisite modülü (Canpolat, 2022)	69
Şekil 4.2 Bazı araştırmacılar tarafından önerilen kaya dayanım sınıfları (Bieniawski 1989)	70
Şekil 4.3 Numunelerin UCS dayanımına ait histogram	72
Şekil 4.4 Numunelerin elastisite modülüne ait histogram	73
Şekil 4.5 Süreksizlik yüzeylerine ait temel sürtünme açısı değerleri.....	75
Şekil 4.6 Süreksizliklerin ortalama pürüzlülük açılarının histogram.....	77

Şekil 4.7 Geleneksel doğrudan kesme deneyleri için hazırlanan 22 No.'lu kaya seti, a) Deney öncesi, b) Deney sonrası	78
Şekil 4.8 02 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	80
Şekil 4.9 02 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	80
Şekil 4.10 05 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	81
Şekil 4.11 05 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	81
Şekil 4.12 11 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	82
Şekil 4.13 11 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	82
Şekil 4.14 24 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	83
Şekil 4.15 24 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	83
Şekil 4.16 01 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	85
Şekil 4.17 01 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	86
Şekil 4.18 08 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	86
Şekil 4.19 08 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	87
Şekil 4.20 10 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	87
Şekil 4.21 10 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	88
Şekil 4.22 18 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği	88
Şekil 4.23 18 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği.....	89
Şekil 4.24 Birinci derece süreksizliklere sahip 01 No.'lu kayanın deney sonrası görünümü	90
Şekil 5.1 05 No.'lu kaya için üç yöntem ile belirlenen Patton çift eğrili yenilme zarflarının geleneksel yöntem ile belirlenen zarflar ile karşılaştırılması.....	94
Şekil 5.2 07 No.'lu kaya için üç yöntem ile belirlenen Patton çift eğrili yenilme zarflarının geleneksel yöntem ile belirlenen zarflar ile karşılaştırılması.....	94
Şekil 5.3 28 No.'lu kaya için üç yöntem ile belirlenen Patton çift eğrili yenilme zarflarının geleneksel yöntem ile belirlenen zarflar ile karşılaştırılması.....	95
Şekil 6.1 Deneysel yöntem ve tüm verilerin doğrusal analizinde belirlenen ampirik yöntemle elde edilen kesme dayanımlarının karşılaştırılması	100
Şekil 6.2 Patton çift eğrili yenilme zarfları için, deneysel olarak belirlenen kesme dayanımları ile regresyon analizleri sonucunda birinci ve ikinci zarflardan ampirik olarak bulunan kesme dayanımlarının karşılaştırılması	106
Şekil 6.3 Deneysel olarak belirlenen kesme dayanımları ile DATAFIT programıyla doğrusal analizlerden ampirik olarak bulunan kesme dayanımlarının karşılaştırılması	108

Şekil 6.4	Deneyisel olarak belirlenen kesme dayanımları ile DATAFIT programıyla doğrusal olmayan ampirik yöntem ile elde edilen kesme dayanımlarının karşılaştırılması	109
Şekil 6.5	03 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması	111
Şekil 6.6	11 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması	112
Şekil 6.7	18 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması	112
Şekil 6.8	24 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması	113
Şekil 7.1	Farklı normal gerilmeler altında çok aşamalı doğrudan kesme deneyi a) Yeniden konumlandırılmalı, b) Yeniden konumlandırmasız (Muralha vd. 2014'ten değiştirilerek düzenlenmiştir).....	117
Şekil 7.2	02 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği .	118
Şekil 7.3	02 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği.....	118
Şekil 7.4	14 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği .	119
Şekil 7.5	14 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği.....	119
Şekil 7.6	21 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği .	120
Şekil 7.7	21 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği.....	120
Şekil 7.8	29 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği .	121
Şekil 7.9	29 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği.....	121

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Bazı araştırmacılar tarafından önerilen ölçütler.....	5
Çizelge 3.1 Numunelerin numaraları ve temin edildiği yerler.....	29
Çizelge 3.2 Araştırmacılar tarafından önerilen kesme dayanım ölçütlerinin karşılık geldiği modeller.....	55
Çizelge 4.1 Kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri.....	67
Çizelge 4.2 Kaya numunelerin UCS sonuçları, ISRM (1981)'e göre dayanım indeksi sınıflaması ve elastisite modülü sonuçları.....	71
Çizelge 4.3 Tiltmetre deney düzeneğinden üç farklı yöntemle elde edilen temel sürtünme açıları.....	74
Çizelge 4.4 Profilometre cihazı ile elde edilen süreksizliklere ait pürüzlülük açıları.....	76
Çizelge 4.5 Tüm kayalar üzerinde gerçekleştirilen geleneksel kesme deneyinden elde edilen toplam sürtünme açıları (ϕ_b+i), temel sürtünme açıları (ϕ_b) ve bunlardan hesaplanarak bulunmuş pürüzlülük açıları (i).....	84
Çizelge 5.1 Tiltmetre deneyi ve profilometre deneyi ile belirlenen temel sürtünme açıları (ϕ_b), pürüzlülük açıları (i) ve toplam sürtünme açıları (ϕ_b+i).....	92
Çizelge 6.1 Regresyon analizi için kullanılan parametreler.....	97
Çizelge 6.2 Doğrusal analizlerde sağlanması gereken koşullar (IBM SPSS Statistics, 2021)	98
Çizelge 6.3 ANOVA tablosu	99
Çizelge 6.4 Model özeti tablosu.....	99
Çizelge 6.5 Katsayı tablosu.....	99
Çizelge 6.6 ANOVA tablosu	102
Çizelge 6.7 Model özeti tablosu.....	102
Çizelge 6.8 Katsayı tablosu.....	102
Çizelge 6.9 ANOVA tablosu	104
Çizelge 6.10 Model özeti tablosu.....	104
Çizelge 6.11 Katsayı tablosu.....	104
Çizelge 6.12 Doğrusal olmayan analize ait ANOVA tablosu.....	110

1. GİRİŞ

Dünyada nüfusun artması ile birlikte ulaşım, altyapı, madencilik, enerji ve tarım gibi sektörler ihtiyaçlara neredeyse cevap vermez duruma gelmiştir. Teknolojik gelişmeler ve mühendislik alanında elde edilen tecrübelerle bağlı olarak yol, tünel, köprü, depolanma alanları, barınma alanları, barajlar, geniş yeraltı galerileri ve iletim hatlarının inşası yaygınlaşmıştır.

Kaya ortamlarının dayanıklı, sürdürülebilir ve çevresel faktörlerden korunma vb. avantajlarından dolayı kaya kütlelerinin üzerinde, kenarında ve içinde pek çok yapı inşa edilmiştir. Kaya ortamlarında inşa edilen yapıların artmasıyla birlikte yapılarda güvenlik sorunları oluşmuş, hasarlar meydana gelmiştir. Ayrıca, kaya ortamlarına yakın alanlarda/yamaç aşağısında inşa edilen yapılar, kaya devrilmeleri gibi tehlikelerle karşı karşıya kalmıştır. Meydana gelen hasarlar sonucunda can ve mal kayıpları yaşanmıştır (Kolapo 2022).

Kaya ortamlarının jeomekanik özelliklerine bağlı olarak yapılarda meydana gelen hasarlar ve tahribatlardan dolayı daha güvenli yapıların inşası amacıyla kaya kütleleri özellikleri araştırılmaktadır. Modern anlamdaki bilimsel ve sistematik araştırmaların 18. yüzyılın ortalarında kaya kütlelerinin dayanıklılığı ve kaya formasyonlarının incelenmesi ile başladığı kabul edilmektedir. 19. yüzyılda madencilik sektörünün gelişmesi ile çalışmalar derinleşmeye başlamıştır. 20. yüzyılda ise, sanayileşmenin de artması ile beraber çalışmalar kapsamlı hale gelmiştir (Gohau 1990).

Kaya kütlelerinin ayrıntılı çalışılması sonucunda, farklı bölgelerde bulunan çeşitli kayaların sınıflandırılması, kayaların oluşum süreçlerinin anlaşılması ve kayaların kimyasal ve mekanik özelliklerine bağlı olarak birbirinden farklı davranış sergilediği belirlenmiştir. Kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerinden dolayı hasarlara yol açan parametrelerin kayanın dayanımı ve kayada yer alan süreksizlik ağının özellikleri (dolgu durumu, devamlılık, açıklık, yarık genişliği, sıklık, su durumu, pürüzlülük vb.) olduğu söylenebilir. Ayrıca, süreksizlik geometrisini oluşturan birinci derece düzensizlikler

(dalgalılık) ve ikinci derece düzensizlikler (pürüzlülük), kaya davranışını etkilemekte olup, bu alanda araştırmalar yapılmıştır. Kaya ortamlarında gerçekleştirilen mühendislik uygulamaları sonucunda aşırı sökülme, oturma, deformasyon, patlatma kaynaklı hasar, yeraltı su seviyesi değişikliği gibi problemlerin detaylı bir şekilde tanımlanmaması sebebi ile kütle hareketleri, su basıncı/drenaj sorunları, çökme, kayma ve duraylılık sorunları gibi problemler ile karşılaşılabilir.

Kaya ortamlarında doğal yamaçların yenilmesi dünyanın çeşitli bölgelerinde gözlenmiştir. Dünya genelinde son yüzyılda elde edilen verilere göre, her 2,7 yılda bir 20 milyon m³'e eşit veya daha büyük hacimlerde kaya yenilmeleri meydana gelmektedir (Evans 2006). Tarihsel veriler Alplerde her yılda bir kere kaya yenilmeleri meydana geldiğini göstermektedir (Evans 2006). Son dönemlerde doğal yamaçlarda gerçekleşen en önemli kaya yenilmesi İsviçre'nin Randa kasabasında 1991 yılında meydana gelmiş olup, toplamda 29 milyon m³ hacminde kaya yenilmesi gerçekleşmiştir (Sartori vd. 2003). Avusturya Alpleri'nde kaya kütlelerinin kayması sonucu devasa malzeme Oetz vadisini doldurmuş, Norveç'in Ramnefjell kentinde son 50 yılda hacimleri 50.000 m³'ü aşan kaymalar meydana gelmiştir (Hermanns vd. 2006). Kaya ortamlarında yapılan mühendislik tasarımları sonucunda da pek çok hasarlar meydana gelmiştir. Örneğin Çin'in Wenchuan kentinde 8 (M_w) büyüklüğünde gerçekleşen deprem sonrasında Duijiangyan-Wenchuan yolunda inşa edilen tünelin portallarında çökme, sökülme ve yer değiştirmeler meydana gelmiştir (Li 2011). ABD'nin Utah eyaletinde Bingham Canyon bakır madeni açık ocağında, Güney Afrika Marikana Platin madeninde, Endonezyanın Papua bölgesinde madenin açık ocağında devasa kaymalar meydana gelmiştir (Pankov 2014). 1950 yılında Trabzon ilinin Akçabat ilçesinde 650 m uzunluğunda, 350 m eninde ve 130 m yüksekliğinde kayan malzeme Sera deresi yatağını doldurmuş ve Sera gölünün oluşmasına sebep olmuştur (Aydın ve Raja 2024). 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş ilinde meydana gelen Mw: 7,7 ve Mw: 7,6 depremleri sonrasında Hatay'ın Altınözü ilçesine bağlı Tepehan köyünde kumtaşı, killi kireçtaşı, kilitaşı ve marnlardan oluşan birim içerisinde gelişen sübidans sonucunda 180.000 m³'ten fazla bir malzeme yer değiştirmiştir (Dölek vd. 2023).

Doğal yamaçlar veya mühendislik tasarımlarının yapıldığı kaya ortamlarında meydana gelebilecek yenilmeleri tahmin etmek ve önlemek için kaya ortamlarının ve bunların jeomekanik parametrelerinin doğru şekilde tanımlanması gerekir. Kaya ortamları süreksizlikler ve kaya malzemesi olarak iki kısımda değerlendirilmektedir. Kaya malzemesi süreksizlikler arasında kalan kısım olarak değerlendirilir. Kaya kütlelerine gelen yükler, kaya malzemesi tarafından süreksizlik yüzeylerine iletilir; süreksizlik yüzeyleri bu yükleri kesme gerilmesi ve normal gerilmeler olarak kaya malzemesine aktarır. Dolgusuz süreksizlik yüzeyleri kaya malzemesine kıyasla daha düşük dayanıma sahip olduğundan, kaya kütlelerinin dayanımında daha fazla belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu sebeple, süreksizlik içeren kayaların dayanım özelliklerinin belirlenmesi için kaya malzemesinin dayanımı, süreksizlikleri ve bu süreksizliklerin kesme dayanımının ortaya konulması gerekir.

Kaya malzemesinin dayanımı (diğer bir ifadeyle kırıksız - intact kayanın dayanımı), kaya mekaniğinde yeraltı ve yerüstü yapılarının tasarımlarında ihtiyaç duyulan önemli bir parametredir. Çevredeki kuvvetlere karşı direnci ifade eden kırıksız kayanın dayanımı, kaya malzemesinden alınan karotlar üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile belirlenir.

Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM 1978) süreksizlikleri, sıfır veya düşük çekme dayanımına sahip olarak tanımlar. Bu yaklaşım, kaya kütlesi sınıflandırmalarında (RQD, Deere 1968 gibi) ve türevlerinde (RMR ve Q gibi) ileri derece zayıf veya açık çatlaklarla ayrılmış kaya bloklarından oluşan kaya kütlelerinin tanımlanmasında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Amerikan Test Malzemeleri Derneği (ASTM 2008) “Yapısal süreksizlikler” tanımlamasına daha yüksek dayanım özelliklerine sahip tabakalanma düzlemini de dahil eder. Mevcut Avrupa standardı ise iki tanımlamayı da göz önünde bulunduracak şekilde ele almaktadır. Hencher ve Richards (2014) kaya kütlesi kalitesini kategorize etmek ve ISRM tanımının getirdiği dar kısıtlamaları aşmak için süreksizliklerin, ana kayanın dayanımına göre açık, zayıf, orta veya yüksek dayanımlı olarak sınıflandırılmasını önermektedir. Kaya malzemesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişikliği işaret eden süreksizlikler mekanik ve bileşik (integral) olarak sınıflandırılabilir (Hack 1998, Slob 2010). Mekanik süreksizlikler

fiziksel bir zayıflık düzlemini ifade etmekte olup, bu durum yüzey boyunca kesme dayanımının duvar kayası dayanımından daha düşük olduğu anlamına gelir (ISRM 1981). Buna karşılık bileşik süreksizlikler herhangi bir açılmaya maruz kalmamıştır ve sağlam duvar kayası kadar serttir. Bunlar farklı mineralojik-kimyasal içeriğe sahip bantlar, mineral yönelimindeki değişiklikler (Slob 2010) ya da bir zayıflık zonu oluşturan bazı kısmi kırılma veya kırılma serileri gibi (Hencer 2013) kırıksız kaya içindeki doğal homojensizliklerdir. Süreksizliğin mineralizasyonu veya çimentolanması gibi durumlarda mekanik süreksizlikler bileşik süreksizliklere dönüşebilmektedir (Tating vd. 2014).

Kaya kütlelerinde bulunan süreksizliklerin jeomekanik davranışının somut, uygulanabilir ve güvenilir matematiksel yöntemler ile belirlenmesi son yarım yüzyılda en çok istenen ve araştırılan bilimsel konular arasında yer almıştır. Yapılan araştırmalarda kaya kütlelerinde zayıflık oluşturan süreksizliklerin kesme dayanımını belirleyen önemli parametreler süreksizliklerin yüzey sertliği, pürüzlülük yapısı ve süreksizliklerde bulunan dolgu malzemesi özellikleri gibi unsurlardır. Süreksizliklerin kesme dayanımına olan etkisi başta Patton (1966) olmak üzere pek çok araştırmacı (Barton 1976, Barton ve Choubey 1977, Maerz vd. 1990, Grasselli ve Egger 2003) tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda süreksizliklerin kesme dayanımının doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla yeni ölçütler ve yöntemler ortaya konulmuştur. Çalışmalarda önerilen bu ölçüt ve yöntemler oldukça çeşitlilik gösterir ve genellikle dört ana model altında sınıflandırılabilir. Bunlar mekanik temelli (Patton 1966, Jaeger 1971, Barton 1973), matematik temelli (Heuze ve Barbour 1982, Indraratna vd. 1998, Grasselli vd. 2003), grafik temelli (Saeb ve Amadi 1990, 1992) ve enerji temelli (Ladanyi ve Archambault 1969, Johnston ve Lam 1989, Seidel ve Haberfield 1995) modellerdir.

Araştırmacılar kayanın yapısına bağlı olarak düz yüzeye sahip kayalar ve pürüzlü yüzeyler için farklı ölçütler öne sürmüştür (Çizelge 1.1). Mohr-Coulomb ölçütü düz yüzeylerde gerçekleştirilen kesme deneylerindeki doruk dayanımı tanımlamak için kullanılır. Denklemden sadece süreksizlik düzlemi üzerindeki normal gerilme ve dayanım özellikleri dikkate alınır. Bu ölçüt uygulanması kolay, kullanımı yaygın ve basittir. Patton

(1966) süreksizliklerde bulunan düzensizlikler veya pürüzlülüğün kesme dayanımına olan etkisini çift eğrili yenilme zarfı ile açıklamıştır. Önerilen ölçütte süreksizlik düzlemine ait pürüzlülük açısı (i) ve kayanın temel sürtünme açısı (ϕ_b) süreksizliklerin kesme dayanımında etkilidir.

Patton (1966)'dan sonra süreksizliklerin kesme dayanımına ait çalışmalar artmış ve daha karmaşık ölçütler ortaya çıkmıştır. Ladanyi ve Archambault (1969) enerji temelli ampirik bir ölçüt öne sürmüştür. Jaeger (1971), Patton (1966) ölçütüne kavramsal olarak benzeyen ancak kesme gerilmesi-normal gerilme ilişkisini üstel olarak ele alan bir ölçüt sunmuştur. Barton (1971a,b) süreksizliğin pürüzlülüğü, yüzey dayanımı ve uygulanan normal gerilme değerini içeren bir ölçüt öne sürmüştür. Barton'ın (1973, 1976) eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) ve eklem yüzey dayanımı (JCS) kullanılarak ortaya koyduğu ölçüt Barton ve Choubey (1977) tarafından güncellenerek son halini almıştır.

Çizelge 1.1 Bazı araştırmacılar tarafından önerilen ölçütler

Araştırmacı(lar)	Önerilen Ölçütler
Mohr-Coulomb (1900)	$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi$
Patton (1966)	$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$
Ladanyi ve Archambault (1969)	$\tau_p = \frac{\sigma_n(1 - as)(\tan \theta_p + \tan \phi_b)a_s \tau_{rock}}{1 - (1 - as)\tan \theta_p \tan \phi_b}$
Jaeger (1971)	$\tau_p = C_0(1 - e^{-b\sigma_n}) + \sigma_n \tan \phi_r$
Barton ve Choubey (1977)	$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC \log_{10} \left[\frac{JCS}{\sigma_n} \right] \right)$
Maksimoviç (1996)	$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \frac{\Delta \phi}{\left(\frac{1 + \sigma_n}{p_n} \right)} \right]$

Huang vd. (2002) süreksizliklerin kesme dayanımını, üçgen pürüzlülüklerden oluşan basit ve iki boyutlu yüzey üzerinde inceleyerek mekanik bir ölçüt ortaya koymuştur.

Grasselli ve Egger (2001, 2003), sabit normal yüke maruz kalan süreksizliklerin kesme dayanımı için ampirik bir ölçüt geliştirmiştir. Yang vd. (2015) üç boyutlu süreksizlik yüzey profilini kullanarak kesme dayanımını belirleyen bir ölçüt önermiştir.

Süreksizliklerin kesme dayanımı için önerilen ölçütlerin uygulanabilir olduğu kadar bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar, kesme dayanımının olduğundan fazla elde edilmesi [örneğin Zhao 1997a,b, Geertsema 2002, Jiang vd. 2006 gibi araştırmacılar tarafından Barton ve Chobey'nin (1977) kesme dayanımı ölçütünün olması gereken değerden fazla elde edildiği belirtilmiştir], bazı ölçütlerin kullanışlı olmaması (örneğin Maksimoviç 1996 ölçütü), süreksizliklerin kesme davranışı esnasında hangi pürüzlülüklerin temas halinde olduğunun bilinmemesi gibi dezavantajlardır (Casagrande, 2018).

Yapılan çalışmalarda süreksizlik içeren kaya ortamlarının dayanımını belirlemede göz önüne alınan en önemli husus kesme dayanımıdır. Sadece laboratuvar veya arazi deneyleri her zaman tatmin edici sonuçlar vermediğinden, kesme dayanımının değerlendirilmesinde düzlemlerin fiziksel ve geometrik karakteristiklerinin tanımlanması gerekir (Vallejo ve Ferrer 2002). Süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesi için, süreksizliğe etki eden normal gerilme değeri, süreksizlik yüzeyinin dayanımı, temel sürtünme açısı ve süreksizliklerin pürüzlülük geometrisi gibi parametrelerin ortaya konulmasının önemli olduğu hususu pek çok çalışmada öne çıkmaktadır. Süreksizliklere ait özelliklerin daha sağlıklı bir şekilde ortaya konulması, bu konuda bilimsel çalışma yapan araştırmacıların ilgi odağı olmuş; böylece farklı tür cihazlar geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Nguyen 2013).

Süreksizlik geometrisi ilkin iki boyutlu olarak belirlenip, pürüzlülük açıları elde edilmiştir (Patton 1966, Ladanyi ve Archambault 1969, Barton ve Choubey 1977). İki boyutlu yöntem için profilograf, marangoz tıraşı ve profilometre cihazları örnek olarak gösterilebilir. Geliştirilen yeni cihazlar sayesinde süreksizlik yüzeyi üç boyutlu olarak ortaya konulmuş olup, bu yöntemlerde süreksizlik yüzeyinin anizotropisinin etkisi

dikkate alınmıştır. Lazer tarayıcılar ve fotogrametri cihazları üç boyutlu yöntem için sıklıkla kullanılmıştır.

Temel sürtünme açısı mühendislik tasarımları veya doğal yamaçların duraylılığının incelenmesinde (Alejano vd. 2010, 2011) ve yeraltı kazılarında (Alejano vd. 2008) çeşitli yenilme türlerine (düzlemsel, kama veya devrilme) karşı süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesinde kullanılır. Süreksizliklerin temel sürtünme açıları üç eksenli deneyler ve kesme kutusu deneyleri ile belirlenmekle birlikte, daha hızlı ve pratik bir yöntem olduğu için motorize veya el ile döndürülen tiltmetre deney cihazları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel sürtünme açılarının tiltmetre cihazıyla belirlenmesi için, uzunlamasına kesilmiş karot kurulum, dikdörtgen blok kurulum, Stimpson yöntemi olarak adlandırılan üç karotlu kurulum, yatay olarak kesilmiş karot kurulum gibi farklı yöntemler ve farklı geometrilere sahip numuneler ile deneyler yapılabilir (Alejano 2012). Araştırmacılar, tiltmetre deneyleri sırasında kayaların yön, kalınlık, pürüzlülük, kayma yüzeyinin şekli ve kesim esnasında testere izi gibi çeşitli fiziksel özelliklerinin sürtünme açısına olan etkisini incelemiştir (Bruce 1989, Chryssanthakis 2003, Perez-Rey vd. 2015, Rahim 2018). Jang vd. (2018) testere ile kesilmiş numunelerde yapılan tiltmetre deneyinde testere izli numunelerden elde edilen temel sürtünme açılarının belirgin bir saçılım sunduğunu belirtmiştir. Bunun önlenmesi amacıyla testere izli yüzeyler 100 No.'lu ince zımpara ile pürüzsüzleştirildikten sonra temel sürtünme açılarını belirlemiştir.

Süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesi için pek çok cihaz geliştirilmiştir. Bu cihazlar normal gerilme, kesme gerilmesi, yerdeğiştirme ve kesme kutusu boyutuna göre farklılık göstermektedir. Pek çok kurumsal firma dışında bazı araştırmacılar da doğrudan kesme kutusu deney cihazı tasarlamıştır (Huang 1993, Boulon 1995, Barbero 1996, Kana 1996, Geertsema 2002, Gehle 2002, Seidel & Haberfield 2002, Jiang vd. 2004, Kim vd. 2006, Gomez vd. 2008, Barla vd. 2010, Konietzky vd. 2012a, Konietzky vd 2012b, Nguyen 2013, Qi vd. 2020). Cihazlar sabit normal yük (CNL) ve sabit normal rijitlik (CNS) veya her iki koşulda deney yapabilme kapasitelerine sahiptir. Bunlarla statik ve dinamik koşullar altında deneyler yapılabilmektedir.

Süreksizliklerin kesme dayanımının hızlı, düşük maliyetli ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi için yeni cihazlar geliştirilse de, deneye tabi tutulacak numunenin temsil edici olması, doğal süreksizliğe sahip olması, laboratuvar cihaz boyutlarına uygun hale getirilmesi ve birden fazla numunenin temin edilmesi oldukça zor bir işlemdir. Geleneksel doğrudan kesme deneyinde 5-6 özdeş numune gereksinimi nedeniyle, yukarıda bahsedilen ampirik yöntemlerin yanı sıra tek numune üzerinde çok aşamalı deney yöntemleri süreksizliklerin kesme dayanımının ortaya konulması için gerçekleştirilen alternatif yöntemlerden biridir.

Geleneksel yöntemde en az 5-6 adet numune üzerinde farklı gerilmeler altında doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar kesme gerilmesi - normal gerilme grafiğine aktararak süreksizliklerin kesme dayanımı belirlenir. Bu yöntem süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesinde yaygın şekilde kullanılır.

Çok aşamalı doğrudan kesme deneyi tek numune üzerinde tekrarlı kesme deneyleri yapılarak süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılan bir deneydir. İlk olarak zeminlerin kesme dayanımının belirlenmesi için kullanılan bu yöntem Jaeger (1959) tarafından kaya numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çok aşamalı doğrudan kesme deneyi iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Bunlar, i) her kesme aşamasından sonra süreksizlik yüzeyinin başlangıçtaki konumuna yeniden yerleştirildiği (yeniden konumlandırılmalı) veya ii) kesme deneyi aşamasında süreksizlik yüzeyinin başlangıç konumuna yeniden yerleştirilmediği (yeniden konumlandırılmaz) yöntemlerdir (MacDonald vd. 2023). Barla vd. (2011) ve Petro (2018) tarafından önerilen alternatif prosedürde ise çok aşamalı deney yönteminin her aşamasında kesme yer değiştirmesinin sınırlandırılarak numune kesme gerilmesi doruk noktaya ulaştıktan sonra numuneye hasar verilmemesi amaçlanmıştır. Doruk dayanıma ulaşılan numune yeniden konumlandırılma olmadan bir sonraki yüksek normal gerilmeye geçilerek deneyler yapılmaktadır. Henüz yeni bir deney türü olan bu yöntem sınırlı yer değiştirmeli çok aşamalı doğrudan kesme deneyi (LDMDs) olarak adlandırılmıştır (MacDonald 2022).

Çok aşamalı doğrudan kesme deneyinde elde edilen en önemli sonuçlardan biri süreksizlik yüzeyinin tekrarlı kesme esnasında hasar görmesi sonucu elde edilen doruk kesme dayanımının düşük olmasıdır. Bu sonuç pek çok araştırmacı tarafından elde edilmiş olsa da yapılan deneyler çok az numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar önemli olmakla beraber doğada farklı mineralojik-petrografik ve mekanik özelliklere sahip pek çok kaya türü bulunduğundan, bu deney türünün farklı kayalardaki davranışının ortaya konulmasına ihtiyaç vardır.

Geleneksel doğrudan kesme deneyi, çok aşamalı doğrudan kesme deneyi, tiltmetre deneyleri ve profilometre deneyleri ile ilgili yapılmış ve bu araştırmanın konusu ile ilişkili önemli araştırmalar bölüm 2’de sunulmuştur.

Habibzadeh (2020) tarafından geleneksel doğrudan kesme deneyi ile yapılan çalışmada Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının kesişim zarfının 2 MPa’lık normal gerilme civarında olduğu bulgusu önemli bir veri olup Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfını elde etmek için 5-6 adet numune gereksinimini ortadan kaldırabilir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının kesişim yerlerinin 2 MPa’lık bir normal gerilmede olduğunu 30 farklı kaya türünde ve farklı gerilmeler altında (0,5-1-1,5-3-5-7 MPa) gerçekleştirilecek bir dizi geleneksel doğrudan kesme deneyiyle doğrulamak; sadece toplam sürtünme açısı, temel sürtünme açısı ve bu kesişim değerini kullanarak süreksizliklerin kesme dayanımını daha kısa ve pratik bir yoldan kestirmektir. Bu hedefe ulaşmak için Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının birinci kısmına ait toplam sürtünme açısını profilometre ve tiltmetre deneyinden, eğrinin ikinci kısmına ait temel sürtünme açısını tiltmetre deneyinden elde etmek; bu iki eğriyi 2 MPa’lık normal gerilmede kesiştirerek geleneksel doğrudan kesme deneyine gerek duyulmadan Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfını oluşturmaktır. Çalışmanın hipotezinin doğrulanması durumunda süreksizliklerin kesme dayanımı hızlı, pratik ve düşük maliyetli şekilde ortaya konulabilecektir. Çalışma hipotezinin doğrulanmaması durumunda, 30 farklı kaya

türü üzerinde çok aşamalı doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilerek, elde edilen kesme dayanımlarının geleneksel doğrudan kesme deneyi ile belirlenen kesme dayanımları arasında bir ilişki tespit edilmesi amaçlanmıştır. Araştırma sonucunda elde edilecek geniş veri tabanı kapsamlı istatistiksel analizlere tabi tutularak, süreksizliklerin kesme dayanımında hangi parametrelerin daha etkili olduğu irdelenerek, kesme dayanımını kullanıcılara kısa yoldan buldurabilecek alternatif ampirik ilişkiler aranacaktır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Süreksizliklerin Kesme Dayanımının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Patton (1966) pürüzlülük sayısı, pürüzlülük açısı ve malzeme karışımları farklı olan özdeş testere dişli yapay süreksizlikler üzerinde bir dizi kesme deneyi gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda uygulanan normal gerilmeye dayalı olarak çift eğrili yenilme zarfı önermiştir. Bu zarflardan düşük normal gerilmeler altında eğrinin birinci kısmı elde edilir ve bu kısım toplam sürtünme açısı ($\phi_t = \phi_b + i$) tarafından kontrol edilir. Yüksek normal gerilmelerde pürüzlülüklerin tıraşlanması sonucunda eğrinin ikinci kısmını oluşturan ikinci bir zarf oluşur ve bu kısım ise temel sürtünme açısı (ϕ_b) tarafından kontrol edilir (Şekil (2.1))

Patton (1966) yenilme zarflarının eğimindeki değişikliklerin yenilme koşullarındaki değişiklikleri yansıttığını, yenilme koşullarındaki değişikliklerin ise yüzey boyunca pürüzlülüklerin fiziksel özellikleri ile ilişkili olduğunu değerlendirmiştir.

Ladanyi ve Archambault (1969) düzenli testere dişli pürüzlülüklerden oluşan süreksizlik yüzeyinde kaymanın gerçekleştiği ve pürüzlülüklerin kırılacağı alanları belirleyerek kesme dayanımının elde edilmesine yönelik bir ölçüt belirlemiştir. Araştırmacılar kesme deneyi esnasında gelişen gerilmenin süreksizlikler üzerinde eşit olarak dağılmayacağından dolayı bazı süreksizliklerin en büyük gerilme değerine ulaşmadan kırılabileceğini değerlendirmiştir. Buna bağlı olarak pürüzlü yüzey boyunca kesme ve kaymanın/kırılmanın aynı anda gelişebileceğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar yüzey alanı a_s , kaymanın gerçekleştiği alanın ise $1 - a_s$ olduğu varsayımını kabul ederek yeni bir ölçüt önermiştir.

Jaeger (1971) süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada süreksizliklerin kesme dayanımında Griffith teorisinin süreksizliklerin etkisini matematiksel olarak incelemek için yararlı olduğunu

değerlendirmiştir. Araştırmacının önerdiği model kavramsal olarak Patton (1966) yenilme ölçütüne benzerlik gösterir; ancak, doğrusal olmayan bir ölçüttür.

Barton ve Choubey (1977) doğal süreksizlikler üzerinde kapsamlı bir dizi deney gerçekleştirerek süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesine yönelik ampirik bir ölçüt önermiştir. Yapılan çalışmada Barton ve Choubey (1973) tarafından ortaya konulan 10 adet profilden ve 0 ile 20 arasında değişen puanlamadan oluşan eklem pürüzlülük katsayısının (JRC) yanı sıra tek eksenli sıkışma dayanımı (JCS) ve kalıntı temel sürtünme açısı (ϕ_r) parametreleri önerilen ölçütün önemli bileşenleridir. Bu parametrelerin hem laboratuvar ortamında hem de arazi koşullarında belirlenebilmesi ve basit olmasından dolayı ölçütün araştırmalarda yaygın şekilde kullanılması söz konusudur. Araştırmacılar JRC ve JCS parametrelerinin, süreksizlik boyutunun büyümesi ile (diğer bir ifade ile numune ölçeğinin büyümesi ile) bu parametre değerlerinde azalma meydana geldiğini tespit etmiştir. Ayrıca, süreksizlik boyutunun artmasının doruk kesme dayanımını ve genişmeyi de azalttığı gösterilmiştir.

Bandis (1980) numune ölçeğinin kesme dayanımına etkisini farklı boyutlara sahip örnekler üzerinde incelemiştir. Yapılan çalışmada doruk kesme dayanımının ölçek boyutundan etkilendiğini ortaya koymuştur. Pürüzlü yüzeylerde ölçek etkisinin düz yüzeylere kıyasla daha etkili olduğunu belirlemiştir. Araştırmacı artan ölçek ile birlikte değişen doruk kesme dayanımına ait davranışın, farklı boyutlardaki numunelerin farklı pürüzlülükler barındırması ile değiştiğini yorumlamıştır. Ayrıca, numune boyutunun büyümesi ile JRC değeri ve JCS değerinde azalma meydana geldiğini göstermiştir.

Haque (1999) CNL (Sabit normal yük) ve CNS (Sabit normal rijitlik) sınır koşulları altında dolgulu ve dolgusuz süreksizliklerin kesme dayanımını incelemiştir. Yapılan çalışmada dolgusuz süreksizliklerde CNS koşullarında süreksizliklerin kesme davranışı (maden kazıları, şevler gibi saha uygulamaları vb.) CNL koşullarına kıyasla daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Dolgusuz CNL koşullarında süreksizlik yüzeyinin genişmesi CNS koşullarına göre daha fazladır. Dolgulu ve CNS koşulları altındaki süreksizliklerin kesme dayanımının dolgusuz ve CNS koşullarına göre önemli ölçüde

azaldığı belirlenmiştir. Doruk kesme dayanımına karşılık gelen yer değiştirmenin dolgu kalınlığının artmasıyla birlikte arttığını, ancak, bu artışın dolgu kalınlığının pürüzlülük genliğini aşana kadar devam ettiğini değerlendirmiştir. Fourier dönüşüm yöntemine dayanarak CNS koşulları altında süreksizliklerin kesme davranışını tahmin etmek için yeni bir dayanım ölçütü önermiştir.

Graselli (2006) süreksizliklerin kesme dayanımını elde etmek için yüzey geometrisinin ölçülmesi ve sayısallaştırılması gerektiğini değerlendirmiştir. Kesme deneyleri esnasında pürüzlülüklerin boyutu ve yüzeydeki dağılımlarının temas alanlarını nasıl etkilediğini incelemiştir. Araştırmacı JRC parametresine alternatif bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde süreksizliklerin karşılıklı olarak birbiriyle temas eden yüzeylerindeki alanları kullanarak pürüzlülük katsayısını elde etmiştir. Grasselli (2006) tarafından önerilen kriter aşağıda sunulmuştur.

$$\tau = \left[1 + e^{-\left(\frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{9 A_o C \sigma_t}\right)} \right] \sigma_n \tan \left[\phi_{b+} + \left(\frac{\theta_{max}^*}{A_o}\right)^{1.18 \beta} \right] \quad (2.1)$$

Burada β : Normal gerilme ile süreksizlik düzlemi arasındaki açı, A_o : En fazla temas alanı, θ_{max} : Kesme doğrultusundaki en büyük açı ve C: Pürüzlülük parametresidir.

Vasarhelyi ve Van (2006) tarafından yapılan bir dizi kesme deneyinde normal gerilmenin genleşme ve yer değiştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada 12 adet çimento harcından üretilmiş numune kullanılmıştır. Sabit normal yükün genleşme hızına göre değişimi ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, ölçülen genleşme değerinin (ν) artan normal gerilmeyle azaldığını ve her zaman mevcut olduğunu göstermektedir.

Atapour ve Moosevi (2013) kaya süreksizliklerinde kesme hızının kesme davranışı üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir. Yapılan çalışmada kesme hızının süreksizlik yüzeylerinin kesme parametreleri üzerindeki etkisi sabit normal rijitlik koşulları altında incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan 116x100x65 mm boyutunda alçı ve beton

numuneleri üzerinde 10° ve 20°'lik yapay pürüzlülükler oluşturulmuştur. Numuneler üzerinde 0,3, 1,8, 6, 15 ve 30 mm/dk hızlarda kesme deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışma yapay pürüzlülüklerin kayma davranışının kesme hızından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Kayma hızının numune türü, normal gerilme değeri ve süreksizliklerin pürüzlülüğüne bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Bahaaddin vd. (2013) süreksizliklerin kayma davranışını “2 Boyutta Parçacık Akış Kodu (PFC2D)” kullanılarak sayısal olarak simüle etmiştir. PFC2D büyük gerilme ve/veya kırılma sergileyen birçok ayrı nesneye ait etkileşiminin gerekli olduğu herhangi bir alanda analiz, test ve araştırmada kullanılan bir süreksizlik kodudur. Yapılan çalışmada, bu yaklaşımın yer değiştirmenin fazla olduğu durumlarda kenetlenmenin yüksek olduğu yerdeki parçacıkların hasar gördüğü ortaya koymuştur. Kesme işlemi sırasında süreksizlik yüzeyinin bozulması sayısal olarak incelenmiştir.

Hencher (2014) süreksizliklerin kesme dayanımını değerlendirmek için arazi ve laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar sonucunda ölçüm ve analiz temelli bir yaklaşım geliştirmiştir. Çalışmada pürüzsüz yüzeylerin de mikroskobik düzeyde pürüzlülükler içerdiği, tekrarlı yenilmiş fay düzlemine ait yüzeylerin parlatılmış halde olduğu gibi yapay veya doğal olarak kaya yüzeylerinin parlatılmasının temel sürtünme açısının dokusal kenetlenme bileşenini azaltacağı değerlendirilmiştir. Hencer vd. (2014) testere ile kesilmiş bir yüzeyin kabul edilebilir bir temel sürtünme açısı sağlamasının yanlış bir algı olduğunu öne sürmüştür. Himalayalar'daki bir barajın dolusavak şevinde yapılan çalışmada birinci derece pürüzlülük ve ikinci derece pürüzlülük özelliklerinin karakterizasyonunu ve bunların proje ölçeğinde kesme dayanımıyla ilişkisini ölçek etkisini göz önünde bulundurarak irdelemiştir.

Johansson ve Stille (2014) süreksizliklerin örtüşme derecesi, ölçeği ve boyutunun kesme dayanımına olan etkisini irdelemiş ve yeni bir kriter ortaya koymuşlardır. Önerilen yenilme kriterinin sadece dolgusuz ve aşınmamış yüzeyler için geçerli olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar pürüzlü yüzey için doruk sürtünme açısının mikroskobik ve makroskobik olmak üzere iki kısımdan oluştuğunu açıklamıştır. Mikroskobik kısım

pürüzsüz yüzeyin mikroskobik düzeyde pürüzlü olduğu temel sürtünme açısı, makroskobik kısım ise pürüzlülüktan kaynaklanan genleşme açısıdır. Süreksizlik boyutu arttıkça veya örtüşme değıştikçe temas alanındaki değışikliklerle başa çıkmak için sabit bir normal gerilme sırasında gerçek temas alanının sabit olacağını ve temas noktalarının miktarının artan süreksizlik boyutuyla değışeceğini açıklamışlardır. Önerilen kriter ile belirlenen sonuçlar Graselli (2001) tarafından elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlarla pürüzlü, dolgusuz, taze ve bozuşmamış süreksizliklerin kesme dayanımının tahmin edilebileceğı sonucuna varılmıştır. Çalışmada ölçek etkisinin doğrulanması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu değerlendirilmiştir.

Gravel vd. (2015) basit ancak çeşitli arazi koşullarında kullanışlı olan kesme deney cihazı kullanarak arazide kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada doğal bir şist yüzeyine yüksek mukavemetli harçtan yapılmış beton 50x50 cm'lik bir kalıp içine dökülmüştür. Deneyden önce katılan beton kaldırılmış, birbirine kenetlenen pürüzlülüklere sahip ancak bağlanmış süreksizlikler yeniden konumlandırılmış ve kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma, yüksek sürtünme açısı değeri, birinci derece pürüzlülüğün ve süreksizlik yüzeylerinin iyi kenetlenmesinin, genellikle düşük dayanım değeriye sahip olduğu düşünölen bir kayada yüksek kesme dayanım parametrelerine yol açabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, pürüzlülüğün kesme dayanımı ve genişleme üzerindeki etkisinin laboratuvar ortamına kıyasla yerinde (in situ) deneylerde daha belirgin olduğu sonucunu elde etmiştir.

Ge vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada normal yük ve kesme yönünün etkisi dikkate alınarak laboratuvar çalışmaları ve ayırık elemanlar yöntemine (DEM) dayalı sayısal simölasyon yapılmıştır. Araştırmacılar kayma yer değıştirmesi arttıkça kaya süreksizliklerine ait yüzey pürüzlülüğünün kademeli olarak azaldığını, pürüzlülüğün sonraki aşamalarda önemli bir azalma sonrasında sabit kaldığını göstermişlerdir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün gelişiminin normal gerilmeye ve kayma yönüne bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Yüksek normal yükler altında süreksizlik pürüzlülüğü değeriinde azalma meydana gelirken, düşük normal yüklerde süreksizlik yüzeylerinde pürüzlülük

değerinde azalma değerinin daha az olduğu gözlenmiştir. Buna göre, dayanımın kesme yönüne göre değişkenlik gösterdiğini değerlendirmiştir.

Casagrande (2018) küçük ölçekli numuneler ile yapılan doğrudan kesme deneylerinden yola çıkarak büyük ölçekli koşulları simüle etmeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda süreksizliklere ait yüzey 3D geometrisi, kayma yönü ve malzeme dayanım parametreleri ile doruk ve kalıntı kesme dayanımı belirlenmesine yönelik yarı analitik model geliştirmiştir. Modelin doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Analitik yaklaşım büyük ölçekli yüzeylere de uygulanmış ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir.

Merabi (2018) beton-kaya ara yüzeylerinin kesme davranışını belirlemek amacıyla farklı pürüzlülük geometrilerine sahip numuneler üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Araştırmacı tarafından beton-kayadan oluşan numuneler üzerinde üç farklı normal gerilme altında bir dizi kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yer değiştirme hızının kesme dayanımı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Kesme deneyleri sonuçlarına dayanarak normal gerilme ve süreksizlik pürüzlülüğünün etkisi gözlenmiştir. Kesme dayanımına etki eden parametreleri nicelleştirmek amacıyla analitik bir ölçüt önermiştir. Ayrıca, doğal süreksizliklerin morfolojisini nicelleştirmek ve kayma mekanizmasında yer alan farklı yüzey pürüzlülük seviyelerini dikkate almak amacıyla yeni bir pürüzlülük parametresi önerilmiştir.

Anderson (2019) kaya kütesinin en zayıf bileşenini oluşturan süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesine yönelik çeşitli faktörlerin etkisini ortaya koyan araştırmacılarından biri olan Casagrande vd. (2018) kriterinin farklı birleşme derecelerine sahip süreksizlikler üzerinde doğruluğunu incelemiştir. Çalışmada bir grup mükemmel örtüşen, iki grup belli ölçüde örtüşen olmak üzere toplam üç grup örnek kullanılmıştır. Tüm süreksizliklerin alt ve üst yüzeyleri farklı açılardan olmak üzere optik tarama sistemi olan ATOS III ile taranmış ve kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada önerilen kriterin mükemmel örtüşen numunelerde doruk kesme dayanımını tahmin edebileceğini

göstermiştir. Ancak, örtüşme derecesi düştükçe doruk kesme dayanımının tahmin doğruluğunun azaldığı görülmüştür.

Renaud vd. (2019) barajlarda betondan, beton-kaya ve kaya süreksizlik yüzeylerinden alınmış 18 numune üzerinde kesme deneylerinden elde edilen verilere dayanarak pürüzlülüğün kesme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada deneye tabi tutulan numunenin temas yüzeyleri lazerle taranıp 3 boyutlu profilleri sayısal olarak ortaya konulmuş ve süreksizlik kesme dayanımının tahmini için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Kesme yönünün kesme dayanımına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada geliştirilen yöntemin anlamlı sonuçlar verdiği; kesme yönünün kesme dayanımını etkilediği sonucuna varılmıştır.

Wang vd. (2019) yeraltında sıvı enjeksiyonlarının boşluk basıncını yükselterek etkin gerilme rejimini bozduğunu, olası kırılmaları etkinleştirebildiğini öne sürmüştür. Yapılan çalışmada pürüzlülüğünün kesme dayanımına, stabiliteye ve kırıkların geçirgenlik gelişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrık elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Kırık pürüzlülüğünde pürüzlülük ondülasyonları, pürüzlülük boyunun anizotropisi ve pürüzlerin sertliği belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda pürüzlülük genliğinin fazla olmasının kesme mukavemetini de arttırdığını, pürüzlülük boyunun anizotropisinin sert yüzey kırıklarının kayma mukavemetini ve geçirgenlik gelişimini etkilediği belirlenmiştir. Kayma yönüne paralel daha büyük pürüzlülük dalga boyu, kırılma geçirgenliğini artırırken kırığın doruk kesme dayanımını azaltmaktadır. Pürüzlülük dayanımının sert kırıkların kesme dayanımını ve geçirgenlik gelişimini belirlemek için önemli olduğunu ve düşük pürüzlülük dayanımının daha düşük kesme dayanımı ve daha az geçirgenlik ile sonuçlandığını belirlemişlerdir.

Habibzadeh (2020) dokuz farklı kaya türü üzerinde farklı normal gerilmeler altında statik ve dinamik doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirerek süreksizliklerin kesme dayanımlarını incelemiştir. Yapılan çalışmada dinamik yükler ve statik koşullar altında gerçekleştirilen deneylerde toplam sürtünme açılarında önemli bir değişimin olmadığı, temel sürtünme açısında ise dinamik yüklerden elde edilen sonuçların statik koşullarda

elde edilen sonuçlara göre %50'ye kadar azaldığı tespit edilmiştir. Araştırmacı statik koşullar altında 3 farklı numune boyutu üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada numune boyutundaki küçülmenin toplam sürtünme açısında azalmaya neden olduğunu; ancak, numune boyutunun temel sürtünme açısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymuştur. Dinamik koşullar altında boyut etkisinin toplam sürtünme açısını etkilemediğini, temel sürtünme açısı ile boyut etkisi arasında anlamlı bir ilişki tespit edilemediğini belirtmiştir.

Larsson (2021) doğal ve yapay süreksizlikler üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarla numunelere ait süreksizlik yüzey geometrilerini belirlemiş ve sabit normal rijitlik koşullar altında kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Araştırmada doğal süreksizlikler ve yapay süreksizlikler üzerinde gerçekleştirilen kesme deneylerinde düşük ve yüksek pürüzlülüklere sahip yapay süreksizliklerin kesme dayanımı ile doğal numunelerin kesme dayanımları kıyaslanmıştır. Buna göre, nispeten düşük pürüzlülüklere sahip yapay süreksizliklerden daha anlamlı sonuçlar elde edildiğini belirlemiştir.

Zou ve Cvetkovic (2024) süreksizliklerin kesilmesinin kaya kütlelerinin hidromekanik davranışına hâkim ve mühendislik uygulamalarında kritik öneme sahip olmasından dolayı tüm süreksizlik yüzeylerini üç boyutlu olarak dikkate alan ve doğrudan kesme sürecini simüle edebilen hesaplamalı bir modele ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Çalışmada normal gerilme dağılımlarını hassas bir şekilde dikkate alarak pürüzlü süreksizlikler üzerinde doğrudan kesme deneylerini öngören bir model geliştirilmiştir. Kesme sürecinde mekanik özelliklerin (E , ν , ϕ , ϕ_b , c vb.) etkisi incelenmiştir. Bu yaklaşım laboratuvarda gerçekleştirilen doğrudan kesme deney verileri ile doğrulanmıştır. Doğrulama sonuçları, bu yaklaşımın artan kesme yerdeğiştirmesi ile kesme gerilmesi, normal yerdeğiştirme ve yüzeydeki hasarı güvenilir bir şekilde tahmin edebileceğini göstermektedir.

2.2 Temel Sürtünme Açısının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Bruce vd. (1989) tiltmetre deney düzeneğinde temel sürtünme açısının (ϕ_b) kolayca belirlenmesi için dolomit ve kuvarsit üzerinde çalışmalar yapmıştır. Numuneler 5x5x2

cm ebadında olacak biçimde elmas dişli testere ile kesilmiştir. Dolomit ve kuvarsit numunelerin zımparalı, cilalı ve testere yüzeylerinde kaydırma deneyleri yapılmıştır. Kaydırma deneyleri 2,5°/dk ve 8°/dk hızında motorlu düzeneğe ve elle 8°/dk hızında döndürülmüştür. Yapılan tiltmetre deneylerinde sürtünme açısının yüzey pürüzlülüğünden önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Nemli koşulların ise ortalama 2° arttırdığını göstermiştir. Motorlu döndürme düzeneği sonuçlarının elle döndürülen düzeneğe göre ortalama 0,9° daha az olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin motorlu düzeneğe meydana gelen titreşimlerden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

Alejano vd. (2012) kayaların temel sürtünme açılarının belirlenmesi için kullanılan tiltmetre deney düzeneğinde farklı geometrilere sahip kaya numuneleri kullanarak deneyler yapmıştır. Alejano vd. (2012) yaptığı çalışmada manyezit, granit, amfibolit ve kila taşı kayalarını kullanmıştır. Yapılan çalışmada geometrik özellikleri ve güvenilir gerilme koşullarının sağlanmasının zor olmasından dolayı küçük ebatlı numuneler üzerinde testler önerilmemiştir. Ayrıca, dört farklı kurulum üzerinde gerçekleştirilen tiltmetre deneylerine ait sonuçlar kıyaslanmış ve güvenilirlik durumu irdelenmiştir.

Ulusay ve Karakul (2015) Türkiye'nin değişik bölgelerinden alınan 22 farklı kaya türü üzerinde tiltmetre deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada kuru, ıslak ve su altındaki koşulların kayaların temel sürtünme açısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca kayaların mineralojik ve petrografik özelliklerinin deney koşulları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Tiltmetre deneyleri için numuneler çoğunlukla kare ve kısmen prizmatik tabanlı levhalar şeklinde kesilmiştir. Çalışmada aynı numunenin iki zıt yüzeyinden belirlenen temel sürtünme açısındaki değişkenlik veya sapmanın oldukça benzer olduğu, ek deneylere ihtiyaç duyulması halinde numunenin diğer yüzeyi üzerinde gerçekleştirilmesi önerilmiştir. Kuru, ıslak ve su altında test edilen numunelerde deney sonrasında yüzeydeki kaya unu çıkarılması durumunda, test yüzeylerinde hiçbir aşınma etkisinin oluşmayacağı veya göz ardı edilebilecek düzeyde bir aşınma etkisinin oluşacağı görülmüştür. Su altı tiltmetre deneylerinde, eğim testinde temel sürtünme açılarının sudan etkilenmediği belirlenmiştir. Kuru ve ıslak temel sürtünme açıları arasındaki farkların,

test yüzeylerindeki emme etkisi ile kaya türüne göre ilgili her mineralin yağlama derecesi arasındaki farklardan kaynaklandığı öne sürülmüştür.

Alejano vd. (2018) süreksizliklerin kesme dayanımı parametrelerinden olan temel sürtünme açısını belirlemek için bir dizi laboratuvar prosedürü önermiştir. Bunlar döndürme hızı, numunenin kaydırılacak yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesi, numune yüzeyinden ince taneli malzemenin uzaklaştırılması, ortam sıcaklık ve nemi durumunu kapsamaktadır. Yapılan çalışmada tiltmetre deneylerinin uygulanması için Alejano vd. (2012) tarafından önerilen geometrilere yenilerini eklemiştir.

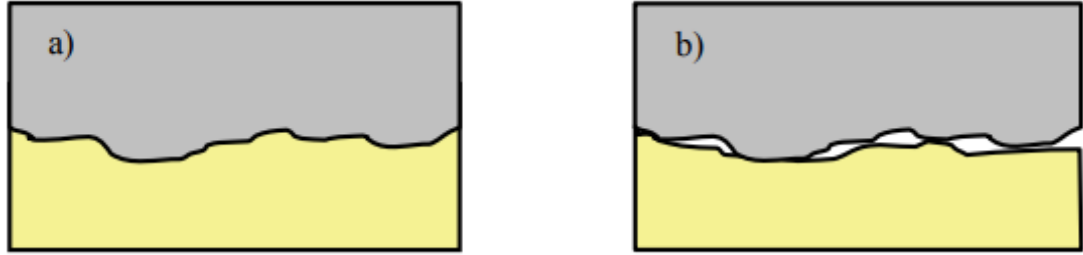
Jang vd. (2018) granit ve kumtaşlarının temel sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla testere izli yüzey ile 600 ve 100 numaralı zımparayla zımparalanmış yüzeylere sahip numuneler üzerinde doğrudan kesme deneyi, üç eksenli sıkışma dayanımı ve tiltmetre deneyleri gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış olup 100 No.'lu zımpara ile zımparalanmış yüzeye sahip numunelere ait temel sürtünme açıları sonuçlarının anlamlı olduğunu ortaya koymuştur.

2.3 Pürüzlülük Açısı ve Süreksizlik Yüzey Geometrilerinin Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Rengers (1970) süreksizlik yüzey pürüzlülüğünün tanımlanması için farklı boyutlardaki pürüzlülüklerin tek bir diyagramda temsil edilmesini sağlayan yeni bir ölçüm düzeneği kullanmıştır. Stereo-derinlik ölçüm mikroskobu ile hat taraması yapılarak pürüzlülük ortaya konulmuştur. Cihaza eklenen mercek sayesinde pürüzlülükler detaylı olarak belirlenir ve kaydediciler vasıtasıyla profil grafikleri hızlıca oluşturulur.

Zhao (1997a) yeni bir parametre olan “eklem örtüşme katsayısı” JMC’yi önermiştir. Bu pürüzlülük endeksi temas halindeki eklem yüzeyinin yüzdesine dayanır. İki yüzey tamamen birbiriyle örtüştüğünde eklem tamamen eşleşmiş olur (Şekil 2.1). Bu nedenle eşleşme derecesi, eklem yüzeylerinin örtüşme derecesi ile temsil edilir. JMC değerleri taze süreksizlikler, farklı yüzey pürüzlülüğü ve eşleşme derecelerine sahip

süreksizliklerde kesme deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, JMC modeli farklı yüzey pürüzlülüğü ve örtüşme derecelerine sahip çeşitli süreksizliklerde kesme deney sonuçlarını uygun şekilde değerlendirmekte ve özellikle yüzeyleri tam örtüşmeyen süreksizlikler için daha iyi bir yorum ve tahmin sağlamaktadır.



Şekil 2.1 Süreksizliklerin örtüşmesinin gösterimi a: Tam örtüşen süreksizlik b: Örtüşmeyen süreksizlik

Gentier vd. (2000) özdeş ve doğal granit süreksizlikleri üzerinde bir dizi kesme testi gerçekleştirmiş ve kırılma geometrisi ile mekanik davranış arasında güçlü bir ilişki olduğunu değerlendirmiştir. Kesme deneyi işleminden sonra süreksizlik yüzeylerindeki hasarlı bölgelerin görüntülerini analiz etmiş ve hasarlı alanların boyutunun, şeklinin ve mekânsal dağılımının kesme yönüne ve kesme yer değiştirmesine bağlı olduğunu öne sürmüşlerdir.

Ünal (2000) süreksizliklerin kesme dayanımında önemli bir etkiye sahip olan pürüzlülüklerin ayrıntılı olarak belirlenmesi ve tanımlanması gerektiğini değerlendirmiştir. Yapılan çalışmada yapay olarak oluşturulan süreksizlik yüzeylerine ait pürüzlülükler farklı ölçüm teknikleri (sayısal fotogrametri, 3B yazılımlar kullanılarak topografik çizimler) kullanarak sayısal tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Pürüzlülüklerin kesme dayanımına olan etkisini belirlemek amacıyla farklı normal gerilmeler, pürüzlülük ve örtüşme derecesine sahip kayalar üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, yersel fotogrametrik ölçümlerin küçük ölçekli yüzeylerde dahi sağlıklı sonuç verdiğini belirlemiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesiyle kesme dayanımının tahmin edilmesinde avantaj sağladığını belirtmiştir.

Yang vd. (2001) Barton (1976) tarafından önerilen JRC'nin (eklem pürüzlülük katsayısı) mühendislik uygulamalarında sıkça kullanıldığını ve JRC katsayısını belirlemek için pek çok ampirik formül öne sürüldüğünü vurgulamaktadır. Pek çok araştırmacı öne sürülen formüllerin JRC katsayısına karşılık gelecek değeri hassas şekilde belirlemek ve sübjektifliği en aza indirmek için profil geometrisini hesaplamayı amaçlamıştır. Yang vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada Fourier serisi yöntemi kullanılarak pürüzlülük yüzey geometrisi belirlenmiştir. İki farklı model ile süreksizlikler test edilerek birinci derece ve ikinci derece pürüzlerin kayma davranışındaki rolü araştırılmıştır.

Grasselli vd. (2002) sabit normal yük altında süreksizliklerin kesme dayanımını modellemek için gerilme ve yer değiştirmeleri ilişkilendiren yeni bir kriter önermiştir. Bu kapsamda süreksizlik yüzeyinin nicel tanımlaması yapılmış ve yedi farklı kaya türünde 50'den fazla sabit normal yük altında deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada önerilen kriterin en önemli yönü, doruk kesme dayanımı kriterine nicel üç boyutlu yüzey parametrelerinin dahil edilmesidir. Önerilen kriter ayrıca eklem pürüzlülük katsayısı değerini tahmin etmek için de kullanılmıştır. Tahmin değerleri eklem pürüzlülük katsayısı değerleriyle başarılı bir şekilde ilişkilendirilmiştir.

Develi (2006) süreksizlik yüzeylerinin sayısallaştırılması için mekanik yüzey tarayıcısı, elektronik kontrol ünitesi ve özel bir yazılımdan oluşan bilgisayar kontrollü ölçüm sistemi tasarlamıştır. Ayrıca, süreksizliklerin kesme dayanımı ve mekanik parametrelerinin laboratuvar ortamında deneysel olarak belirlenmesi amacıyla kesme kutusu, veri toplama ünitesi ve hidrolik ünitelerden oluşan yeni bir doğrudan kesme deney cihazı geliştirmiştir. Yüzey pürüzlülükleri farklı yöntemler ile belirlenerek geliştirilen ölçüm sistemi ile kıyaslanmıştır. Yüzeyin mekanik dayanımı ile yüzey pürüzlülüğü arasında ilişki irdelenmiştir. Buna göre tasarlanan cihaz ve geliştirilen yazılımın anlamlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Haneberg (2006) özel üç boyutlu tarayıcı kullanarak kaya süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğünün ölçülmesi amacıyla yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntemin mevcut

yöntemlerden daha hızlı, hassas ve doğru olduğunu ortaya koymuştur. Üç boyutlu tarayıcı yöntemi ile mevcut yöntemlerden %10 daha ayrıntılı pürüzlülük değerleri üretmiştir.

Özvan (2014) süreksizlik yüzeylerindeki pürüzlülük parametresi ve bozuşmanın pürüzlülük üzerindeki etkisini incelemiştir. Araziden alınan ve farklı bozuşma derecesine sahip granit ve kristalize kireçtaşlarının mineralojik-petrografik özellikleri belirlenmiş ve pürüzlülük açıları ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada bozuşma derecesinin artmasıyla pürüzlülük açısının arttığı belirlenmiştir. Araştırmacı ISRM'nin (1981) pürüzlülüğün artmasıyla kesme dayanımının artacağı yönündeki görüşünün yapılan çalışmada geçerli olmadığını ortaya koymuştur.

Tatone ve Grasselli (2010) süreksizliklerin pürüzlülük özelliklerini belirlemek için iki boyutlu yaklaşımların uzun yıllar kullanılmış olduğunu, son yıllarda ise üç boyutlu yöntemlerin yaygınlaştığını belirtmiştir. Araştırmacılar iki boyutlu profil ölçüm sonuçlarıyla üç boyutlu sonuçlar arasında nasıl bir ilişki olduğunu incelemiştir. Çalışmada iki boyutlu pürüzlülük ölçümlerini üç boyutlu pürüzlülük ölçüm metodolojisi ile ele alarak üç boyutlu bir ölçüm verisine dönüştürmüş ve bu sonuçları üç boyutlu olarak ölçülen sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Ayrıca Barton-Bandis makaslama kriterine göre kesme dayanımını tahmin etmek için iki boyutlu pürüzlülük parametresi olan $\theta^*_{\max}/(C+1)_{2D}$ ile JRC arasında ampirik bir ilişki geliştirmişlerdir.

Asadi ve Rasouli (2012) sentetik ve doğal kaya pürüzlülüklerinin temas esnasında kırılma etkilerine ait mekanik davranışı ortaya koymuştur. Deneylerde normal gerilmenin artırılması ile pürüzlülüklerde hasarların aynı oranda arttığı değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün azalmasıyla kesme dayanımının azaldığı ortaya konulmuştur.

Önsel (2014) süreksizliklerin pürüzlülüklerinin hem arazi ortamında hem de laboratuvar ortamında ölçülebilmesi için düşük maliyetli ve kullanılabilir bir cihaz geliştirilmesini planlamıştır. Araştırmacı kamera ve lazer kullanarak süreksizlik yüzeyini tarayan bir cihaz tasarladıktan sonra tarayıcı verilerini kullanarak yüzey pürüzlülüklerini analiz eden bir düzenek geliştirmiştir. Yapılan çalışmada tasarlanan cihaz ve geliştirilen yazılımın

pürüzlülük ölçümlerinin belirlenmesinde %80'in üzerinde doğru sonuç verdiği tespit edilmiş olup, cihazın uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Zhang vd. (2014) mühendislik çalışmalarında sıklıkla kullanılan JRC değeri için yeni bir yaklaşım önermiştir. Çalışmada pürüzlülük eğim açısını, pürüzlerin genliğini ve yönlerini dikkate alan yeni bir indeks (λ) ortaya konulmuştur. Bu indeks ile JRC arasında bir fonksiyon geliştirilmiştir. Önerilen yöntem ve yapılan deneysel çalışmaların kıyaslanması ile yeni pürüzlülük indeksinin JRC'yi doğru bir şekilde belirlemek için kullanılabileceğini ortaya koymuştur. JRC değerinin, kesme dayanımının ve mekanik açıklığın iletken açıklığa oranının (E/e) λ 'ya göre hassaslığı da araştırılmıştır. Buna göre JRC, kesme dayanımı ve E/e oranlarının eğilimlerinin benzer olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca λ değeri 0,005-0,20 aralığında olduğunda bu parametrelerin λ değerine karşı hassas olduğu bulunmuştur.

Yang vd. (2015) yaptığı çalışmada, bir süreksizliğinin üç boyutlu morfolojisinin kayma davranışı üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Kayalarda kayma mekanizmasını ve kesme direncini belirlemek için süreksizliklerin pürüzlülük parametreleri belirlenmiştir. Yapılan pek çok çalışmada kayma yönü ile yakından ilişkili olan 3D morfoloji parametrelerinin anizotropi özelliklerinin deneysel olarak araştırılmadığını öne sürmüşlerdir. Yang vd. (2015) bu kapsamda 3 boyutlu morfoloji parametrelerine ve test sonuçlarına dayanarak ayrıca efektif pürüzlülük açısı değişim eğilimini de dikkate alarak kaya süreksizlikleri için doruk kesme dayanımına yönelik ampirik bir ilişki önermiştir.

2.4 Çok Aşamalı Doğrudan Kesme Deneyleri ile Süreksizliklerin Kesme Dayanımının Belirlemesine Yönelik Çalışmalar

Barton (2013) kaya kütleleri, süreksizlik dolgusu ve kaya kütlelerin kesme dayanım kriterleri ve bu konularda meydana gelen sorunlar ve olası çözümler üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu kapsamda, yetersiz numune durumlarına karşı aynı numune üzerinde gerçekleştirilen çok aşamalı deneylerde görünür kohezyonun geleneksel doğrudan kesme

deneyine kıyasla fazla çıkabileceğini öne sürmüştür. Pürüzlü süreksizliklerde düşük normal gerilmeler altında genleşmenin (dilasyon/dilation) meydana gelmesiyle yüksek sürtünme açısı elde edileceğini değerlendirmiştir.

ISRM (2014) veri kayıtları, kesme gerilmesi ve yer değiştirme grafiklerini kullanarak, geleneksel doğrudan kesme yöntemi ve çok aşamalı doğrudan kesme yöntemiyle elde edilen sonuçların değerlendirilmesini önermiştir. ISRM (2014) çok aşamalı deneylerde tekrarlı kesilme sonucu süreksizlik yüzeyinde hasarlı parçaların birikmesi ile görünür kohezyonun olduğundan fazla çıkmasına sebep olabileceğini belirtmiştir.

Petro (2019) süreksizliklerin doğası gereği benzer süreksizlik yüzeylerinin temin edilmesi oldukça zor olduğundan, tek numune üzerinde çok aşamalı deneyler gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada farklı pürüzlülük yüzeyine ve farklı boyutlara sahip numuneler üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Pürüzlülükler ölçümleri 3D lazer tarayıcı ile taranarak ortaya konulmuştur. Çalışmada sınırlı yer değiştirmeli çok aşamalı doğrudan kesme deney yöntemi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deney yöntemi sayesinde elde edilen sonuçlar ile geleneksel doğrudan kesme deney sonuçları arasında anlamlı bir ilişkinin yakalandığı belirtilmiştir.

MacLaughlin vd. (2019) süreksizliklerin doğası gereği aynı pürüzlülük yüzeyine sahip birden fazla numunenin temin edilmesinin zorluğundan dolayı, sınırlı yer değiştirmeli çok aşamalı doğrudan kesme deneyi (LDMDs) yöntemiyle tek bir kaya üzerinde çok aşamalı deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyler çimento ve kaya süreksizlikleri üzerinde yürütülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda bu yaklaşımın mevcut geleneksel deney prosedürlerine potansiyel olarak geçerli bir alternatif sağlayacağını belirtmiştir.

Gaines (2020) süreksizlikler içeren kumtaşları üzerinde yeniden konumlandırma var iken ve yok iken çok aşamalı doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada çeşitli metodolojiler kullanarak dayanım özellikleri arasındaki farkı yorumlamak amacıyla sınırlı yer değiştirmeli çok aşamalı deneyler de gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada her bir test yöntemi ile elde edilen dayanım farkları arasındaki ilişki belirlenmiştir. Deney

sonuçlarına göre, yeniden konumlandırma yapılmadan gerçekleştirilen çok aşamalı deneylerin, yeniden konumlandırma yapılanlara kıyasla nispeten daha az doğru olduğu değerlendirilmiştir. Bu durumun kesme yer değiştirmesi ilerledikçe küçük ondülasyonlar ile zayıf pürüzlerin kenetlenmesinden ileri geldiği öne sürülmüştür.

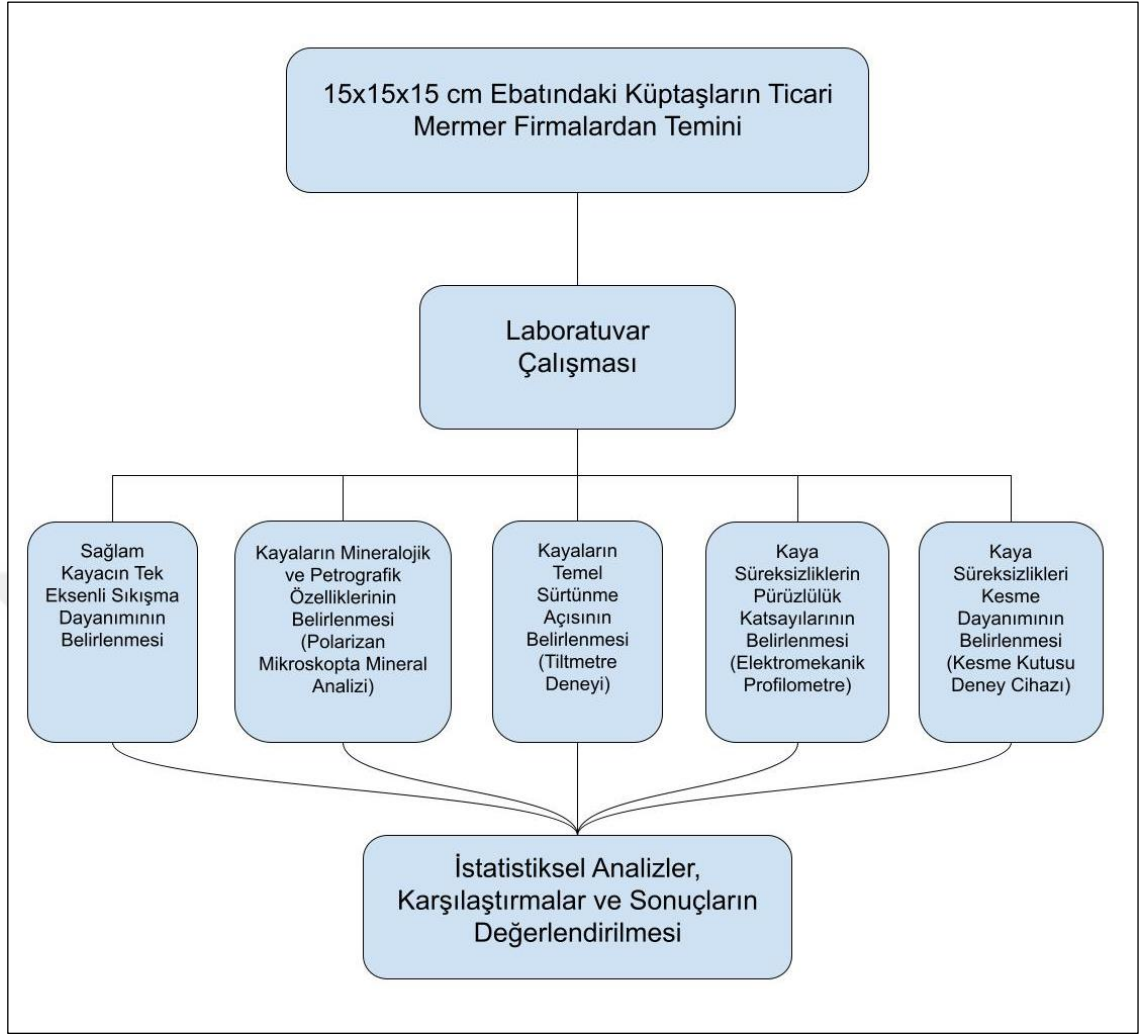
MacDonald vd. (2023) geleneksel doğrudan kesme deneyinde farklı sınır koşulları ve farklı prosedürler hakkında değerlendirmeler yapmıştır. Çok aşamalı kesme deneyleri esnasında numunenin tekrarlı olarak kesilmesi sonucunda pürüzlülüklerin hasar görmesi ile deney esnasında kesme gerilmesinin giderek düştüğünü belirtmişlerdir. Bununla birlikte, sınırlı bütçe veya numune yetersizliği nedeniyle çok aşamalı deney kullanılması durumunda deney uygulanması ve sonuçların değerlendirilmesi hususunda önerilerde bulunmuşlardır.

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Tez çalışması büro çalışması, malzemenin temini, laboratuvar çalışmaları ve deney sonuçlarının değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Büro çalışmasında kayaların kesme dayanımı ile ilgili kapsamlı literatür araştırması yapılmıştır. Malzemenin temini kapsamında, ticari mermer fabrikalarından temin edilen küptaşların özelliklerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvarda kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımı, temel sürtünme açısı ve pürüzlülük açısı tayin edilmiş ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Tez çalışmasına ait akış diyagramı Şekil 3.1’de verilmiştir.

3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve ekipmanlar tanıtılmıştır. Araştırmada malzeme olarak sadece kaya kullanılmıştır. Araştırmayla ilgili deneyler için kullanılan düzenekler karot alma makinası, karot kesme makinası, baltalı pres, profilometre, tiltmetre ve doğrudan kesme deney setidir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirilmesi ise SPSS (IBM SPSS Statistics, 2021) ve DATAFIT (Oakdale Engineering, 2008) yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney cihazlarının kullanılması ve deney numunelerinin hazırlanması aşamalarında ilgili standartlar ve prosedürlere uyulmuştur. Çalışmada kullanılan malzemelere ait ayrıntılar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1 Tez çalışmasında takip edilen eylem akış şeması

3.1.1 Kaya numuneleri

Süreksizlikler üzerinde yapılması gereken kesme dayanım testleri normal şartlarda doğal süreksizlik yüzeyleri içeren kayaların kullanılmasını gerektirir. Bu tez çalışması gibi parametrik bir çalışmada arzu edilen çeşit ve sayıda kaya numunesinin elde edilmesindeki pratik zorluklar ve ekonomik boyutu dikkate alınarak, deneylerde kullanılacak süreksizliklerin laboratuvar ortamında oluşturulması yoluna gidilmiştir. Bu çerçevede ihtiyaç duyulan numuneler çeşitli illerdeki taş kesim fabrikalarından temin edilmiştir (Çizelge 3.1). Taş kesim fabrikalarından elde edilen numuneler 15x15x15 cm boyutunda

olup, göz ile görülebilecek herhangi bir süreksizlik içermemesine dikkat edilmiştir. Deneyisel çalışmalarda kullanılmak üzere 30 çeşit kaya numunesi temin edilmiş olup numuneler farklı renk, dayanım ve türe (magmatik, metamorfik ve sedimenter kaya) sahiptir.

Çizelge 3.1 Numunelerin numaraları ve temin edildiği yerler

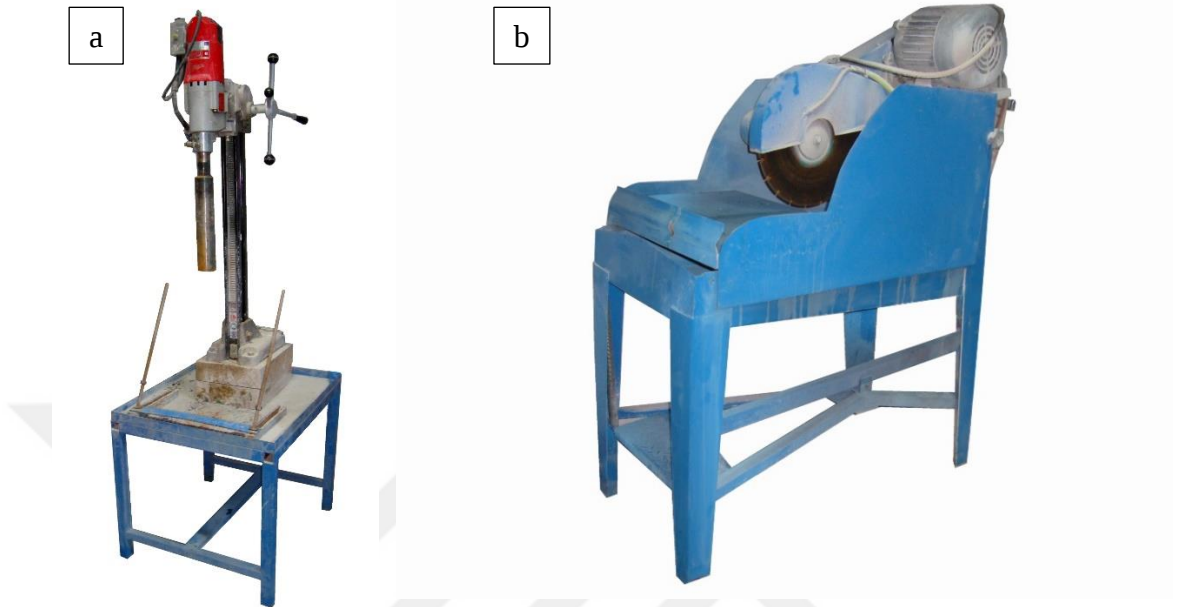
No	Yer		No	Yer		No	Yer
01	Sincan		11	Denizli		21	Kayseri
02	Bilinmiyor		12	Denizli		22	Kayseri
03	Antalya		13	Kütahya		23	Kayseri
04	Çorum		14	Afyon		24	Kayseri
05	Bilinmiyor		15	Afyon		25	Gölbaşı
06	Bilinmiyor		16	Aksaray		26	Beyşehir
07	Bilinmiyor		17	Aksaray		27	Kaman
08	Sivrihisar		18	Aksaray		28	Afyon
09	Afyon		19	Bayburt		29	Kayseri
10	Afyon		20	Ahlat		30	Mudurnu

3.1.2 Karot alma ve karot kesme makinaları

Tek eksenli sıkıştırma deneyinin yapılması amacıyla her kaya için karot alınacak küptaş numuneler dikkatlice incelenmiş olup çatlaksız olmasına özen gösterilmiştir. Numunenin hazırlanması işlemleri silindirik karot numune alınması, numunenin boy (L) ve çap (D) oranının standartlara uygun şekilde düzenlemesi, numunenin dairesel yüzeylerinin parlatılması ve gözlemsel olarak dikkatlice incelenmesi aşamalarını kapsamaktadır (ASTM 2002).

Karot alma işleminde yüksek ve düşük sertlikteki kaya türlerine uygun NX tipi (54,7 mm çapında) karotiyerler kullanılarak karot alınmıştır. Alınan karotların, yapılacak deneylerde doğru sonuç vermesi için çatlaklı olmamasına dikkat edilmiştir. Karotlar 15x15x15 cm küp numunelerinden alındığı için boy (L) ve çap (D) oranının standartlara uygun hale getirilmesi amacıyla elektrikli kesme cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.2). Karot

alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olması için yüzeyleri pürüzsüzleştirilmiş olup deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.2 Çalışmada kullanılan karotiyerden (a) ve karot kesme makinasından (b) görünüm

3.1.3 Baltalı pres

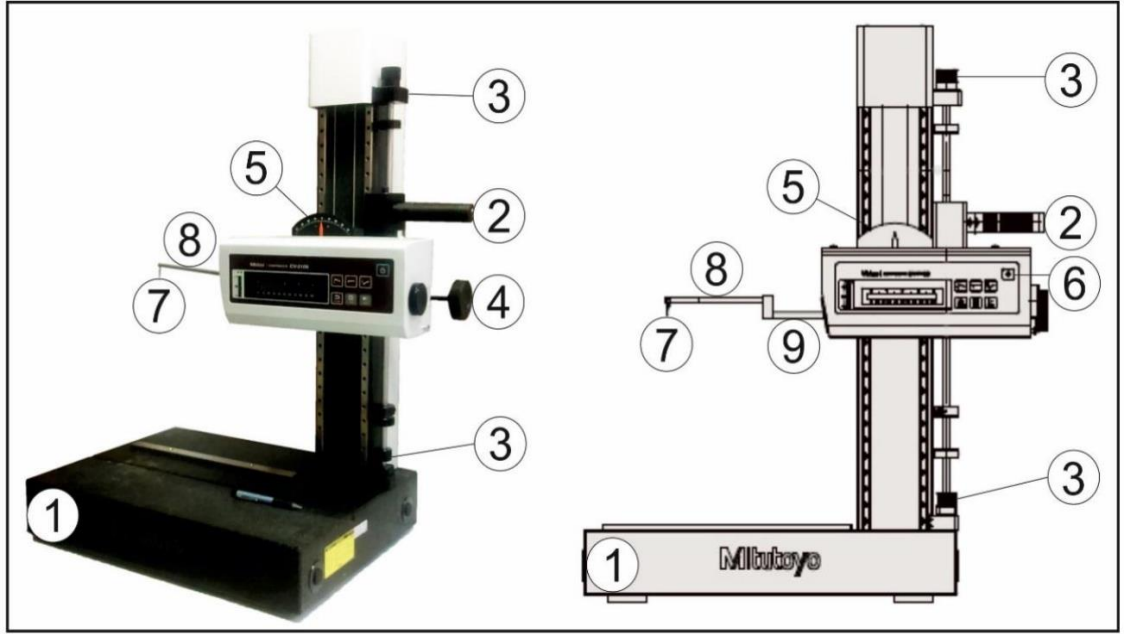
Statik yükler altında kesme deneylerinin yapılması amacıyla 15x15x15 cm boyutlarında numuneler üzerinde yapay süreksizlikler oluşturulmuştur. Bu yöntem, tek eksenli sıkışma deney düzeneğinin başlık kısmının modifiye edilerek kayalarda yapay süreksizlik oluşturabilen bir cihaza dönüştürülmesini içermektedir (Şekil 3.3). Baltalı pres ile numunenin yarılması sonucunda elde edilen süreksizlikler yapay süreksizlikler olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada kayalarda özdeş yüzey özelliklerine sahip süreksizliklerin elde edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.3 Baltalı pres cihazı ve aparatları

3.1.4 Profilometre

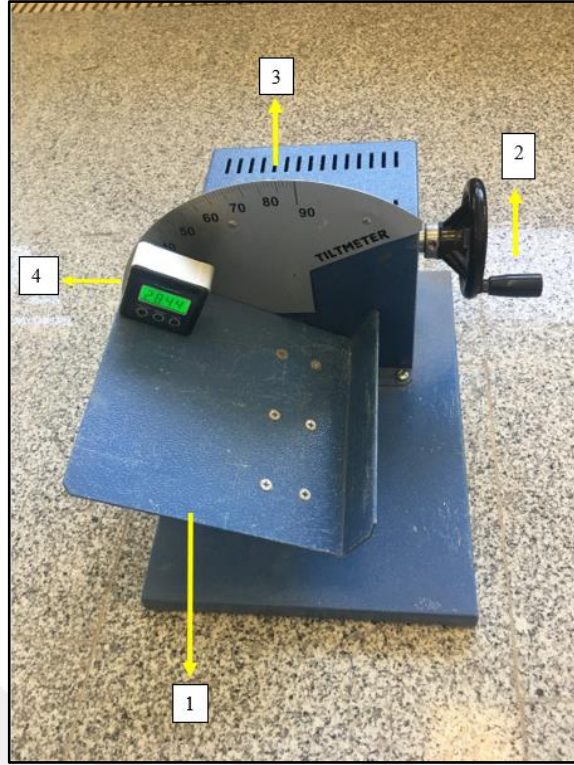
Laboratuvar ortamında oluşturulan yapay süreksizliklerin pürüzlülük açılarının ortaya konulması amacı ile Mitutoyo CV-2100 modeli cihaz kullanılmıştır. Mitutoyo CV-2100 (profilometre) düzeneği, yatay yönde 100 mm ve düşey yönde 50 mm ölçüm kapasitesine sahiptir. Ölçüm hızı 0,02-5 mm/s arasında değişmektedir. Profilometre cihazı 0,0001 mm hassasiyet ile yüzey pürüzlülük ölçümlerini yapabilme kapasitesine sahiptir. Profilometre deney cihazı hassas ölçüm iğnesinin malzeme yüzeyinde belirlenen hat boyunca ilerlemesi sırasında malzemede yer alan girinti ve çıkıntılardan geçilmesi ile yüzey profilinin ortaya konulması prensibine dayalı olarak çalışmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Profilometre deney cihazının detayları; 1) Kaide, 2) Aşağı yukarı ayarlama kolu, 3) İnce ayar düğmesi, 4) Ölçüm ünitesinin -45'ten +45 derecelik eğimini sağlayan düğmesi, 5) Açı paneli, 6) Açma kapama düğmesi, 7) Ölçüm iğnesi, 8) Ölçüm iğnesinin monte edildiği ikinci kol, 9) İkinci kolu ileri geri hareket ettiren ana kol ünitesi (Habibzadeh, 2020)

3.1.5 Tiltmetre

Tilt (eğdirme) deneyi, kayaların temel sürünme açılarını belirlemek amacıyla kullanılan bir deney yöntemidir. Araştırma kapsamında numunelerin temel sürtünme açılarını belirlemek için taşınabilir eğdirme deney düzeneğinden yararlanılmıştır (Şekil 3.5). Deney düzeneği numune yerleştirme tablası, döndürme kolu, eğim ölçeği ve alternatif olarak eklenen hassas eğim ölçeği dijital eğim ölçerden oluşur.

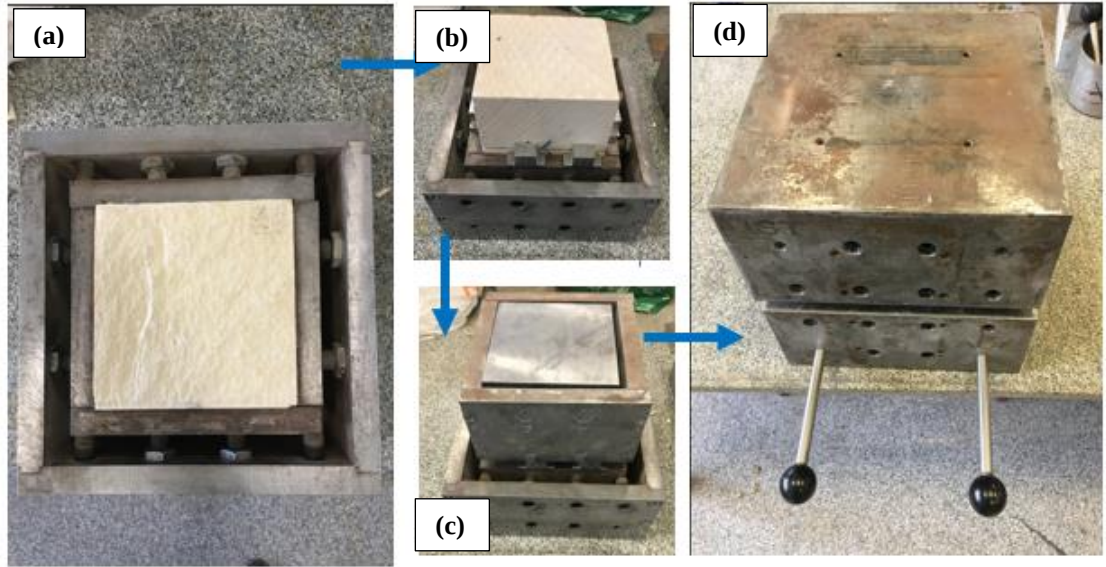


Şekil 3.5 Taşınabilir tiltmetre deney düzeneği, 1) Numune yerleştirme tablası, 2) Döndürme kolu, 3) Eğim ölçme skalası, 4) Dijital eğim ölçer

3.1.6 Doğrudan kesme deney seti

Doğrudan kesme deney düzeneği kesme kutusu ve doğrudan kesme cihazından oluşmaktadır.

Kesme kutusu setinde alt ve üst bölmesinde 4'er adet olmak üzere toplamda 8 adet plaka bulunmaktadır. Bu plakalar, kesme kutusunun her köşesinde yer alan yuvalara yerleştirilen civatalar aracılığıyla sıkılarak, kutuya yerleştirilen numunenin deney boyunca sabit kalmasını sağlar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Kesme kutusu düzeneği, a) Numunenin plakalar ile sabitlenmesi, b) Yükseltme aparatının yerleştirilmesi, c) Üst plakaların yerleştirilmesi, d) Üst kutunun ve tutacakların yerleştirilmesi

Yapay süreksizlikler içeren kayaların kesme dayanımının tayininde yatay ve düşey yönlerde aynı anda 10 Hz'e kadar değişik frekanslarda dinamik ve statik yükleme yapabilen Wille marka bir makine (model No.: LO 51000) kullanılmıştır. Cihaz üzerinde yer alan iki adet hidrolik pompa ile normal ve kesme yükleri uygulanmaktadır. Kapasitelerine bağlı olarak 300 kN'luk normal ve kesme yükleri uygulanabilmektedir. Statik (monotonik) ve tekrarlı (dinamik) kesme özelliğine sahip olan cihaz, HBM 1-WA/10MM-T yer değiştirme göstergeleri vasıtasıyla normal ve kesme yer değiştirmelerini % 0,5 hassasiyet ile ölçebilmektedir. Cihazda düşey ve yatay deformasyon ölçerler yer almaktadır. Yatay ve düşey deformasyon ölçümler LVDT (Linear Variable Differential Transducer) ile ölçülmektedir. Deformasyon ölçerler 0,001 mm hassasiyetine ve 25 mm ölçüm aralığına sahiptir.

Deney esnasında soğutma işlemi yapmak amacıyla sürekli akış sağlayan şebeke suyuna ihtiyaç vardır. Deney verilerini kaydetmek için veri toplayıcı ve incelemek için ise yüksek çözünürlüklü dönüştürücüler kullanılmaktadır. Deney sonuçları LO-51000 cihazı

GEOsys uygulaması ile kontrol edilmiştir. Bu uygulama ölçüm sistemi, kontrol üniteleri ve veri toplama ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Araştırmada kullanılan kesme kutusu cihazının değişik açılardan görünümü

3.1.7 SPSS yazılımı

SPSS (Statistical Package for the Social Sciences - Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi), anket verileri, deneyler sonuçları ve gözlemsel analiz sonuçları ve daha pek çok alanda elde edilen verilerin tam ve esnek bir şekilde analiz edilmesini sağlayan bir bilgisayar programıdır. Verilerin kapsamlı bir şekilde işlenmesi ve dönüştürülmesi olanaklarına

sahiptir. Hem basit hem de oldukça karmaşık istatistiksel analizler için çok çeşitli prosedürler uygular (Frude 1987).

SPSS özellikle sosyal bilimler, psikolojik araştırmalar, sağlık, finans, ulaşım, eğitim, ekonomi ve mühendislik gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra pazarlama araştırmaları, kamu politikaları, sağlık hizmetleri ve eğitim gibi alanlarda da sıkça tercih edilir. Yazılım veri toplama, düzenleme, analiz ve raporlama süreçlerini kolaylaştırarak hızlı bir şekilde sonuçların yorumlanmasını sağlar. Ayrıca veri analizi, veri yönetimi, veri madenciliği ve istatistiksel modelleme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Program faktör analizi, kümeleme analizi, regresyon analizi gibi birçok istatistiksel tekniği destekler.

3.1.8 DATAFIT yazılımı

DATAFIT doğrusal ve doğrusal olmayan çoklu regresyon analizlerinin gerçekleştirilmesine yardımcı olmak için geliştirilen bir uygulamadır. DATAFIT 20'ye kadar bağımsız değişkenle doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modellerini işleme kapasitesine sahiptir. Uygulama, genellikle bilimsel ve istatistiksel araçlarda kullanılan, önceden tanımlanmış çok çeşitli iki ve üç boyutlu doğrusal olmayan regresyon modelleri arasında seçim yapılmasını sağlar. Doğrusal olmayan regresyon işlemlerini gerçekleştirmek için Levenberg-Marquardt yöntemini kullanır. Doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon modu tek bir modele, model gruplarına veya mevcut tüm modellere uygulanabilir. Uygulamanın bir diğer kullanışlı özelliği, regresyon modelleri artık kareler toplamı ve korelasyon katsayısı gibi farklı kriterlere göre çözüldüğü için otomatik sıralama moduna izin vermesidir. Uygulama, her çözülmüş regresyon modeli hakkında gözlem sayısı, eksik gözlemler ve doğrusal olmayan yinelemeler, artıkların toplamı, ortalama artık, çoklu belirleme katsayısı, varyans analizi ve girilen, hesaplanan ve artık verilerle ilgili ayrıntıları içeren veri tablosu gibi kapsamlı raporlar görüntüler (Oakdale Engineering, 2008).

3.2 Çalışmada Kullanılan Yöntemler

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan yöntemler tanıtılmıştır. Mineralojik-petrografik tanımlamaların nasıl yapıldığı, tek eksenli sıkışma deneylerinin hangi standartlara göre ve nasıl gerçekleştirildiği, temel sürtünme açılarının tayininde tiltmetrenin nasıl kullanıldığı, ikinci derece düzensizlik açılarının hangi enstrümanla ve nasıl tayin edildiği ve son olarak da çalışmanın bel kemiğini oluşturan doğrudan kesme deneyi için yapay süreksizliklerin ne şekilde oluşturulduğu, deney numunelerinin teste uygun hale nasıl getirildiği ve deney düzeneğinde ne şekilde test edildiği hususları izleyen altbölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2.1 Mineralojik-Petrografik özelliklerin belirlenmesi

Bu araştırmada kullanılan değişik kaya türlerinin mineralojik/petrografik tanımlamasında Leica-DM500 model polarizan mikroskopu kullanılmıştır. Tüm kayalar için ince kesitlerin hazırlanması, mikroskop incelemesi ve petrografik analizlerin yapılması adımları takip edilmiştir. Yapılan çalışmada, kaya dokusu, varsa özel dokusu, bozuşma durumu ve bileşimi ortaya konmuş ve kaya tanımlaması yapılmıştır.

3.2.2 Tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi

Tek eksenli sıkışma deneyi kayaların mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde, kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında, uygun kazı tekniğinin belirlenmesinde ve jeoteknik çalışmalar kapsamında sıklıkla kullanılabilmektedir. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) bu deney yöntemini standartlaştırmıştır (ASTM, 2002).

Kaya bloklarından NX (54,7 mm) çapında ve 110 mm boyunda karotlar alınmıştır. Her kaya türü için 5'er adet karot alınmıştır (Şekil 3.8). Karot numunelerinin alt ve üst yüzeyleri pürüzsüzleştirilmiştir. Alt ve üst yüzeylerin birbiri ile paralel ve uzun eksene dik olmasına özen gösterilmiştir.

Tek eksenli sıkışma deneyi çalışmaları kapsamında düşey yönde sabit hızda ve sürekli olarak yükleme yapabilen 1000 kN yükleme kapasitesine sahip bir hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 3.2). Deneylerden önce küresel yükleme başlığının rahatça yuvasında dönebilmesi kontrol edilmiştir.



Şekil 3.8 Tek eksenli sıkışma deneyine hazır hale getirilen numuneler

ASTM D2938 (2002) yönergesine uygun şekilde hazırlanan numunelere yatay ve düşey deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Eksenel yükün numuneye homojen dağılmasını sağlamak amacıyla karot numunenin altına ve üstüne oynar eklemlili çelik diskler

yerleştirilmiştir. Deney başlatılmadan önce bilgisayardan tek eksenli sıkışma deney uygulaması açılıp verilerin takibi sağlanır. Numuneye uygulanan yük hem makine ekranından hem de bilgisayar yazılımı ile izlenip kayıt altına alınır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Tek eksenli sıkışma deney düzeneğinin görünümü

3.2.3 Yapay süreksizlik yüzeylerinin elde edilmesi

Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının belirlenmesi ve statik yükler altında kesme deneylerinin yapılması için 15 cm’lik küptaşlar temin edilmiş ve laboratuvar ortamında yapay süreksizlikler oluşturulmuştur. Kayalarda yapay süreksizlikler oluşturulurken, tek eksenli sıkışma deney düzeneği başlığı modifiye edilerek kayalarda yapay süreksizlik oluşturma cihazına dönüştürülen baltalı pres kullanılmıştır (Şekil 3.10).

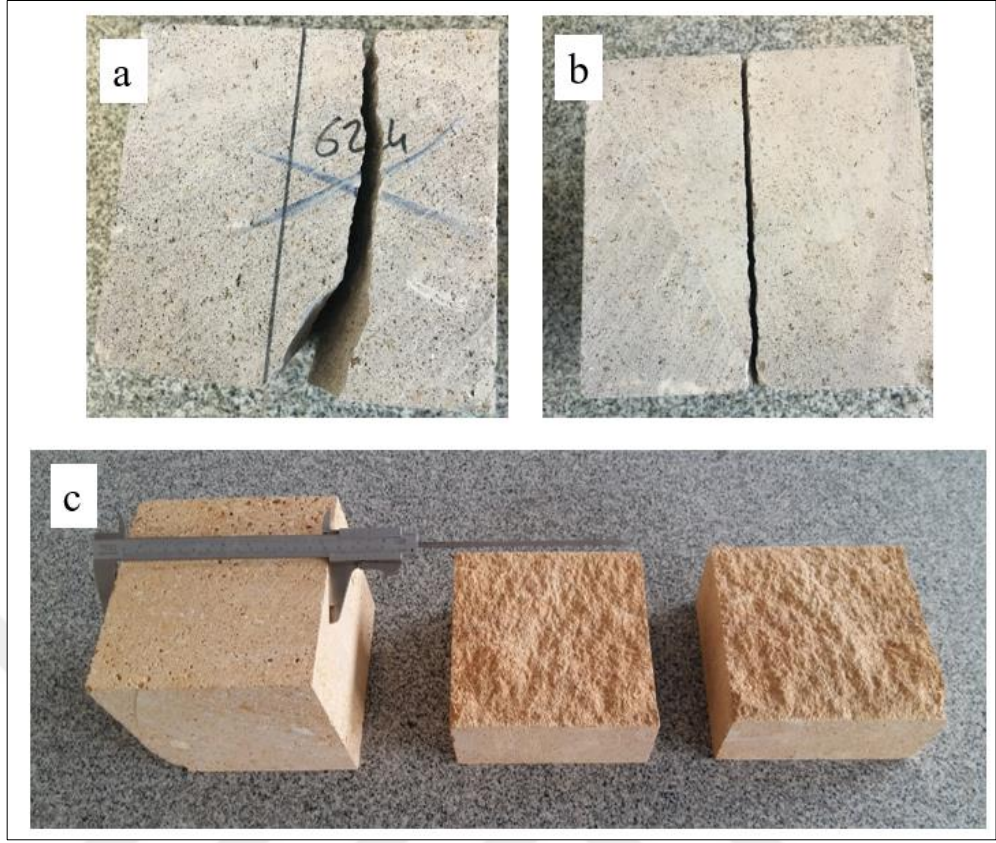
Çalışmada karşılaştırma yapabilmek için deneylerde kullanılacak numunelerin özdeş olması önemlidir. Bu sebeple, kübik numuneler tam ortadan, kesme yönüne paralel olacak şekilde bir klavuz hat çizilip bu hat boyunca yarılmıştır. Baltalı pres ile numunenin

yarılması sonrasında elde edilen süreksizlikler yapay süreksizlik olarak tanımlanmıştır. Yapılan deneyler bu süreksizlik yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10 Baltalı pres düzeneğinde kübik numunelerde yapay süreksizlik oluşturulması

Küptaşlar baltalı pres ile yarıldığında sonucun Şekil 3.11.a'da gösterildiği gibi olması durumunda yapay süreksizlik şartı sağlanamamıştır. Yarma işlemi Şekil 3.11.b'de görüldüğü gibi, oluşturulan yüzeyin küptaşın alt ve üst yüzeyleri ile eşdüzlemsel olduğu durumda deney yapmaya elverişli numuneler elde edilmiştir. Süreksizlik yüzey profilleri, pürüzlülük ölçümleri ve kesme deneyleri Şekil 3.11.c'de görüldüğü gibi yarılan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



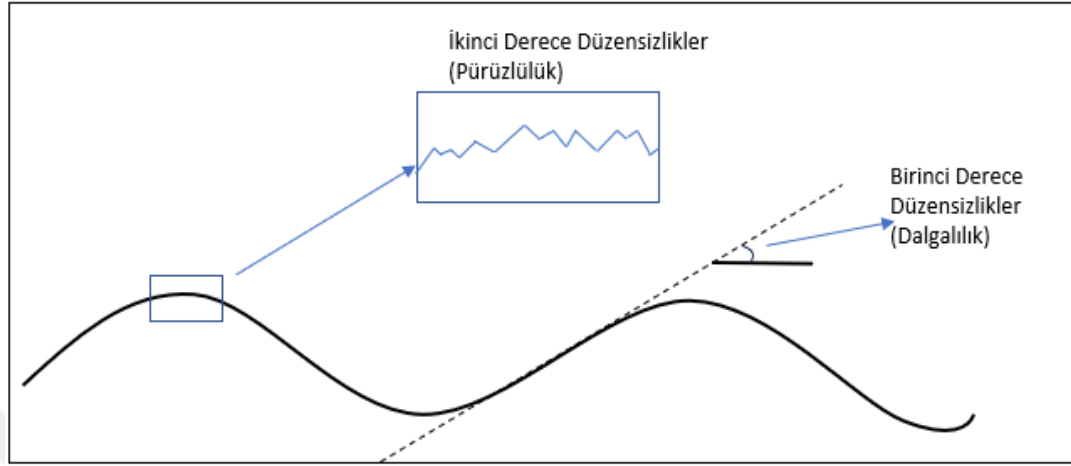
Şekil 3.11 Yapay süreksizliklerin oluşturulması a) Eğrisel yüzeyli yapısından dolayı deneye uygun olmayan numune, b) ve c) Deneye uygun numuneler

3.2.4 Pürüzlülük açılarının belirlenmesi

Süreksizlik düzlemleri kaya tipi ve doğal yapının etkisi ile rastgele dağılım gösteren pürüzlü şekillerden meydana gelir. Pek çok araştırmacı (örnek: Patton 1966, Barton 1976, Barton ve Choubey 1977, Ladanyi ve Archambault 1977, Maerz vd. 1990) süreksizlik düzlemlerinin pürüzlülük geometrisi, yüzey pürüzlülüğünün sertliği gibi faktörlerin süreksizlik kesme dayanımına etkisi konusunda çalışmalar yapmıştır.

Süreksizliklerin düzlemlerinin geometrisi süreksizliklerin kesme dayanımını etkileyen parametrelerden biridir. Süreksizlik düzlemlerinin gösterdiği düzensizlikler birinci derece ve ikinci derece olmak üzere iki gruba ayrılır. Birinci derece düzensizlikler dalgalanmalı, düzlemsel ve basamaklı olarak karakterize edilirken, ikinci derece

düzensizlikler pürüzlü, düz ve kayma çizikli olarak sınıflanır (Wylie ve Mah 2004). Birinci derece ve ikinci derece düzensizlikler şekil 3.12’te sunulmuştur



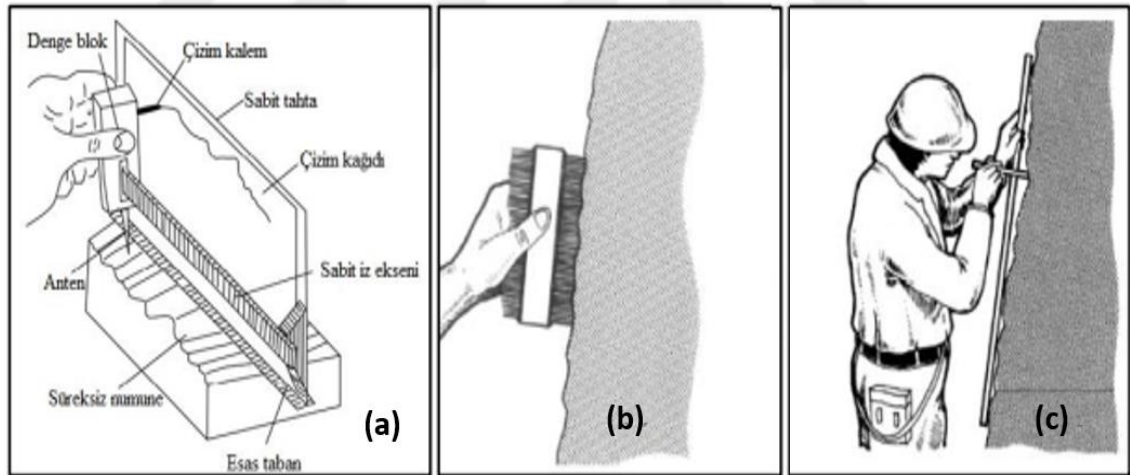
Şekil 3.12 Birinci ve ikinci derece süreksizlikler (Patton, 1966’dan değiştirilerek düzenlenmiştir)

Süreksizlik dayanımlarının sağlıklı bir şekilde irdelenebilmesi için süreksizlik geometrisinin de ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Süreksizliklerin pürüzlülük özelliklerini yerinde ve laboratuvarında belirlemek için bazı yöntemler geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu yöntemler temaslı yöntem ve temassız yöntem olmak üzere iki kategoriye ayrılmıştır.

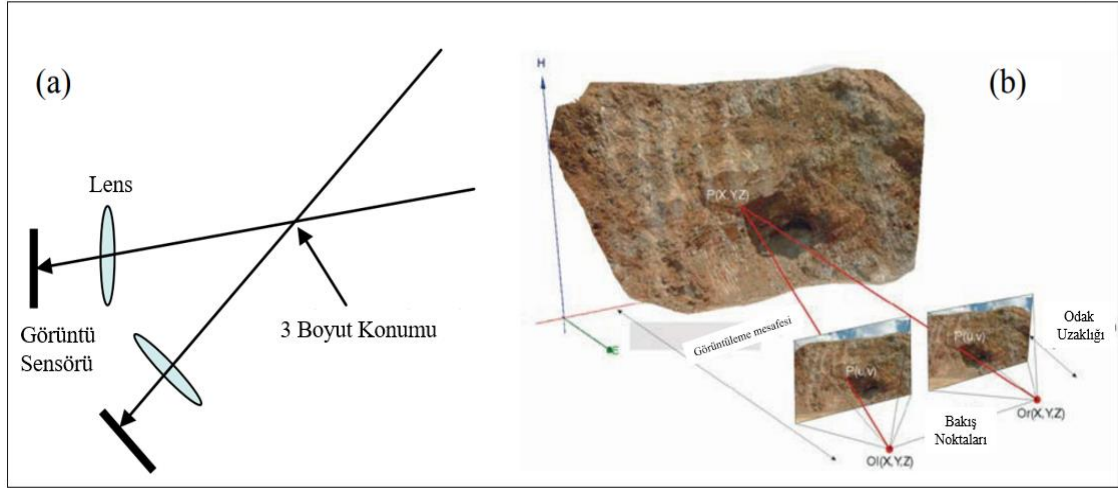
Temaslı yöntem için çeşitli alet ve metodlar geliştirilmiştir. Bunlar doğrusal profil metodu (Fecker ve Rengers 1971, Weissbach 1978, Shigui vd. 2009), pusula ve disk-klinometre metodu (Fecker ve Rengers 1971), profil tarak metodu (Barton ve Choubey 1977, Stimpson 1982), düz kenar ve cetveller metodu (Piteau 1970; Milne vd. 1991), gölge profilometre metodu (Maerz vd. 1990), teğet düzlemi ve sabit pimli örnekleme metodudur (Rasouli ve Harrison, 2004). Temaslı yöntemler ucuz, kolay, doğru ve sahada büyük ölçekli pürüzlülük ölçümü yapmaya veya laboratuvarında küçük ölçekli pürüzlülük ölçümü elde etmeye uygun olması gibi avantajlara sahiptir. Buna karşılık, geniş alanlarda tehlikeli ve erişilmeyen yerlerde ölçümlerin alınmaması ve zaman alıcı olması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Feng 2003).

Temassız yöntemde kaya süreksizlik yüzeylerinin geometrisini iki boyutlu veya üç boyutlu olarak elde etmek amacıyla çeşitli alet ve metodlar bulunmaktadır. Bunlar fotogrametri yöntemi (Wickens ve Barton, 1971; ISRM 1978), görüntü işleme metodu (Galante vd. 1991), ileri topometrik sensör sistemi (Grasselli ve Egger 2003), lazer tarama (Fardin vd. 2004; Hong vd. 2006; Rahman vd. 2006) ve benzeri metotlardır. Temas yöntemi ile karşılaşılan dezavantajlar, temassız yöntemler kullanılarak aşılabilmektedir (Nguyen 2013)

Temaslı ve temassız yöntemler ile sahada ve laboratuvar ortamında süreksizliklerin pürüzlülük açılarının belirlenmesi için geliştirilen aletler ve metotlara örnekler Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Süreksizliklerin pürüzlülük ölçümü a) Pürüzlülük ölçümü için basit profilograf (Shigui vd., 2009) b) Süreksizliklerde pürüzlülük ölçmek için marangoz tıraşının kullanılması c) Süreksizliklerin dalgalılığını ölçmek için teğet düzlem yönteminin kullanılması (Milne vd. 1991)



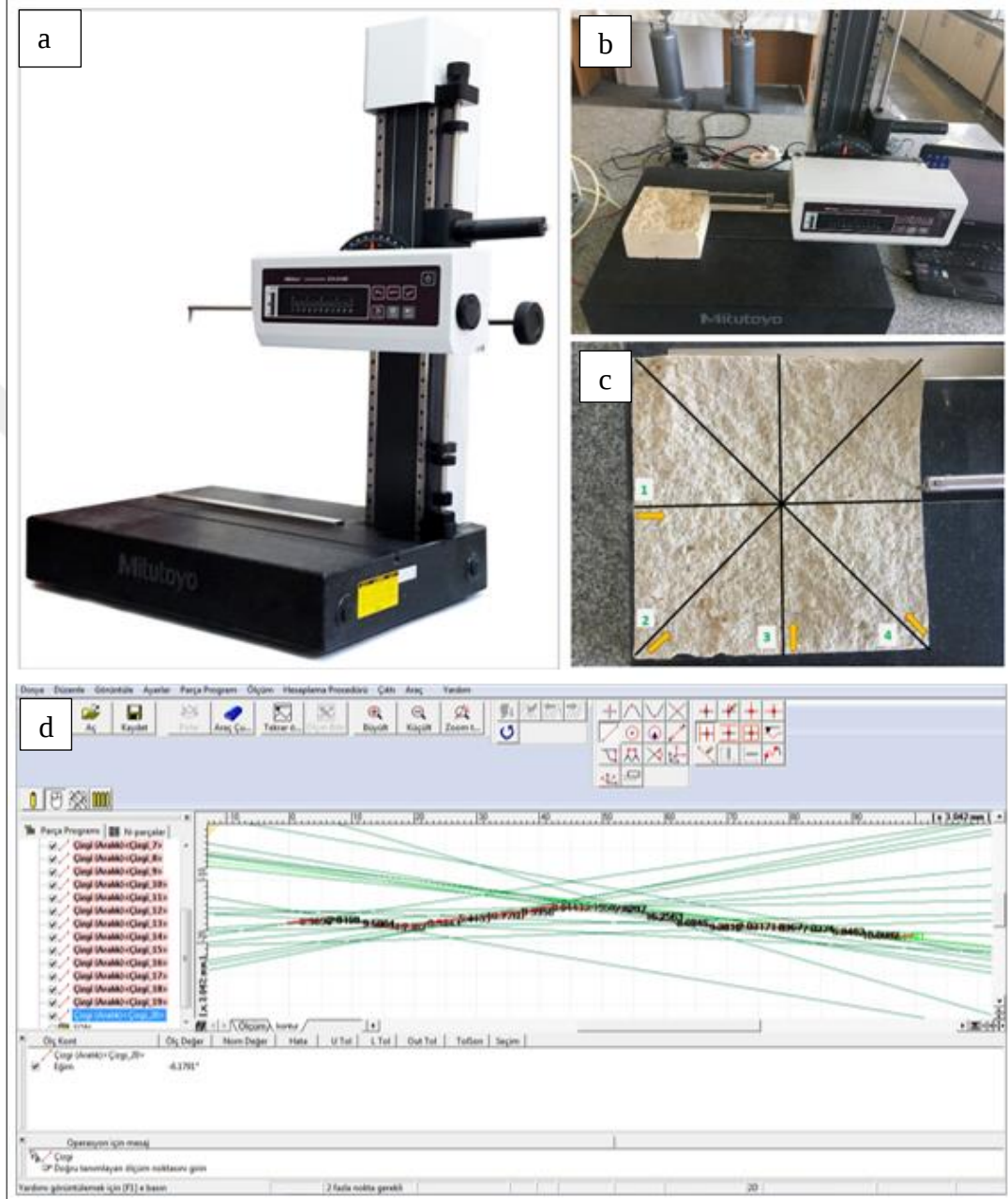
Şekil 3.14 Fotogrametri prensibi ile pürüzlülük haritalaması (Birch 2006, Gaich vd. 2006)

Bu tez çalışması gibi parametrik bir çalışma için gerekli olan çeşit ve sayıda doğal süreksizlik yüzeyi bulmanın pratik güçlüğü ortadadır. Sadece bir çeşit kayaya ait uygun bir mostra bulmanın ve bu mostradan süreksizlik deneyleri için yeterli sayıda ve “özdeş” süreksizlik geometrisi içeren deney numunesi kesmenin ve bu işlemi dayanımı geniş bir aralıkta değişen çok sayıda kaya çeşidinde yapmanın doğuracağı güçlükler nedeniyle bu çalışmada yapay süreksizlikler üzerinde çalışılması planlanmıştır.

Bu çalışmada ortadan ikiye yarılan numunelerde yapay süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının belirlenmesi için elektromekanik profilometre kullanılmıştır. Profilometre cihazı yatayda ve düşeyde 0,1 mikron hassasiyetle iki boyutlu hat taraması yapabilme kabiliyetine sahiptir.

Hat taramaları yapan ölçüm iğnesi tutucu bir kol vasıtasıyla sürücü ünitesine bağlıdır. Ölçüm iğnesi malzeme yüzeyinden belirlenen hat boyunca geçmesi esnasında girinti ve çıkıntılardan geçerken düşey ekseninde hareket eder. Böylece meydana gelen düşey yöndeki yer değiştirmeler elektro-mekanik dönüştürücüler vasıtası ile elektrik sinyallerine dönüştürülürler. Meydana gelen elektrik sinyalleri dönüştürücüden geçirilmesi ile pürüzlülük ve dalgalılık ölçüm sonuçlarının belirlenmesi için veriler üç farklı işlemci tarafından çözülür. Düşük geçirimli sinyallerinin dalgalılık belirleme

işlemcisi tarafından çözümlenirken, yüksek geçirimli sinyaller pürüzlülük belirleme işlemcisi tarafından çözümlenip kaydedici tarafından kaydedilir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Profilometre cihazı ile süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının ölçülmesi; a) Elektromekanik profilometre genel görünümü, b) Ölçüm tablasına yerleştirilmiş numune, c) Süreksizliklerde ölçüm alınan hatlar, d) Yüzey taramaları sonucunda elde edilen profil

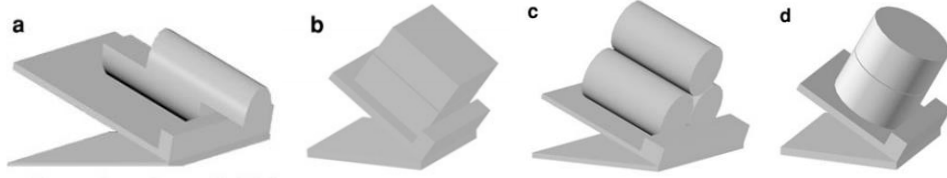
Profilometrenin tek seferde en fazla 100 mm (10 cm) ölçüm kapasitesine sahip olmasından dolayı bir hat boyunca yapılan ölçümler 2 aşamada tamamlanmıştır. Ölçüm tablasına yerleştirilen numunenin hareket etmemesine özen gösterilmiştir. Süreksizlik yüzeylerinde ölçüm iğnesinin hat boyunca gezdirilmesi esnasında eş zamanlı olarak ölçüm hattına ait profil bilgisayara aktarılır. Tarama yüzeyi bilgisayara aktarıldıktan sonra programda yer alan ölçüm araçları vasıtasıyla en az 20 adet pürüzlülük açısı belirlenmiştir. Her kaya türü için elde edilen tüm sonuçların aritmetik ortalaması alınarak, ilgili kaya türüne ait pürüzlülük açısı tayin edilmiştir.

3.2.5 Temel sürtünme açılarının belirlenmesi

Hoek ve Bray (1974) süreksizlik yüzeylerinin kayma mukavemetinin bir eğdirme testi ile tahmin edilebileceğini öne sürmüştür. Deney düzeneğine konulan numunenin ilk hareket ettiği eğimin sürtünme açısı olduğu değerlendirilmiştir. Cawsey ve Farrar (1976) karbonat kaya (chalk) numunelerinin süreksizlik yüzeyleri boyunca hareket esnasında sürtünme açılarını belirlemek için eğim ölçer düzenekli masa kullanmıştır. Bu testin yerinde (in situ) yenilme koşullarını, geleneksel doğrudan kesme testi kadar yakın simüle ettiğini öne sürmüştür. Sonuçların geleneksel doğrudan kesme testlerinde ve üç eksenli testlerde bulunanlara benzer olması nedeniyle eğdirme deneyinden elde edilen açının ϕ_p (doruk sürtünme açısı) olarak ölçüldüğü sonucuna varmıştır. Barton ve Choubey (1977) düz kesilmiş kaya yüzeylerinde eğimli bir masa kullanarak sürtünme açısını elde etmeye çalışmıştır (Bruce vd. 1989).

Literatürde tiltmetre deneyi için birbirinden farklı geometrilere sahip numuneler kullanılmıştır (Stimpson 1981, Alejano 2012, González vd. 2014, Alejano 2018). Bunlar; uzunlamasına kesilmiş karot kurulum, dikdörtgen blok kurulum, Stimpson yöntemi olarak adlandırılan üç karotlu kurulum, yatay olarak kesilmiş karot kurulum olmak üzere tiltmetre deneyinde temel sürtünme açısını belirlenmesinde kullanılan başlıca kurulumlardır (Şekil 3.16). Çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen tiltmetre deneylerinde kayaların farklı fiziksel özelliklerinin (yön, kalınlık, pürüzlülük, kayma yüzeyinin/düzleminin şekli, kesim esnasında testere izi etkisi vb. özelliklerin) sürtünme

açısına etkisinin de araştırıldığına rastlanmaktadır (Bruce 1989, Chryssanthakis 2003, Perez-rey vd. 2015, Rahim 2018).



Şekil 3.16 Deney çalışmalarında tiltmetre testi için kullanılan farklı kurulumlar a) Uzunlamasına kesilmiş karot kurulum, b) Dikdörtgen blok kurulum c) Üç karot kurulumu ve d) yatay olarak kesilmiş karot kurulum (Alejano vd. 2012)

Jang vd. (2018) tiltmetre deneyinde kullanılan numunelerin testere ile kesilmesi sonucunda numunelerin pürüzsüz olarak kabul edilen yüzeylerinde testere izlerinin meydana geldiğini öne sürmüştür. Jang vd. (2018) çalışmasında testere izli yüzeylerin numunelerin temel sürtünme açılarını tam olarak yansıtmadığını, bu yüzeylerde ölçülen temel sürtünme açılarının belirgin bir saçılım gösterdiğini tespit etmiştir. Bunun önlenmesi amacıyla, testere ile kesilmiş yüzeyler 100 No.'lu ince zımpara ile pürüzsüzleştirdikten sonra temel sürtünme açıları belirlemiştir.

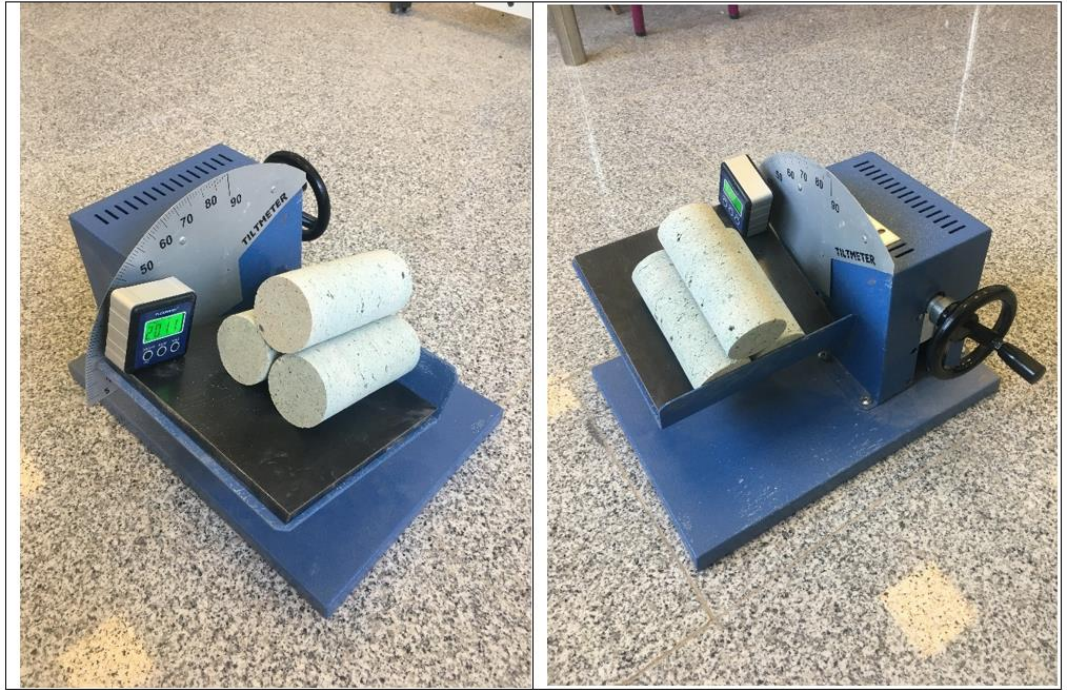
Bu araştırmada kullanılan tüm kaya numunelerinin temel sürtünme açılarını tayin etmek için bir tiltmetre düzeneği kullanılmıştır. Tiltmetre deney düzeneği numune yerleştirme tablası, döndürme kolu ve eğim ölçme skalasından oluşmaktadır.

Tiltmetre deneyleri üç farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bunlar silindirik karot numuneleri, testere izli dikdörtgen şekilli düz yüzeyler ve 100 No.'lu ince zımpara ile aşındırılmış yüzeyler üzerinde yapılan deneylerdir. Doğru ve anlamlı sonuçlar elde edilmesi amacıyla her tiltmetre yöntemi için her bir kaya türünden 15'er adet deney gerçekleştirilmiştir.

Karot Numunelerde Temel Sürtünme Açılarının Belirlenmesi: Kübik numunelerden alınan karotlar tek eksenli sıkışma dayanımı testi yapılmadan önce temel sürtünme

açısının belirlenmesi için kullanılmıştır. Her kaya türünden üçer adet karot numunesi alınarak tiltmetre deneyi ve ardından tek eksenli sıkışma testi yapılmıştır.

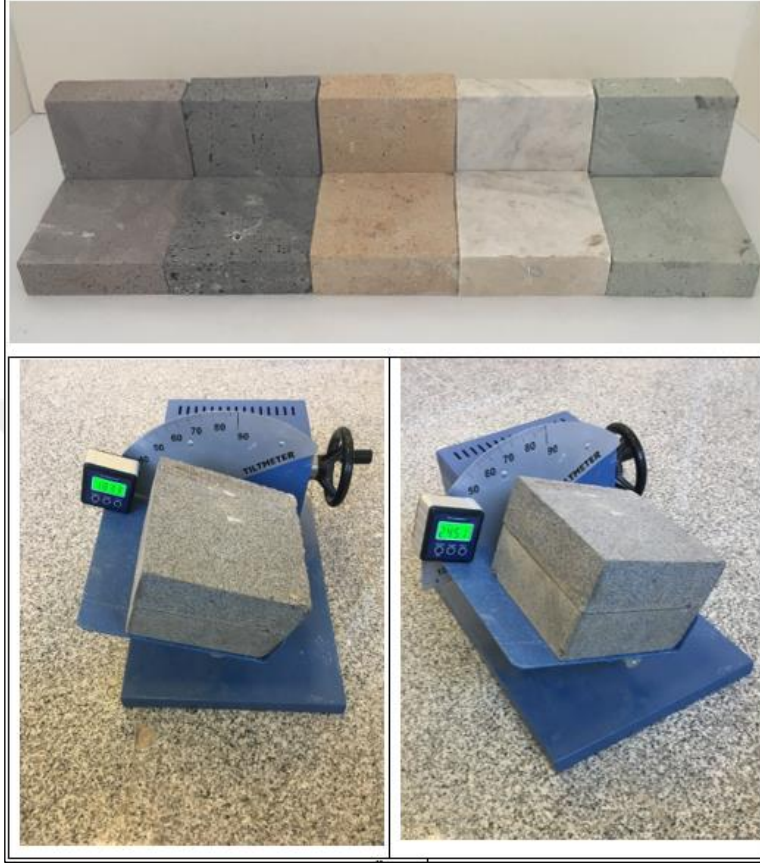
Temel sürtünme açısının belirlenmesi amacıyla altta iki adet karot numunesinin uzun eksenini eğim yönüne paralel ve yan yana yerleştirilmiş; sonra her iki karotun arasına-üste üçüncü karot yerleştirilir (Şekil 3.17). Daha sonra eğimlendirme kolu dikkatlice çevrilir. Tablaya yerleştirilen dijital eğim ölçer yardımıyla numunelerin eksen eğimleri (kayma/sürtünme açıları) hassas şekilde ölçülmüştür.



Şekil 3.17 Karot numunelerinde tiltmetre ölçümü

Testere İzli Blok Numunelerde Temel Sürtünme Açılarının Belirlenmesi: 15 cm'lik küp numuneler alt bölümünün kalınlığı en az 6 cm olacak şekilde kaya testeresi ile kesilmiştir. Kesme yüzeylerinin düz olmasına, numunelerde ovallik, testere kaynaklı girinti ve çıkıntılar olmamasına özen gösterilmiştir. Deneye uygun olmayan numuneler ayıklanmış, yerlerine yeni numuneler hazırlanmıştır. Kesme deneyinde kullanılacak tüm kayalar için blok numune hazırlama işlemi tamamlanmış, numaralandırılmış ve tiltmetre

deneyi için hazır hale getirilmiştir. Test için hazırlanmış bazı numuneler ve tiltmetredeki görünümü Şekil 3.18’de sunulmuştur.



Şekil 3.18 Düz yüzeyli numunelerde tiltmetre ölçümü

Testere ile ortadan ikiye bölünmüş numunenin alt parçası tablaya yerleştirildikten sonra üst parçası ile alt parçasının tüm yüzeyleri örtüşecek şekilde üst parçası üzerine yerleştirilmiştir. Döndürme kolu dikkatlice çevrilerek deney başlatılmıştır.

Zımparalanmış Yüzeylerde Temel Sürtünme Açılarının Belirlenmesi: Numuneler testere ile kesilmeden önce kesim yapılacak hat kılavuz yardımı ile kayanın ortasından geçecek şekilde çizilmiştir. Böylece testere ile numunenin kesilmesi esnasında herhangi bir düzlemden sapma veya eğrisel bozukluk olmasının önüne geçilmiştir.

İki eşit parçaya ayrılan numunelerin bu yüzeyleri 100 numaralı ince zımpara ile pürüzsüzleştirildikten sonra (Şekil 3.19) tiltmetre deneyleri yapılmıştır.

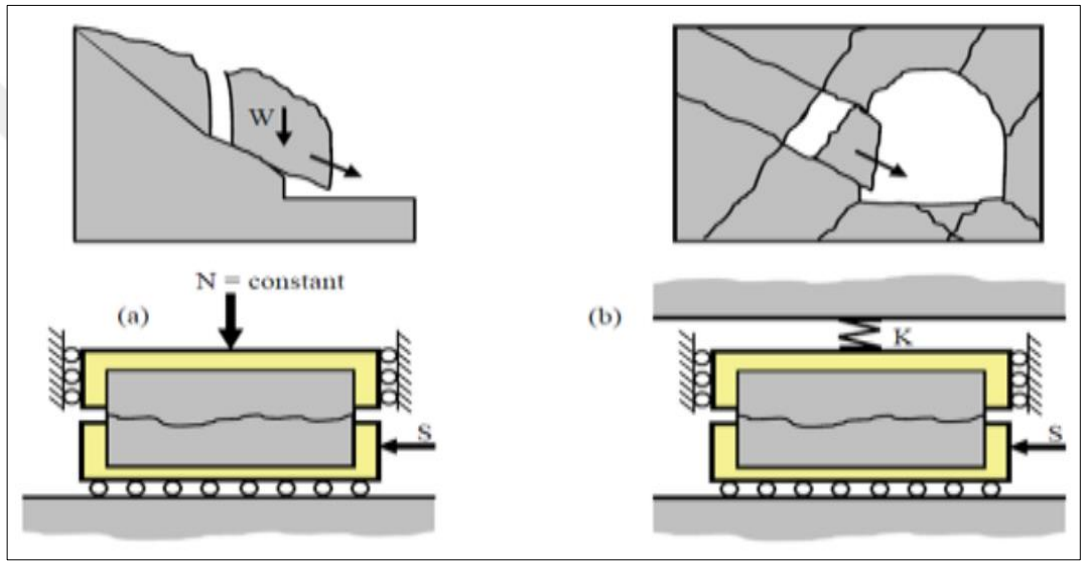


Şekil 3.19 Temel sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla kesilmiş ve zımparalanmış numuneler

3.2.6 Doğrudan kesme deneyleri

Doğrudan kesme deneyi süreksizliklerinin kesme dayanımının belirlenmesi amacı ile yapılan bir deneydir. Gerilme etkisindeki büyük yeraltı açıklıkları, karayolu şevleri, tüneller, maden ocakları vb. üzerine yük gelebilecek kaya ortamlarının kesme davranışının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu deney çoğunlukla laboratuvar ortamında yapılmakla beraber arazi koşullarında da uygulanabilen bir deneydir. Doğrudan kesme deneyi kesme kutusu cihazları ile yapılmaktadır.

Doğrudan Kesme Deney Yöntemleri: Süreksizliklerinin kesme davranışını araştırmak için laboratuvarında kullanılan genellikle iki temel yöntem bulunmaktadır. Bunlar sabit normal yük (CNL) ve sabit normal rijitlik (CNS) deneyleridir (Şekil 3.20). Kesme işlemi sırasında normal yükün sabit tutulduğu durumlar CNL olarak tanımlanır. CNL sınır koşulu altında kesme deneyi, çevresindeki kaya kütlelerinin genişlemeyi kısıtlamadan düzlemin kaymasına serbestçe izin verdiği, güçlendirilmemiş kaya şevleri gibi durumlar için uygundur. Bu nedenle kesme düzlemindeki normal yük Şekil 3.20.a’da gösterildiği gibi kesme işlemi sırasında sabittir.



Şekil 3.20 CNL yöntemi (solda) ve CNS yöntemi (sağda) ile kaya kesme dayanımının belirlenmesi (Brady ve Brown 2005)

CNS kesme işlemi sırasında normal rijitliğin sabit tutulduğu durumlar için uygulanır (Şekil 3.20). CNS sınır koşulu altında kesme testi genellikle derin yeraltı açıklıklarındaki veya çevredeki kaya kütlelerinin yeterince deforme olmadığı ve kesme düzlemine etki eden normal gerilmenin kesme işlemi sırasında sabit tutulmadığı kaya blonları-ankrajları ile güçlendirilmiş şevlerdeki davranışı araştırmak için uygundur. Bu durumda genişleme, çevredeki kaya kütlelerinin normal rijitliği tarafından kontrol edilir (Nguyen, 2013). Bu nedenle kayma düzlemindeki normal gerilmeler genişlemenin artması veya azalmasıyla sırasıyla artar veya azalır.

Bu tez çalışmasında yatayda ve düşeyde statik ve dinamik olarak 300 kN yükleme yapabilme kapasitesine sahip Wille Geoteknik tarafından imal edilen cihaz vasıtasıyla sabit normal yük yöntemi (CNL) ile kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deney numunelerin hazırlanması: Deneyde geleneksel yöntem için uygulanacak 0,5-1-1,5-3-5-7 MPa normal gerilme değerleri için yapay süreksizlik oluşturulan 6 adet numune, çok aşamalı yöntem için 1 adet numune özenle seçilmiş olup, numune numaraları ve uygulanacak normal gerilme değeri her numunenin üzerine yazılmıştır. Bütün numuneler kesme deneyi öncesinde fotoğraflanarak deney öncesi görünümü kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Kesme kutusu deneyi için hazırlanan numuneler

Kesme kutusu deneyi numunenin kesme kutusu kalıplarına yerleştirilmesi, kesme kutusu kalıplarının kesme kutusu deney düzeneğine yerleştirilmesi ve deneyin uygulanması aşamalarından oluşmaktadır.

Deney çalışmasının ilk aşamasında yarılan numunenin alt bölümü kalıbın içerisine yerleştirilir (Şekil 3.22). Numunenin her kenarına çelik plaka yerleştirildikten sonra deney esnasında numunenin sabit kalması ve hareket etmemesi için plakaların etrafında bulunan setskur civatalar iyice sıkılarak alt parça sabitlenir (b). Sabitlenen numune üzerine üst bölümü yerleşilir (c). Yükseltme aparatları yerleştirildikten sonra kesme kutusu üst plakaları dikkatlice numune kenarlarına ve üzerine konumlandırılır (d). Üst bölümde bulunan setskur civatalar sıkılıp numunenin üst parçası sabitlendikten sonra yükseltme aparatları çıkarılır (e). Numune artık deney cihazına yerleştirmek üzere hazır hale getirilmiştir. Numune dikkatlice deney düzeneği haznesine yerleştirilir ve yük uygulanmasına geçilir.



Şekil 3.22 Kesme deneyine hazırlık aşamaları

Wille marka deney cihazı başlatılmadan önce cihaz kapakları dikkatlice açılır, cihazın soğutucu ünitesine su sağlayan vana açıldıktan sonra motoru çalıştıran valf çevrilir. Cihazın bağlı olduğu bilgisayara yüklenen Geosys Premium uygulaması kullanılarak çalıştırılır.

Kesme kutusu kalıbının içerisine sabitlenmiş olan deney numunesi dikkatli bir şekilde cihaz içerisindeki haznesine yerleştirilerek cihaza ait bağlantı aparatlarının montajı yapılır. Hareketli makara şeklinde olan hazne, pistonun altına gelecek şekilde düzeneğe yerleştirilen işarete kadar itilir. Pistonun düşey hareketi ve diğer deney verilerini uygulamak amacı ile Geosys Premium programı kullanılmaktadır. Burada pistonun haznenin üst kısmında yer alan boşluğa yerleştiğini kontrol etmek için indirilen piston sağa sola hareket ettirilerek kontrol edilmektedir. Geosys Premium programı vasıtasıyla numune için belirlenen deney parametreleri girilerek deney başlatılır.

3.3 Süreksizliklerin Kesme Dayanımına Dair Önerilen Modeller

Bu bölümde süreksizliklerin kesme dayanımının ortaya konulması için önerilen ölçütler tanıtılmıştır. Süreksizliklerin kesme dayanımının ortaya konulması ve süreksizlik kesme dayanımına etki eden parametrelerin belirlenmesine yönelik çalışmalar pek çok araştırmacı tarafından yürütülmüştür (Patton 1966, Jaeger 1971, Barton 1971a, 1971b, Coulson 1972, Jaeger 1971, Goodman 1976, Lama 1978, Krahn ve Morgenstem 1979, Bandis vd. 1981, Hassani ve Scoble 1985, Hencher ve Richards 1989 ve Papaliangas vd. 1990, 1993, Maksimovic 1996, Huang vd. 2002, Grasselli ve Egger 2003 vb.). Bu çalışmalarda önerilen yöntemler oldukça çeşitli olup, bunlar genel olarak mekanik temelli, matematik temelli, grafik temelli ve enerji temelli olmak üzere dört ana model şeklinde gruplandırılabilir. Süreksizliklerin kesme dayanımına yönelik modeller çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Süreksizlik yüzeyleri genellikle pürüzlü bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte, daha az yaygın olarak düz yüzeylere de rastlanır. Doğada yoğun kesme kuvvetine maruz kalmış kaya ortamları düz yüzeye sahip olma eğilimindedir. Araştırmacılar düz yüzey ve pürüzlü

yüzeye sahip süreksizliklerin kesme dayanımına yönelik ölçütler öne sürmüştür. İzleyen alt bölümde süreksizliklerin kesme dayanımı için önerilen dayanım ölçütleri ve bu alanda yapılmış araştırmalara değinilmiştir.

Çizelge 3.2 Araştırmacılar tarafından önerilen kesme dayanım ölçütlerin karşılık geldiği modeller

Model Grubu	Araştırmacı(lar)
Mekanik Temelli Modeller	Patton (1966)
	Jaeger (1971)
	Barton (1973)
	Skinas vd. (1990)
Matematik Temelli Modeller	Goodman (1976)
	Heuze ve BarBour (1982)
	Indraratna vd. (1998)
	Grasselli ve Egger (2003)
Grafik Temelli Modeller	Saeb ve Amadi (1990, 1992)
Enerji Temelli Modeller	Ladanyi ve Archambault (1969)
	Johnston ve Lam (1989)
	Haberfield ve Johnston (1994)
	Seidel ve Haberfield (1995)
	Indraratna ve Haque (2000)
	Oliveira ve Indraratna (2010)

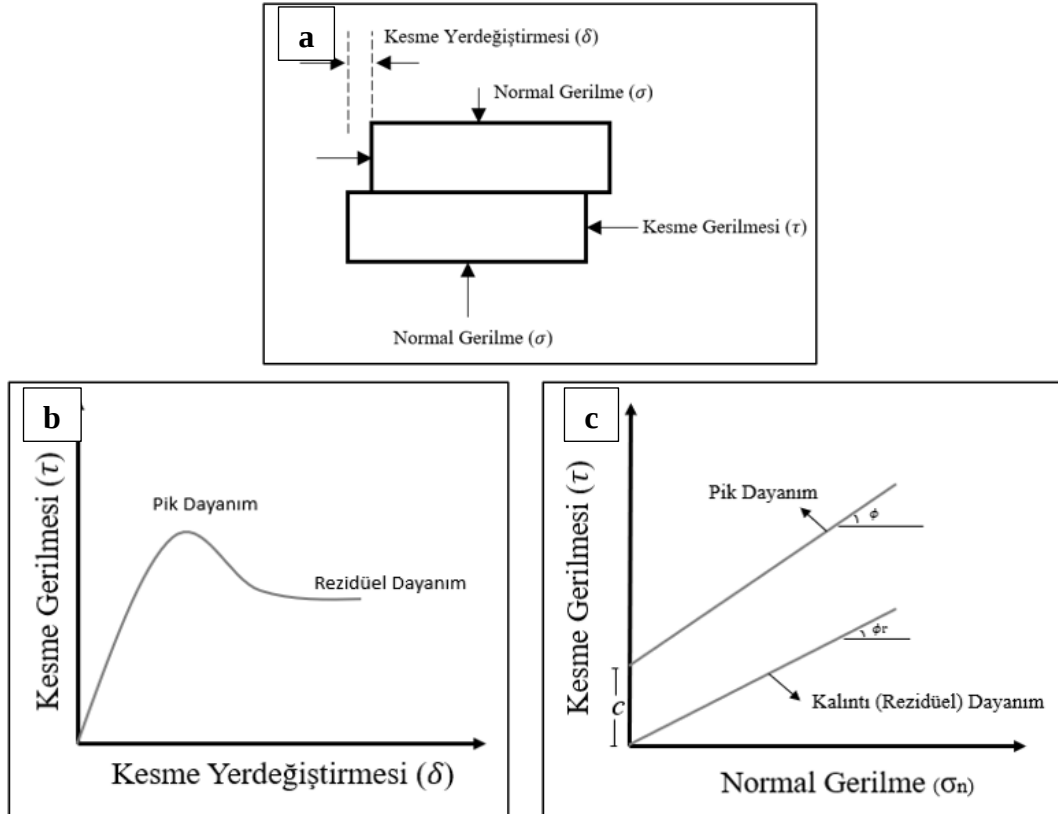
3.3.1 Mohr-Coulomb yöntemi

Doğrudan kesme deneyinde belli bir normal gerilme altında numuneye kesme kuvveti uygulanır ve bunun sonucunda yatay yönde bir yer değiştirme meydana gelir. Kesme kuvveti doruk değerine ulaştıktan sonra belli bir düşüşün ardından genellikle sabit olarak devam eder. Elde edilen yenilme zarfının genel denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3.1)$$

Burada; τ_p : Kesme dayanımı, σ_n : Normal gerilme, c : Görünür kohezyon ve ϕ : Sürtünme açısıdır.

Mohr-Coulomb yöntemi, jeoteknik uygulamalarda sıkça kullanılan ve doğrusal bir yenilme zarfını temel alan kriterdir. Yöntemin yenilme zarfı şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23 Mohr-Coloumb yöntemi a) Normal gerilme ve kesme gerilmesi uygulanmasının gösterimi, b) Mohr-Coulomb yenilme grafiği, c) Kalıntı (rezidüel) dayanım ve pik (doruk) dayanıma ait normal gerilme ve kesme gerilme grafiği

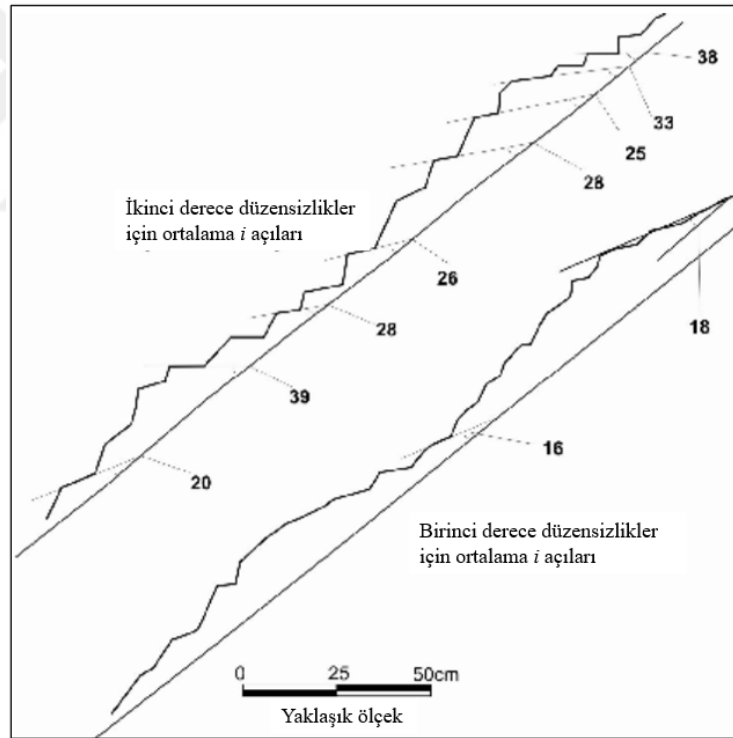
Kalıntı (rezidüel) dayanım durumunda görünür kohezyon (c) sıfır değerine düşecektir. ϕ_r ve σ_n arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olur.

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \quad (3.2)$$

Burada; τ_r : Rezidüel (kalıntı) kesme dayanımı, ϕ_r : Rezidüel (veya temel) sürtünme açısı, σ_n : Normal gerilmedir.

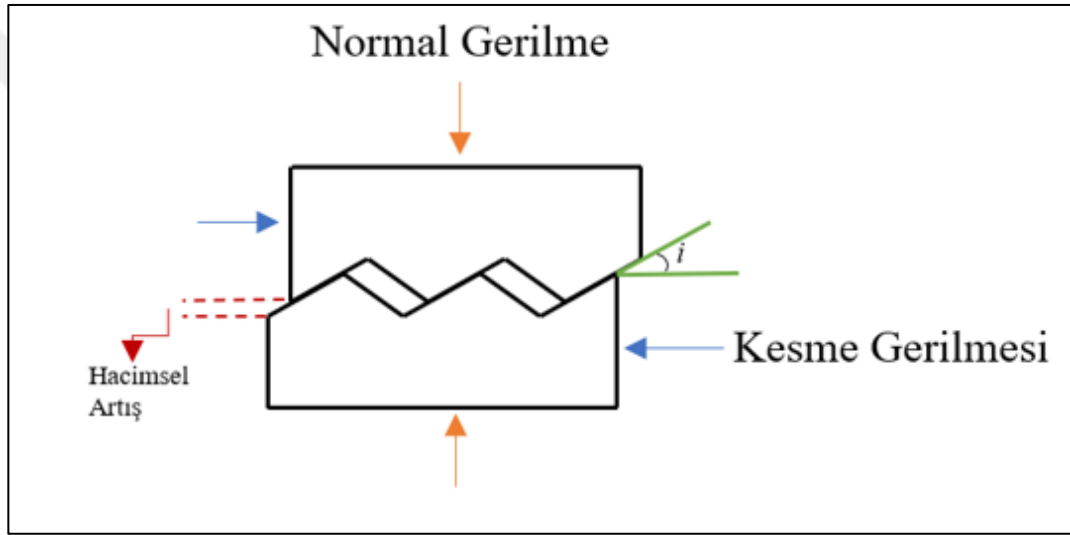
3.3.2 Patton yöntemi

Patton (1966) kaya yüzeylerinde bulunan süreksizlikleri birinci derece ve ikinci derece süreksizlikler olmak üzere iki sınıfta değerlendirmiştir. Birinci derece süreksizlikler ana dalgalanmalara karşılık gelen süreksizlikleri tanımlarken ikinci derece süreksizlikler süreksizlik yüzeyindeki küçük girinti ve çıkıntıları ifade eder. İkinci derece süreksizliklerin pürüzlülük açısı birinci derece süreksizliklerin açısından daha yüksektir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının sınıflandırılması (Wyllie ve Mah, 2004)

Doğal süreksizlik yüzeyi içeren bir kaya ile testere ile kesilmiş bir kaya yüzeyinin pürüzlülük özellikleri oldukça farklıdır. Doğal süreksizlik yüzeyleri birinci derece süreksizlikler (dalgalanmalar) ve ondülasyonlar gibi özellikler taşıyarak, kayma davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Genellikle bu tip yüzey pürüzlülüğüne sahip kayalar bulunduğu ortamın kesme dayanımını artırmaktadır (Hoek ve Bray,1974). Patton (1966) bu etkiyi testere dişli numuneler üzerinde kesme deneyleri yaparak ortaya koymuştur. Yapılan çalışmada numunelerdeki yer değiştirmenin öncelikle yüzeylerin yukarı yönlü hareket etmesi sonucu gerçekleştiği ve bunun sonucunda numunenin genişlemesine (hacminin artmasına) neden olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 3.25).



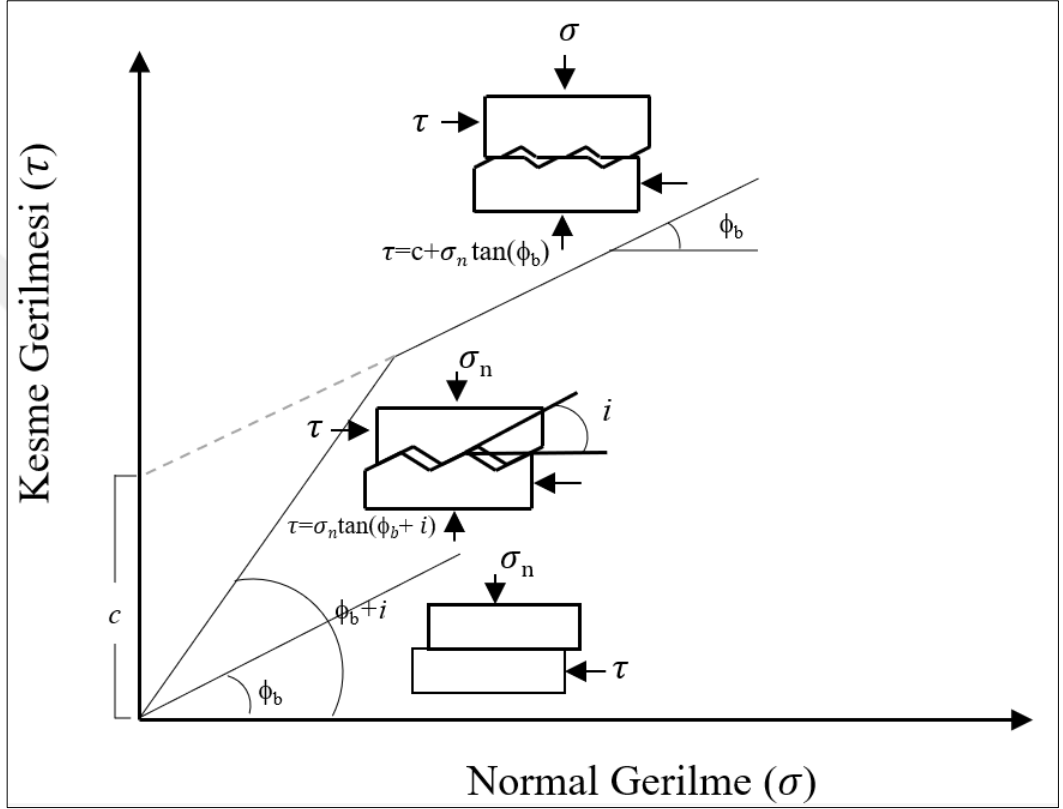
Şekil 3.25 Testere dişli numunelere uygulanan kesme gerilme sonucu oluşan hacimsel artış (genleşme veya dilasyon) (Hoek ve Bray, 1981)

Patton (1966) pürüzlü yüzeylerdeki düşük normal gerilmeler altında kesme dayanımını tanımlamak için aşağıdaki denklemi önermiştir:

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (3.3)$$

Burada; τ : Kesme dayanımını, ϕ_b : Temel sürtünme açısını, i : Dişlerin eğim açısını ifade eder.

Patton (1966) eğrinin birinci kısmının normal gerilmeler altında ve pürüzlülüklerin kırılmadığı durumlarda süreksizlik düzlemlerinde kayma dayanımını oldukça iyi temsil ettiğini değerlendirmiştir. Eğrinin birinci kısmından farklı olarak eğrinin ikinci kısmı için ise, yüksek normal gerilmeler altında çoğu pürüzlülüğün tıraşlanması sırasında farklı bir yenilme kriterinin geçerli olduğunu değerlendirmiştir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı kesme gerilmesi

Buna göre Patton, pürüzlü yüzeylerdeki yüksek normal gerilmeler altında kesme dayanımını tanımlamak için aşağıdaki denklemi önermiştir:

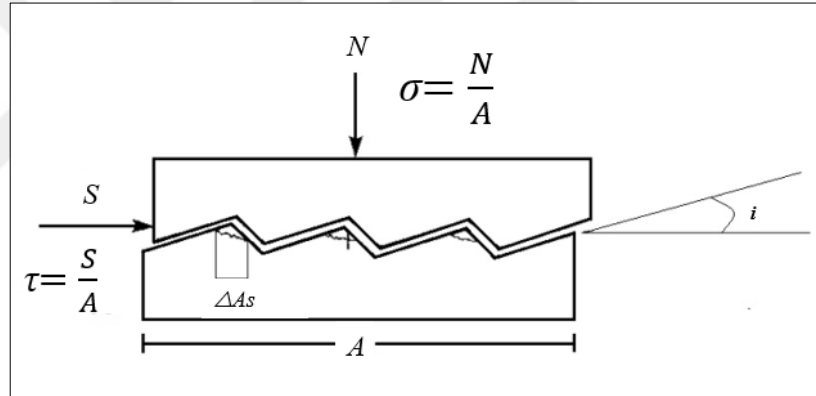
$$\tau = c + \sigma_n \tan(\phi_b) \quad (3.4)$$

Burada τ : Kesme dayanımı, ϕ_b : Temel sürtünme açısı, c : Görünür kohezyon ve i : Dişlerin eğim açısıdır.

Patton'nın (1966) önerdiği iki denklem ile çift eğrili yenilme zarfı oluşturulmaktadır. Ladanyi ve Archambault (1969) bu denklemin düzenli ve eşit pürüzlülüklerle sahip yüzeylerde oldukça iyi sonuç verdiğini belirtmiştir.

3.3.3 Ladanyi ve Archambault yöntemi

Ladanyi ve Archambault (1969) pürüzlülüklerin (düzenli dişler) kayma ve kesilme olasılığının yüksek olduğu bölümlerini belirleyerek düzenli pürüzlülükler ile temsil edilen süreksizliklerin kesme dayanımını araştırmıştır. Araştırmada temas yüzeyleri üzerinde gerilmenin düzgün olmayan dağılımı nedeniyle bazı pürüzlülüklerin en büyük dayanıma ulaşmadan kısmen kırılabileceğini değerlendirmişlerdir. Süreksizlik yüzeyinde meydana gelen kırılmanın kavramsal gösterimi şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.27 Ladanyi ve Archambault (1969) tarafından önerilen yenilme ölçütünün kavramsal görünümü (S: Pürüzlülüğün kesilmesi için gereken kesme kuvveti, A: Numune yüzey alanı, N: Uygulanan yük, i: Pürüzlülük açısı)

Ladanyi ve Archambault (1969) tarafından geliştirilen yöntemde yenilme modelinin oluşturulmasında statik bir yaklaşım yerine enerji yöntemi tercih edilmiştir. Önerilen yöntemde, pürüzlülük, hacimsel genişleme, genişlemeden kaynaklı sürtünme değeri ve pürüzlülüğe uygulanan kesme kuvveti modelin temelini oluşturmaktadır. Buna göre kayma ve kesme esnasında toplam direnç T_p , aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$T_p = S_f (1-a_s) + S_r (a_s) \quad (3.5)$$

Burada T_p : Kesme esnasındaki toplam direnç, S_f : Pürüzlülüklerdeki kayma kuvveti, S_r : Kesilen pürüzlülüklerdeki kesme kuvveti, a_s : Pürüzlülüklerin kesilen yüzey alanını ifade eder ve $a_s = \frac{\sum \Delta A_s}{A}$ formülü ile elde edilir. Bu kabullere göre doruk kesme dayanımı aşağıdaki eşitlikte sunulmuştur.

$$\tau_p = \frac{\sigma_n(1-a_s)(\tan\theta_n + \tan\phi_b)a_s\tau_{rock}}{1-(1-a_s)\tan\theta_p\tan\phi_b}, \quad (3.6)$$

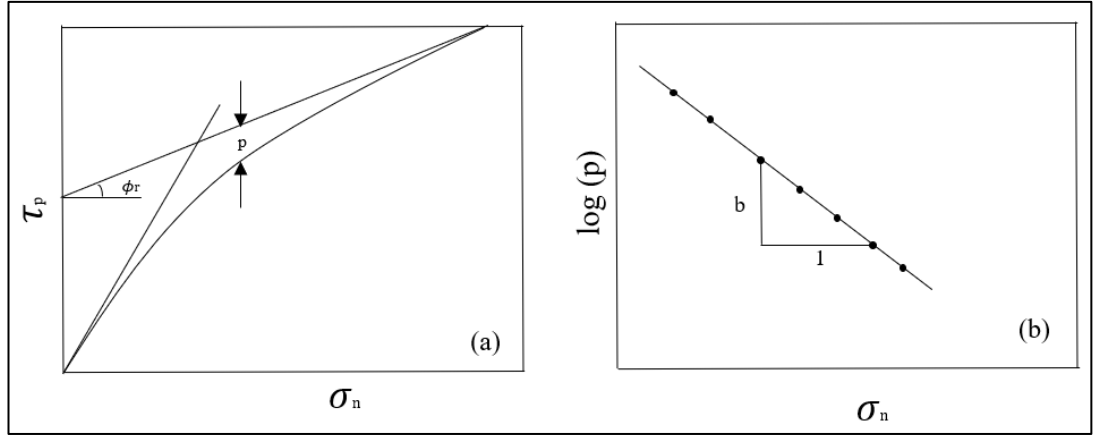
Burada; $\theta_p = \arctan(v_p/u_p)$ olup, v_p/u_p de kırılma anındaki normal (v_p) ve kesme (u_p) yerdeğiştirmesi arasındaki oran (genişleme oranı) olarak tanımlanır, τ_{rock} : Kırıksız (intact) kayanın dayanımını ifade etmektedir.

3.3.4 Jaeger yöntemi

Jaeger (1971) süreksizliklerin kesme dayanımını belirlemek için düşük ve yüksek normal gerilmeleri de dikkate alarak ampirik bir yöntem önermiştir. Jaeger (1971) Patton'un çift eğrili doğrusal yöntemini doğrusal olmayan bir yöntem ile ele almıştır. Patton'ın (1966) modeline kavramsal olarak benzeyen bu yöntemde, kesme gerilmesi-normal gerilme ilişkisi üstel olarak belirlenir. Jaeger tarafından önerilen denklem aşağıda sunulmuştur:

$$\tau_p = C_0(1 - e^{-b\sigma_n}) + \sigma_n \tan\phi_r \quad (3.7)$$

Burada; model parametresi olan b bir dizi matematiksel işlem ile elde edilir. Şekil 3.28'de $\log(p)$ kullanılarak b değerlerinin elde edilmesi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.28 Jaeger (1971) ampirik kesme dayanım modeli; a) kesme dayanımı - normal gerilme grafiği, b) log (p) - normal gerilme grafiği

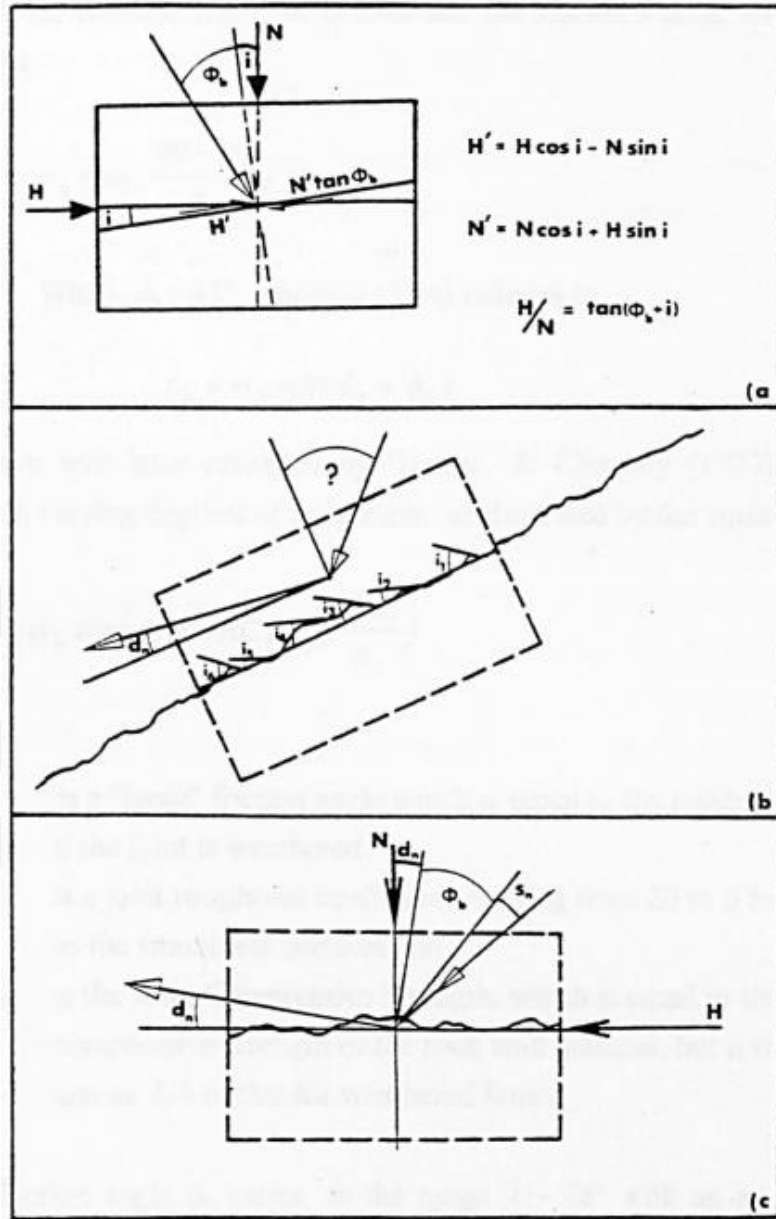
3.3.5 Barton yöntemi

Barton (1971a) süreksizliklerin doruk kesme dayanımının şekil 3.28’de gösterildiği gibi üç bileşenin sonucu olduğunu öne sürmüştür. Bu bileşenler süreksizliğin pürüzlülüğü, süreksizlik yüzeyinin dayanımı ve süreksizlik yüzeyine etki eden normal gerilmedir. Barton (1971a, b) yaptığı bir dizi doğrudan kesme deneylerine dayanarak aşağıdaki doğrusal olmayan ampirik kriteri önermiştir:

$$\tau_p = \sigma_n \tan(2 d_n + \phi_b) \quad (3.8)$$

Burada; σ_n : Normal gerilme, ϕ_b : Temel sürtünme açısı ve d_n : Doruk genişleme açısıdır.

Barton (1971a, b) denklem (3.8)’i esas alarak, temel sürtünme açısının 30° ve 45° olduğu durumlar için yeni ampirik denklemler önermiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Kaya süreksizliklerinin kesme dayanımının açısal bileşenleri (Barton 1971a)

Barton (1973, 1976) yaptığı çalışmalarda doğal süreksizliklerin davranışını incelemiş ve aşağıdaki denklemi önermiştir:

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + JRC \log_{10} \left[\frac{JCS}{\sigma_n} \right] \right) \quad (3.9)$$

Burada; τ : Kesme dayanımı, ϕ_b : Temel sürtünme açısı, σ_n : Normal gerilme, JRC: Eklem pürüzlülüğü katsayısı ve JCS: Süreksizlik yüzeyinin sıkışma dayanımıdır.

Barton (1973, 1976)'nın önerdiği formüldeki JRC değeri yüzeyin pürüzlülük profillerini tanımlayan tablodan belirlenir. JCS değeri ise arazi gözlemleri veya süreksizlik yüzeyinde Schmidt çekici kullanılarak belirlenir. Barton ve Choubey (1977) farklı tür numunelerde yapılan kesme deneyi sonuçlarına dayalı olarak aşağıdaki formülü ortaya koymuştur.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC \log_{10} \left[\frac{JCS}{\sigma_n} \right] \right) \quad (3.10)$$

Burada; ϕ_r : Rezidüel sürtünme açısı olup aşağıdaki formülden bu değerin belirlenebileceğini öne sürmüştür:

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R) \quad (3.11)$$

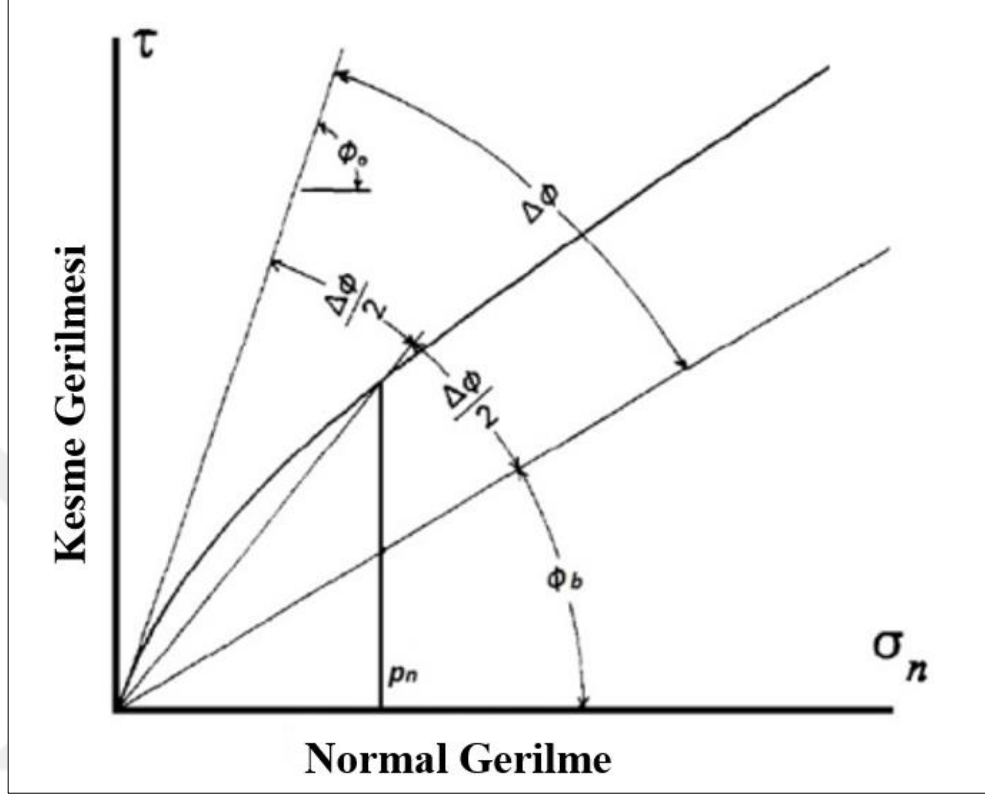
Burada, r: nemli ve bozuşmuş yüzeyde ölçülen Schmidt geri sekme değeri, R: kuru, bozuşmamış ve düz yüzeyde alınan Schmidt sekme değeridir.

3.3.6 Maksimoviç yöntemi

Maksimoviç (1996) Patton modelini doğal kaya modeli üzerine uygulamış ve süreksizliğin kesme dayanımının uygulanan normal gerilmenin bir fonksiyonu olduğunu değerlendirmiştir. Önerilen yöntemde p_n parametresinin belirlenmesi için aynı yüzey üzerinde en az üç kesme testi gerektirmesi temel zorluk olarak görülmektedir (Casagrande 2018). Maksimoviç tarafından önerilen denklem aşağıda sunulmuştur:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \frac{\Delta\phi}{\left(\frac{1+\sigma_n}{p_n} \right)} \right] \quad (3.12)$$

Burada ϕ_b : Temel sürtünme açısı, $\Delta\phi$: Süreksizliklerin pürüzlülük açısı ve p_n : Ortanca gerilme açısıdır.



Şekil 3.30 Maksimoviç (1996) tarafından önerilen doğrusal olmayan yenilme zarfı

3.3.7 Bu çalışmada benimsenen yöntem

Literatürde süreksizliklerin kesme dayanımının tayini için pek çok model önerilmiş olsa da, bu çalışmada elde edilen deney sonuçları dikkate alındığında Patton (1966) yönteminin (çift eğrili yenilme zarfının) deneysel verilere daha iyi uyduğu düşünülmüş olup, kesme dayanımının değerlendirilmesine yönelik analizlerde bu yöntem benimsenmiştir.

Dolgunuz kaya süreksizliklerin kesme dayanımının tayinine Patton (1966) yaklaşımı dışında birkaç modelin varlığından daha önce söz edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen

verilerin Ladanyi ve Archamboult (1969), Jaeger (1971), Barton ve Choubey (1977) vb. yaklaşımlar dikkate alınarak ilave analizler gerçekleştirilmesi hem tezin hacmini çok fazla arttıracığından hem de tezin başlangıçtaki hedefleri arasında yer almadığından Patton (1966) yaklaşımı dışındaki modellerle analizler yapma yoluna gidilmemiştir.



4. BULGULAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan kayaların; i) mineralojik-petrografik özellikleri, ii) Tek eksenli sıkışma dayanımı, iii) Temel sürtünme açıları, iv) Pürüzlülük açıları ve v) Doğrudan kesme dayanımı ortaya konulmuştur. Bu konuyla ilgili bilgiler aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

4.1 Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Her bir kaya türüne ait mineralojik-petrografik özellikler/tanımlamalar optik mikroskop altında yapılan incelemelerle ortaya konulmuştur. Kaya türlerinin ince kesitleri hazırlanmış, polarizan mikroskobu kullanılarak incelenmiş ve kaya tanımlaması yapılmıştır. Mikroskobik inceleme sonucunda, her bir kaya çeşidi için ana mineral bileşenleri ve bu minerallerin dokusal özellikleri tespit edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri

Numune No	Dokusu	Özel Doku	Bileşimi	Bozuşma	Kaya Adı
01	Hiyaloplitik Porfiritik	Zonlu, glomeroporfirik	Plajiyoklaz, amfibol, biyotit, kristalit, mikrolit	Opaklaşma, opasitleşme, hidrobiyotitleşme	Andezit
02	Halokristalin porfiritik	Zonlu	Plajiyoklaz, piroksen, amfibol	Biyotitleşme, Silisleşme	Diyorit Porfir
03	Sparitik	-	Başlıca kalsit, yer yer rekristalize kalsit	-	Kireçtaşı
04	Hiyaloklastik	Kemirilme doku	Kuvars, plajiyoklaz, andezit kaya parçası, volkan camı kıymığı, amfibol, opak mineralleri, pomza kaya parçası	-	Tüf (Vitrik Tüf)
05	Sparitik	-	Başlıca sparit, kalsit, fosil ve fosil kavkuları	-	Fosilli Kireçtaşı, Biosparitik Kireçtaşı
06	Mikritik	-	Başlıca kalsit, opak mineraller	-	Kireçtaşı (Traverten-Kireçtaşı Dokanağı)
07	Granoblastik Doku	Poligonal	Başlıca kalsit	-	Mermer
08	Mikritik	-	Başlıca kalsit, rekristalize kalsit	-	Rekristalize Kireçtaşı

Çizelge 4.1 Kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri (devamı)

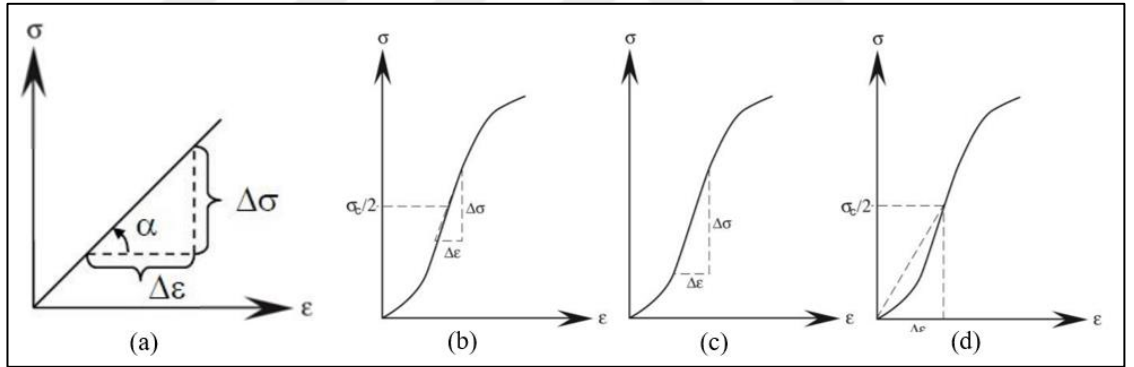
09	Sparitik, Kristalize	-	Başlıca kalsit	-	Rekristalize Kireçtaşı
10	Kristalize	-	Bol miktarda kalsit	-	Kristalize Kireçtaşı
11	Spiritik	-	Başlıca kalsit, fosil ve fosil kavkuları	-	Fosilli Kireçtaşı
12	-	Tarak	Başlıca kalsit, rekristalize kalsit	-	Traverten
13	Granoblastik	Poligonal	Başlıca kalsit	-	Mermer
14	Böbreğimsi	-	Başlıca kalsit	-	Soğuksu Traverten
15	Mikritik	-	Başlıca kalsit	-	Mikritik Kireçtaşı
16	Hyalopilitik porfiritik	Akma, zonlu, glomeroporfirik	Biyotit, piroksen, amfibol, hamur (kristalit, mikrolit), plajiyoklaz, opak mineral	Opaklaşma, hidrobiyotitleşme, opasitleşme	Andezit (Bazaltik Andezit)
17	Hyaloklastik	Zonlu doku	Bazalt kaya parçası, plajiyoklaz, biyotit, volkan camı kıymığı, opak mineraller, dasit kaya parçası	-	İgnimbirit
18	Hipohyalin Doku	Vesiküler	Kristalit, mikrolit, volkan camı, piroksen	Karbonatlaşma	Bazalt
19	Hyaloklastik Doku	Zonlu doku	Plajiyoklaz, kuvars, biyotit jeokristalleri, dasit kaya parçası, zeolit, pomza kaya parçası	Zeolitleşme	Zeolitleşmiş Tüf
20	Hyaloklastik	Zonlu doku, kemirilme doku	Plajiyoklaz, kuvars, bazalt kaya parçası	-	İgnimbirit
21	Holokristalen	Zonlu doku	Plajiyoklaz, piroksen, amfibol, eser miktarda opak mineraller	Opasitleşme	Diyabaz
22	Hyaloklastik	Zonlu	Kuvars, plajiyoklaz, amfibol, volkan camı kıymığı, kaya parçaları	-	Vitrik Tüf
23	Holokristalen Hipidiyomorf	Zonlu doku	Plajiyoklaz, piroksen, eser miktarda opak mineraller	-	İnce Kristalen Diyabaz
24	Hyaloklastik Doku	Kemirilme doku	Plajiyoklaz, kuvars, opak mineraller, bazalt, andezit, dasit, trakit ve pomza kaya parçaları	-	İgnimbirit
25	Hipohyalin Porfiritik Doku	Zonlu doku, akma doku	Plajiyoklaz, sanidin, piroksen, amfibol ve eser miktarda opak mineraller	Opaklaşma	Trakit
26	Hyaloklastik Doku	Zonlu doku	Plajiyoklaz, kalsit, opak mineraller, bazalt, trakibazalt, kuvarsit, andezit kaya parçaları	Demiroksitleşme	Litik Tüf
27	Holokristalen	Zonlu doku, poikilitik doku	Ortoklaz, plajiyoklaz, mikrolin, kuvars, amfibol, biyotit, titanit, opak mineraller	Serizitleşme, Kloritleşme	Granodiyorit
28	Granoblastik Doku	-	Kalsit, ankerit ve az miktarda aragonit	-	Mermer
29	Hipoklastik Doku	Zonlu doku, poikilitik doku	Kuvars, plajiyoklaz, sanidin, biyotit (piroklastik) opak mineraller	Zeolitleşme	Zeolitleşmiş İgnimbirit
30	Hyaloklastik	Zonlu	Plajiyoklaz, Opak mineralleri, volkan camı kıymığı	-	Vitrik Tüf

4.2 Tek Eksenli Sıkışma Deneyi

Bu çalışmada 15 cm'lik küptaşlardan ASTM D 2938 standardına uygun çap ve boyda karotlar kesilmiş, alt ve üst yüzeyleri pürüzsüzleştirilmiş ve tek eksenli sıkışma dayanımı test edilmiştir. Deneyler ASTM D 2938 standardına göre, numunelerin 2-15 dk içerisinde yenilecekleri şekilde yükleme yapılmıştır.

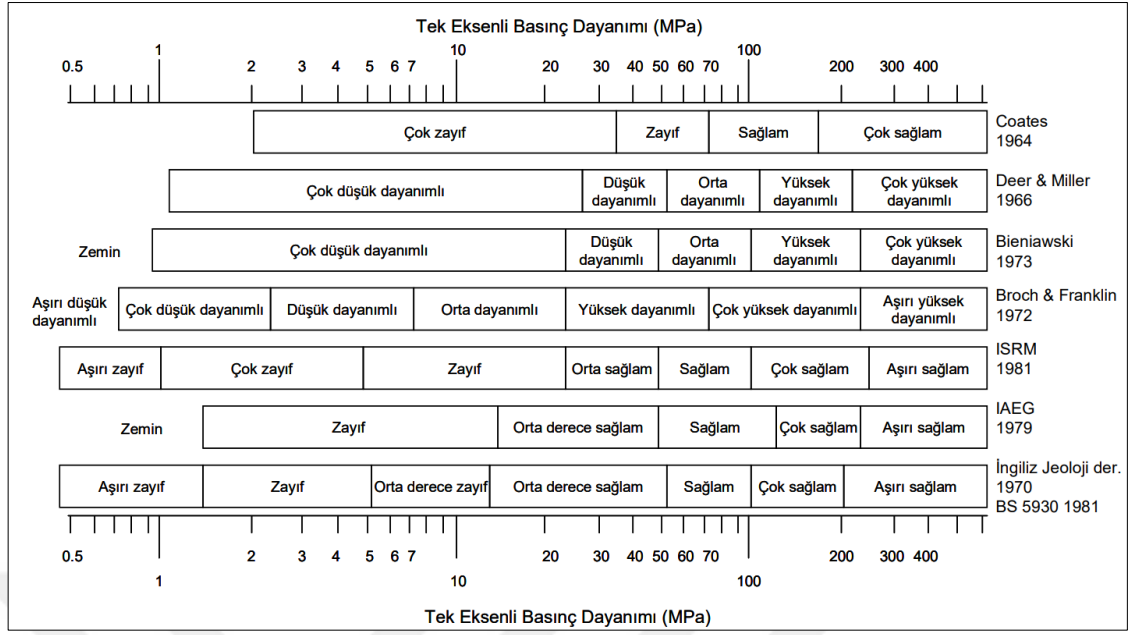
Numunenin kırılma şekli deneyin geçerliliğini etkileyen önemli bir faktör olması sebebi ile standartlara uygun numuneler hazırlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyde numuneye düşey deformasyon ölçer aparatları yerleştirilerek numunenin elastisite modülü de belirlenmiştir.

Bu çalışmada elastisite modülü boyda meydana gelen deformasyon ve gerilme eğrisinin doğrusal bölümünün eğimi (E_{ort}) dikkate alınarak hesaplanmıştır (Şekil 4.1c).



Şekil 4.1 Kaya malzemesinde elastisite modülünün belirlenmesi, a) Kaya malzemesinde σ - ϵ ilişkisinin belirlenmesi b) Tanjant elastisite modülü c) Ortalama elastisite modülü, d) Sekant (kiriş) elastisite modülü (Canpolat, 2022)

Her bir kayanın yük dayanımı/direnci farklılık gösterir. Buna bağlı olarak, çeşitli araştırmacılar ve kuruluşlar tarafından tek eksenli sıkışma direncine/dayanımına göre kayalar için indeks sınıflandırma ölçütleri geliştirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Bazı araştırmacılar tarafından önerilen kaya dayanım sınıfları (Bieniawski 1989)

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde en düşük dayanım değeri 10,4 MPa ile 20 No.'lu (ignimbirit) numunede, en yüksek dayanım değeri 127 MPa ile 23 No.'lu (ince kristalen diyabaz) numunede olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca elastisite modülü (E) hesaplamaları incelendiğinde en düşük E değerinin 1,8 GPa ile 24 No.'lu (ignimbirit) numunede, en yüksek E değerinin 29,5 GPa ile 13 No.'lu (mermer) numunede olduğu belirlenmiştir. Kayaların en yüksek ve en düşük tek eksenli sıkışma dayanımı ve E değeri farklılıklarının modül oranından kaynaklanmaktadır.

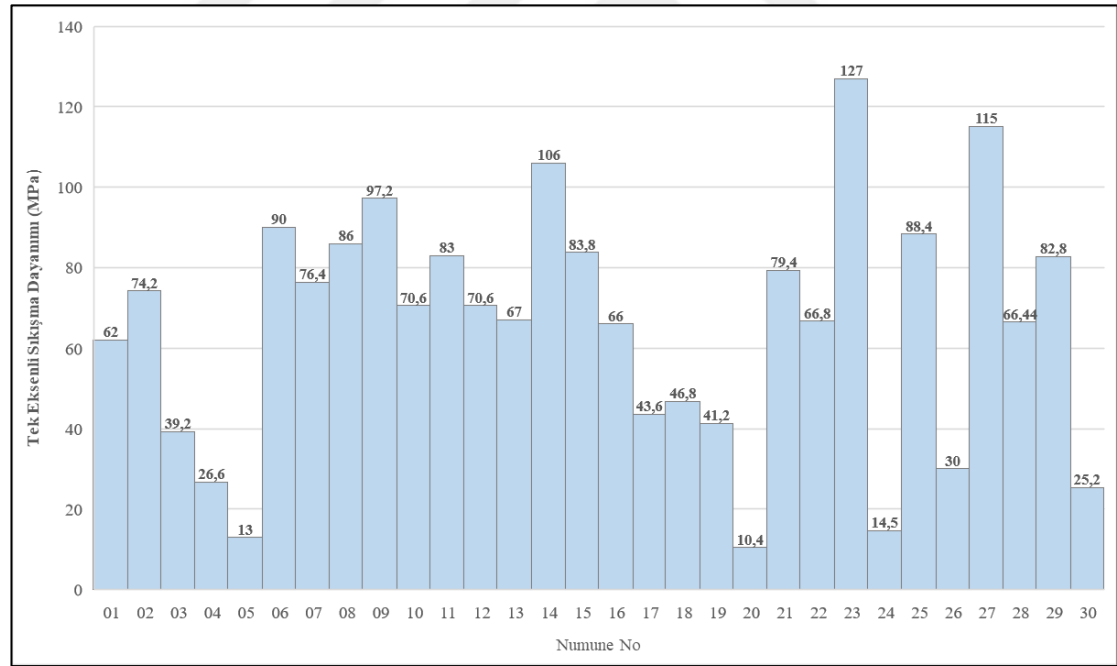
Kayaların tek eksenli sıkışma dayanımı toplu sonuçları ISRM (1981) sınıflamasına göre tanımlamaları ve elastisite modülü sonuçları Çizelge 4.2, histogram gösterimi Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur. Tek eksenli sıkışma deneyine ait tüm sonuçlar ve deney grafikleri Ek-1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 Kaya numunelerin UCS sonuçları, ISRM (1981)'e göre dayanım indeksi sınıflaması ve elastisite modülü sonuçları

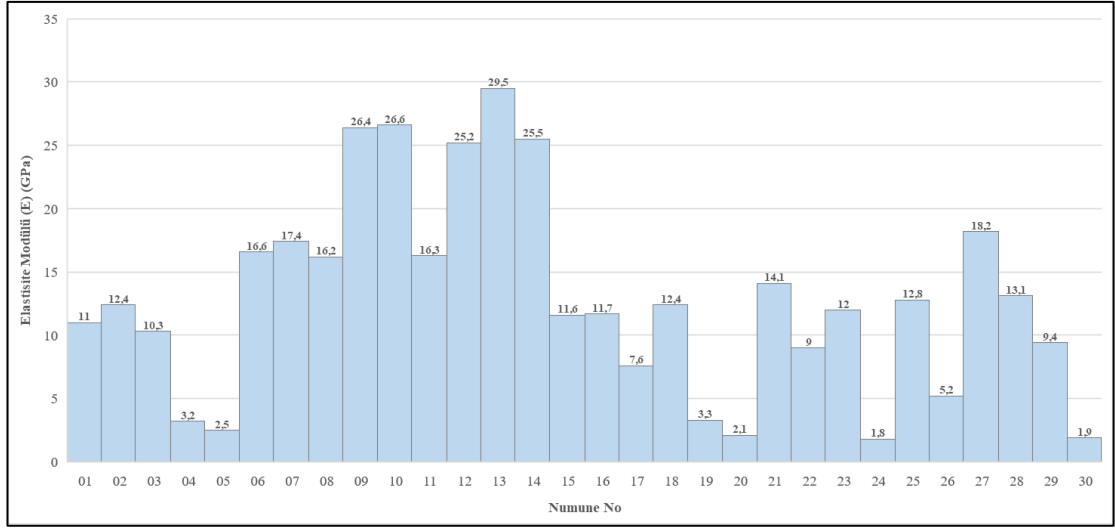
Numune No	Kaya Adı	UCS (σ_{ort}) (MPa)	Kaya Dayanım Sınıfı (ISRM, 1981)	Elastisite Modülü (GPa)
01	Andezit	62	Sağlam Kaya	11,0
02	Diyorit porfir	74,2	Sağlam Kaya	12,4
03	Kireçtaşı	39,2	Orta Sağlam Kaya	10,3
04	Tüf (vitrik tüf)	26,6	Orta Sağlam Kaya	3,2
05	Fosilli kireçtaşı, biosparitik kireçtaşı	13	Zayıf Kaya	2,5
06	Kireçtaşı (traverten-kireçtaşı dokanağı)	90	Sağlam Kaya	16,6
07	Mermer	76,4	Sağlam Kaya	17,4
08	Rekristalize kireçtaşı	86	Sağlam Kaya	16,2
09	Rekristalize kireçtaşı	97,2	Sağlam Kaya	26,4
10	Kristalize Kireçtaşı	70,6	Sağlam Kaya	26,6
11	Fosilli Kireçtaşı	83	Sağlam Kaya	16,3
12	Traverten	70,6	Sağlam Kaya	25,2
13	Mermer	67	Sağlam Kaya	29,5
14	Soğuksu traverteni	106	Çok Sağlam Kaya	25,5
15	Mikritik kireçtaşı	83,8	Sağlam Kaya	11,6
16	Andezit (bazaltik andezit)	66,0	Sağlam Kaya	11,7
17	İgnimbirit	43,6	Orta Sağlam Kaya	7,6
18	Bazalt	46,8	Orta Sağlam Kaya	12,4
19	Zeolitleşmiş tüf	41,2	Orta Sağlam Kaya	3,3
20	İgnimbirit	10,4	Zayıf Kaya	2,1

Çizelge 4.2. Kaya numunelerin UCS sonuçları, ISRM (1981)'e göre dayanım indeksi sınıflaması ve elastisite modülü sonuçları (devamı)

Numune No	Kaya Adı	UCS (σ_{ort}) (MPa)	Kaya Dayanım Sınıfı (ISRM, 1981)	Elastisite Modülü (GPa)
21	Diyabaz	79,4	Sağlam Kaya	14,1
22	Vitrik tüf	66,8	Sağlam Kaya	9,0
23	İnce kristalen diyabaz	127	Çok Sağlam Kaya	12,0
24	İğnimbirit	14,5	Zayıf Kaya	1,8
25	Trakit	88,4	Sağlam Kaya	12,8
26	Likit tüf	30	Orta Sağlam Kaya	5,2
27	Granodiyorit	115	Çok Sağlam Kaya	18,2
28	Mermer	66,44	Sağlam Kaya	13,1
29	Zeolitleşmiş İğnimbirit	82,8	Sağlam Kaya	9,4
30	Vitrik tüf	25,2	Orta Sağlam Kaya	1,9



Şekil 4.3 Numunelerin UCS dayanımına ait histogram



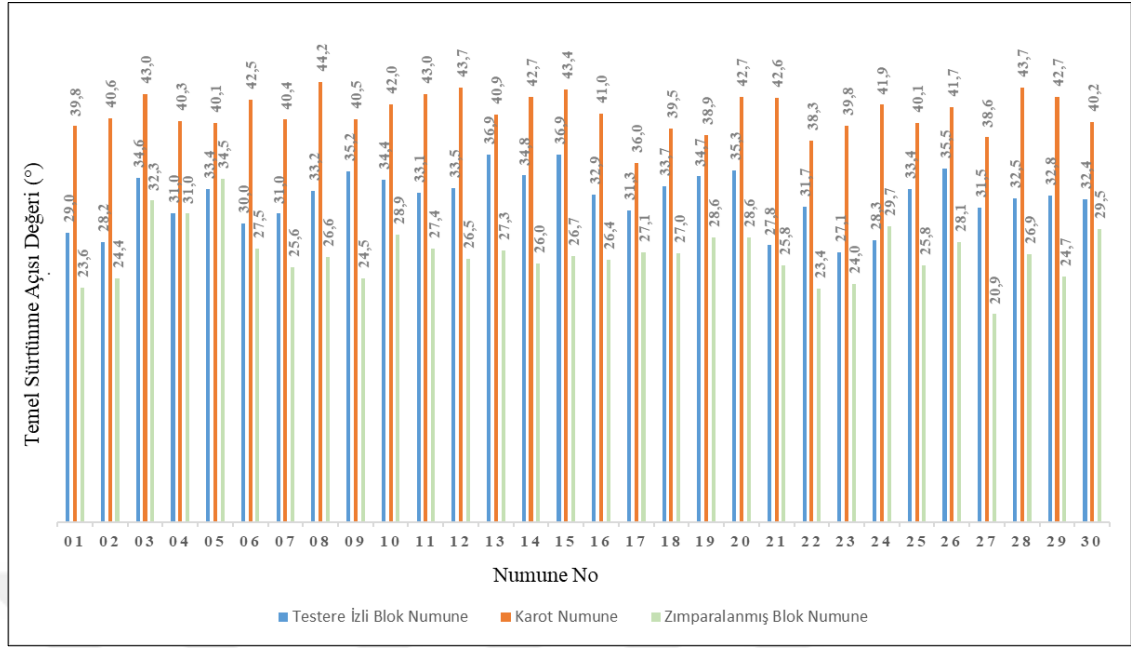
Şekil 4.4 Numunelerin elastisite modülüne ait histogram

4.3 Süreksizliklerin Temel Sürtünme Açıları

Süreksizliklerin temel sürtünme açıları laboratuvarında taşınabilir tiltmetre düzeneği ile belirlenmiştir. Temel sürtünme açısı testleri i) Karot numuneler, ii) Testere izli blok numuneler ve iii) 100 numaralı zımparayla aşındırılmış yüzeye sahip blok numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Temel sürtünme açısı ölçümleri 3 farklı aşınma (geometrik) yüzeyine sahip her bir kaya türü için 15'er kez tekrarlanmış ve ortalama değeri alınmıştır. Deneylere ait sonuçlar çizelge 4.3'te ve sonuçların histogram olarak gösterimi Şekil 4.5'te sunulmuştur. Tiltmetre sonuçlarına göre i) karot numunelerde en yüksek temel sürtünme açısı $44,2^{\circ}$, en düşük temel sürtünme açısı 36° 'dir. ii) Testere izli blok numunelerde en yüksek temel sürtünme açısı $36,9^{\circ}$ ve en düşük temel sürtünme açısı $27,1^{\circ}$ 'dir. iii) 100 numaralı zımparayla aşındırılmış blok numunelerde en yüksek temel sürtünme açısı $34,5^{\circ}$ ve en düşük temel sürtünme açısı $20,9^{\circ}$ 'dir. Tüm sonuçlar Ek-2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.3 Tiltmetre deney düzeneğinden üç farklı yöntemle elde edilen temel sürtünme açıları

Numune No	Numune Adı	ϕ_b (Karot Numune)	ϕ_b (Testere İzli Blok Numune)	ϕ_b (100 No'lu Zımparayla Aşındırılmış Blok Numune)
01	Andezit	39,8	29,0	23,6
02	Diyorit Porfir	40,6	28,2	24,4
03	Kireçtaşı	43,0	34,6	32,3
04	Tüf (Vitrik Tüf)	40,3	31,0	31,0
05	Fosilli Kireçtaşı, Biosparitik Kireçtaşı	40,1	33,4	34,5
06	Kireçtaşı (Traverten-Kireçtaşı Dokanağı)	42,5	30,0	27,5
07	Mermer	40,4	31,0	25,6
08	Rekristalize Kireçtaşı	44,2	33,2	26,6
09	Rekristalize Kireçtaşı	40,5	35,2	24,5
10	Kristalize Kireçtaşı	42,0	34,4	28,9
11	Fosilli Kireçtaşı	43,0	33,1	27,4
12	Traverten	43,7	33,5	26,5
13	Mermer	40,9	36,9	27,3
14	Soğuksu traverteni	42,7	34,8	26,0
15	Mikritik Kireçtaşı	43,4	36,9	26,7
16	Andezit (Bazaltik Andezit)	41,0	32,9	26,4
17	İgnimbirit	36,0	31,3	27,1
18	Bazalt	39,5	33,7	27,0
19	Zeolitleşmiş Tüf	38,9	34,7	28,6
20	İgnimbirit	42,7	35,3	28,6
21	Diyabaz	42,6	27,8	25,8
22	Vitrik Tüf	38,3	31,7	23,4
23	İnce Kristalen Diyabaz	39,8	27,1	24,0
24	İgnimbirit	41,9	28,3	29,7
25	Trakit	40,1	33,4	25,8
26	Likit Tüf	41,7	35,5	28,1
27	Granodiyorit	38,6	31,5	20,9
28	Mermer	43,7	32,5	26,9
29	Zeolitleşmiş İgnimbirit	42,7	32,8	24,7
30	Vitrik Tüf	40,2	32,4	29,5



Şekil 4.5 Süreksizlik yüzeylerine ait temel sürtünme açısı değerleri

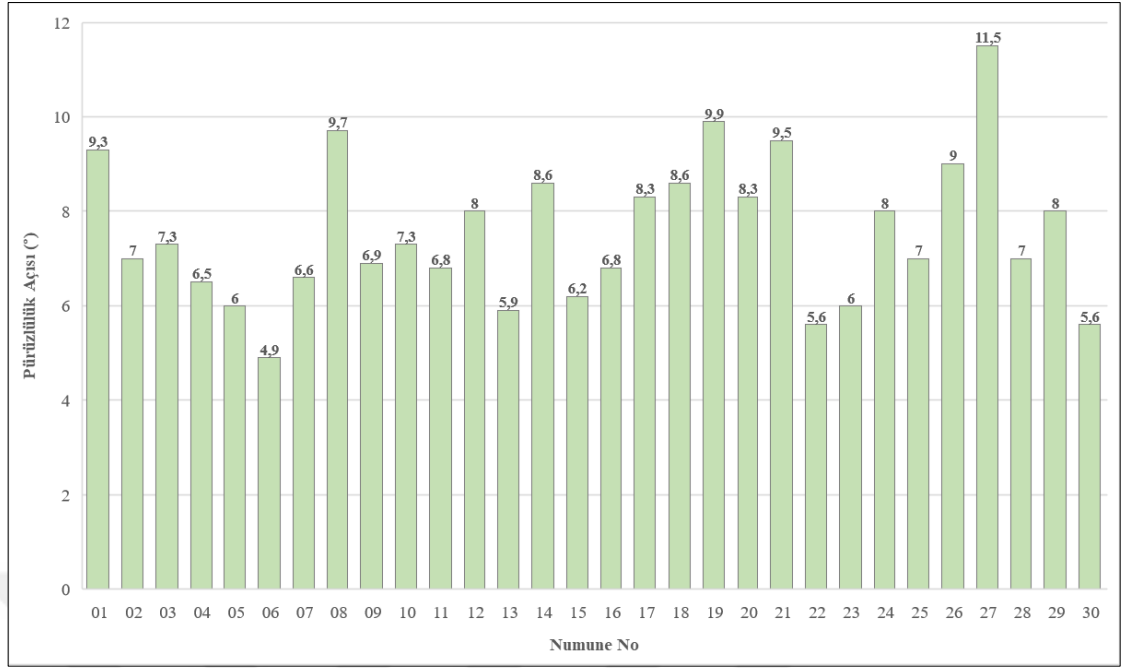
4.4 Süreksizliklerin Pürüzlülük Açısı

Yapılan çalışmada ölçüm tutarlılığını arttırmak amacıyla her kaya türü için yapay süreksizlik oluşturulmuş üç farklı numune belirlenmiştir. Her numunenin kenarlarının ortasından ve köşegenlerden olmak üzere dört hat boyunca süreksizlik yüzey profilleri belirlenmiş ve pürüzlülük açıları tayin edilmiştir. Profilometre ile gerçekleştirilen ölçüm verileri Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

Ölçüm değerleri incelendiğinde en yüksek pürüzlülük açısının 11,5° ile 27 No.'lu numunede (granodiyorit), en düşük pürüzlülük açısının 4,9° ile 06 No.'lu numunede (kireçtaşı) olduğu belirlenmiştir. Pürüzlülük açılarına ait ayrıntılı sonuçlar EK-3'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Profilometre cihazı ile elde edilen süreksizliklere ait pürüzlülük açıları

Numune No	Kaya Adı	Pürüzlülük Açısı (i)
01	Andezit	9,3
02	Diyorit porfir	7,0
03	Kireçtaşı	7,3
04	Tüf (vitrik tüf)	6,5
05	Fosilli kireçtaşı, biosparitik kireçtaşı	6,0
06	Kireçtaşı (traverten-kireçtaşı dokanağı)	4,9
07	Mermer	6,6
08	Rekristalize kireçtaşı	9,7
09	Rekristalize kireçtaşı	6,9
10	Kristalize Kireçtaşı	7,3
11	Fosilli Kireçtaşı	6,8
12	Traverten	8,0
13	Mermer	5,9
14	Soğuksu traverten	8,6
15	Mikritik kireçtaşı	6,2
16	Andezit (bazaltik andezit)	6,8
17	İgnimbirit	8,3
18	Bazalt	8,6
19	Zeolitleşmiş tüf	9,9
20	İgnimbirit	8,3
21	Diyabaz	9,5
22	Vitrik tüf	5,6
23	İnce kristalen diyabaz	6,0
24	İgnimbirit	8,0
25	Trakit	7,0
26	Likit tüf	9,0
27	Granodiyorit	11,5
28	Mermer	7,0
29	Zeolitleşmiş İgnimbirit	8,0
30	Vitrik tüf	5,6



Şekil 4.6 Süreksizliklerin ortalama pürüzlülük açılarının histogram

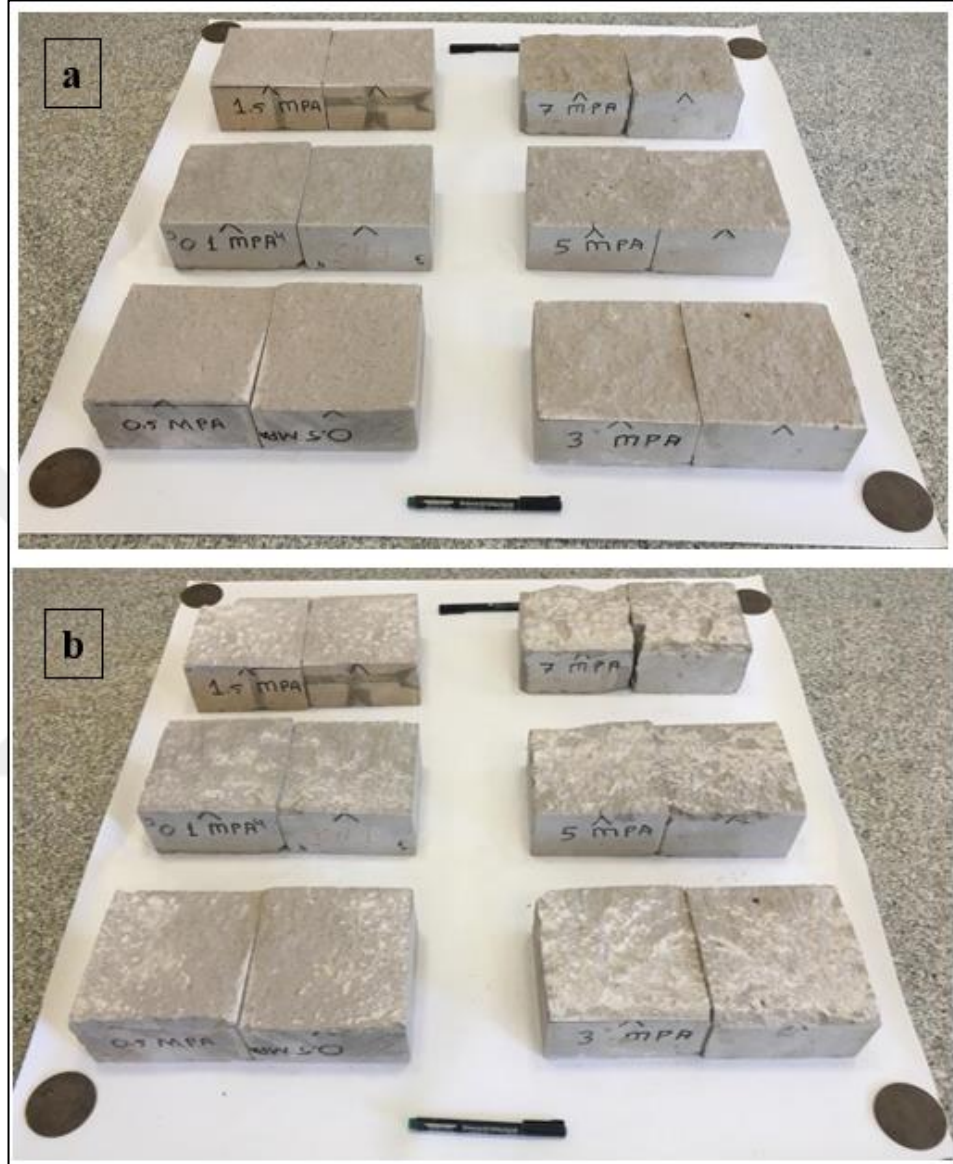
4.5 Doğrudan Kesme Deneyleri

Bu çalışmanın hipotezi doğrultusunda geleneksel doğrudan kesme deney yöntemi kullanılarak süreksizliklerin kesme dayanımı belirlenmiştir. Deneyler Wille Geoteknik tarafından tasarlanan kesme kutusu cihazı kullanılarak farklı mineralojik–petrografik ve jeomekanik özelliklere sahip otuz farklı kaya seti üzerinde yapılmıştır.

4.5.1 Geleneksel doğrudan kesme deneyi

Deneyde kaya setine ait her numuneye uygulanacak olan normal gerilme değeri üzerlerine yazılarak düzenli bir şekilde yan yana dizilmiş ve fotoğraflanmıştır (Şekil 4.7a). Kaya setinde en düşük normal gerilme değerinden başlamak üzere sırasıyla 0,5-1-1,5-3-5-7 MPa normal gerilmeleri altında kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme deneyleri tamamlandıktan sonra deneye tabi tutulan numuneler tekrar fotoğraflanmak üzere aynı şekilde yan yana dizilmiştir (Şekil 4.7b). Deneylerden elde edilen sonuçlar kesme

gerilmesi-normal gerilme grafiğine aktarılarak Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı çizilmiştir.



Şekil 4.7 Geleneksel doğrudan kesme deneyleri için hazırlanan 22 No.'lu kaya seti, a) Deney öncesi, b) Deney sonrası

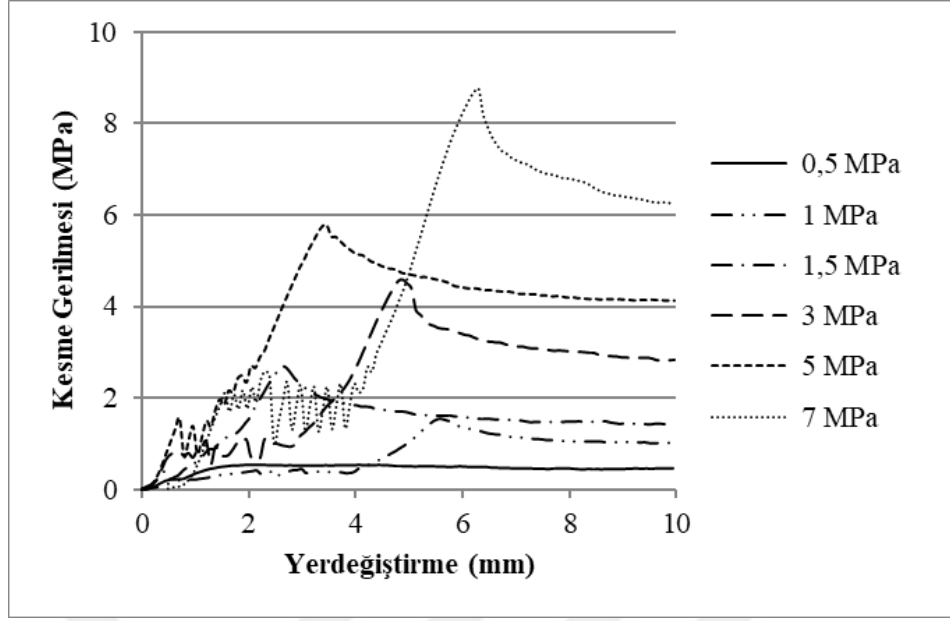
Kesme kutusu deneylerinden elde edilen sonuçlar kesme gerilmesi-normal gerilme grafiğine aktarıldığında, düşük normal gerilmeler (eğrinin birinci kısmı) ile yüksek normal gerilmelerde (eğrinin ikinci kısmı) yer alan sonuçların farklı doğrusal karakterde

olduğu gözlemsel olarak belirlenebilmektedir. Patton'ın (1966) öne sürdüğü bu ölçüt pek çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Habibzadeh (2020) yaptığı bir dizi statik kesme kutusu deneyi ile elde ettiği Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının kesişim yerinin çoğunlukla 2 MPa civarında bir normal gerilmeye karşılık geldiğini öne sürmüştür.

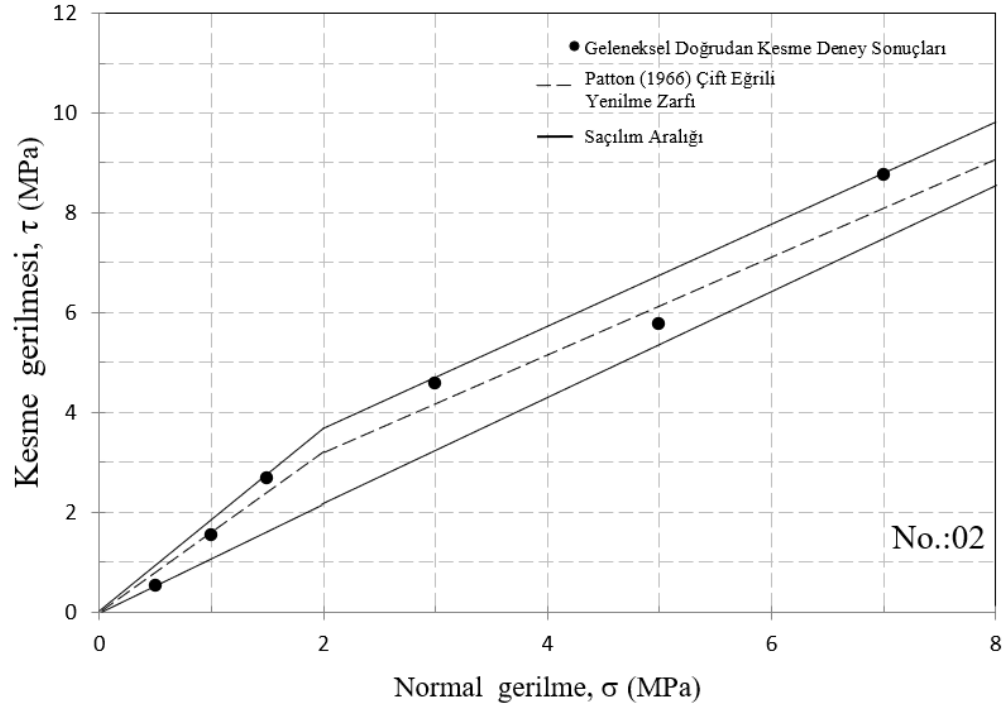
Bu çalışmada 30 farklı kaya için gerçekleştirilen geleneksel kesme kutusu deney sonuçları, kesme gerilmesi - normal gerilme grafiğine aktarılarak Patton'ın (1966) çift eğrili yenilme zarfı görsel olarak çizilmiştir. Eğrinin birinci kısmı orijinden başlamak üzere düşük normal gerilme sonuçlarına en iyi uyan (eğer saçılımlı ise mümkün olduğunca noktalara teğet olacak biçimde) bir zarf çizilmiştir. Aynı mantıksal yaklaşım çift eğrili yenilme grafiğinin ikinci kısmına da uygulanmıştır. Grafikte eğrinin birinci ve ikinci kısmında saçılım aralığının ortaya konulması için grafikteki noktaların en alt ve en üst değerlerini içine alacak şekilde saçılım aralığı çizgileri eklenmiştir.

Geleneksel doğrudan kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı çizildikten sonra eğrinin birinci ve ikinci kısımlarının yatayla yaptığı açı olan toplam sürtünme açısı (ϕ_{b+i}) ve temel sürtünme açısı (ϕ_b) belirlenmiştir. Toplam sürtünme açısı değerinden temel sürtünme açısına ait değer çıkarılması ile pürüzlülük açısı elde edilmiştir.

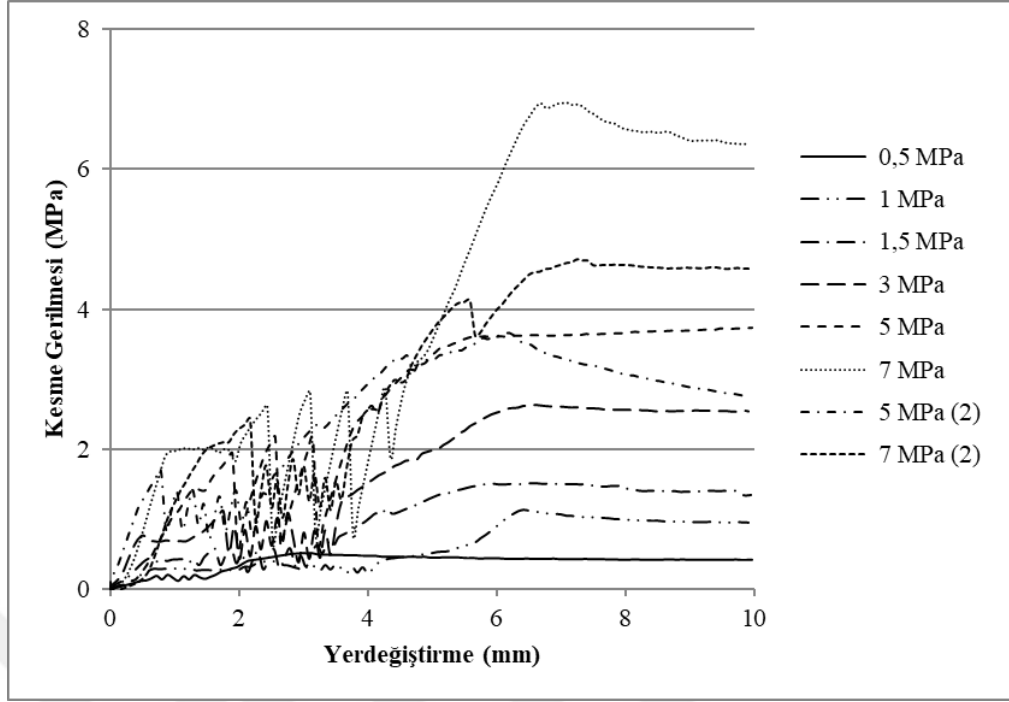
Geleneksel doğrudan kesme deneyine tabi tutulan bazı kaya türlerine ait kesme gerilmesi – yer değiştirme ve kesme gerilmesi – normal gerilme grafikleri şekil 4.8 - şekil 4.15'te verilmiştir. Tüm kayalar için deneylerden elde edilen toplam sürtünme açısı, temel sürtünme açısı ve pürüzlülük açısına ait sonuçlar çizelge 4.5'te verilmiştir. Doğrudan kesme deneylerine ait toplu sonuçlar ve Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarına ait toplu sonuçlar Ek 4'te verilmiştir.



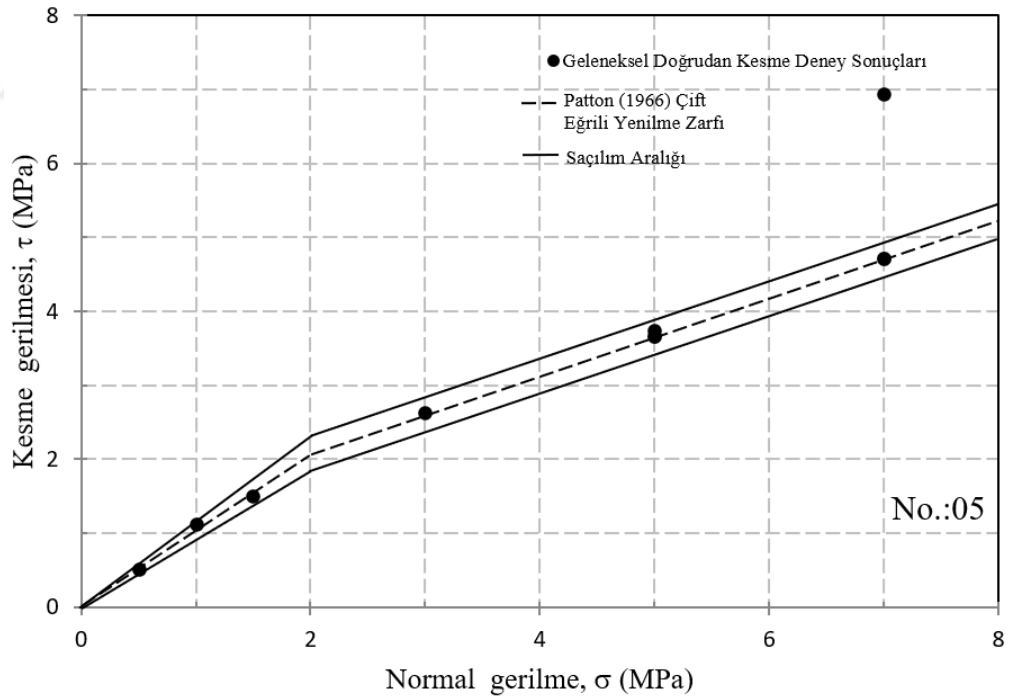
Şekil 4.8 02 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



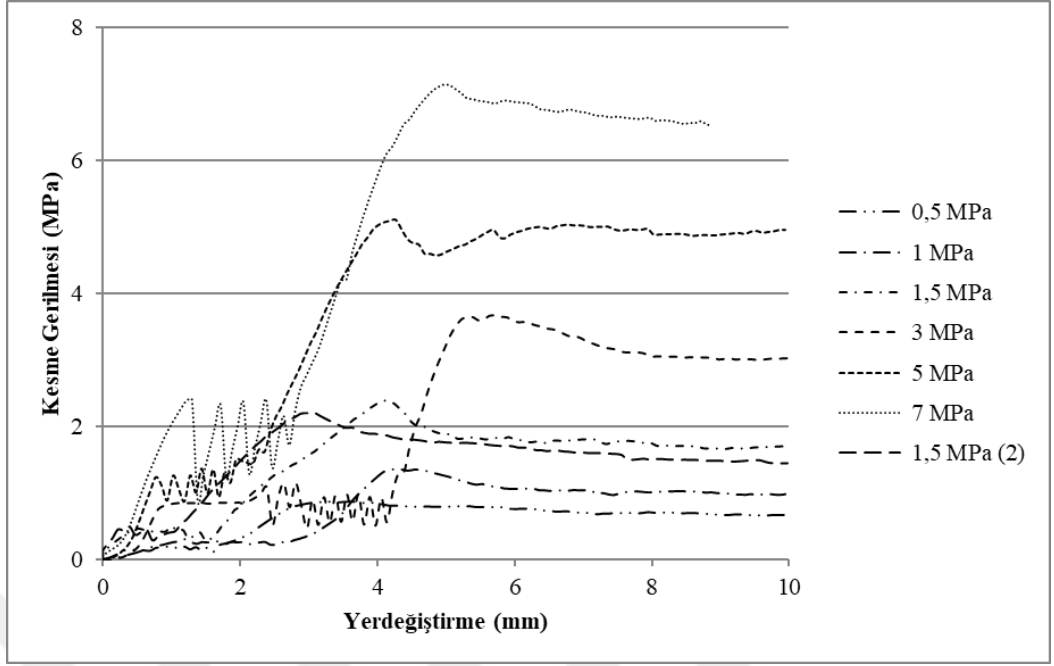
Şekil 4.9 02 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



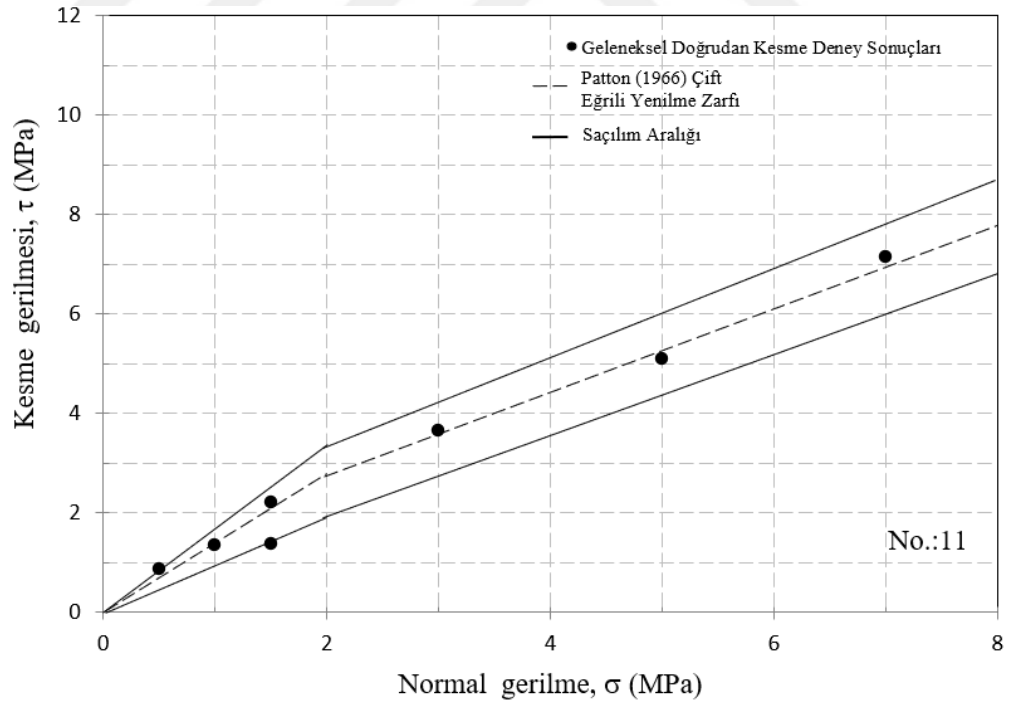
Şekil 4.10 05 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değıştirme grafiği



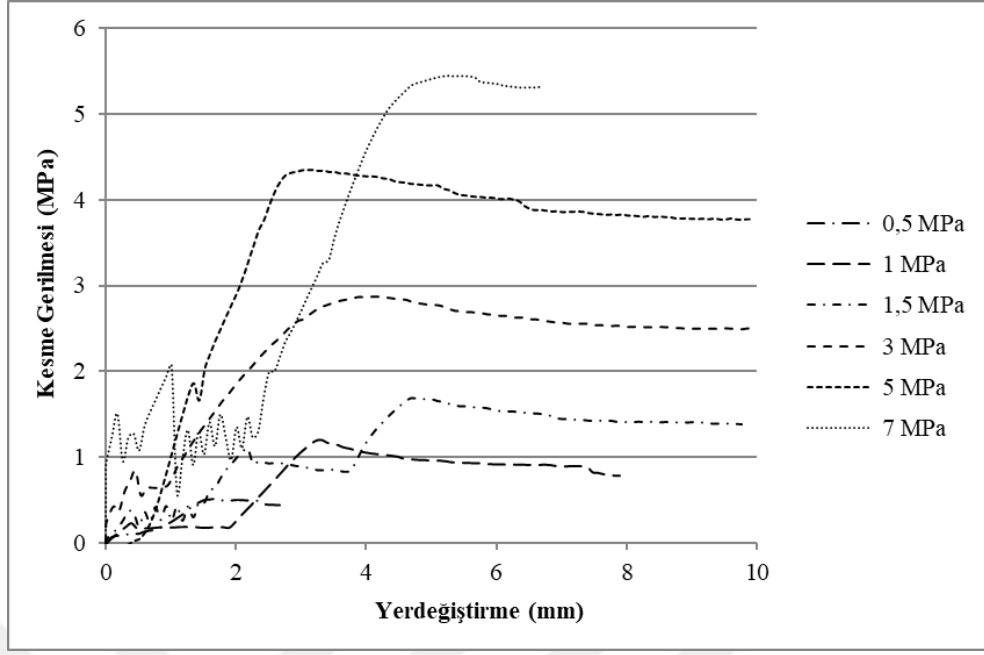
Şekil 4.11 05 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



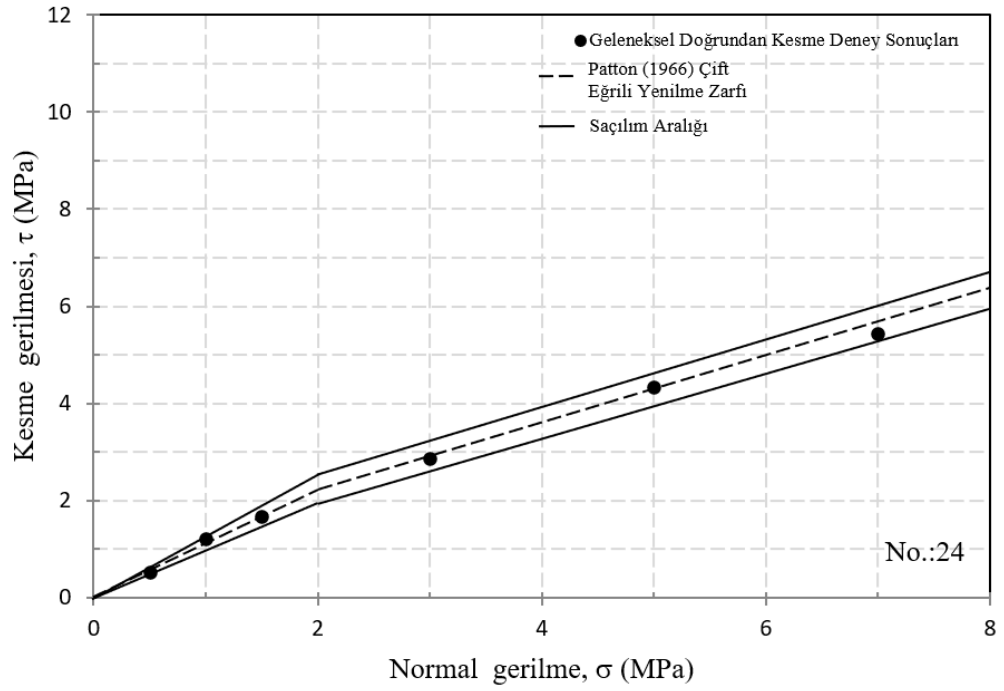
Şekil 4.12 11 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



Şekil 4.13 11 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



Şekil 4.14 24 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



Şekil 4.15 24 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği

Çizelge 4.5 Tüm kayalar üzerinde gerçekleştirilen geleneksel kesme deneyinden elde edilen toplam sürtünme açıları (ϕ_b+i), temel sürtünme açıları (ϕ_b) ve bunlardan hesaplanarak bulunmuş pürüzlülük açıları (i)

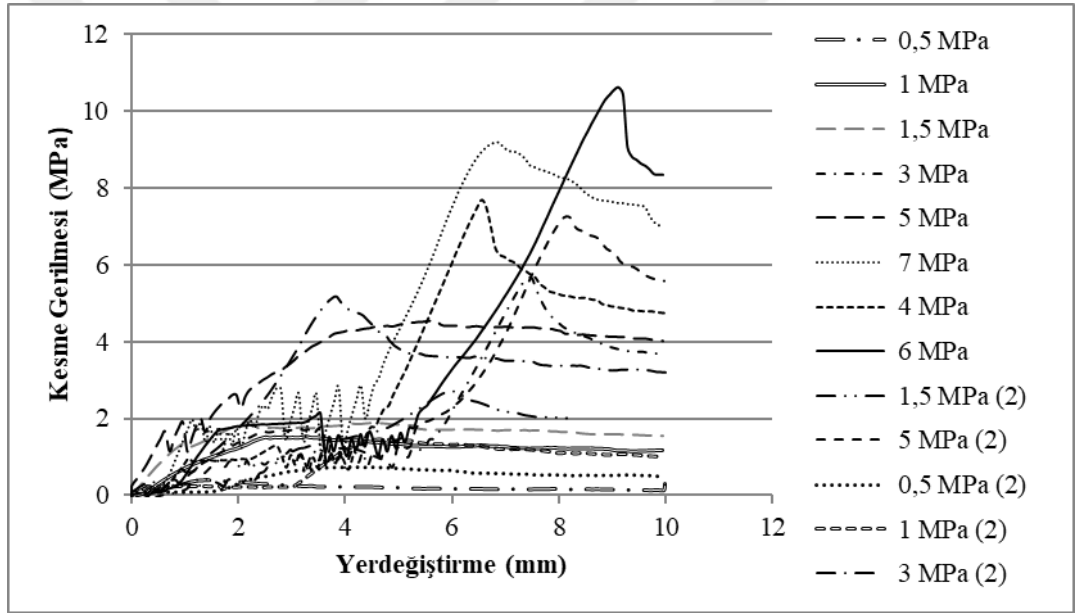
Numune No	Toplam Sürtünme Açısı ϕ_b+i (°)	Temel Sürtünme Açısı ϕ_b (°)	Pürüzlülük Açısı i (°)
01	59,0	46,6	12,4
02	59,2	43,2	16,1
03	53,5	38,1	15,4
04	44,2	34,3	9,9
05	46,3	28,8	17,5
06	52,4	41,2	11,3
07	53,5	41,3	12,1
08	57,7	41,7	16
09	49,6	39,8	9,8
10	54,5	27,8	26,7
11	54,5	39,8	14,7
12	50,2	43,0	7,2
13	51,3	43,8	7,6
14	56,3	44,5	11,8
15	55,4	40,9	14,5
16	55,4	45,5	9,9
17	55,4	34,9	20,5
18	56,3	43,9	12,4
19	58,0	37,5	20,5
20	47,1	29,5	17,5
21	58,0	50,4	7,6
22	47,7	40,6	7,1
23	51,3	44,5	6,8
24	49,0	34,3	14,7
25	56,3	40,0	16,3
26	50,2	39,4	10,8
27	56,3	41,7	14,6
28	53,5	41,5	12,0
29	58,0	40,4	17,6
30	42,0	36,9	5,1

Pürüzlülük açısı toplam sürtünme açısından temel sürtünme açısı çıkarılarak belirlenmiştir.

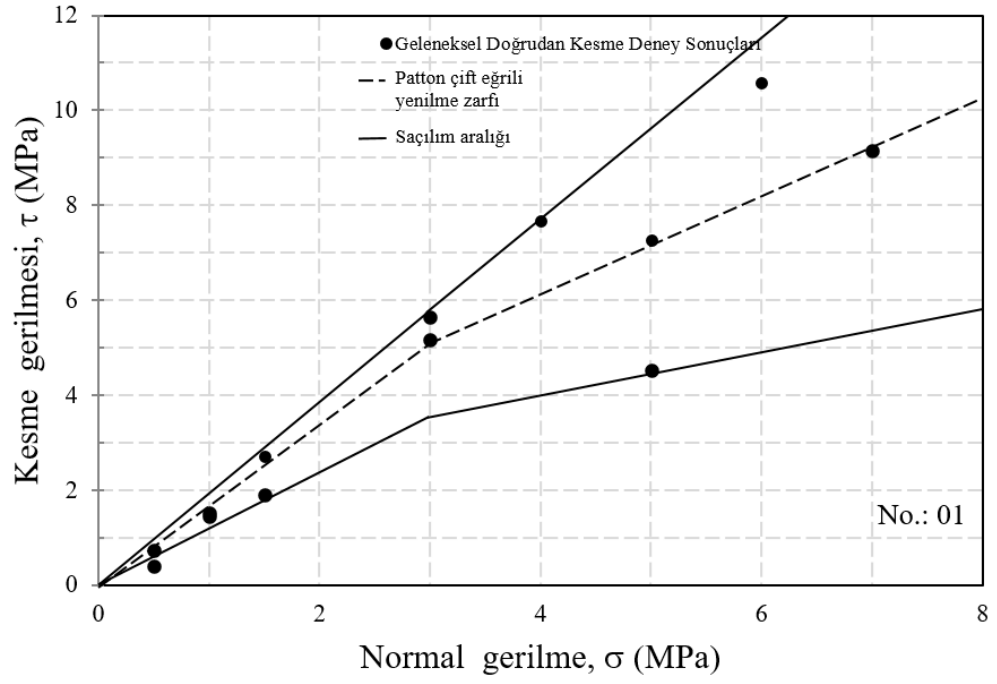
Bu çalışmada Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının kesişim yerleri geniş bir veri tabanı ile irdelenmiştir. Tüm kaya türleri için elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme

zarflarının kesişim yerlerinin, 30 kayanın 26'sında 2 MPa civarında bir normal gerilmeye karşılık geldiği belirlenmiştir. Ancak, bu kesişim yerinin yaklaşık 2 MPa civarında yoğunlaştığı gözlemlenmekle birlikte, daha ayrıntılı çalışmalar ve istatistiksel analizlerle bu durumun detaylı olarak incelenmesi faydalı olacaktır. Bu kapsamda gerçekleştirilecek çalışmalar, eğrilerin kesişim yerlerinin ani/keskin veya dereceli bir değişim sergileyip sergilemediğini ortaya koyabilir.

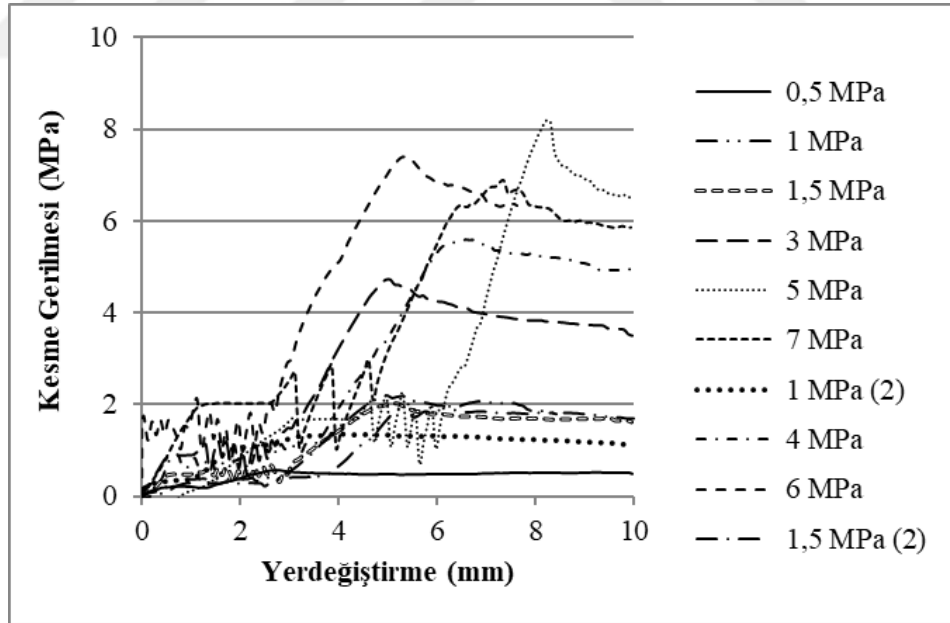
Dört adet kaya türünde ise Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının kesişim yerlerinin 2 MPa dışında bir normal gerilme değerine karşılık geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.16 - Şekil 4.23). Bunlar 01 No.'lu andezit, 08 No.'lu rekristalize kireçtaşı, 10 No.'lu kristalize kireçtaşı ve 18 No.'lu bazalt kayalarıdır.



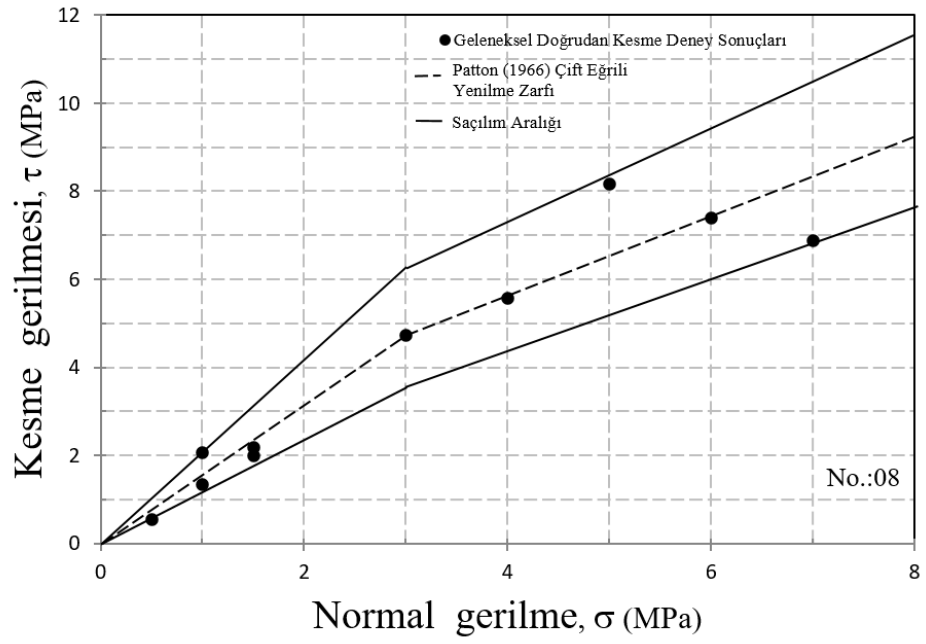
Şekil 4.16 01 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



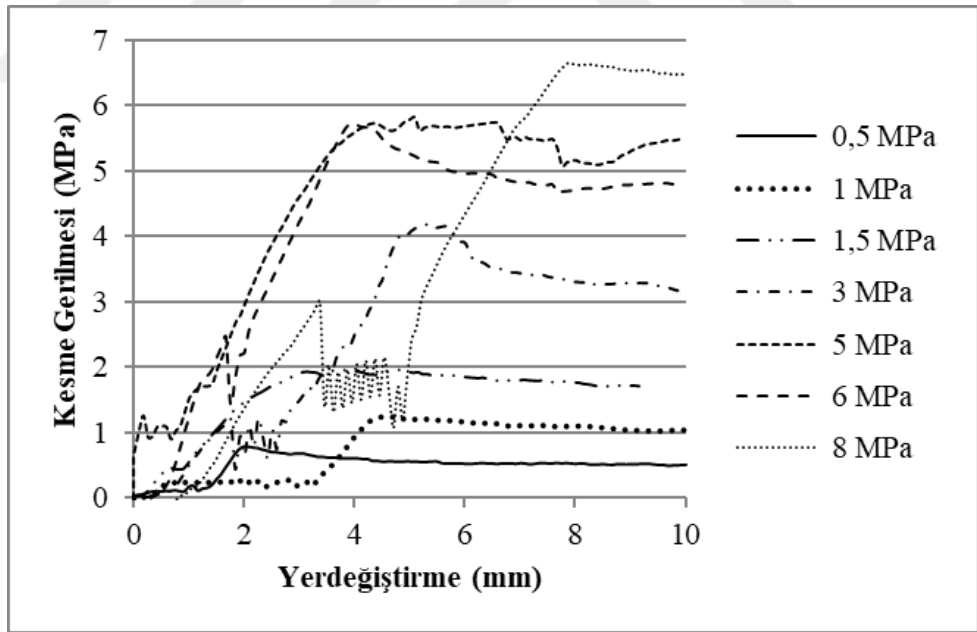
Şekil 4.17 01 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



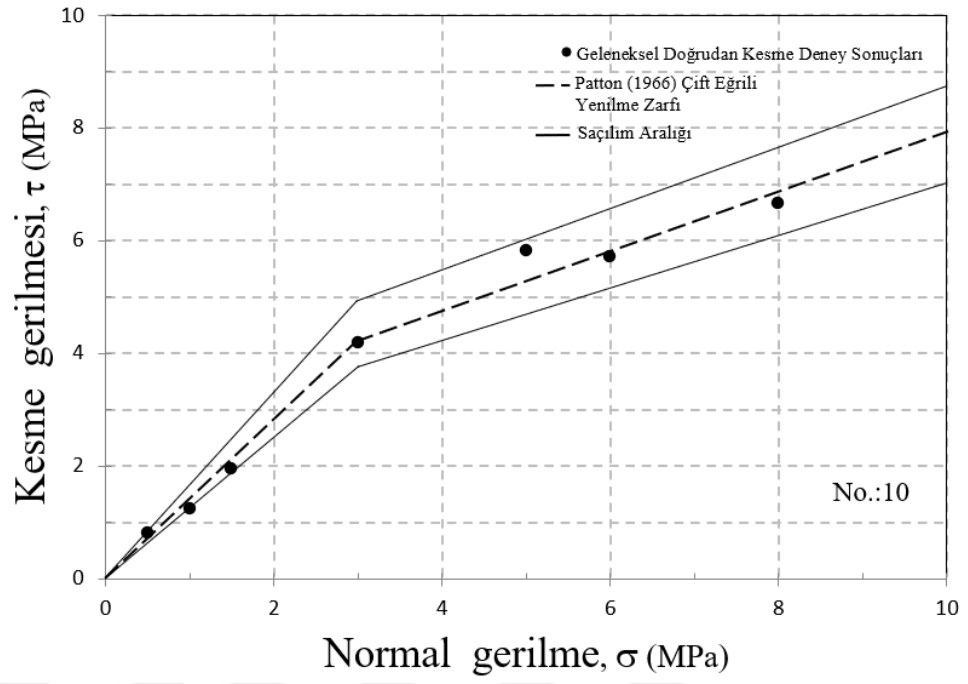
Şekil 4.18 08 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



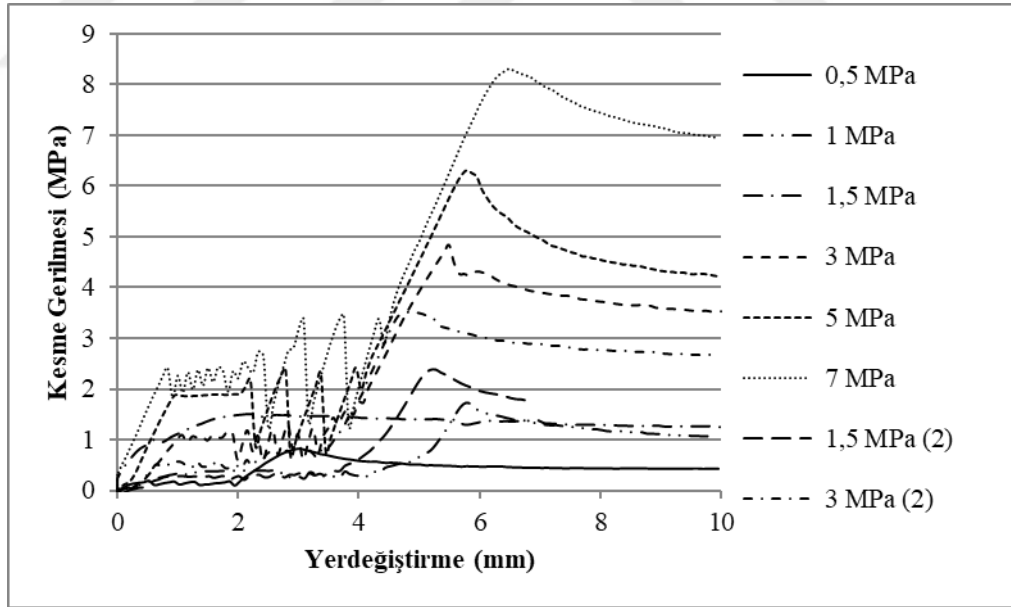
Şekil 4.19 08 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



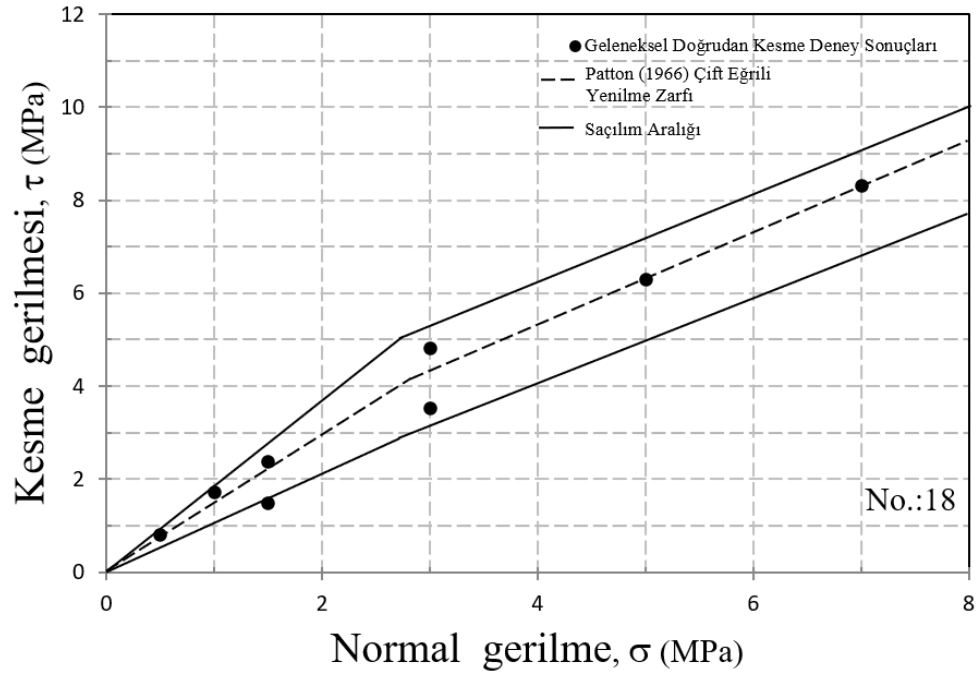
Şekil 4.20 10 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



Şekil 4.21 10 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği

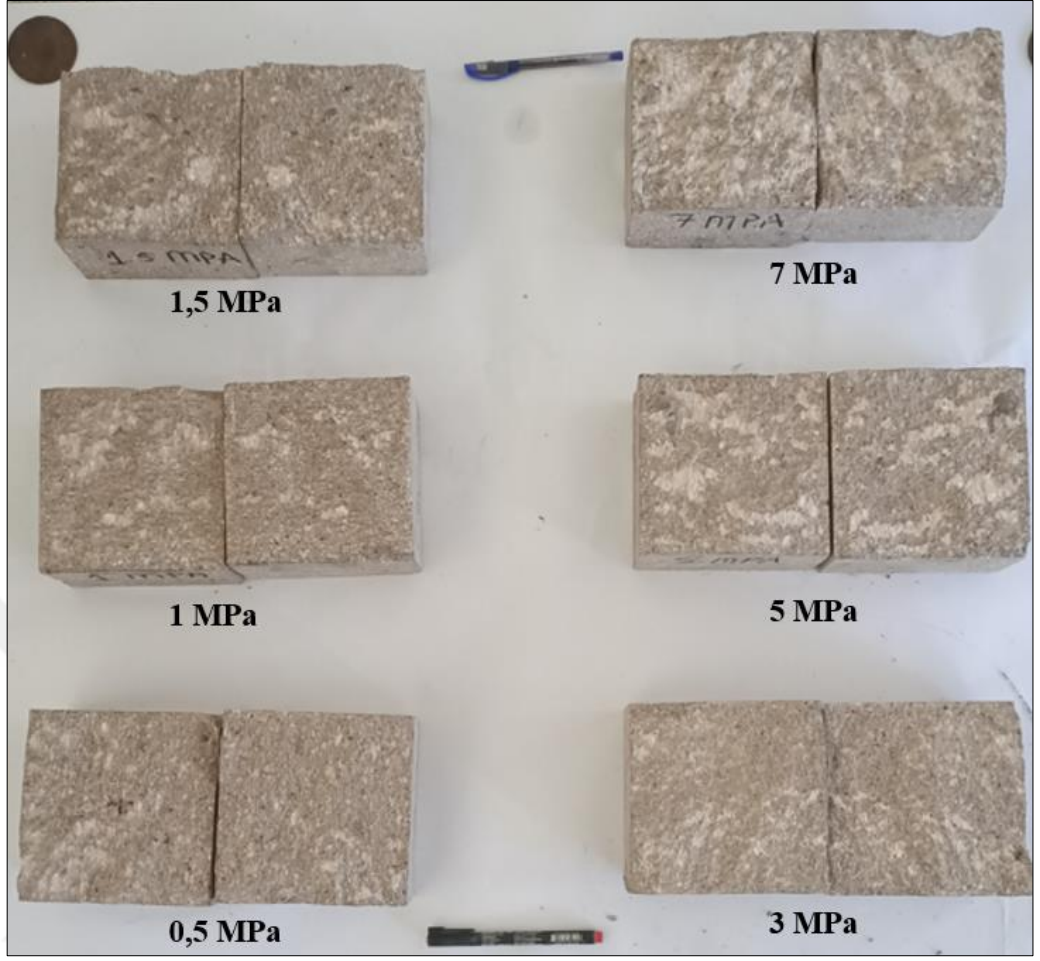


Şekil 4.22 18 No.'lu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



Şekil 4.23 18 No.'lu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği

Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının kesişim yeri 2 MPa dışında bir normal gerilmede olmasının, kayanın dayanımının nispeten yüksek ve birinci derece pürüzlülüğe sahip olmasından ileri gelebileceği düşünülmektedir. Bu özelliklere sahip kayalarda kesme deneyi esnasında ikinci derece pürüzlülükler kesilse dahi birinci derece pürüzlülüklerin kesilmemesi durumunda süreksizlik yüzeyindeki sıkışma ve kenetlenmenin birinci derece pürüzlülükler tarafından kontrol edildiği gözlenmiştir. Kesme davranışını ise ikinci derece pürüzlülükler üzerinde yer alan birinci derece pürüzlülükler kontrol etmektedir. Dayanımı yüksek olan, birinci derece ve ikinci derece pürüzlülük içeren kayalarda kesme esnasında ikinci derece pürüzlülükler kesilirken, birinci derece pürüzlülükler kayanın dayanımı da yüksek ise kesilemez ve böylece genişleme (dilasyon) birinci derece pürüzlülüklerde devam eder. Şekil 4.24'te görüldüğü üzere dayanımı yüksek ve birinci derece pürüzlülükler içeren 01 No.lu kayada birinci derece pürüzlülükler traşlanmamıştır.



Şekil 4.24 Birinci derece süreksizliklere sahip 01 No.'lu kayanın deney sonrası görünümü

5. ÇALIŞMA HİPOTEZİNİN İRDELENMESİ

Tez çalışmasında Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının kesişim yerleri genellikle 2 MPa civarında bir normal gerilmeye yoğunlaştığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının elde edilmesi için toplam sürtünme açısı (ϕ_{b+i}) ve temel sürtünme açısı (ϕ_b) kullanılarak çizilen eğrilerin 2 MPa normal gerilme değerinde kesiştirilmesi ile süreksizliklerin kesme dayanımının kapsamlı deneylere gerek duymadan, kısa yoldan belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, her kaya türü için tiltmetre ve profilometre deneyleri yapılmıştır. Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfında eğrinin birinci kısmını (toplam sürtünme açısını) oluşturmak için profilometreden bulunan pürüzlülük açısı ve tiltmetreden bulunan temel sürtünme açısının toplamı; eğrinin ikinci kısmını (temel sürtünme açısını) oluşturmak için de tiltmetreden bulunan temel sürtünme açısı kullanılmıştır.

Profilometre deneyi ile belirlenen pürüzlülük açılarıyla, tiltmetre deneyinden üç farklı yöntemle (karot numuneler, testere izli blok numuneler ve 100 no'lu ince zımpara ile aşındırılmış yüzeyler) elde edilen temel sürtünme açılarının sonuçlarının ayrı ayrı toplanmasıyla Patton (1966) yenilme zarfları oluşturulmuştur (Çizelge 5.1). Bu yöntem ile elde edilen yenilme zarflarının doğrudan kesme deneyi ile elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı ile benzerliği incelenmiştir. Tiltmetre deneyinden elde edilen temel sürtünme açıları ve tiltmetre ile profilometre deneyinden elde edilen toplam sürtünme açılarıyla oluşturulan Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının bu saçılım aralıkları içinde yer alıp almadığı kontrol edilmiştir.

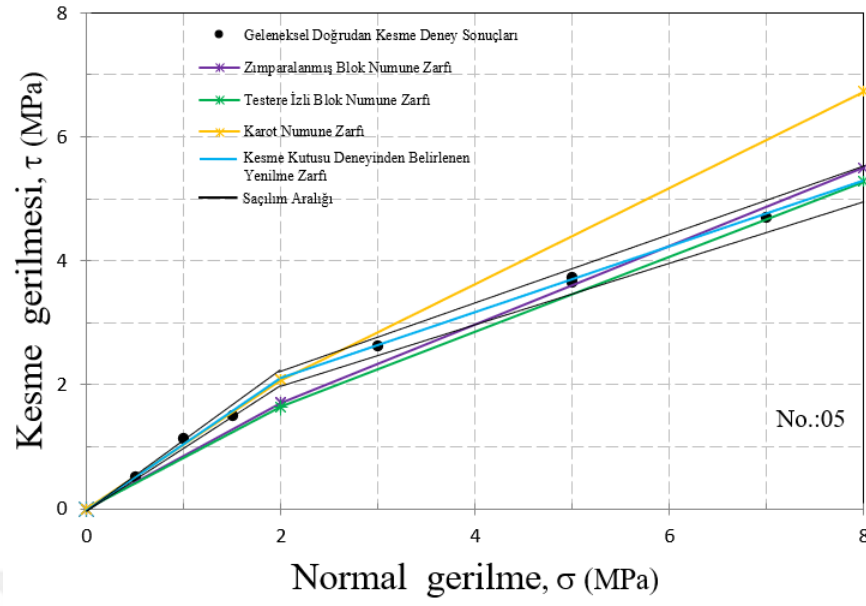
Çizelge 5.1 Tiltmetre deneyi ve profilometre deneyi ile belirlenen temel sürtünme açıları (ϕ_b), pürüzlülük açıları (i) ve toplam sürtünme açıları (ϕ_b+i)

Numune No.	Temel Sürtünme Açıları ϕ_b			Pürüzlülük Açısı (i)	Toplam Sürtünme Açıları ϕ_b+i		
	Blok Numune	Karot Numune	Zımparalanmış Blok Numune		Blok Numune	Karot Numune	Zımparalanmış Blok Numune
01	29,0	39,8	23,6	9,3	38,3	49,1	32,9
02	28,2	40,6	24,4	7	35,2	47,6	31,4
03	34,6	43,0	32,3	7,3	41,9	50,3	39,6
04	31,0	40,3	31,0	6,5	37,5	46,8	37,5
05	33,4	40,1	34,5	6	39,4	46,1	40,5
06	30,0	42,5	27,5	4,9	34,9	47,4	32,4
07	31,0	40,4	25,6	6,6	37,6	47,0	32,2
08	33,2	44,2	26,6	9,7	42,9	53,9	36,3
09	35,2	40,5	24,5	6,9	42,1	47,4	31,4
10	34,4	42,0	28,9	7,3	41,7	49,3	36,2
11	33,1	43,0	27,4	6,8	39,9	49,8	34,2
12	33,5	43,7	26,5	8	41,5	51,7	34,5
13	36,9	40,9	27,3	5,9	42,8	46,8	33,2
14	34,8	42,7	26,0	8,6	43,4	51,3	34,6
15	36,9	43,4	26,7	6,2	43,1	49,6	32,9
16	32,9	41,0	26,4	6,8	39,7	47,8	33,2
17	31,3	36,0	27,1	8,3	39,6	44,3	35,4
18	33,7	39,5	27,0	8,6	42,3	48,1	35,6
19	34,7	38,9	28,6	9,9	44,6	48,8	38,5
20	35,3	42,7	28,6	8,3	43,6	51,0	36,9
21	27,8	42,6	25,8	9,5	37,3	52,1	35,3
22	31,7	38,3	23,4	5,6	37,3	43,9	29,0
23	27,1	39,8	24,0	6	33,1	45,8	30,0
24	28,3	41,9	29,7	8	36,3	49,9	37,7
25	33,4	40,1	25,8	7	40,4	47,1	32,8
26	35,5	41,7	28,1	9	44,5	50,7	37,1
27	31,5	38,6	20,9	11,5	43,0	50,1	32,4
28	32,5	43,7	26,9	7	39,5	50,7	33,9
29	32,8	42,7	24,7	8	40,8	50,7	32,7
30	32,4	40,2	29,5	5,6	38,0	45,8	35,1

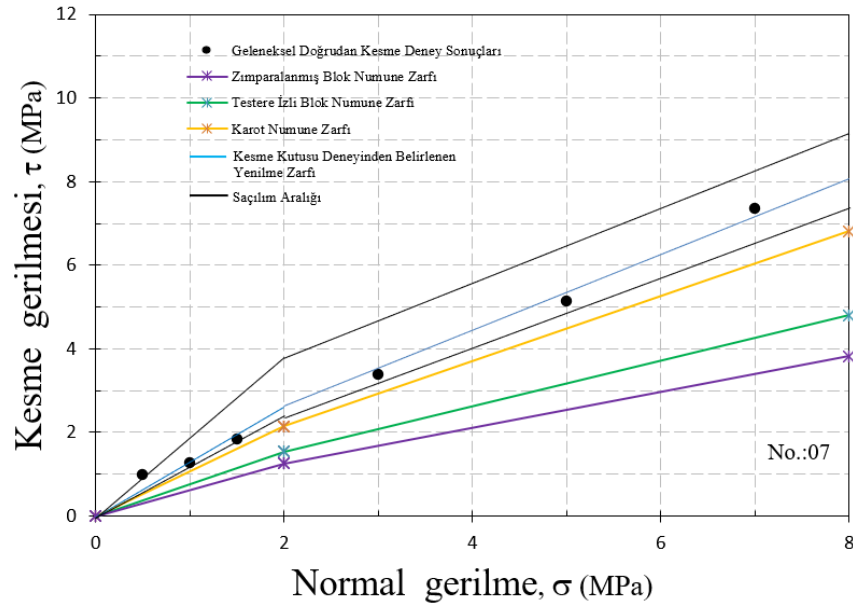
Yapılan çalışma sonucunda, zımparalanmış blok numuneler ve testere izli blok numuneler için elde edilen Patton çift eğrili yenilme zarflarının, 30 kaya türünden sadece 5'inin saçılım aralığında kısmen veya tamamen yer aldığı belirlenmiştir. Bunlar 05 No.'lu fosilli kireçtaşı, 17 No.'lu ignimbirit, 20 No.'lu ignimbirit, 24 No.'lu ignimbirit ve 30 No.'lu vitrik tuf kayaları olup, bu kayaların en belirgin benzer özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımlarının en düşük olan kayalar arasında bulunmalarıdır. Karot numunelere ait temel sürtünme açıları kullanılarak elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarında, 30 kaya türünde 14 tanesi saçılım aralığında, 5 kaya türünde ise kesme kutusu deneyinden elde edilen Patton (1966) zarfına oldukça benzer yenilme zarfı elde edilmiştir.

Şekil 5.1'de üç yöntem ile elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının kesme kutusu deneyi sonuçları ile oluşturulan saçılım aralığının içerisinde kısmen yer aldığı belirlenmiştir. Şekil 5.2'de üç yöntem ile elde edilen zarfların hiçbirinin saçılım aralığında yer almadığı, Şekil 5.3'te ise karot numuneler ve kesme kutusu deneyinden elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tüm kayalara ait sonuçlar Ek-5'te sunulmuştur.

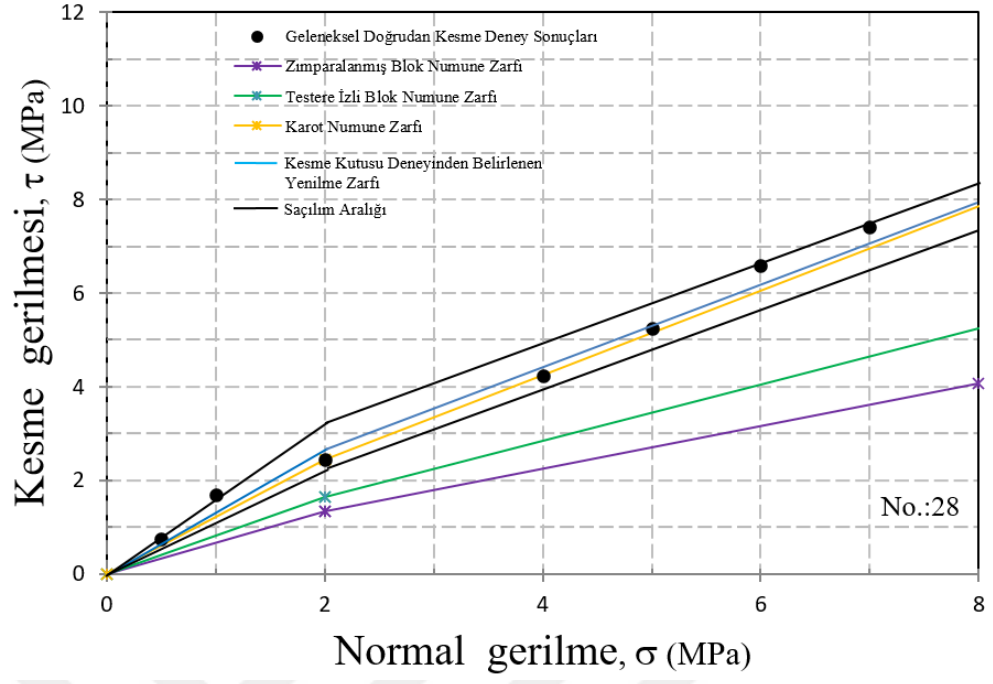
Sonuç olarak karot numuneler, testere izli blok numuneler ve zımparalanmış blok numunelerden elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı ile kesme kutusu deneyiyle elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı arasında 30 kaya türünün 22 tanesinde kısmen bir uyum olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu oran umut verici olmakla beraber bu iki metod ile belirlenen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfları arasında doğrudan bir ilişki tespit edilememiştir. Ancak, uygulanacak normal gerilme değeri ve deney sayılarının arttırılması ile iki yöntem arasında daha sağlıklı bir ilişki ortaya konulabilir.



Şekil 5.1 05 No.'lu kaya için üç yöntem ile belirlenen Patton çift eğrili yenilme zarflarının geleneksel yöntem ile belirlenen zarflar ile karşılaştırılması



Şekil 5.2 07 No.'lu kaya için üç yöntem ile belirlenen Patton çift eğrili yenilme zarflarının geleneksel yöntem ile belirlenen zarflar ile karşılaştırılması



Şekil 5.3 28 No.'lu kaya için üç yöntem ile belirlenen Patton çift eğrili yenilme zarflarının geleneksel yöntem ile belirlenen zarflar ile karşılaştırılması

6. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER VE SÜREKSİZLİKLERİN KESME DAYANIMININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK AMPİRİK BİR İLİŞKİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Bu tez çalışmasının hipotezlerinden biri olan Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının kesişim yerlerinin 2 MPa'lık bir normal gerilme değeri civarında yoğunlaştığı gözlenmiş olsa da tiltmetre ve profilometre deneyleri ile elde edilen sonuçlarla oluşturulan Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarının, kesme kutusu deneyinden elde edilen yenilme zarflarıyla sınırlı düzeyde uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tez önerisinde yer almamasına rağmen, süreksizliklerin kesme dayanımı ile onu etkileyebilecek parametreler arasında bir ilişki olup olmadığına dair bir irdeleme yapılmıştır.

Bu kapsamda, süreksizliklerin kesme dayanımının alternatif bir yöntem ile ortaya konulması için, 30 farklı kaya setine ait yapay süreksizlikler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde belirlenen doruk kesme dayanımları ve Çizelge 6.1'de yer alan parametreler kullanılarak, süreksizliklerin kesme dayanımının ampirik bir yöntem ile belirlenmesine yönelik bir dizi istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Geleneksel doğrudan kesme deneyinden elde edilen kesme dayanımı bağımlı değişken, diğer parametrelerin ise bağımsız değişken olduğu çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Çoklu regresyon analizlerinde bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde toplu etkisi incelenmiştir.

SPSS ve DATAFIT yazılımı kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve her iki program ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. SPSS yazılımı kullanılarak yapılan istatistiksel analizler ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde etkisi ve anlamlılık durumu detaylıca irdelenmiştir. DATAFIT (Oakdale Engineering, 2008) yazılımı kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizleri Çizelge 6.1'de yer alan parametrelerin hepsi ve ayrı ayrı birkaçı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SPSS ve DATAFIT yazılımları ile gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucunda, bir süreksizliğin kesme dayanımını en fazla etkileyen parametreler belirlenmiş ve bu parametreler arasında ampirik bir ilişki ortaya konulmuştur.

Çizelge 6.1 Regresyon analizi için kullanılan parametreler

No.	Deneyler	Parametreler	Değişken
1	Profilometre Deneyi	Pürüzlülük açısı, (i)	Bağımsız
2	Tiltmetre Deneyi	Testere izli blok numune / Temel sürtünme açısı (ϕ_b)	
3		Karot numune / Temel sürtünme açısı, (ϕ_b)	
4		Zımparalanmış blok numune / Temel sürtünme açısı, (ϕ_b)	
5	Tiltmetre ve Profilometre Deneyi	Testere izli blok numune / Toplam sürtünme açısı (ϕ_t)	
6		Karot numune / Toplam sürtünme açısı, (ϕ_t)	
7		Zımparalanmış blok numune / Toplam sürtünme açısı, (ϕ_t)	
8	Tek Eksenli Sıkışma Deneyi	Tek eksenli sıkışma dayanımı, (σ_{ort}) (MPa)	
9		E_{ort} , (GPa)	
10		Modül oranı, E/σ_c	
11	Kesme Kutusu Deneyi	Uygulanan normal gerilme, (MPa)	Bağımlı
12		Kesme gerilmesi, (MPa)	

6.1 SPSS Yazılımı ile Yapılan İstatistiksel Analizler

SPSS yazılımı (IBM SPSS Statistics, 2021) istatistiksel analizlerin yapılması için kullanılan bir paket programdır. Program sosyal bilimler, fen bilimleri, eğitim ve sağlık gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Bu araştırmada süreksizlikler üzerinde gerçekleştirilen bir dizi deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak bu verilerin süreksizliklerin kesme dayanımını ne ölçüde etkilediği irdelenmiştir. Bu amaçla hem doğrusal analizler hem de doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve belirleme katsayıları tayin edilmiştir. Doğrusal analizler i)

tüm sonuçlar ve ii) Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfında eğrinin birinci ve ikinci kısmına ait sonuçlar için ayrı ayrı yapılmıştır. Böylece hem tüm verilerin doğrusal analizinde hem de Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının birinci ve ikinci kısmında hangi bağımsız değişkenlerin etkili olduğu incelenmiştir. SPSS yazılımı ile doğrusal analizlerin gerçekleştirilmesi için Çizelge 6.2 de sunulan koşulların sağlanması gerekir.

Çizelge 6.2 Doğrusal analizlerde sağlanması gereken koşullar (IBM SPSS Statistics, 2021)

No	Koşullar
1	Bağımlı değişken eşit aralıklı/eşit düzeyde ve sürekli değişken olması
2	Değişkenlerin normal dağılıma sahip olması
3	Doğrusallık ilişkisinin sağlanması
4	Bağımsız değişkenlerde çoklu bağlantılılık olmaması
5	Uç değerlerin olmaması
6	Hataların normal dağılması
7	Eşvaryanslık olmaması
8	Hataların birbirinden bağımsız olması

Tüm veriler modele aktarıldıktan sonra, model çıktıları ve koşulların sağlanıp sağlanmadığı incelenmiştir. Modelde bağımsız değişkenlerin çoklu regresyon analizinde bağlantılılık özelliği göstermemesi gerekir. Bunun için iki bağımsız değişken arasındaki korelasyon ilişkisi $r < 0,8$ olmalıdır. Buna uymayan parametreler modelden çıkarılmıştır. Korelasyon tablosunda nőtür ve nőtüre yakın korelasyon katsayısı ortaya koyan ve anlamlılık (önem testi) koşulu 0,05'in oldukça üzerinde olan parametreler de modelden çıkarılmış olup, koşulları sağlayan parametreler ile model güncellenmiştir. Buna göre tek eksenli sıkışma dayanımı (TESD), normal gerilme değeri, pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı ve pürüzlülük açısı bağımsız değişkenleri güncellenen modelde yer almıştır. Modelde koşulların sağlandığı belirlendikten sonra model sonuçları incelenmiştir (Çizelge 6.3, Çizelge 6.4, Çizelge 6.5)

Çizelge 6.3 ANOVA tablosu

ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	Anlamlılık (Sig.)
1	Belirleme	1092,658	4	273,164	621,427	0,000 ^b
	Kalıntı	90,113	205	0,440		
	Toplam	1182,771	209			
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı						
b. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzlülük açısı, normal gerilme, TESD, pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı						

Çizelge 6.4 Model özeti tablosu

Model Özeti ^b					
Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	0,961 ^a	0,924	0,922	0,66301	1,178
a. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzlülük açısı, normal gerilme, TESD, pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı					
b. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı					

Çizelge 6.5 Katsayı tablosu

Katsayılar ^a												
Model	Standartsız Katsayılar		Standartlı Katsayılar	t	Anlamlılık (Sig.)	B için %95 Güven Aralığı		Korelasyon			Çoklu Bağlantı İstatistikleri	
	B	Std Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Sıfır derece	Kısmi	Bölüm	Tolerans	VIF
(Sabit)	-0,275	0,944		-0,291	0,771	-2,137	1,587					
TESD	0,007	0,002	0,090	3,126	0,002	0,003	0,012	0,082	0,213	0,060	0,447	2,237
Normal Gerilme	0,933	0,019	0,953	49,407	0,000	0,895	0,970	0,950	0,960	0,952	0,999	1,001
Pürüzsüz Yüzeylerin Temel Sürtünme Açısı	-0,026	0,026	-0,030	-0,989	0,324	-0,077	0,026	-0,105	-0,069	-0,019	0,416	2,401
Pürüzlülük Açısı	0,132	0,033	0,083	4,013	0,000	0,067	0,197	0,094	0,270	0,077	0,869	1,150
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı												

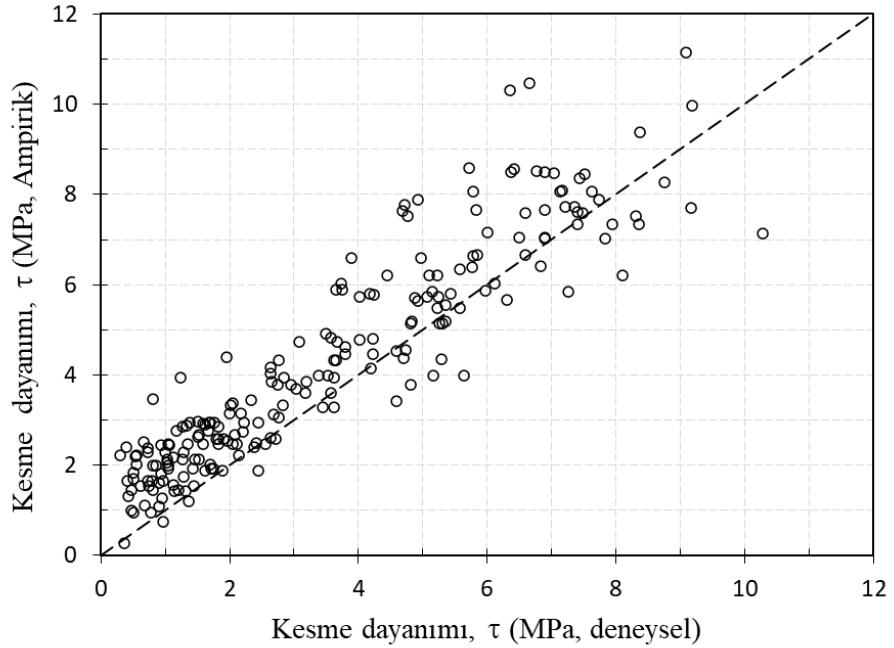
ANOVA tablosunda (Çizelge 6.3) anlamlılık değeri 0,05'in altında olduğu için modelin anlamlı olduğu belirlenmiştir Model özeti tablosu (Çizelge 6.4) incelendiğinde düzenlenmiş belirleme katsayısı 0,92 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı olup olmadığını (t testi) belirlemek amacıyla katsayı tablosunda (Çizelge 6.5) yer alan anlamlılık (sig.) değerleri incelenmiştir. Buna göre tek eksenli sıkışma dayanımı ($p = 0,002$), normal gerilme değeri ($p = 0,000$) ve pürüzlülük

açısının ($p = 0,000$) bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu; pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısının ($p = 0,324$) anlamlı bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki ampirik ilişki ortaya konulmuştur.

$$\tau_D = -0,275 + 0,007\sigma_c + 0,933\sigma_n - 0,026\phi_b + 0,132i \quad (6.1)$$

Burada τ_D : Doğrusal analizde belirlenen kesme dayanımı, σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_n : Uygulanan normal gerilme değeri, i : Pürüzlülük açısı ve ϕ_b : Pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısıdır.

Şekil 6.1’de deneysel yöntem ve doğrusal analizlerle elde edilen kesme dayanımları arasında saçılımı bir dağılım olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, SPSS’de tüm sonuçların doğrusal analiz yöntemiyle analiz edilmesinin, deneysel yöntemle elde edilen sonuçları tam yansıtmadığı şeklinde değerlendirilmiştir. Bu sebeple Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının her iki kısmı için ayrı ayrı doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1 Deneysel yöntem ve tüm verilerin doğrusal analizinde belirlenen ampirik yöntemle elde edilen kesme dayanımlarının karşılaştırılması

6.1.1 Patton (1966) çift eğrili zarf için ayrı ayrı gerçekleştirilen regresyon analizleri

Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfında eğrinin birinci kısmı ve eğrinin ikinci kısmının kesişim yerinin 30 kaya türünün 26'sında 2 MPa civarında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfında eğrinin birinci kısmı ve eğrinin ikinci kısmına ait zarfların doğrusal olmasından dolayı bu iki zarf için ayrı ayrı doğrusal çoklu regresyon analizleri yapılmıştır.

Eğrinin birinci kısmı için yapılan regresyon analizi: Eğrinin birinci kısmı için 2 MPa normal gerilme değerine eşit ve bu değer altında olan değerler seçilmiş ve eğrinin birinci kısmı olarak değerlendirilip modele aktarılmıştır. Oluşturulan modelde korelasyon tablosu incelendiğinde kesme dayanımı ile normal gerilme arasında güçlü bir korelasyon belirlenmiş; kesme dayanımı ile diğer tüm bağımsız değişkenler arasında zayıf bir korelasyon gözlenmiştir. Zayıf korelasyon sergileyen tek eksenli sıkışma dayanımı ve pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısının, diğer bağımsız değişkenlere kıyasla daha yüksek bir korelasyon katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlılık özelliği incelendiğinde sadece normal gerilmenin kesme dayanımı üzerinde anlamlı ($p < 0,01$) bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, tek eksenli sıkışma dayanımı ve pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısının diğer parametrelere kıyasla anlamlılık değerinin $p = 0,05$ değerine daha yakın olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple tek eksenli sıkışma dayanımı, normal gerilme değeri ve pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı parametreleri ile model tekrar güncellenmiş ve güncellenen modelde doğrusal analiz için koşulların sağlandığı belirlendikten sonra model çıktıları incelenmiştir (Çizelge 6.6, Çizelge 6.7, Çizelge 6.8).

Çizelge 6.6 ANOVA tablosu

ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	Anlamlılık (Sig.)
1	Belirleme	37,344	3	12,448	153,693	0,000 ^b
	Kalıntı	7,937	98	0,081		
	Toplam	45,281	101			
a. Bağımlı Değişken: Kesme dayanımı						
b. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı, normal gerilme, TESD						

Çizelge 6.7 Model özeti tablosu

Model Özeti ^b					
Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	0,908 ^a	0,825	0,819	0,208459	1,673
a. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı, normal gerilme, TESD					
b. Bağımlı Değişken: Kesme dayanımı					

Çizelge 6.8 Katsayı tablosu

Katsayılar ^a												
Model	Standartsız Katsayılar		Standartlı Katsayılar	t	Anlamlılık (Sig.)	B için %95 Güven Aralığı		Korelasyon			Çoklu Bağlantı İstatistikleri	
	B	Std Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	B	Std Hata	Beta	Tolerance	VIF
(Sabit)	0,229	0,474		0,484	0,630	-0,711	1,170					
TESD	0,002	0,001	0,106	1,762	0,081	0,000	0,005	0,149	0,175	0,075	0,492	2,031
Normal Gerilme	1,223	0,058	0,896	21,180	0,000	1,108	1,337	0,897	0,906	0,896	0,999	1,001
Pürüzsüz Yüzeylerin Temel Sürtünme Açısı	-0,010	0,015	-0,042	-0,692	0,491	-0,040	0,019	-0,112	-0,070	-0,029	0,492	2,031
a. Bağımlı Değişken: Kesme dayanımı												

ANOVA tablosunda (Çizelge 6.6) anlamlılık değeri 0,05'in altında olduğu için modelin anlamlı olduğu belirlenmiştir. Model özeti tablosu (Çizelge 6.7) incelendiğinde düzenlenmiş belirleme katsayısı 0,81 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı olup olmadığını (t testi) belirlemek amacıyla katsayı tablosunda (Çizelge 6.8) yer alan anlamlılık (sig.) değerleri incelenmiştir. Buna göre eğrinin birinci kısmında normal gerilme değerinin anlamlı bir etkiye sahip olduğu ($p = 0,000$), tek eksenli sıkışma dayanımının anlamlılık değerine oldukça yakın olduğu ($p = 0,081$) belirlenmiş; ancak, pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısının anlamlı bir etkiye sahip olmadığı ($p = 0,491$) tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki ampirik ilişki ortaya konulmuştur.

$$\tau_{D1} = -0,229 + 0,002\sigma_c + 1,223\sigma_n - 0,010\phi_b \quad (6.2)$$

Burada τ_{D1} : Doğrusal analiz ile eğrinin birinci kısmı için belirlenen kesme dayanımı, σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_n : Uygulanan normal gerilme değeri ve ϕ_b : Pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısıdır.

Eğrinin ikinci kısmı için yapılan regresyon analizi: Eğrinin ikinci kısmı için 2 MPa normal gerilme değerinin üzerindeki kesme dayanımları dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Tüm veriler modele aktarılıp korelasyon tablosu incelendiğinde kesme dayanımı ile normal gerilme arasında güçlü bir korelasyon olduğu ve kesme dayanımının diğer tüm parametreler ile zayıf korelasyon sergilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, tek eksenli sıkışma dayanımı ve pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı zayıf korelasyon gösteren diğer parametrelere kıyasla daha yüksek katsayı ile korelasyon katsayısı vermiştir. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenle anlamlılık durumu incelendiğinde, normal gerilme ve pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısının kesme dayanımı ile anlamlı bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple, eğrinin ikinci kısmı için normal gerilme değeri, tek eksenli sıkışma dayanımı ve pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı parametreleri ile model tekrar güncellenmiştir. Güncellenen modelde doğrusal analiz için koşulların

sağlandığı belirlendikten sonra model çıktıları incelenmiştir (Çizelge 6.9, Çizelge 6.10, Çizelge 6.11).

Çizelge 6.9 ANOVA tablosu

ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	Anlamlılık (Sig.)
1	Belirleme	299,957	3	99,986	130,315	0,000 ^b
	Kalıntı	89,770	117	0,767		
	Toplam	389,727	120			
a. Bağımlı Değişken: Kesme dayanımı						
b. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı, normal gerilme, TESD						

Çizelge 6.10 Model özeti tablosu

Model Özeti ^b					
Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	0,877 ^a	0,770	0,764	0,876	0,920
a. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı, normal gerilme, TESD					
b. Bağımlı Değişken: Kesme dayanımı					

Çizelge 6.11 Katsayı tablosu

Katsayılar ^a										
Model	Standartsız Katsayılar		Standartlı Katsayılar	t	Anlamlılık (Sig.)	Korelasyon			Çoklu Bağlantılılık İstatistikleri	
	B	Std Hata	Beta			Sıfır derece	Kısmi	Bölüm	Tolerans	VIF
(Sabit)	4,384	1,406		3,119	0,002					
TESD	0,004	0,004	0,067	1,003	0,318	0,184	0,092	0,045	0,435	2,297
Normal Gerilme	0,772	0,041	0,842	18,949	0,000	0,843	0,868	0,841	0,996	1,004
Pürüzsüz Yüzeylerin Temel Sürtünme Açısı	-0,123	0,044	-0,189	-2,815	0,006	-0,250	-0,252	-0,125	0,436	2,296
a. Bağımlı Değişken: Kesme dayanımı										

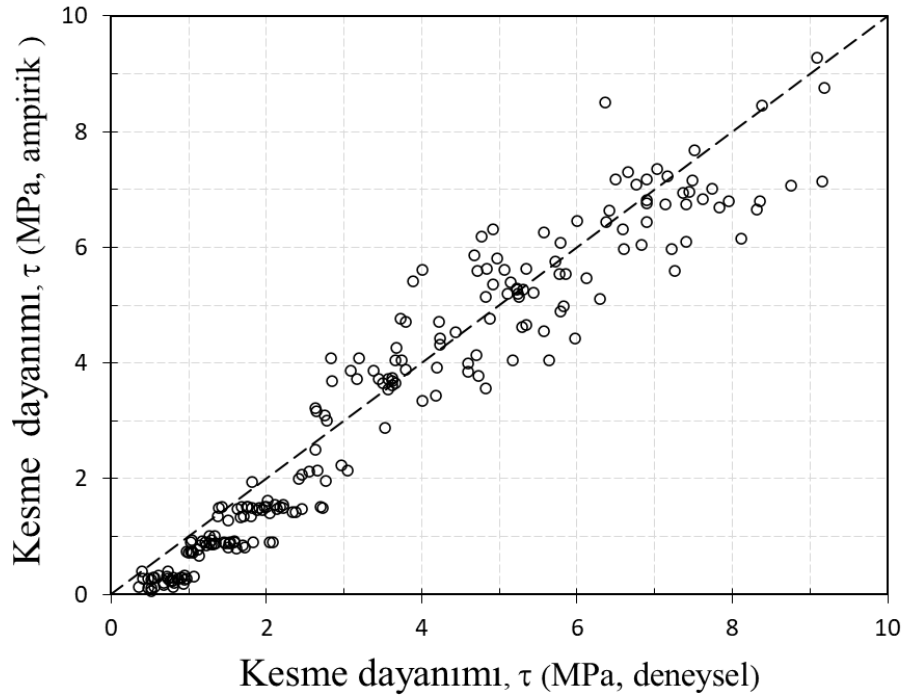
ANOVA tablosunda (Çizelge 6.9) anlamlılık değeri 0,05'in altında olduğu için modelin anlamlı olduğu belirlenmiştir. Model özeti tablosu (Çizelge 6.10) incelendiğinde

düzenlenmiş belirleme katsayısı 0,76 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı olup olmadığını (t testi) belirlemek amacıyla katsayı tablosunda (Çizelge 6.11) yer alan anlamlılık (sig.) değerleri incelenmiştir. Buna göre eğrinin birinci kısmında normal gerilme değeri ($p = 0,000$) ve pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısının ($p = 0,006$) anlamlı bir etkiye sahip olduğu; ancak, tek eksenli sıkışma dayanımının anlamlı olmadığı ($p = 0,318$) tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki ampirik ilişki ortaya konulmuştur.

$$\tau_{D2} = 4,384 + 0,004\sigma_c + 0,772\sigma_n - 0,123\phi_b \quad (6.3)$$

Burada τ_{D2} : Doğrusal analizde eğrinin ikinci kısmı için belirlenen kesme dayanımı, σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_n : Uygulanan normal gerilme değeri ve ϕ_b : Pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısıdır.

Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfları için ayrı ayrı ampirik formüller oluşturulmuş ve kesme dayanımları elde edilmiştir. Şekil 6.2’de deneysel yöntem ile Patton (1966) zarfları için belirlenen kesme dayanımları kıyaslanmıştır. Grafikte kısmen daha az saçılım görülmekle birlikte eğrinin birinci ve ikinci kısımlarında elde edilen regresyon katsayılarının nispeten düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.2 Patton çift eğrili yenilme zarfları için, deneysel olarak belirlenen kesme dayanımları ile regresyon analizleri sonucunda birinci ve ikinci zarflardan ampirik olarak bulunan kesme dayanımlarının karşılaştırılması

6.2 DATAFIT Yazılımı ile Yapılan İstatistiksel Analizler

DATAFIT yazılımı kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

6.2.1 DATAFIT yazılımı ile gerçekleştirilen doğrusal analizler

SPSS yazılımında yapılan tüm analizler incelendiğinde normal gerilme değeri ve tek eksenli sıkışma dayanımının, diğer parametrelere kıyasla kesme dayanımının belirlenmesinde en yüksek korelasyon katsayısını sunduğu ve anlamlılık özellikleri sergilediği belirlenmiştir. DATAFIT yazılımında bu parametreler kullanılarak Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı için eğrinin birinci ve ikinci kısmı için ayrı ayrı doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, eğrinin her iki kısmı için ayrı ampirik ilişkiler oluşturulmuştur. Eğrinin birinci kısmı için yapılan analizler

neticesinde aşağıdaki ampirik ilişki elde edilmiştir. Bu ampirik ilişkiden elde edilen belirleme katsayısı (R^2) 0,82'dir.

$$\tau = -0,0044 + 0,0026 \sigma_c + 1,218 \sigma_n \quad (6.4)$$

Burada τ : Kesme dayanımı, σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı ve σ_n : Uygulanan normal gerilme değeridir.

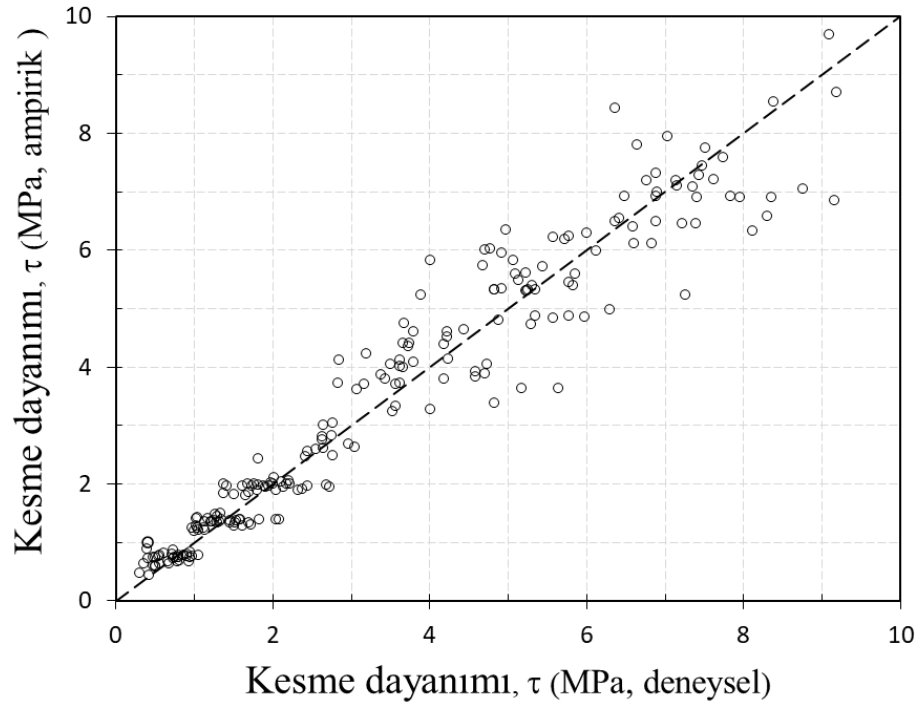
Eğrinin ikinci kısmı için elde edilen doğrusal ampirik ilişki aşağıda sunulmuştur. Bu ampirik ilişkiden elde edilen belirleme katsayısı (R^2) 0,74 olarak bulunmuştur.

$$\tau = 0,18 + 0,017 \sigma_c + 0,801 \sigma_n \quad (6.5)$$

Burada τ : Kesme dayanımı, σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı ve σ_n : Uygulanan normal gerilme değeridir.

Yukarıda sunulan ampirik ilişkiler kullanılarak eğrinin birinci ve ikinci kısmına ait kesme dayanımları elde edilmiştir. Doğrudan kesme deneylerden elde edilen kesme dayanımı ve ampirik ilişkilerle oluşturulan kesme dayanımlarının birbiriyle olan ilişkisi şekil 6.3'te sunulmuştur.

şekil 6.3'te DATAFIT yazılımı ile elde edilen dağılım grafiği ile şekil 6.2'de SPSS yazılımı ile elde edilen grafik sonuçlarının birbirine çok benzer olduğu gözlenmiştir. Ancak, yukarıda da belirtildiği üzere belirleme katsayısının kısmen düşük olması sebebiyle, doğrusal olmayan analizlerin yapılması uygun grlmştir.



Şekil 6.3 Deneysel olarak belirlenen kesme dayanımları ile DATAFIT programıyla doğrusal analizlerden ampirik olarak bulunan kesme dayanımlarının karşılaştırılması

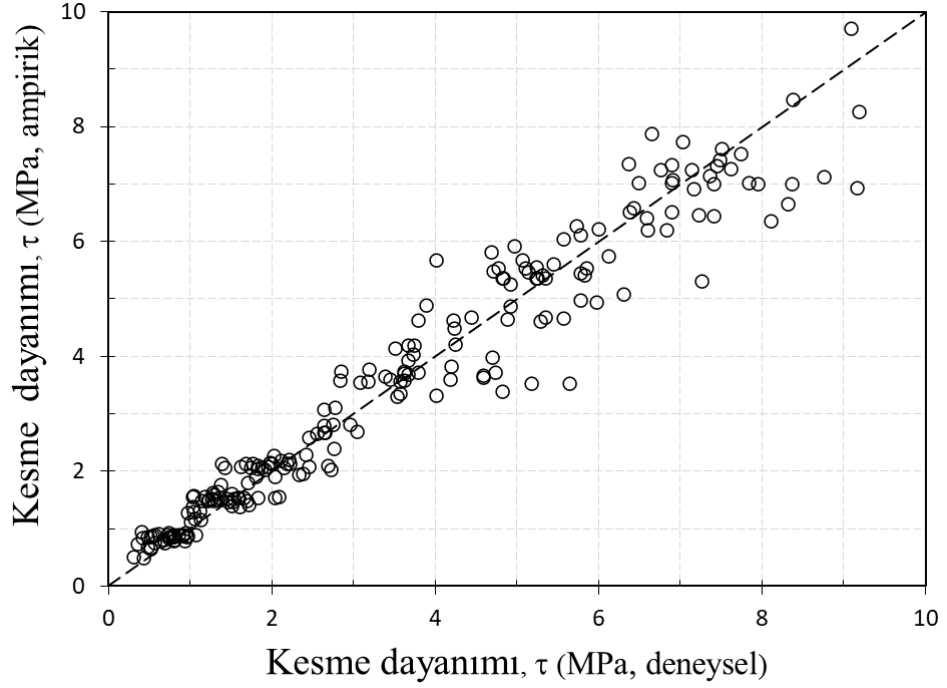
6.2.2 DATAFIT yazılımı ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler

İstatistiksel analizler süreksizliklerin kesme dayanımının en çok kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı ile kesme deneyinde uygulanan normal gerilmenin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Buna göre DATAFIT yazılımı ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler ile elde edilen ampirik ilişki denklem 6.6'da sunulmuştur.

$$\tau = 0,785 \sigma_c^{0,154} \sigma_n^{0,803} \quad (6.6)$$

Burada τ : Kesme dayanımı, σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı ve σ_n : Uygulanan normal gerilme değeridir.

Şekil 6.4'te doğrusal olmayan analitik yöntem ve deneysel yöntem sonuçlarının karşılaştırılmasında daha az saçılımlı bir dağılım görülmüş olup, anlamlı bir sonuç elde edildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte yüksek bir regresyon katsayısı ($R^2 = 0,92$) elde edilmiştir.



Şekil 6.4 Deneysel olarak belirlenen kesme dayanımları ile DATAFIT programıyla doğrusal olmayan ampirik yöntem ile elde edilen kesme dayanımlarının karşılaştırılması

Bu tez çalışması için gerekli deneştirmeleri (korelasyonları) yapmada “aslında aynı işlemi yapıyor” gibi görünen iki farklı yazılım kullanılmasının özel bir nedeni vardır. SPSS yazılımı ile doğrusal olmayan çoklu regresyon analizi yapılırken, analize dahil edilen her bir parametre için kullanıcının belli bir değer aralığı girmesi istenir. DATAFIT yazılımı ile doğrusal olmayan çoklu regresyon yapıldığında analize dahil edilen her bir parametre için sadece bir sabit katsayı elde edilir. Bu sabit katsayıların ortalama değerler kabul edilerek her bir katsayı için bir değişim aralığı seçilmesi, çoklu regresyon analizinde daha güçlü bir yazılım olduğu bilinen SPSS ile analiz yaparken kullanıcının işi büyük ölçüde

kolaylaşmaktadır. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analize ait sonuçlar ANOVA tablosunda (Çizelge 6.12) yer almaktadır.

Çizelge 6.12 Doğrusal olmayan analize ait ANOVA tablosu

ANOVA ^a			
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Ortalaması
Belirleme	3865	3	1288
Kalıntı	95,4	213	0,45
Düzeltilmemiş Toplam	3960	216	
Düzeltilmiş Toplam	1272	215	
Bağımlı Değişken: Kesme Gerilmesi ^a			
a. $R^2 = 1 - (\text{Kalıntı kareler toplamı}) / (\text{Düzeltilmiş kareler toplamı}) = 0,92$.			

SPSS yazılımı ile gerçekleştirilen analiz sonucunda belirleme katsayısı $R^2 = 0,92$ olarak bulunmuş olup, bu sonuç DATAFIT yazılımı ile belirlenen regresyon katsayısıyla örtüşmektedir.

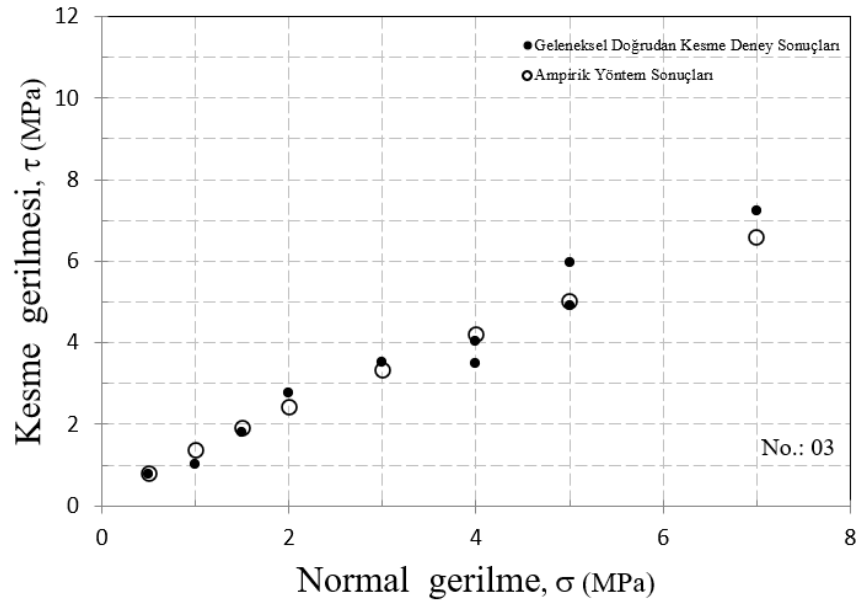
6.3 İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SPSS ve DATAFIT yazılımı ile yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden elde edilen ampirik ilişkiler, deneysel yöntemle belirlenen sonuçlarla kıyaslanmış olup daha az saçılım sergileyen ilişkinin bulunması hedeflenmiştir. Ayrıca, elde edilen ampirik ilişkilere ait regresyon katsayılarının mümkün olduğunca en iyi sonuçları vermesi amaçlanmıştır.

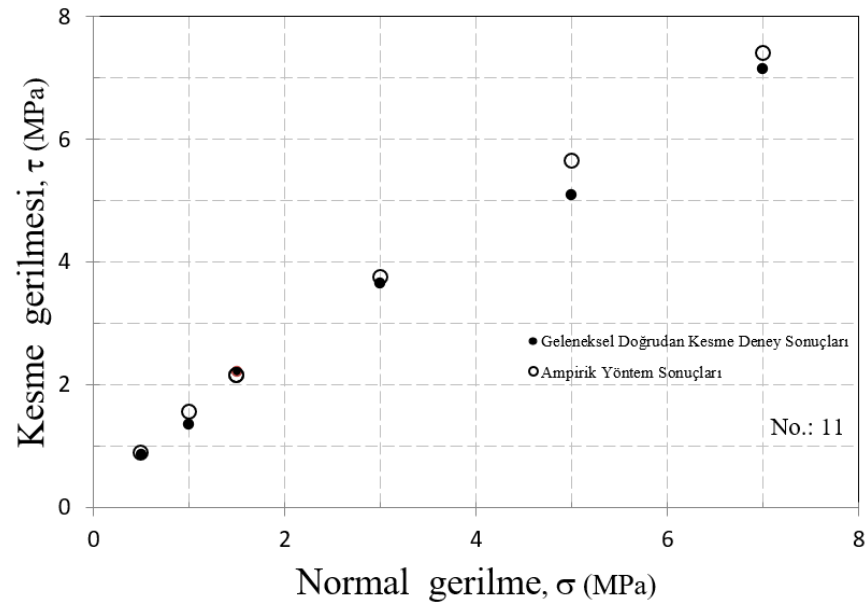
Yapılan istatistiksel çalışmalarda doğrusal olmayan analizler ile elde edilen belirleme katsayısı (R^2) 0,92 olan ampirik ilişkiye göre (Denklem 6.6), tek eksenli sıkışma dayanımı

bilinen bir kayadaki taze ve dolgunsuz süreksizlik yüzeyine etkiyen normal gerilme değeri bilindiğinde, makaslama dayanımı büyük bir doğruluk derecesinde kestirilebilmektedir. Elde edilen bu ampirik yöntem ile profilometre ve tiltmetre deneylerinden bağımsız olarak süreksizliklerin kesme dayanımı kolay bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu sonuç taze süreksizlik yüzeylerine sahip kayalardan elde edilmiş olup, bozuşmuş kaya süreksizliklerine uygulanmamalıdır.

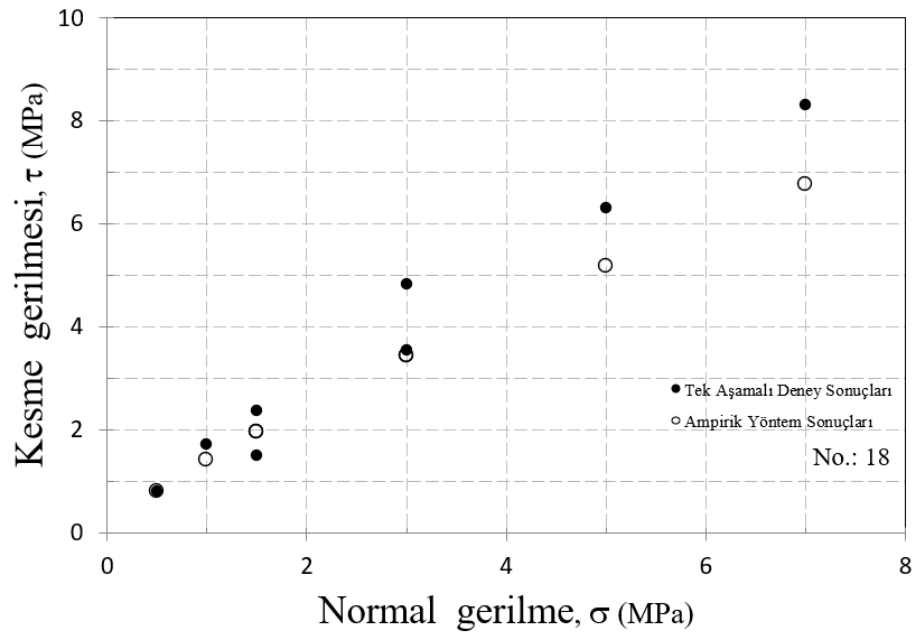
Her kaya için tek eksenli sıkışma dayanımı ve doğrudan kesme deneyinde uygulanan normal gerilme değerleri kullanılarak, ampirik formül yardımıyla süreksizliklerin kesme dayanımı ayrıca belirlenmiştir. Tüm kayalar için ampirik yöntemle belirlenen sonuçlar, doğrudan kesme deneyiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekiller 6.5 – 6.8’de doğrudan kesme deneyi ve ampirik yöntem ile belirlenen sonuçların sadece birkaçı kesme gerilmesi- normal gerilme grafiği şeklinde sunulmuş olup tüm sonuçlara ait grafikler Ek-6’da verilmiştir.



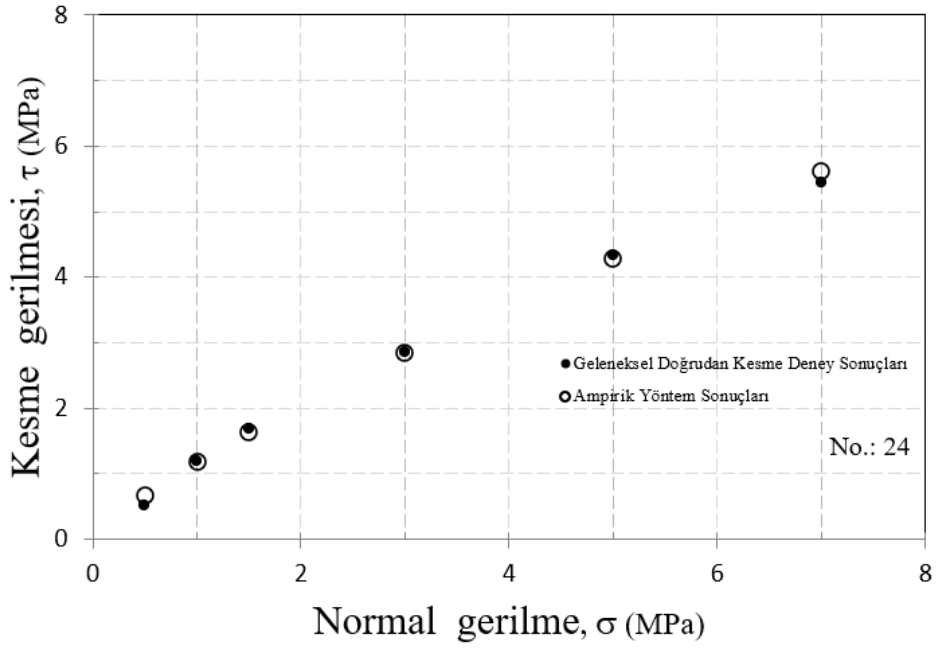
Şekil 6.5 03 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.6 11 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.7 18 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.8 24 No.'lu numuneye ait deneysel yöntem sonuçları ile ampirik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması

Ampirik yöntem ve deneysel yönteme ait sonuçlar kesme gerilmesi - normal gerilme grafiğine aktarıldığında 19 kayanın mükemmel, 8 kayanın oldukça iyi ve 3 kayanın nispeten kötü uyum sağladığı gözlenmiştir. Kötü uyum sağlayan kayalar 01 No.'lu andezit, 08 No.'lu rekristalize kireçtaşı ve 18 No.'lu bazalt olup bu durumun birinci derece düzensizliklerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

7. ÇOK AŞAMALI DOĞRUDAN KESME DENEYİ

Doğrudan kesme deneyleri süreksizliklerin kesme dayanımını belirlemede kullanılan en yaygın yöntemdir. Doğrudan kesme deneyi tipik olarak birbiriyle örtüşürülen süreksizlik yüzeylerine normal gerilme uygulanıp, numunenin süreksizlik yüzeyi boyunca yatay düzlemde yer değiştirmesi sonucu meydana gelen doruk kesme dayanımının belirlenmesi olarak tanımlanır. Süreksizliklerin kesme dayanımını ortaya koymak için farklı normal gerilmeler altında doğrudan kesme deneylerinin gerçekleştirilmesi gerekir. Mevcut doğrudan kesme deneyleri geleneksel (tek aşamalı) ve çok aşamalı (tekrarlı) doğrudan kesme deneyleri olmak üzere iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Geleneksel doğrudan kesme deneyi özdeş karakterdeki süreksizliğe sahip (en az 5-6) numunelerin ayrı ayrı deneye tabi tutulması ile yapılırken, çok aşamalı kesme deneyi tek numune üzerinde birden fazla kesme gerilmesi uygulanması ile gerçekleştirilmektedir (ASTM 2016, ISRM 2014). Geleneksel kesme deneyi alt bölüm 4.5'te ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Çok aşamalı kesme deneyi ilk olarak Beer (1950) tarafından 3 eksenli deney ile zeminlerin kesme dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Sonraki dönemlerde Taylor (1951), Jaeger (1959), Ripley ve Lee (1961) ve Franklin (1974) tarafından çok aşamalı kesme deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yeterli numune elde edilmesindeki zorluklar nedeniyle yaygın olarak kullanılan bu yöntemde tek bir numune üzerinde farklı normal gerilmeler altında kesme deneyleri yapılmıştır. Taylor (1951) bu test prosedürünün geçerliliğini doğrulayarak ve farklı sonuçları karşılaştırarak bir zeminin doruk kesme dayanımını belirleme amacıyla kullanılabilirliğini onaylamıştır. Zeminler üzerinde yapılan çok aşamalı testlerin ardından, kayalar üzerinde çok aşamalı bir test prosedürünün ilk kullanımı Jaeger (1959) tarafından gerçekleştirilmiştir. Ripley ve Lee (1961) hem yapay olarak oluşturulan pürüzlülüklere hem de doğal pürüzlülüğe sahip süreksizlik yüzeylerinde bir dizi çok aşamalı doğrudan kesme testi gerçekleştirmiştir. Bu dönemde bazı araştırmacılar (Kovari ve Tisa 1975) sadece bir numune kullanılarak ek veriler elde etmenin avantajlı bir yol olduğunu değerlendirmiştir. Son dönemlerde Muralha (2007) ise bir normal gerilme için bir numune kullanımının pratik olmadığını bunun yerine tek numune üzerinde birden fazla normal gerilme

uygulanarak kayaya ait yenilme zarfının belirlenmesinin daha uygun olduğunu değerlendirmiştir.

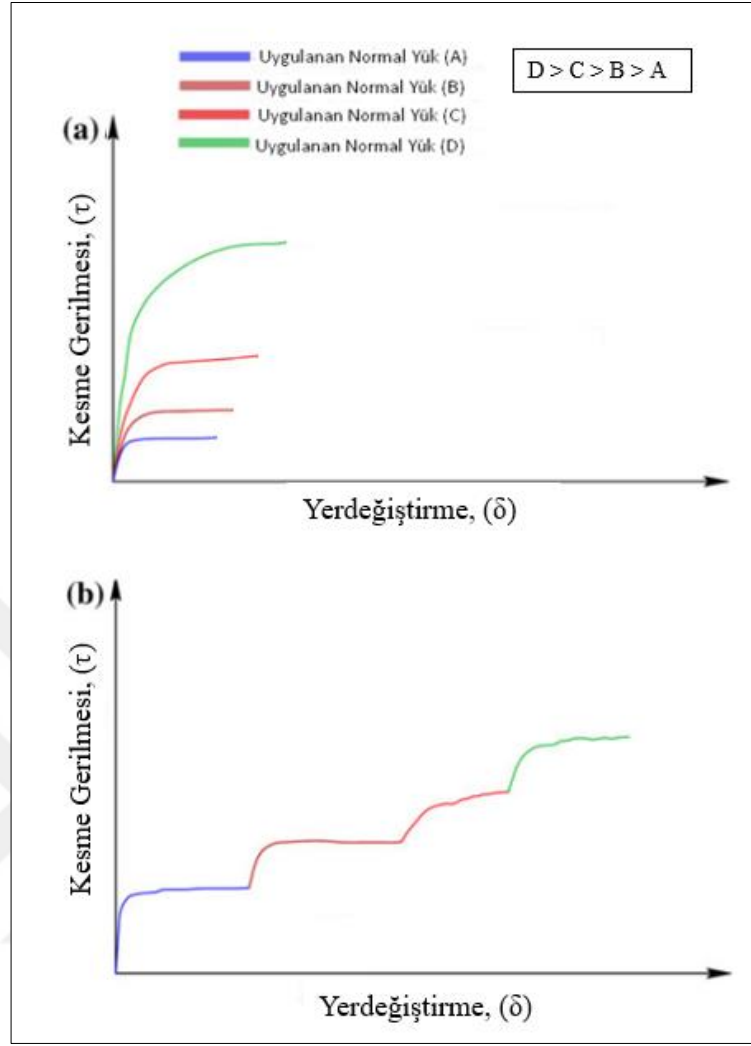
Çevresel/atmosferik koşullar ve kayanın dokusal-kimyasal özelliklerinden dolayı doğada aynı süreksizlik yüzeyine sahip numune temin etmek oldukça zor ya da imkansızdır. Süreksizlik yüzeylerinin çok küçük alanda dahi (birkaç cm) farklılık göstermesi farklı sonuçların elde edilmesine yol açabilir (Quansheng vd., 2017). Bu sebeplerden dolayı ve gelişen kesme kutusu deney cihazları sayesinde süreksizliklerin kesme dayanımını belirlemek amacıyla tek numune üzerinde çok aşamalı doğrudan kesme deneyleri son dönemlerde araştırmacıların ilgisini çeken konular arasında yer almıştır. Bu deney türü iki farklı yöntem ile uygulanabilir (ISRM, 2014). Bunlar, i) her kesme aşamasından sonra süreksizlik yüzeyinin başlangıçtaki konumuna yeniden getirildiği (yeniden konumlandırılmalı) (Şekil 7.1a) veya ii) kesme deneyi aşamasında süreksizlik yüzeyinin başlangıç konumuna yeniden getirilmediği (yeniden konumlandırma olmayan) (Şekil 7.1b) yöntemleridir.

Barla vd. (2011) ve Petro (2018) tarafından önerilen alternatif prosedürde çok aşamalı deney yönteminin her aşamasında kesme yer değiştirmesini sınırlayarak numune kesme gerilmesi doruk noktaya ulaştıktan sonra süreksizliğe hasar verilmemesi amaçlanmıştır. Doruk noktaya ulaşan numune yeniden konumlandırma olmadan bir sonraki yüksek normal gerilmeye geçilerek deneyler yapılmıştır. Henüz yeni bir deney türü olan bu yöntem sınırlı yer değiştirmeli çok aşamalı doğrudan kesme deneyi (LDMDs) olarak adlandırılmıştır (MacDonald vd. 2019). Ancak, çimento ve kumtaşı üzerinde yapılan bazı araştırmalar (Yathon, vd. 2019, Gaines vd., 2020) yeniden konumlandırılmalı çok aşamalı doğrudan kesme deney sonuçlarının yeniden konumlandırmasız çok aşamalı doğrudan kesme kutusu deneyine göre daha doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Literatürde çok aşamalı kesme deney sonuçlarının anlamlı sonuçlar verdiğine dair bazı araştırmalar bulunmakla birlikte, genellikle sınırlı sayıda numune üzerinde yapılmış olup, kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Son dönemlerde araştırma alanlarından olan çok

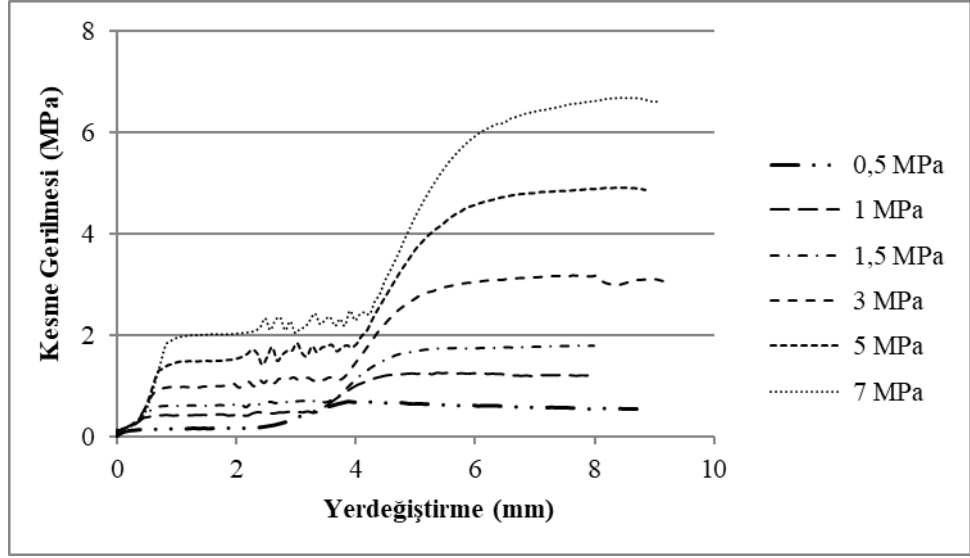
aşamalı doğrudan kesme deneyi için olası eksiklerinin belirlenmesi ve yöntemin geliştirilmesi açısından ayrıntılı şekilde araştırılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Bu tez çalışmasında önerilen hipotezin doğrulanmaması durumunda, alternatif olarak (B planı) süreksizliklerin kesme dayanımının istatistiksel olarak yeterli sayıda çok aşamalı doğrudan kesme deneyleriyle belirlenmesi ve elde edilen sonuçların geleneksel yöntem sonuçları ile kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda 30 farklı kaya türünde oluşturulan yapay süreksizlikler üzerinde çok aşamalı doğrudan kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Tek numune üzerinde sırasıyla 0,5-1-1,5-3-5-7 MPa normal gerilmeleri uygulanmıştır. Deneylerde çok aşamalı yeniden konumlandırılmalı yöntem kullanılmıştır. Deneye tabi tutulan numunede kesme gerilmesi doruk noktaya ulaştıktan sonra deney durdurulmuş ve numune ilk konumuna getirilmiştir. Deney düzeneği görsel olarak incelendikten sonra bir sonraki normal gerilme değeri uygulanıp kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında her zaman düşük normal gerilme değeri ile başlanıp bir sonraki yüksek normal gerilme değeri ile devam edilmiştir.

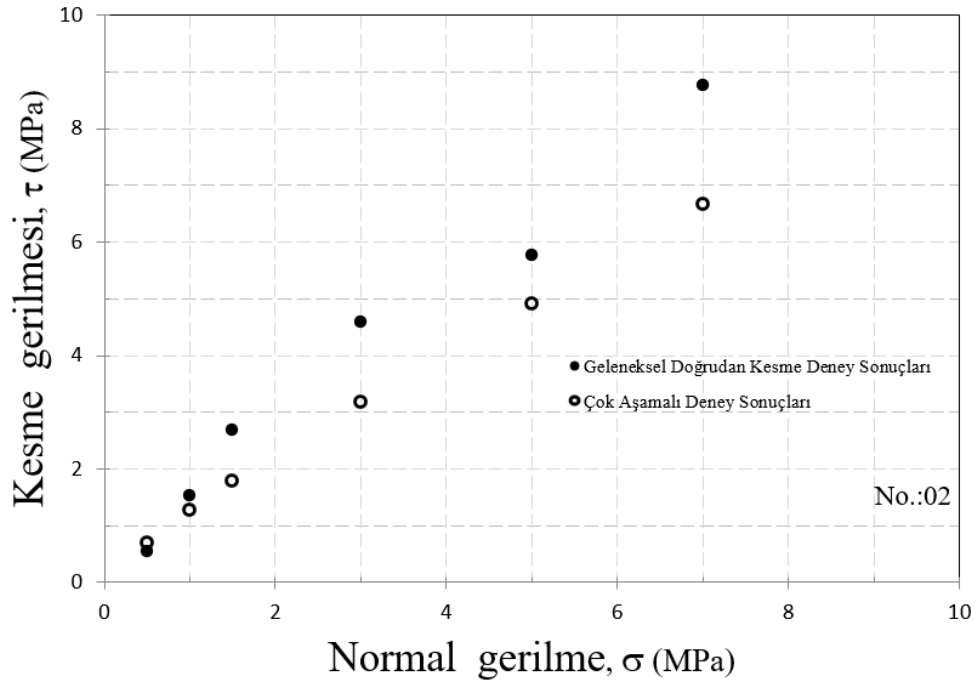


Şekil 7.1 Farklı normal gerilmeler altında çok aşamalı doğrudan kesme deneyi a) Yeniden konumlandırılmalı, b) Yeniden konumlandırılmasız (Muralha vd. 2014'ten değiştirilerek düzenlenmiştir)

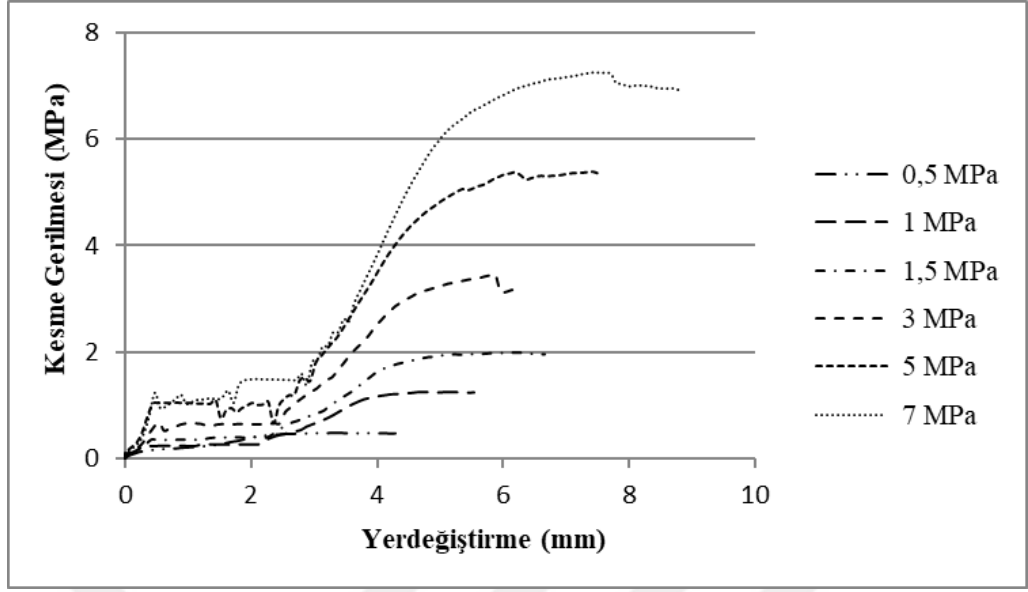
Tüm numuneler için geleneksel doğrudan kesme deneyinden elde edilen sonuçlar ile çok aşamalı doğrudan kesme deneyinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çok aşamalı yöntemle ait kesme gerilmesi – yerdeğiştirme grafiği ve her iki yöntemin karşılaştırmalı sonuçlarına ait grafiklerden bazıları şekiller 7.2-7.9 arasında verilmiştir. Tüm numunelere ait sonuçlar Ek-7'de sunulmuştur.



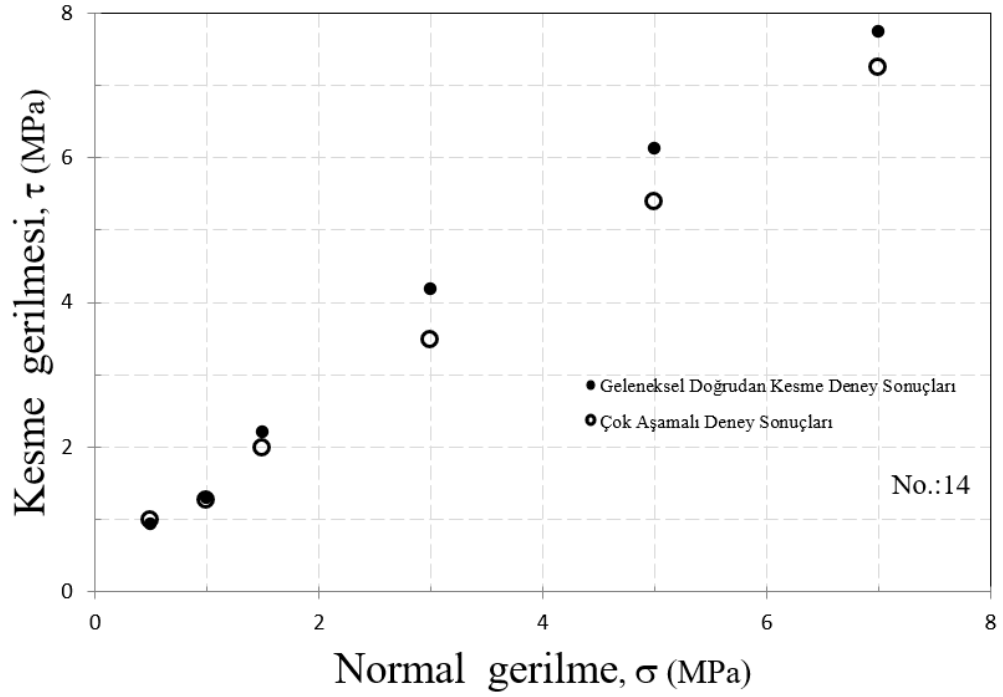
Şekil 7.2 02 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği



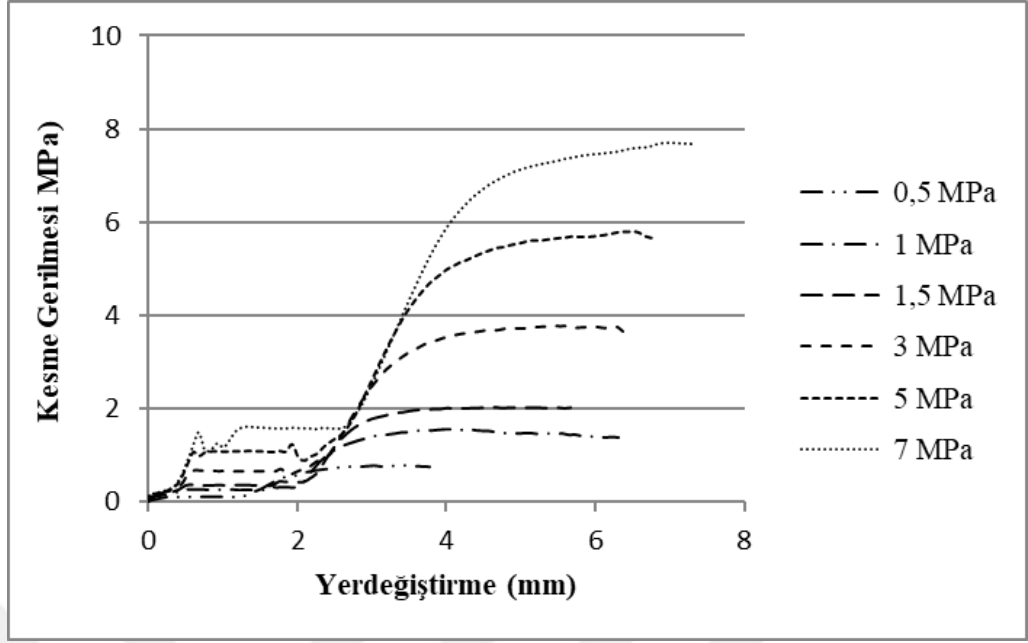
Şekil 7.3 02 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği



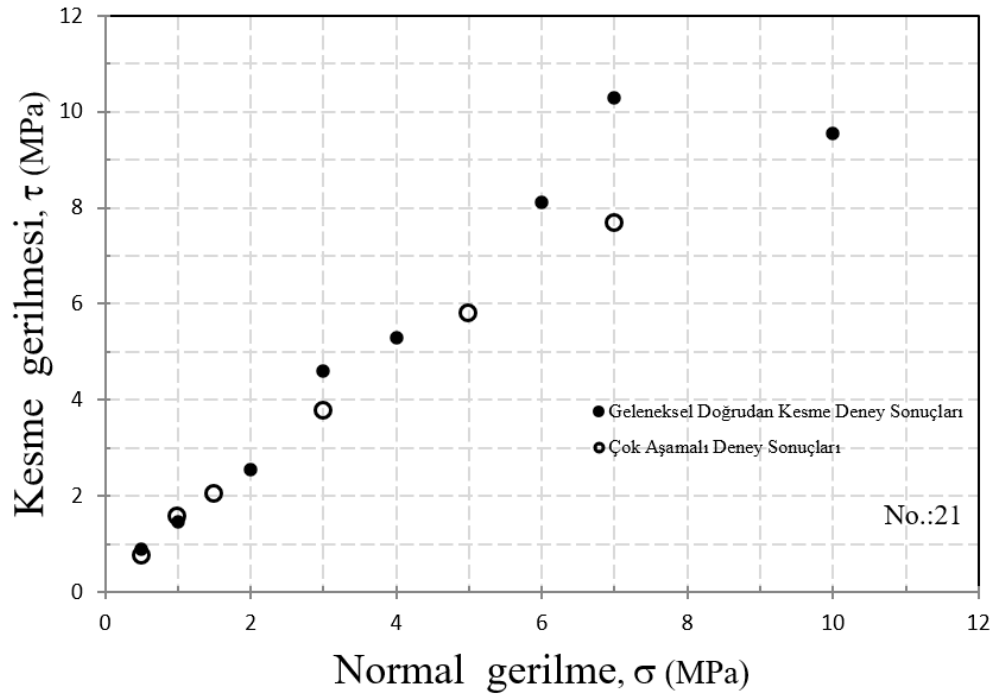
Şekil 7.4 14 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği



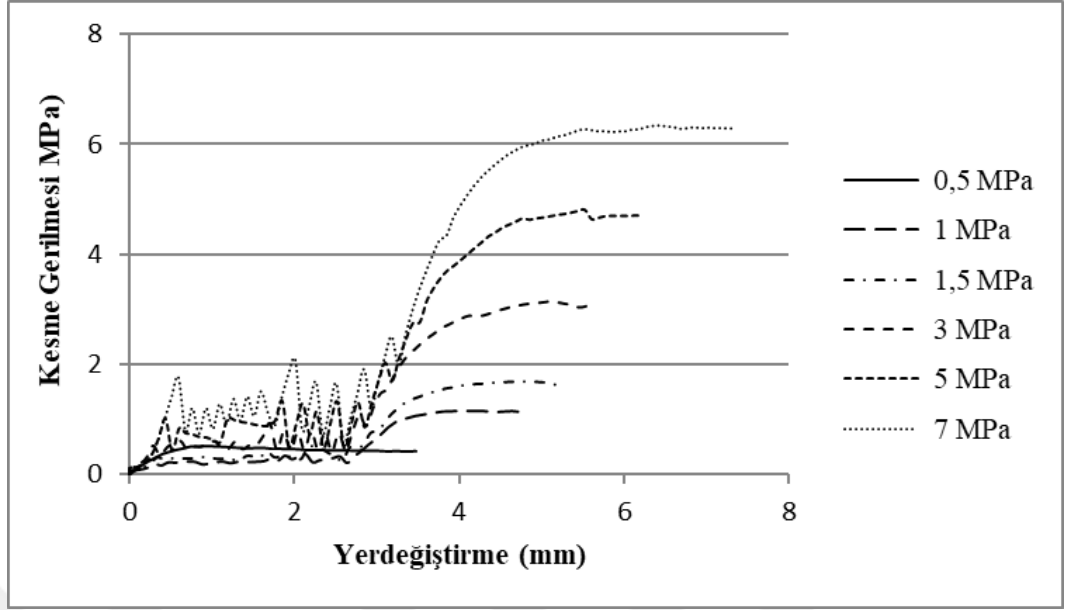
Şekil 7.5 14 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği



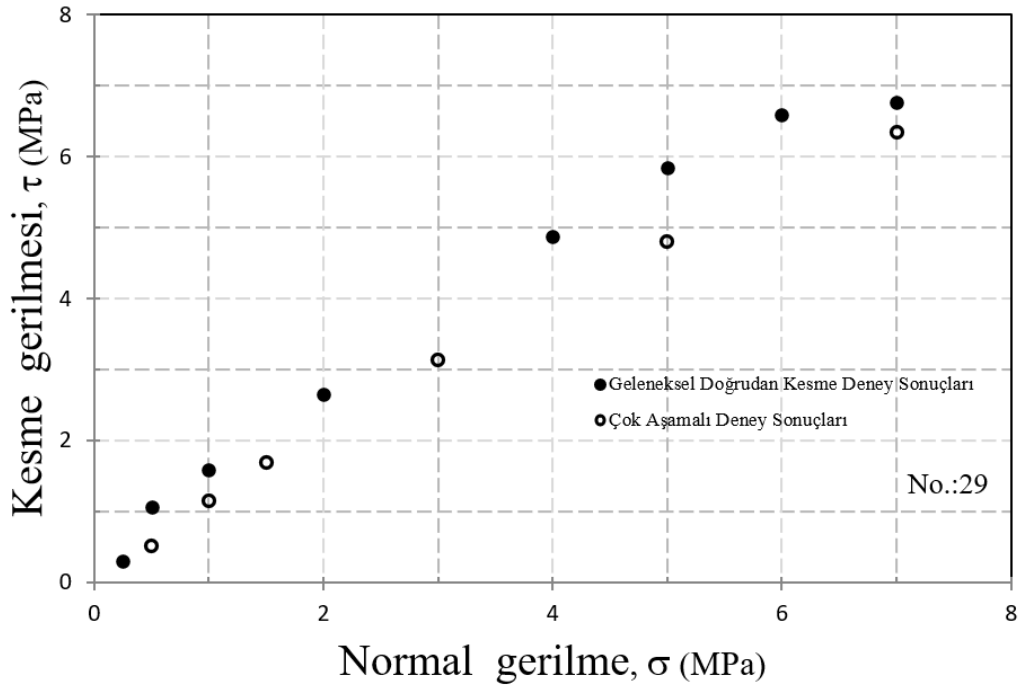
Şekil 7.6 21 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği



Şekil 7.7 21 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği



Şekil 7.8 29 No.'lu numunenin çok aşamalı kesme gerilmesi - yerdeğiştirme grafiği



Şekil 7.9 29 No.'lu numuneye ait geleneksel ve çok aşamalı deney grafiği

Çok aşamalı doğrudan kesme deneyinde numunenin orijinal konumuna getirilmesi numunenin ilk pürüzlülük profiline sahip kısmında sonraki kayma testinin yapılmasını sağlar. Ancak, pürüzlülük yüzeyi önemli ölçüde hasar gördüğü için elde edilen değer aynı olmayacaktır. Bu konuda ASTM (2016) her tekrar testinde yüzeyin daha fazla hasar göreceğinin unutulmaması gerektiğini hatırlatır. Quansheng vd. (2017) ve Petro (2018) dolgusuz süreksizlikler üzerinde yaptığı çalışmalarda pürüzlülüklerin kesme yönünde kademeli olarak deforme olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalarda deney sonrasında süreksizlik yüzeylerinin bazen aşındırılmış, bazen kesilmiş ve tıraşlanmış olduğu gözlenmiştir. Daha pürüzlü yüzeyler veya birinci derece pürüzlülüğe sahip kayalarda bu hasar tipik olarak bazen birkaç pürüzlülük bazen de sadece bir baskın pürüzlülük üzerinde veya belli bir yüzeyde yoğunlaşmıştır (Petro, 2018). Baskın pürüzlülüklerin sayısının az olduğu durumlarda deney kaynaklı hasarlar kesme kuvvetinin en baskın pürüzlülük üzerinde birikme eğiliminde olması nedeniyle tekrarlı deneylerde özellikle önemli bir etkiye sahiptir. Ulusay (2014) tarafından bu hasarın düşük normal gerilmelerde ihmal edilebileceği önerilse de bazı araştırmacılar (Barton 2013, Berry vd. 2015) hasarın ihmal edilebilir olmadığını, bir sonraki deneyde süreksizliklerin eklem sürtünme açısının düşük tahmin edilmesine yol açtığını belirtmiştir. Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak farklı köken ve pürüzlülük özelliklerine sahip 30 farklı kaya türünde ve değişik normal gerilmeler altında çok aşamalı deneyler yapılarak kesme dayanımları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada otuz farklı kaya türü üzerinde geleneksel ve çok aşamalı doğrudan kesme deneyleri yapılmıştır. Geleneksel kesme deneyinde bir kaya türü için 6 numune, çok aşamalı deney için her kaya türü için bir adet numune kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda her iki yöntem ile elde edilen sonuçlar kesme gerilmesi-normal gerilme grafiğine aktarılmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çift eğrili yenilme zarfının ikinci kısmında çok aşamalı deneylerden elde edilen doruk kesme dayanımlarının pek çok kaya türünde geleneksel yöntemle belirlenen dayanımlara kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonucun çok aşamalı yöntem sırasında süreksizlik yüzeylerinde bulunan pürüzlülüklerin deney esnasında zamanla tıraşlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük normal gerilmelerde çok aşamalı deney sonuçları ile tek aşamalı

deney sonuçları arasındaki fark düşük iken, yüksek normal gerilmelerde her iki deneyden elde edilen sonuçlar arasındaki fark daha büyüktür. Bazı kaya türlerinde çok aşamalı deneylerden elde edilen kesme dayanımının geleneksel yöntem ile elde edilen kesme dayanımından yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum özellikle dayanımı düşük kayalarda meydana gelmiştir. Bu tür kayalarda, kesme deneyi sırasında süreksizlik yüzeyinin aşınması ve pürüzlülüklerin kırılması, dayanımı yüksek kayalara göre daha kolay gerçekleşebilmektedir. Düşük dayanıma sahip kayalarda kesme deneyi esnasında süreksizlik yüzeyinden kırılan parçaların ve sürtünmeden kaynaklı olarak süreksizlik yüzeyinin aşınması ile ayrılan kaya malzemesi süreksizlik yüzeyinde birikmesinin, kesme dayanımını arttırdığı şeklinde yorumlanmıştır.



8. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu araştırmada 30 farklı kaya türünün mineralojik-petrografik özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülü ortaya konulmuştur. Temel sürtünme açıları karot numuneler, testere izli blok numuneler ve ince zımpara ile aşındırılmış yüzeyler olmak üzere üç farklı yöntemle elde edilmiştir. 15 cm'lik küptaşlar ortadan yarılarak yapay süreksizlikler oluşturulmuş ve bu süreksizliklerin pürüzlülük açıları belirlenmiştir. Yapay süreksizlikler oluşturulan tüm kaya setleri üzerinde geleneksel (tek aşamalı) doğrudan kesme deneyleri ve çok aşamalı (tekrarlı) doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1. Tüm kayalar için yapılan tek eksenli sıkışma deneyleri sonucunda kayaların dayanımları 10,4 MPa ile 127 MPa arasında, elastisite modülleri de 1,8 GPa ile 29,5 GPa arasında değişmektedir.
2. Temel sürtünme açıları karot numunelerde 36° ile $44,2^{\circ}$ arasında, testere izli blok numunelerde $27,1^{\circ}$ ile $36,9^{\circ}$ arasında ve ince zımpara ile aşındırılmış blok numunelerde $20,9^{\circ}$ ile $34,5^{\circ}$ arasında değişmektedir.
3. Her kaya türü için laboratuvar ortamında üç farklı numunede yapay süreksizlikler oluşturulmuş ve pürüzlülük açıları belirlenmiştir. Buna göre tüm kayalarda elde edilen ortalama en yüksek pürüzlülük açısı $11,5^{\circ}$ en düşük pürüzlülük açısı ise $4,9^{\circ}$ 'dir.
4. Geleneksel doğrudan kesme yöntemiyle yapılan deneylerinde Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının kesişim yerinin 30 kayanın 26'sında genellikle 2 MPa'lık bir normal gerilme civarında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfının kesişimi 2 MPa dışında gerçekleşen kayalar kısmen yüksek dayanıma sahip kayalardır.

5. Geleneksel yöntem ile elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarflarından eğrinin birinci kısmı olan toplam sürtünme açısı (ϕ_{b+i}) ve eğrinin ikinci kısmı olan temel sürtünme açısı (ϕ_b) hesaplanmıştır. Toplam sürtünme açısından temel sürtünme açısı çıkarılarak pürüzlülük açısı (i) ortaya konulmuştur. Her kaya türü için tiltmetre deney cihazı kullanılarak üç farklı yöntemle belirlenen temel sürtünme açıları (ϕ_b) ve profilometre deneyi ile belirlenen pürüzlülük açıları (i) elde edilmiş, bu deneylerden elde edilen sonuçların toplanmasıyla belirlenen toplam sürtünme açıları (ϕ_{b+i}) ortaya konulmuştur. İki farklı yöntem ile belirlenen sonuçlar karşılaştırılmış olup karot numuneler, testere izli blok numuneler ve zımparalanmış blok numunelerden elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı ile kesme kutusu deneyiyle elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfı arasında 30 kaya türünün 22 tanesinde kısmen bir uyum olduğu belirlenmiştir. Yapılan karşılaştırmada geleneksel doğrudan kesme deneyi ile tiltmetre ve profilometre deneyleriyle belirlenen toplam sürtünme açıları, temel sürtünme açıları ve pürüzlülük açıları arasında anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Kesme kutusu deneyi esnasında pürüzlülüklerin tamamen tıraşlanmaması ve kırılan pürüzlülükler ait parçaların deney sırasında süreksizlik yüzeyinde bulunmasının geleneksel yöntemle belirlenen sonuçları etkilediği düşünülmektedir.
6. Süreksizliklerin kesme dayanımı ve onu etkileyebilecek parametreler arasında bir ilişki olup olmadığını belirlemek için SPSS ve DATAFIT yazılımları kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizleri sonucunda süreksizliklerin kesme dayanımının en çok kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı ve kesme deneyinde uygulanan normal gerilmenin bir fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizlerde belirleme katsayısı 0,92 olan aşağıdaki ampirik ilişki ortaya konulmuştur:

$$\tau = 0,785 \sigma_c^{0,154} \sigma_n^{0,803}$$

Bu sonuç, dolgunsuz taze süreksizlik yüzeylerine sahip kayalar için geçerlidir.

7. Ampirik yöntem ve geleneksel doğrudan kesme deney ile belirlenen sonuçlar kesme gerilmesi – normal gerilme grafiğinde karşılaştırıldığında 19 kayanın

mükemmel, 8 kayanın oldukça iyi ve 3 kayanın nispeten kötü uyum sağladığı gözlenmiştir.

8. 30 farklı kaya türünde çok aşamalı yöntem kullanılarak süreksizliklerin kesme dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar geleneksel kesme kutusu deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Çok aşamalı deneylerden elde edilen doruk kesme dayanımlarının özellikle çift eğrili zarfın ikinci kısmında pek çok kaya türünde geleneksel yöntemle belirlenen dayanımlara kıyasla daha biraz düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonucun çok aşamalı yöntem sırasında süreksizlik yüzeylerinde bulunan pürüzlülüklerin deney esnasında ilk deneyden itibaren aşama aşama zamanla tıraşlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
9. Çok aşamalı yöntem ile gerçekleştirilen deneylerde bazı kayaların kesme dayanımının geleneksel yöntem ile elde edilen kesme dayanımından yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle düşük dayanıma sahip kayalarda gözlenen bu durum, çok aşamalı deney esnasında süreksizlik yüzeyinin aşınması sonucunda pürüzlülük parçalarının süreksizlik yüzeyinde birikmesiyle kesme dayanımının etkilendiği şeklinde yorumlanmıştır.

Yapılan çalışmada, süreksizliklerin kesme dayanımını belirlemeye yönelik bir ampirik ilişki ortaya konulmuştur. Bu ilişkiye göre, pürüzlülük açısının kesme dayanımı üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ancak, gerçekleştirilecek ilave çalışmalarla farklı model test numunelerindeki pürüzlülük açı değerlerinin makaslama dayanımına etkisinin olup olmadığı ve varsa bu etkinin değeri detaylı bir şekilde araştırılabilir.

Bu araştırma konusuyla ilgili olarak aşağıdaki konuların irdelenmesi önerilir:

Patton çift eğrili yenilme zarflarının kesişim yerleri daha ayrıntılı çalışmalar ile irdelenebilir. Bu çalışmalar sonucunda kesişim yerinin ani/keskin veya dereceli/yumuşak bir geçişin olup olmadığı ortaya konulabilir. Böyle bir analizin eğrinin birinci ve ikinci

kısmına yapılan eğri uyarlaması sonucunda toplam ve temel sürtünme açılarının kayda değer düzeyde değiştirip değiştirmediği incelenebilir.

Tiltmetre deneyinden elde edilen temel sürtünme açılarının kesme kutusu deneyinden elde edilen temel sürtünme açılarından farklı olmasının nedenleri ayrıntılı bir şekilde incelenebilir.

Tiltmetre ve profilometre deney sonuçlarından elde edilen sonuçlarla geleneksel kesme deneyinden elde edilen Patton (1966) çift eğrili yenilme zarfları arasında belirgin bir ilişki tespit edilmemiş olsa da umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Ancak uygulanacak normal gerilme ve deney sayısının arttırılması ile iki yöntem arasında güvenilir bir ilişki ortaya konulabilir.

Çok aşamalı deney yöntemlerinden olan yeniden konumlandırma olmayan yöntem son zamanlarda araştırma alanları arasında yer almaktadır. Bu yöntem ile yeniden konumlandırılmalı yöntem arasında ne tür bir ilişki olduğu, elde edilen sonuçların geleneksel yöntem ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmasıyla bu yöntemin güvenilirliği daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Alejano, L. R., Taboada, J., Bastante, F.G. and Rodriguez, P. 2008. Multiapproach Back Analysis of A Roof Collapse in A Mining Room Excavated in Stratified Rock. *Int J Rock Mech Min Sci* 45:899–913. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.10.001.
- Alejano, L. R., Gomez-Marquez, I. and Martinez-Alegria, R. 2010. Analysis of a Complex Toppling-circular Slope Failure. *Eng Geol* 114:93–104. doi:10.1016/j.enggeo.2010.03.005.
- Alejano, L.R., Ferrero, A.M., Ramirez-Oyanguren, P. A. and lvarez-Fernandez, M.I. 2011. Comparison of Limit Equilibrium, Numerical, and Physical Models of Wall Slope Stability. *Int J Rock Mech Min Sci* 48:16–26. doi:10.1016/j.ijrmms.2010.06.013.
- Alejano, L.R., González, J., and Muralha, J. 2012. Comparison of Different Techniques of Tilt Testing And Basic Friction Angle Variability Assessment. *Rock Mech Rock Eng* 45:1023–1035.
- Alejano, L. R., Muralha, J. Ulusay, R., Li, C. C., Pérez-Rey, I., Karakul, H., Chryssanthakis P. and Aydan, Ö. 2018. ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests. *Rock Mech Rock Eng* (2018) 51:3853-3859. DOI 10.1007/s00603-018-1627-6.
- Andersson, E., 2019. Evaluation of influence From Matedness on The Peak Shear Strength of Natural Rock Joints. Master's Thesis. Kth Royal Institute Of Technology In Stockholm. Degree Project In Civil Engineering And Urban Management. 55. Stockholm
- Asadi, M. S., Rasouli, V. and Barla, G. 2012. A Bonded Particle Model Simulation of Shear Strength and Asperity Degradation for Rough Rock Fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(5), 649-675.
- ASTM (American Society For Testing And Materials), 2002. Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength Of İntact Rock Core Specimens. ASTM D 2938–95. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA 19428–2959, United States.
- ASTM (American Society For Testing And Materials), 2008. Standard Guides for Using Rock-Mass Classification Systems For Engineering Purposes. American Society for Testing Materials. ASTM D 5878-08, p 30.
- ASTM (American Society For Testing And Materials), 2016. Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens under Constant Normal Force. ASTM D5607-16. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016

- Atapour, H. and Moosavi, M. 2013. The Influence of Shearing Velocity on Shear Behavior of Artificial Joints. *Rock Mech Rock Eng*, 47 (5), 1745-1761.
- Aydın, O., Raja, N.B. 2024. Bulanık Mantık Yöntemiyle Sera Gölü Çevresinin Heyelan Duyarlılık Analizi. *Afet ve Risk Dergisi* 7(2), 2024, (441-456). DOI: 10.35341/afet.1439973
- Bahaaddini, M., Sharrock, G., and Hebblewhite, B. K. 2013. Numerical Direct Shear Tests to Model The Shear Behaviour Of Rock Joints. *Computers and Geotechnics*, 51, 101-115.
- Bandis, S., 1980. Experimental Studies Of Scale Effects on Shear Strength and Deformation Of Rock Joints. PhD Thesis. Department of Earth Sciences, The University of Leeds. 540 pp. Leeds
- Bandis, S., Lumsden, A.C. and Barton, N. 1981. Experimental Studies of Scale Effects on The Shear Behaviour Of Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18: 1-21.
- Barbero, M., Barla, G. and Zaninetti, A. 1996. Dynamic Shear Strength of Rock Joints Subjected to İmpulse Loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 33, No. 2, pp. 141–151.
- Barla, G., Barla, M. and Martinotti, M.E. 2010. Development of A New Direct Shear Testing Apparatus, *Rock mechanics and Rock engineering*, Vol. 43, pp. 117–122.
- Barla, G., Robotti, F. and Vai, L. 2011. Revisiting Large Size Direct Shear Testing of Rock Mass Foundations. In *Proceedings of the 6th International Conference on Dam Engineering*, Lisbon, Portugal, 15–17 February 2011; p. 10.
- Barton N. A. 1971a. Model Study Of The Behaviour of Steep Excavated Rock Slopes. PhD Thesis. University of London. 1971.
- Barton N. A. 1971b. A Relationship Between Joint Roughness and Joint Shear Strength. *Symposium Soc. Internat. Mecanique des Roches*, Nancy 1971. Pp 1-8
- Barton, N. 1973. Review of A New Shear Strength Criterion For Rock Joints. *Engineering Geology*, Vol. 7, pp. 287–332.
- Barton, N. 1976. The Shear Strength Of Rock And Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 13, pp. 255–279.
- Barton, N. and Choubey, V. 1977. The Shear Strength Of Rock Joints İn Theory And Practice. *Rock mechanics and Rock engineering*, Vol. 10, No. 1–2, pp.1–54.

- Barton, N. 2013. Shear Strength Criteria For Rock, Rock Joints, Rockfill And Rock Masses: Problems And Some Solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(4), 249-264.
- Beer, I.E.E. 1950. The Cell-test. *Géotechnique*, 2(2): Volume 2 Issue 2, December 1950, pp. 162–172. doi:10.1680/geot.1950.2.2.162.
- Berry, K., McCormick, M.L. Berry, S.M. Adams, S.L. and MacLaughlin, M.M. 2015. Evaluation of the Continuous Multistage Direct Shear Test Procedure for Rock Joints. Unpublished master's research paper. Montana Tech of the University of Montana.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley and Sons, 237pp.
- Birch, J.S. 2006. Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite For Rock Face Characterization. *Laser And Photogrammetric Methods For Rock Face Characterization. The 41st U.S. Rock Mechanics Symposium*. F. Tonon, and Kottenstette, J.T., (Eds). Colorado School of Mines: 13-32.
- Boulon, M. 1995. A 3D Direct Shear Device for Testing the Mechanical Behaviour and the Hydraulic Conductivity of Rock Joints. *Proceedings of Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, pp. 407–420
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T. 2005. *Rock Mechanics for Underground Mining* -Third edition, Kluwer Academic Publishers
- Bruce, I. G., Cruden, D. M. and Eaton, T. M. 1989. Use Of A Tilting Table To Determine The Basic Friction Angle Of Hard Rock Samples. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 26, pp. 474–479.
- Bruce, I.G., Cruden, M. D. and Eaton, T.M. 2011. Use Of A Tilting Tablet O Determine The Basic Friction Angle Of Hard Rock Samples. *Canadian Geotechnical Journal* 26(3):474-479.
- Canpolat, A. 2022. Sıkışma ve Çekme Gerilmelerinin Kaya Malzemesinin Elastisite Modülü ve Poisson Oranına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı. 74 Sf. Elazığ.
- Casagrande, D.D. 2018. A Stochastic Approach For The Shear Strength Of Rock Discontinuities. *Discipline of Civil, Surveying and Environmental Engineering Faculty of Engineering and Built Environment University of Newcastle Callaghan*, 2308, Australia.
- Cawsey, D.C., and Farrar, N.S. 1976. Simple Apparatus for Finding Rock Joint Friction *Geotechnique*, 26: 382-386.

- Coulomb, C.A. 1776. Essai Sur Une Application Des Regles Des Maximis Et Minimis a Quelques Problemes de Statique Relatifs, A La Architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., Vol. 7, pp. 343–387.
- Coulson, J.H. 1972 Shear Strength Of Flat Surfaces In Rock Stability Of Rock Slopes. In: Cording EJ (ed) Proc 13th symposium on rock mechanics, 1972. ASCE, New York, pp 77–105
- Chryssanthakis, P. 2003. Results Of Tilt Testing. Report: SKB P-03-108. Forsmark site.
- Deere, D.U. 1968. Geological Considerations. In: Stagg KG, Zienkiewicz OC (Eds) Rock Mechanics In Engineering Practice. Wiley, New York, pp 1–20.
- Develi, K. 2006. Süreksizlik İçeren Ortamların Mekanik Modellemesi için Pürüzlülüğün Kuramsal ve Deneysel Yöntemler ile Sayısal Tanımı. Doktora Tezi. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Jeolojisi Programı. 257. İstanbul.
- Dölek, İ., Uzelli, T., Ege, İ., Çelik Ö., 2023. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri ile oluşan kütle hareketlerine bir örnek: Tepehan heyelanı. Türk Coğrafya Dergisi, (83), 73-86. <https://doi.org/10.17211/tcd.1307166>.
- Evans, S.G., 2006. Single-Event Landslides Resulting from Massive Rock Slope Failure: Characterising Their Frequency And Impact On Society. Conference paper pp 53–73.
- Fardin, N., Feng, Q. and Stephansson, O. 2004. Application of a New in-Situ 3D Laser Scanner To Study The Scale Effect On The Rock Joint Surface Roughness. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41(2): 329-335
- Fecker, E. and Rengers, N. 1971. Measurement of Large-Scale Roughness Of Rock Planes By Means Of Profilograph And Geological Compass. Rock Fracture, Proc. of Int. Symp. Rock Mech. Nancy: 1-18.
- Feng, Q., Fardin, N., Jing, L., Stephansson, O.S.J. 2003. A New Method for in-Situ Non-Contact Roughness Measurement Of Large Rock Fracture Surfaces. Rock mechanics and Rock engineering 36(1): 3-25.
- Franklin, J.A., Kanji, M.A., Herget, G., Ladanyi, B., Drozd, K., Dvorak, A., Egger, P., Kutter, H., Rummel, F., Rengers, N., Nose, M., Thiel, K., Peres Rodrigues, F., Serafim, J.L., Bieniawski, Z.T., Stacey, T.R., Muzas, F., Gibson, R.E., Hobbs, N.B., Coulson, J.H., Deere, D.U., Dodds, R.K., Dutro, H.B., Kuhn, A.K. and Underwood, L.B. 1974. ISRM Suggested Methods For Determining Shear Strength. International Society for Rock Mechanics,: 129–140.
- Frude, N. 1987. A Guide to SPSS/PC+. Springer Verlag. 278. Newyork.

- Gaich, A., Pötsch, M. and Schubert, W. 2006. Basics and Application Of 3D Imaging Systems With Conventional And High-Resolutions Cameras. Laser And Photogrammetric Methods For Rock Face Characterization. The 41st U.S. Rock mechanics Symposium. F. Tonon, and Kottenstette, J.T., (Eds). Colorado School of Mines: 33-48
- Gaines, S. 2020. Interpretation Of The Peak And Residual Strength Of Induced Tension Fractures in Sandstone By Single-Stage And Multi-Stage Direct Shear Tests. 54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Golden, Colorado.
- Galante, G., Piacentini, M. and Ruisi, V.F. 1991. Surface Roughness Detection By Tool Image Processing. *Wear* 148(2): 211-220.
- Ge, Y., Tang, H., Ez Eldin, M. A. M., Wang, L., Wu, Q. and Xiong, C. 2016. Evolution Process of Natural Rock Joint Roughness during Direct Shear Tests. *International Journal of Geomechanics*, 17(5), E4016013.
- Geertsema, A.J. 2002. The Shear Strength Of Planar Joints in Mudstone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39: 1045-1049.
- Gehle, C. 2002. Breakage And Shear Behaviour Of Rock Joints With Intermittent Material Bridges. Doctoral Thesis. Ruhr-Universität Bochum, Universitätsbibliothek, Germany.
- Gentier, S., Riss, J., Archambault, G., Flamand, R. and Hopkins, D. 2000. Influence of Fracture Geometry on Shear Behaviour. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37 (1), 161-174
- Gomez, J.E., Filz, M.G., Ebeling, R.M. and Dove, J. E. 2008. Sand-to-Concrete Interface Response to Complex Load Paths in A Large Displacement Shear Box. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 31, pp. 1-12.
- Goodman, R. 1976. *Methods of Geological Engineering*, West Publishing Company, St. Paul.
- Grasselli G. 2001. Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description, Ph.D. thesis. Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), 2001.
- Grasselli, G. and Egger, P. 2003. Constitutive Law For The Shear Strength Of Rock Joints Based On Three-Dimensional Surface Parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, No. 1, pp. 25-40.
- Grasselli, G., Wirth, J. and Egger, P. 2002. Quantitative Three-Dimensional Description of A Rough Surface And Parameter Evolution With Shearing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39: 789-800.

- Gohau, G. 1990. A History of Geology. Library of Congress Cataloging in Publication Data. The State University. QE11.G84 1991
- González, J., González–Pastoriza. N., Castro, U., Alejano, L.R., Muralha, J. 2014 Considerations On The Laboratory Estimate Of The Basic Friction Angle Of Rock Joints. In: Alejano LA, Perucho A, Olalla C, Jimenez R (eds) Proc. EUROCK 2014 symposium. CRC Press, Vigo, pp 199–204
- Gravel, C., Moradian, Z., Fathi, A., Ballivy, G., Rivard, P., and Quirion, M. 2015. In situ Shear Testing Of Simulated Dam Concrete-Rock Interfaces. In 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics. International Society for Rock Mechanics. ISBN: 978-1-926872-25-4.
- Haberfield, C.M. and Johnston, I.W. 1994. A Mechanistically-Based Model For Rough Rock Joints. International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences., Vol. 31, pp. 279-292.
- Habibzadeh, F., 2020. Süreksizliklerin Statik Ve Dinamik Koşullardaki Kesme Dayanımının Yapay Süreksizlikler Yoluyla Karşılaştırılması. Doktora tezi. Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. 186 sayfa. Ankara
- Hack, R., 1998. Slope Stability Probability Classification; SSPC; 2nd version. University of Technology Delft; International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences; ITC, Delft, Enschede, 258 pp, ISBN 90 6164 154 3. The Netherlands.
- Haneberg, W.C. 2006. Measurement and Visualization of Directional Rock Surface Profiles Using Three-Dimensional Photogrammetric or Laser Point Clouds, Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2006.
- Hans, J. and Boulon, M. 2003. A New Device for Investigating the Hydro–Mechanical Properties of Rock Joints. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 27, pp. 513–548.
- Haque, A. 1999. Shear Behaviour Of Soft Rock Joints Under Constant Normal Stiffness. (Doctor of Philosophy). University of Wollongong. Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, pp 271. Australia.
- Hassani, F.P. and Scoble, M.J. 1985. Frictional Mechanism And Properties Of Rock Discontinuities. Paper on Fundamental of Rock Joints, Proceeding of The International Symposium on Fundamental of Rock Joints, Bjorkliden, Sweden, 15–20, Lulea Sweden Centek Pub 185–196.
- Hencher, S.R. 2013. Characterizing Discontinuities In Naturally Fractured Outcrop Analogues And Rock Core: The Need To Consider Fracture Development Over Geological Time. Geological Society, London, Special Publications 374. doi:10.1144/sp374.15.

- Hencher, S.R. and Richards, L.R. 1989. Laboratory Direct Shear Testing Of Rock Discontinuities. *Ground Eng* 22(2):24–31
- Hencher, S.R. and Richards, L.R. 2014. Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales. *Rock Mech Rock Eng* (2015) 48:883–905 DOI 10.1007/s00603-014-0633-6.
- Hermanns R.L., Blikra L.H., Naumann, M. and Nilsen, B. 2006. Examples Of Multiple Rock-Slope Collapses From Kofels (Otz Valley, Austria) And Western Norway. *Engineering Geology* 83:94-108. DOI:10.1016/j.enggeo.2005.06.026.
- Heuze, F. E. and Barbour, T. G. 1982. New Models For Rock Joints And Interfaces. *Journal Of The Geotechnical Engineering Division (ASCE)*, Vol. 108, pp. 757-776.
- Hoek, E., And Bray, J. 1974. *Rock Slope Engineering*. Institute of Mining and Metallurgy, London, United Kingdom.
- Hoek, E. And Bray J. W., 1981. *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, 3rd edition, London.
- Hong, E.S., Lee, I.M. and Lee, J.S. 2006. Measurement Of Rock Joint Roughness By 3D Scanner. *Geotechnical Testing Journal* 29(6).
- Huang, T.H., Chang, C.S. and Chao, C.Y. 2002. Experimental And Mathematical Modeling For Fracture Of Rock Joint With Regular Asperities. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(17), 1977-1996.
- IBM SPSS Statistics, 2021. Version 27. Armonk, NY: IBM Analytics.
- Indraratna, B., Haque, A. and Aziz, N. 1998. Laboratory Modelling Of Shear Behaviour Of Soft Joints Under Constant Normal Stiffness Conditions. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 16, pp. 17-44.
- Indraratna, B. And Haque, A. 2000. *Shear Behaviour Of Rock Joints*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.164
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1978. Suggested Methods For The Quantitative Description Of Discontinuities In Rock Masses. *Int J Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 15:319–368.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. *Rock Characterization Testing And Monitoring- Suggested Methods*. ET BROWN Pergamon Press. Oxford, UK
- Jaeger, J.C. 1959. The Frictional Properties of Joints in Rock. *Geofis. Pura Appl.* 1959, 43, 148–158.

- Jaeger, J.C. 1971. Friction Of Rocks And Stability Of Rock Slopes. *Géotechnique*, Department of Geophysics and Geochemistry, Australian National University, Canberra, Vol. 21, No. 2, pp. 97–134.
- Jang H. C., Zhang, Q. Z., Kang, S. S., Jang, B. A., 2017. Determination Of The Basic Friction Angle Of Rock Surfaces By Tilt Tests. *Rock Mechanics And Rock Engineering*, 2018. 51:989–1004.
- Jiang, Y., Xiao, J., Tanabashi, Y. and Mizokami, T. 2004. Development of an Automated Servo-Controlled Direct Shear Apparatus Applying A Constant Normal Stiffness Condition. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 275–286.
- Jiang, Y., Li, B. and Tanabashi, Y. 2006. Estimating The Relation Between Surface Roughness And Mechanical Properties of Rock Joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43: 837-846.
- Johnston, I. W. and Lam, T. S. K. 1989. Shear Behavior Of Regular Triangular Concrete/Rock Joints. Analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, pp. 711-727.
- Johansson F. and Stille, H. 2014. A Conceptual Model for the Peak Shear Strength of Fresh and Unweathered Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, 69:31–38, 2014
- Kana, D.D., Fox, D.J. and Hsiung, S.M. 1996. Interlock/ Friction Model for Dynamic Shear Response In Natural Jointed Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 33(4), pp. 371–386.
- Kim, D.Y., Chun, B.S. and Yang, J.S. 2006. Development Of A Direct Shear Apparatus With Rock Joints And Its Verification Tests. *Geotechnical testing*, V. 29(5).
- Kolapo, P., Oniyide, O.G., Said, O. K., Lawal, A.I., Onifade, M., Munemo, P. 2022. An Overview of Slope Failure in Mining Operations. *Mining* 2022, 2(2), 350-384; <https://doi.org/10.3390/mining2020019>
- Konietzky, H., Frühwirth, T. and Luge, H. 2012a. A New Large Dynamic Rockmechanical Direct Shear Box Device. *Rock mechanics and Rock engineering*, Vol. 45, No. 3, pp. 427–432.
- Konietzky, H., Frühwirth, T. and Nguyen, V.M. 2012b. GS-1000: A New Large Rockmechanical Shear Box Device for Dynamic And HM-Coupled Testing Under Extreme Strong Forces. *Eurock: Rock Engineering And Technology For Sustainable Underground Construction*. Stockholm, 2012: 1-9.

- Kovari, K., and Tisa, A. 1975. Multiple Failure State And Strain Controlled Triaxial Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 7: 17–33. doi:10.1007/BF01239232.
- Krahn, J. and Morgenstern, N.R. 1979. The Ultimate Frictional Resistance Of Rock Discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16: 127-133
- Ladanyi, B. and Archambault, G. 1969. Simulation of Shear Behavior of A Jointed Rock Mass. 11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics Association, pp. 105–125.
- Lama, R. D. 1978. Influence of Clay Fillings on Shear Behaviour of Joints. In: 3rd Congr. Int. Assoc. Eng. Geol., Madrid, Spain, pp. 27-34.
- Larsson, J. 2021. Quality Aspects in Direct Shear Testing of Rock Joints. Licentiate Thesis in Civil and Architectural Engineering, Soil and Rock Mechanics KTH Royal Institute of Technology. Pp 53. Stockholm.
- Li, T. 2012. Damage to Mountain Tunnels Related to The Wenchuan Earthquake and Some Suggestions For Aseismic Tunnel Construction. *Bull. Eng. Geol. Environ.* (2012) 71:297–308 DOI 10.1007/s10064-011-0367-6.
- Maerz N.H., Franklin J.A. and Bennett C.P. 1990. Joint Roughness Measurement Using Shadow Profilometry. *International Journal of Rock Mechanics And Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 27, No. 5, pp. 329–343.
- MacDonald, N.R. 2022. A Critical Laboratory Investigation of Multi-Stage Direct Shear Testing Procedures on Rock Joints Using Synthetic Replica Specimens. Master's Thesis, Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University. Pp 487. Kingston.
- MacDonald, N.R., Packulak, T.R.M. and Day, J.J. 2023. A Critical Review of Current States of Practice in Direct Shear Testing of Unfilled Rock Fractures Focused on Multi-Stage and Boundary Conditions. *Geosciences* 2023, 13, 172. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060172>
- MacLaughlin, M., Berry, S., Petro, M., Berry, K. and Bro, A. 2019. Characterization of Peak Shear Strength of Rough Rock Joints Using Limited Displacement Multi-Stage Direct Shear (LDMDs) Tests. *E3S Web Conf.* 2019, 92, 13011.
- Maksimovic, M. 1996. The Shear Strength Components of a Rough Rock Joint. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 33(8): 769-783.
- Merabi, B.E. 2018. Mechanical Behavior of Cohesive Concrete-Rock Joints at the Dam-Foundation Interface Geometrical And Mechanical Influence Of Asperities. PhD Thesis. *Mechanics of the solides*. Université Grenoble Alpes, 205.

- Milne, D., Germain, P., Grant, D., and Noble, P. 1991. Field Observation For The Standardization Of The NGI Classification System For Underground Mine Design. International Congress on Rock Mechanics. Aachen, Germany, A.A. Balkema.
- Milne, D., Hawkes, C. and Hamilton, C. 2009. A New Tool for The Field Characterization Of Joint Surfaces. Proc. of the 3rd Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium. Toronto: 1-11
- Mohr, O. 1900. Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und Den Bruch Eines Materials. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure Band, Vol. 44, pp. 1524–1530.
- Muralha, J. 2007. Stress Paths in Laboratory Joint Shear Tests. in 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. Taylor & Francis Group, Lisbon, Portugal. pp. 431–434
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chryssanthakis, P. and Yujing, J. 2014. ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(1): 291–302. doi:10.1007/s00603-013-0519-z.
- Nguyen, V.V.M. 2013. Static and Dynamic Behaviour of Joints in Schistose Rock: Lab Testing and Numerical Simulation. PhD Thesis. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. pp 181.
- Oakdale Engineering, 2008. DATAFIT: Version 9.0, RC 101, 23 Tomey Road, Oakdale, PA, 15071 USA.
- Oliveira, D.A.F. and Indraratna, B. 2010. Comparison between Models of Rock Discontinuity Strength And Deformation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., Vol. 136, pp. 864-874.
- Önsel, İ.E. 2014. Kaya Kütlesindeki Süreksizliklerin Pürüzlülük Ölçümleri İçin Objektif Yöntemlerin Geliştirilmesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Maden Mühendisliği Anabilim Dalı. Sf 332. İstanbul.
- Özvan, B., 2010. Süreksizlik Düzlemlerinde Ayrışmanın Pürüzlülük Üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. 74 sf. Adana.
- Pankow, K.L., Moore, J.R., Hale, J.M., Koper, K.D., Kubacki, T., Whidden, K.M., McCarter, M.K. 2014. Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data. Geol. Soc. Am. 2014, 24, 4–9.

- Papaliangas, T., Lumsden, A.C., Hencher, S.R. and Manolopoulou, S. 1990. Shear Strength of Modelled Filled Rock Joints. In: Int. Conf. on Rock Joints., N. Barton and O. Stephansson (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 275–282.
- Papaliangas, T., Hencher, S.R., Lumsden, A.C. and Manolopoulou, S. 1993. The Effect of Frictional Fill Thickness on The Shear Strength of Rock Discontinuities. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences., Vol. 30, pp. 81–91
- Patton, F.D. 1966. Multiple Modes of Shear Failure in Rock. Proceedings 1st Congress on Rock Mechanics, ISR Lisbon. Vol. 1, pp. 509–513.
- Pérez-Rey, I., Alejano, L. R., González-Pastoriza, N., González, J., and Arzúa, J. 2015. Effect of Time and Wear on The Basic Friction Angle of Rock Discontinuities. In ISRM Regional Symposium-EUROCK 2015. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Petro, M. 2018. Characterization of Peak Shear Strength of Rough Rock Joints Using the Limited Displacement Multi-Stage Direct Shear (LDMSD) Test Method. Master's Thesis, Montana Technological University, USA, 2018. Butte
- Perez-Rey, I., Alejano, L.R., Gonz'alez-Pastoriza, N., Gonz'alez, J., and Arz'ua, J. 2015. Effect of Time and Wear on The Basic Friction Angle of Rock Discontinuities. In Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium, pages 1115–1120.
- Piteau, D.R. 1970. Geological Factors Significant To The Stability of Slopes Cut In Rock. Proc. Symp. on Theoretical Background to Planning Open Pit Mines with Ref to Slope Stability. Johannesburg, South Africa: 33-53.
- Qi S., Zheng, B., Wu, F., Huang, X., Guo, S., Zhan, Z., Zou, Y., Barla, G., 2020. A New Dynamic Direct Shear Testing Device on Rock Joints. Rock Mechanics and Rock Engineering. Volume 53, pp 4787–4798. doi.org/10.1007/s00603-020-02175-3.
- Quansheng, L., Yongchao, T., Dongfeng, L. and Yalong, J. 2017. Updates to JRC-JCS Model for Estimating The Peak Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description. Engineering Geology, 282(300), 282-300.
- Rahim, A.I. 2018. Sample Type of Tilt Testing and Basic Friction Angle Value for the Crocker Formation's Fine Sandstone of Sabah, Malaysia. ASM Sc. J., 11, Special Issue 3, 2018 for SANREM, 215-223.
- Rahman, Z., Slob, S. and Hack, R. 2006. Deriving roughness Characteristics of Rock Mass Discontinuities from Terrestrial Laser Scan Data. Proc. Engineering Geology for Tomorrow's cities. 10th IAEG Congress. Nottingham, UK: 1-12

- Rasouli, V. and Harrison, J.P. 2004. A Comparison of Linear Profiling and an in-Plane Method For The Analysis Of Rock Surface Geometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41(3): 377-378
- Renaud, S., Saichi, T., Bouaanani, N. Miquel, B., Quirion, M. and Rivard, P. 2019. Roughness Effects on the Shear Strength of Concrete and Rock Joints in Dams Based on Experimental Data. *Rock Mech Rock Eng* 52, 3867–3888 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01803-x>.
- Rengers, N., 1970. Influence of Surface Roughness on the Friction Properties of Rock Planes In: *Proceedings 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Belgrade, 1, 229-234.
- Ripley, C.F., and Lee, K.L. 1961. Sliding Friction Tests on Sedimentary Rock Specimens. 7th International Congress of Large Dams, 4. Rome. pp. 657–671.
- Saeb, S. and Amadei, B. 1990. Modelling Joint Response under Constant or Variable Normal Stiffness Boundary Conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.*, Vol. 27, pp. 213-217
- Saeb, S. and Amadei, B. 1992. Modelling Rock Joints Under Shear and Normal Loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.*, Vol. 29, pp. 267-278.
- Sartori, M., Baillifard, F., Jaboyedoff, M. and Rouiller, J.D. 2003. Kinematics of the 1991 Randa Rockslides (Valais, Switzerland), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 423–433, <https://doi.org/10.5194/nhess-3-423-2003>, 2003.
- Seidel, J. P. and Haberfield, C. M. 1995. The Application of Energy Principles to The Determination of the Sliding Resistance of Rock Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering.*, Vol. 28, pp. 211-226.
- Seidel, J.P. and Haberfield, C.M. 2002. A Theoretical Model for Rock Joints Subjected to Constant Normal Stiffness Direct Shear. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 39, pp. 539–553.
- Shigui, D., Yunjin, H. and Xiaofei, H. 2009. Measurement of Joint Roughness Coefficient by using Profilograph and Roughness Ruler. *Journal of Earth Science* 20(5):890-896.
- Skinas, C.A., Bandis, S.C. and Demiris, C.A. 1990. Experimental Investigations and Modelling of Rock Joint Behaviour under Constant Stiffness, In: *Conf. on Fractured and Jointed rock masses - Rock Joints.*, pp. 301-308.
- Slob, S. 2010. Automated Rock Mass Characterisation using 3-D Terrestrial Laser Scanning. ITC disserttion number 172. 301 Pages. Netherlands.

- Stimpson, B. 1981. A Suggested Technique For Determining The Basic Friction Angle of Rock Surfaces Using Core. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18:63–65
- Stimpson, B. 1982. A Rapid Field Method for Recording Joint Roughness Profiles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 19(6): 345-346.
- Tating, F., Hack, R., Victor, R. and Jetten, V. 2014. Weathering Effects on Discontinuity Properties in Sandstone in A Tropical Environment: Case Study at Kota Kinabalu, Sabah Malaysia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. DOI: 10.1007/s10064-014-0625-5.
- Tatone, B.S.A., Grasselli, G. 2010. A new 2D Discontinuity Roughness Parameter and Its Correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* Volume 47, Issue 8, December 2010, Pages 1391-1400.
- Taylor, D.W. 1951. A Triaxial Shear Investigation on A Partially Saturated Soil. In *Triaxial Testing of Soils and Bituminous Mixtures*; Davis, H.E., Holtz, W.G., Housel, W.S., Eds.; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1951; pp. 180–191.
- Ulusay, R. 2014. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014 (Orange Book)*. Cham: Springer.
- Ulusay, R., Karakul, H. 2016. Assessment of Basic Friction Angles Of Various Rock Types from Turkey Under Dry, Wet And Submerged Conditions And Some Considerations on Tilt Testing. *Bull Eng Geol Environ* 75, 1683–1699 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0828-4>.
- Ünal, M., 2000. Süreksizlik Yüzey Pürüzlülüğünün Modellenmesi ve Makaslama Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı. 274 sf. Ankara.
- Vallejo, L.G. ve Ferrer, M. 2002. *Ingenteria Geológica*. Pearson Education, S. A. Çeviri: Prof. Dr. Kamil Kayabalı. Ankara Üniversitesi Yayınları No: 399-8.
- Vasarhelyi B., and Van, P., Shearing Tests With Continuously Increasing Normal Stress. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.* Vol. 50, No. 2, pp. 171–180.
- Wang, Y., Zhang, D. and Hu, Y.Z. 2019. Laboratory Investigation of the Effect of Injection Rate on Hydraulic Fracturing Performance in Artificial Transversely Laminated Rock Using 3D Laser Scanning. *Geotech Geol Eng* 37, 2121–2133 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0749-7>.
- Weissbach, G. 1978. A New Method for the Determination of The Roughness of Rock Joints in The Laboratory. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 15(3): 131-133.

- Wickens, E.H. and Barton, N.R. 1971. The Application of Photogrammetry to the Stability of Excavated Rock Slopes. *The Photogrammetric Record* 37(7): 46-54.
- Wyllie, D.C. and Mah, C.W. 2004. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th ed., Spon Pres.2004.
- Yang, Z. Y., Lo, S. C., Di, C. C. 2001. Reassessing the Joint Roughness Coefficient (JRC) Estimation using Z2. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34(3), 243- 251.
- Yang, J., Rong, G., Hou, D., Peng, J., and Zhou, C. 2015. Experimental Study on Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints. *Rock Mech Rock Eng.* DOI 10.1007/s00603-015-0791-1.
- Yathon, J., Chakrabarti, S., Penner, O., Lindenbach, E., Bergman, B., Razavi-Darbar, S. 2019. A Novel Approach for Characterizing Shear Strength of Concrete Joints: Experimental Procedure And Empirical Model. In *Proceedings of the 39th Annual Conference and Exhibition*, Chicago, IL, USA, 8–11 April 2019; p. 14
- Zhang, G., Karakus, M., Tang, H., Ge, Y. and Zhang, L. 2014. A New Method Estimating The 2D Joint Roughness Coefficient for Discontinuity Surfaces in Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 72 (2014) 191–198
- Zhao, J. 1997a. Joint Surface Matching and Shear Strength Part A: Joint Matching Coefficient (JMC). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (2), 173- 178.
- Zhao, J. 1997b. Joint Surface Matching and Shear Strength Part B: JRC-JMC Shear Strength Criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (2), 179-185.
- Zou, L. and Cvetkovic, V. 2024. A New Approach for Predicting Direct Shear Tests on Rock Fractures. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 168 (2023) 105408. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105408>

EKLER

EK 1 TEK EKSENLİ SIKIŞMA DAYANIM SONUÇLARI

EK 2 TİLTMETRE DENEY SONUÇLARI

EK 3 PROFİLOMETRE DENEY SONUÇLARI

EK 4 PATTON (1966) ÇİFT EĞRİLİ YENİLME ZARFLARI

**EK 5 PATTON (1966) YENİLME ÖLÇÜTÜNÜN FARKLI
YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

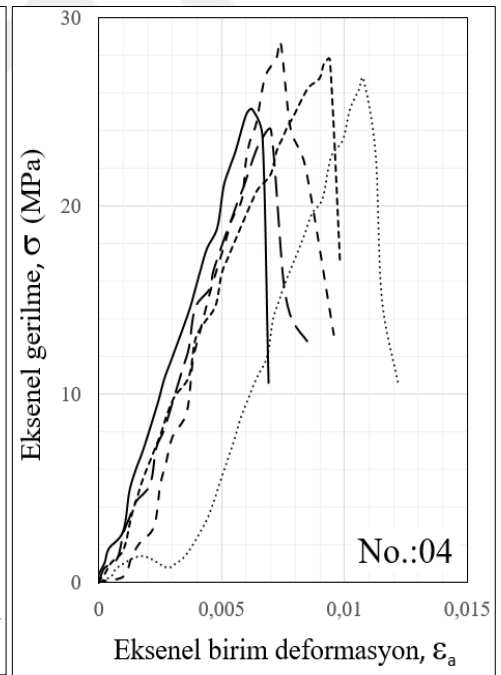
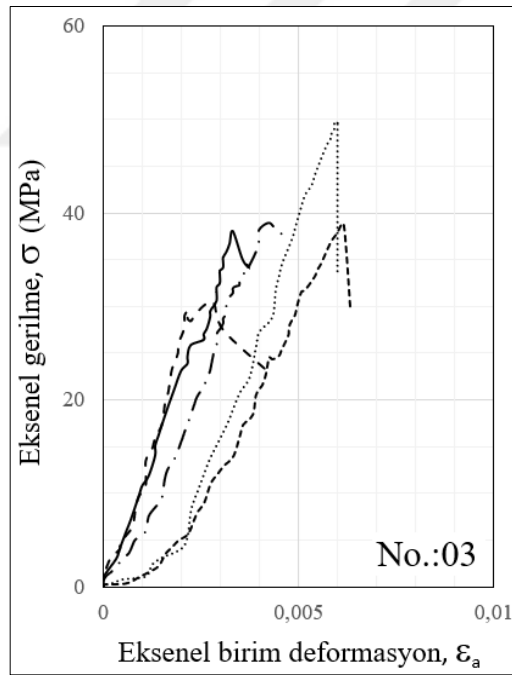
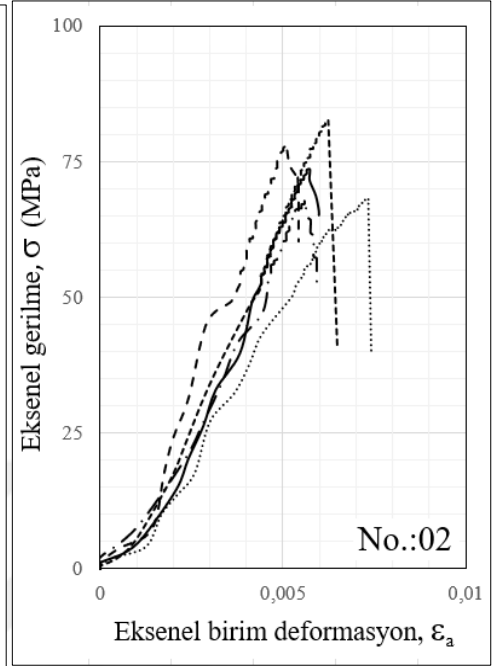
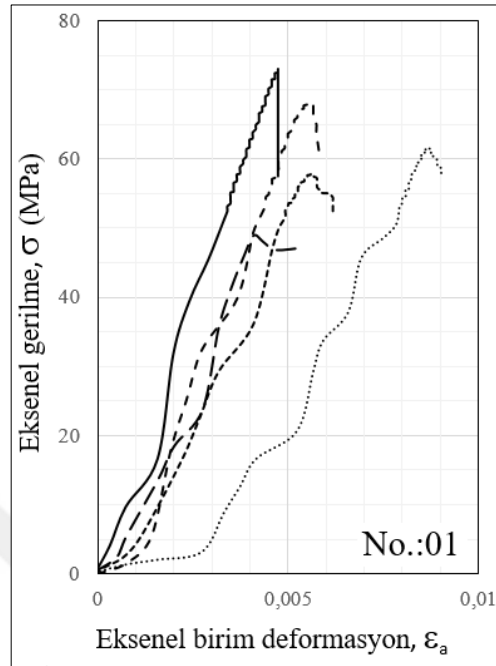
EK 6 REGRESYON ANALİZİ SONUÇLARI

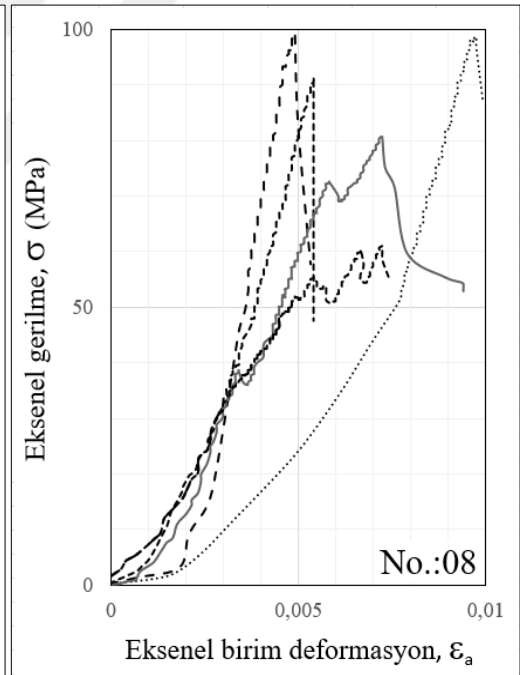
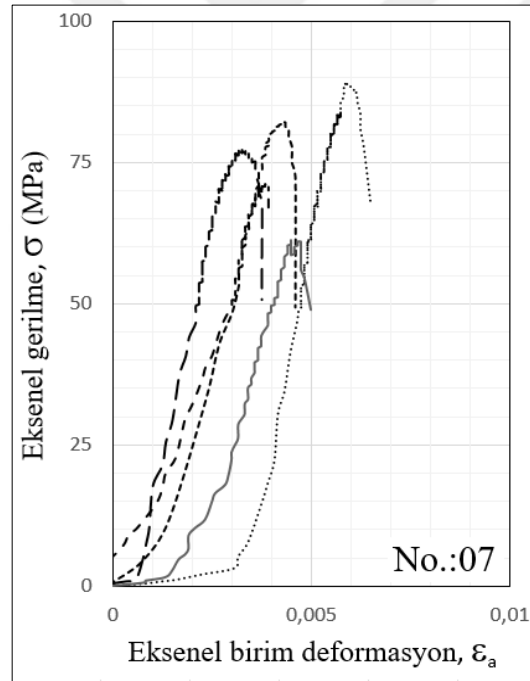
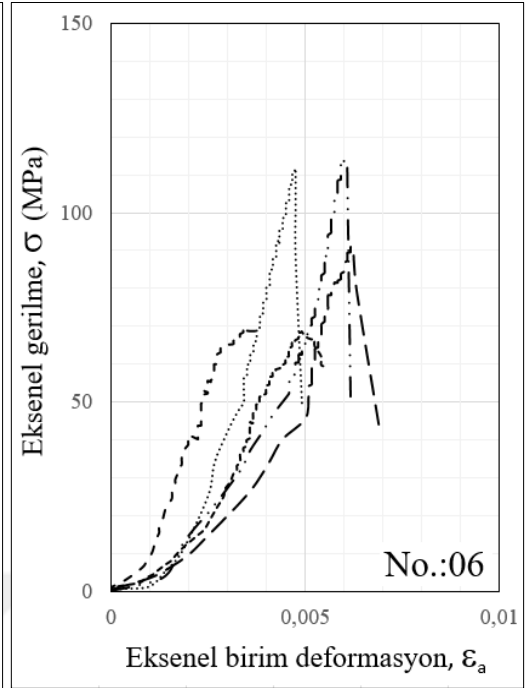
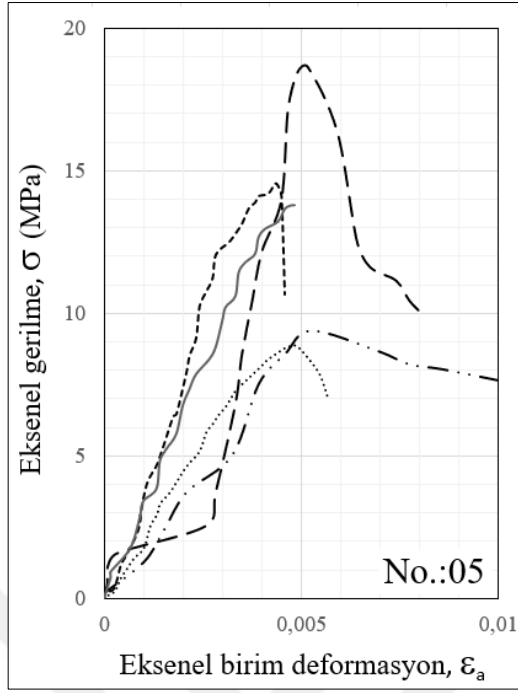
EK 7 ÇOK AŞAMALI DENEY SONUÇLARI

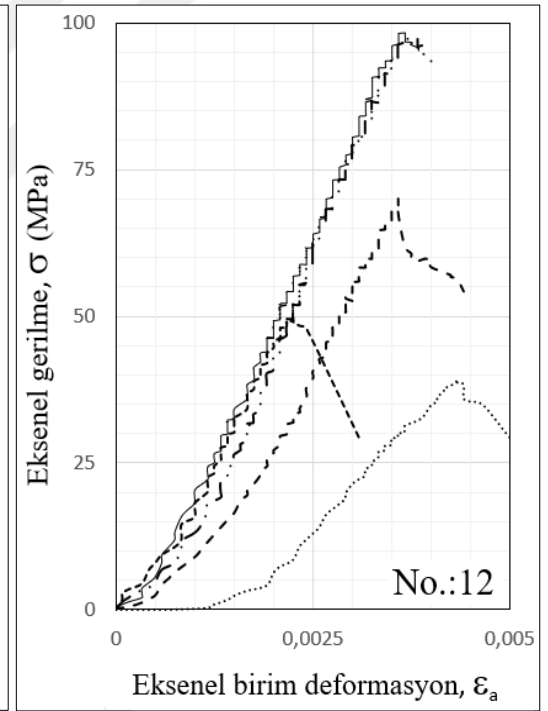
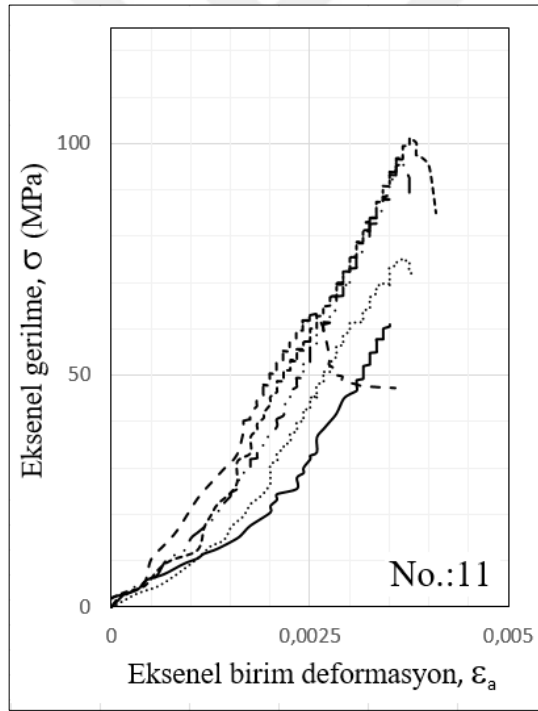
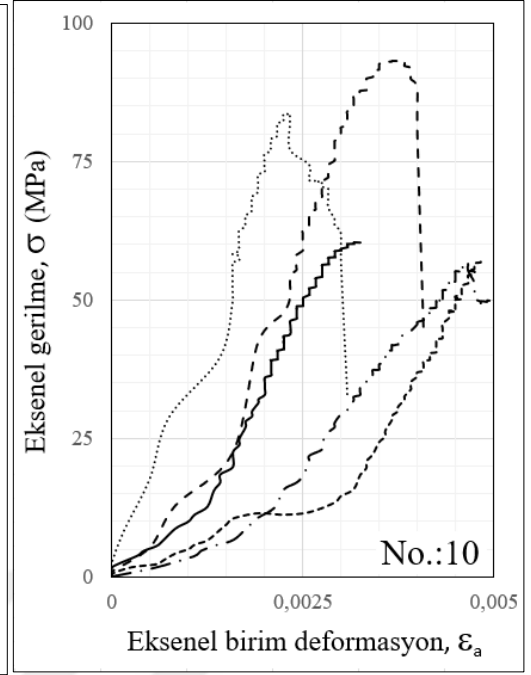
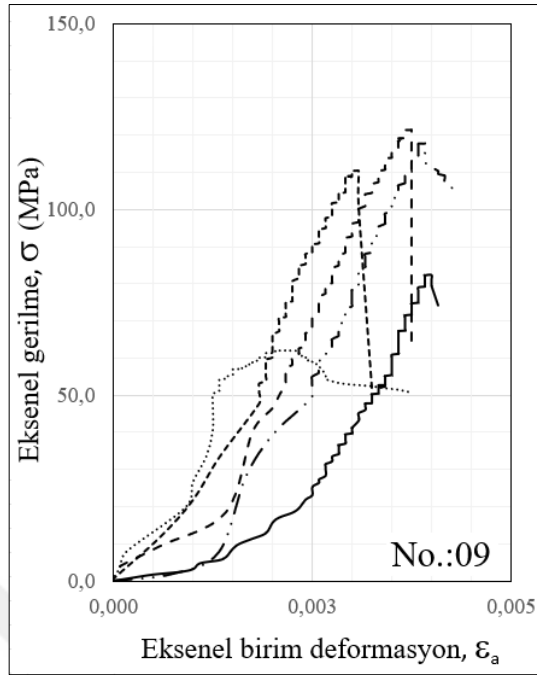
EK 1 TEK EKSENLİ SIKIŞMA DENEYİ SONUÇLARI

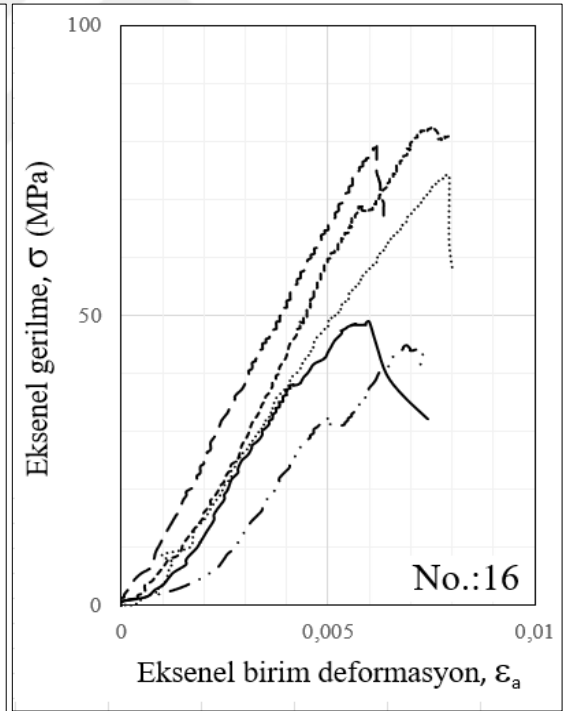
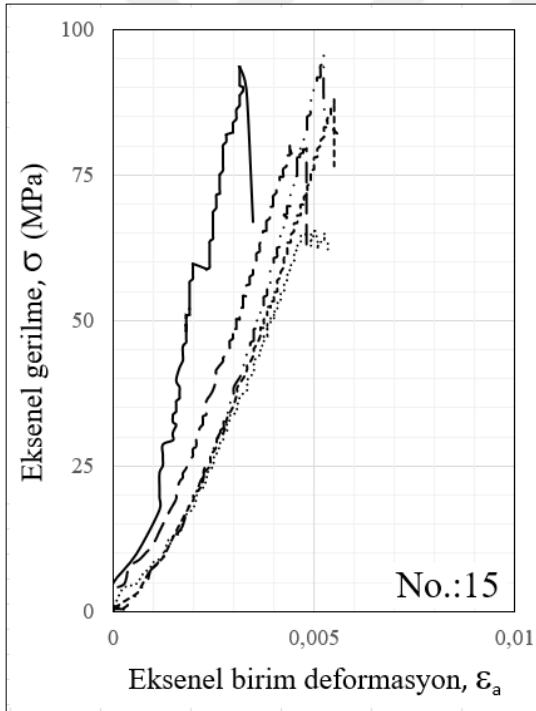
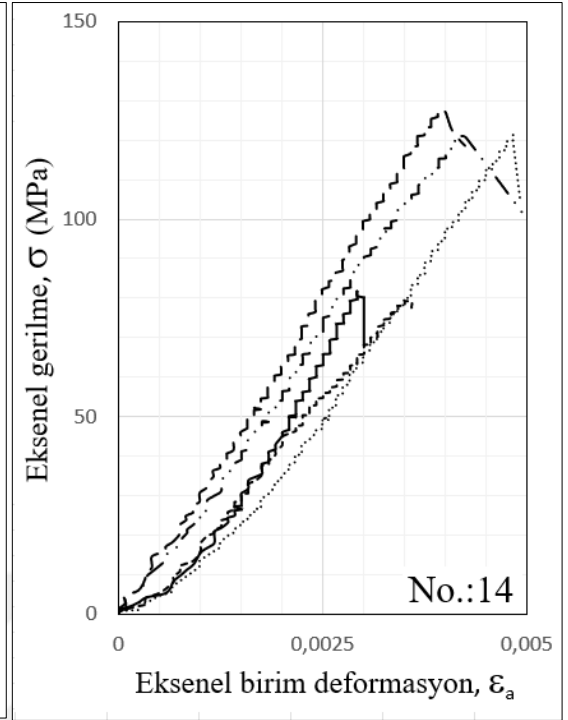
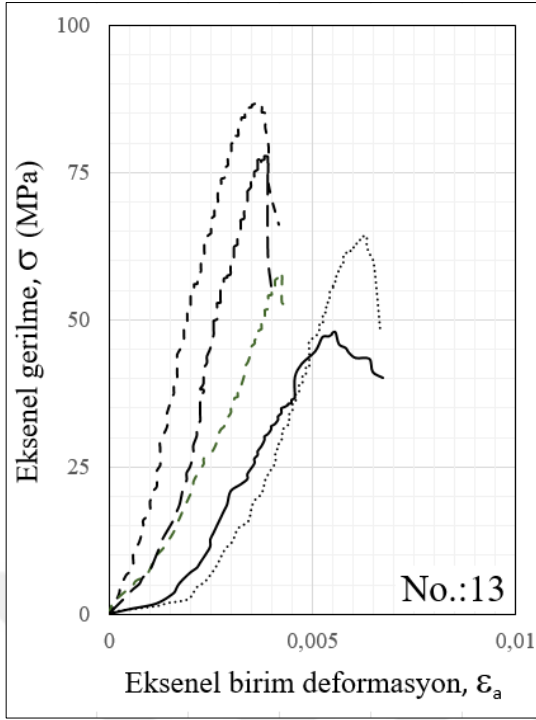
Numune No.	Deney1	Deney2	Deney3	Deney4	Deney5	$\sigma_{ort.}$
01	49	58	62	68	73	62
02	68	68	74	78	83	74,2
03	30	38	39	39	50	39,2
04	24	25	27	28	29	26,6
05	18,5	14,5	13,8	9,4	8,8	13
06	68	70	90	111	113	90
07	89	84	77	71	61	76,4
08	61	80	92	98	99	86
09	62	83	110	110	121	97,2
10	57	58	61	84	93	70,6
11	75	101	79	63	97	83
12	40	49	70	96	98	70,6
13	64	87	58	48	78	67
14	80	80	120	121	128	106
15	64	80	87	93	95	83,8
16	45	49	75	79	82	66,0
17	38	42	45	46	47	43,6
18	39	40	50	51	54	46,8
19	35	40	40	43	48	41,2
20	12	8,8	10,3	10,6	10,3	10,4
21	130,7	81,3	68,7	56,4	59,7	79,4
22	65,7	61,8	77,9	63,1	65,5	66,8
23	96,7	111,4	107	133,3	187,2	127
24	17,8	12,1	15,4	16,8	10,2	14,5
25	56,8	88,5	101,1	69,2	126,3	88,4
26	44,1	22,7	24,2	31,6	27,2	30
27	108,7	135,2	107,3	119,6	102,7	115
28	64	59,8	75,3	64,5	68,6	66,4
29	80,6	75,8	84,1	80,6	92,7	82,8
30	27,2	32,5	23,4	18,7	24,4	25,2

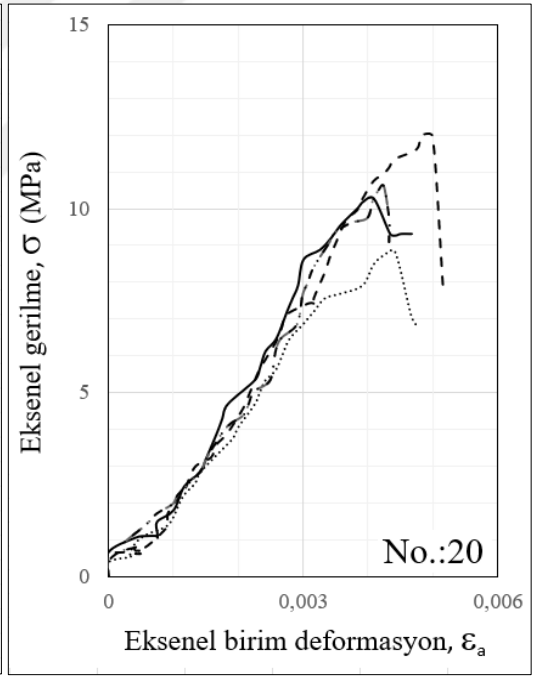
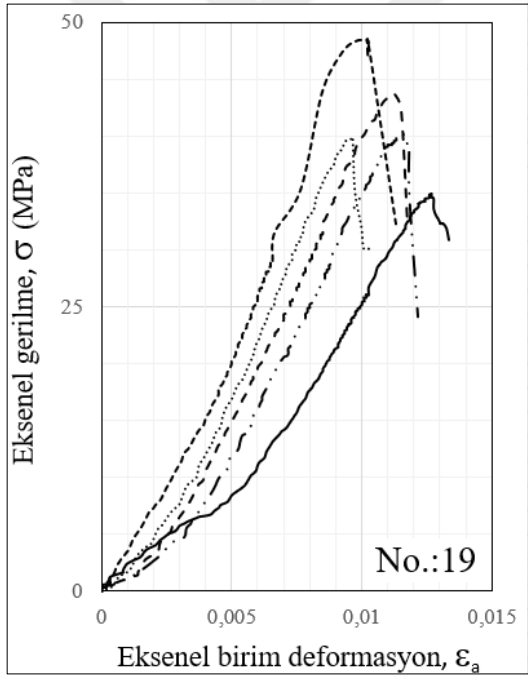
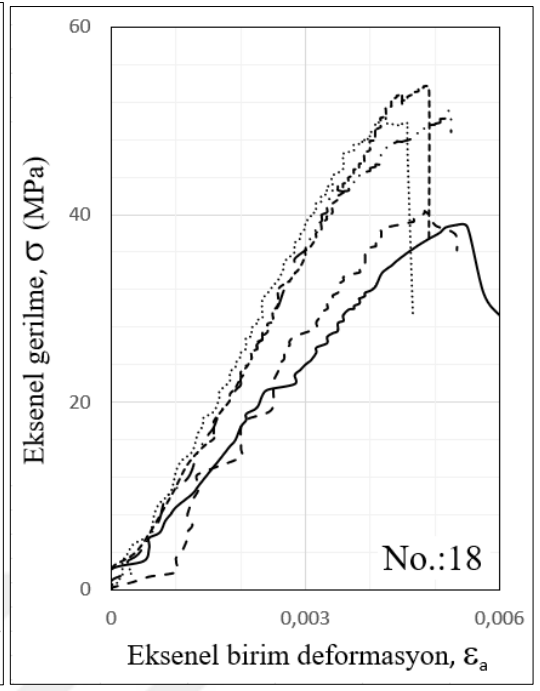
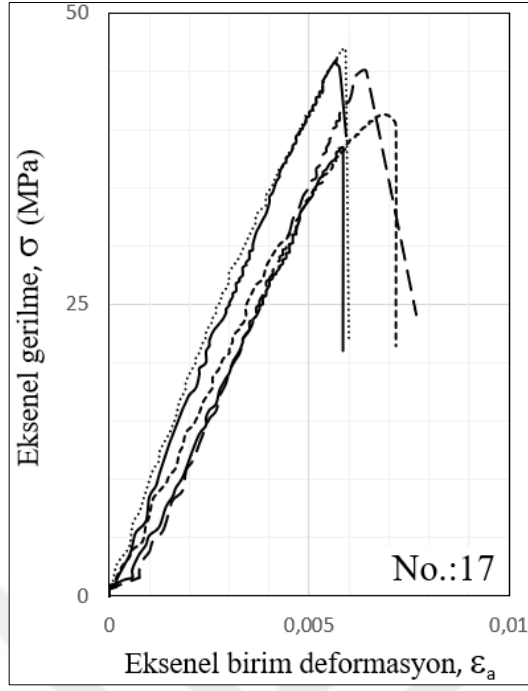
Tek eksenli sıkışma deneyi sonuçlarına ait grafikler

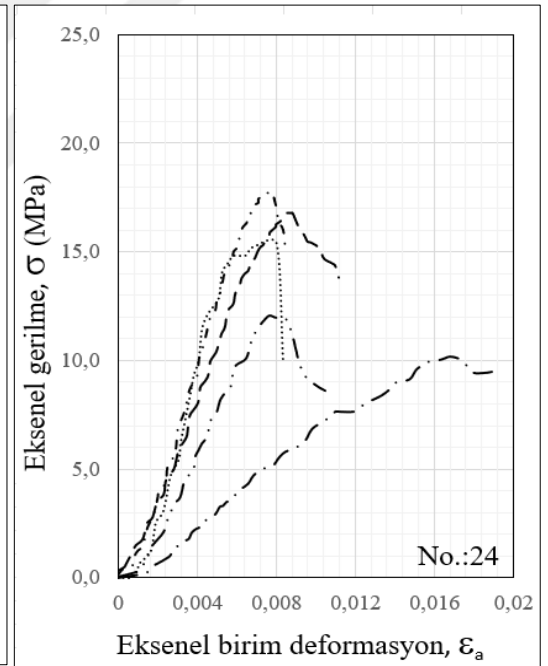
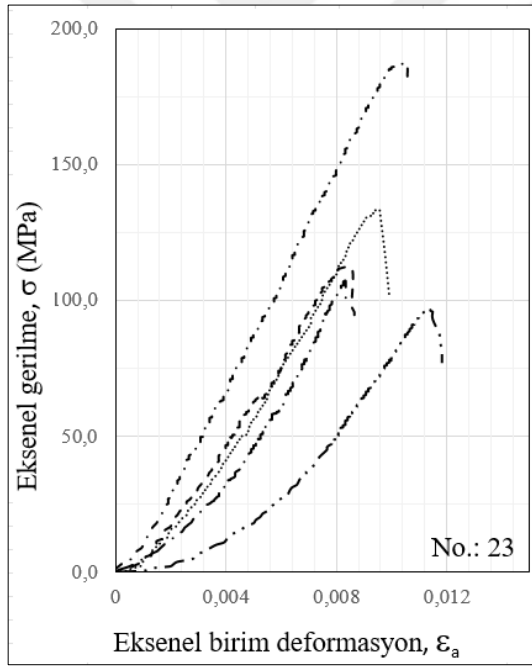
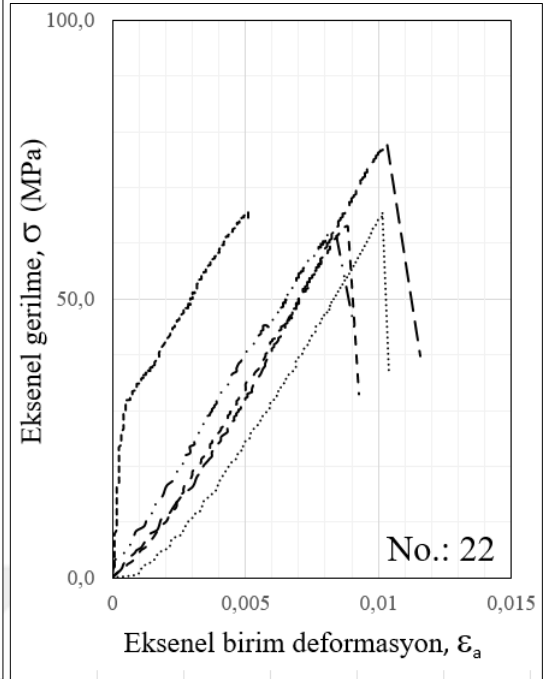
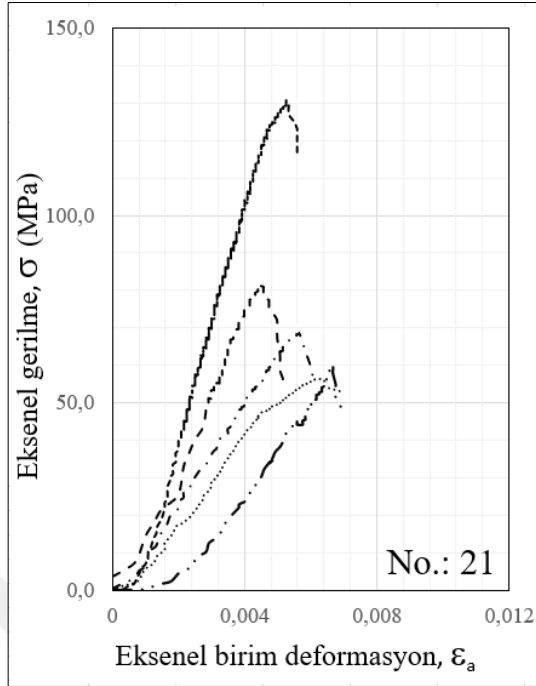


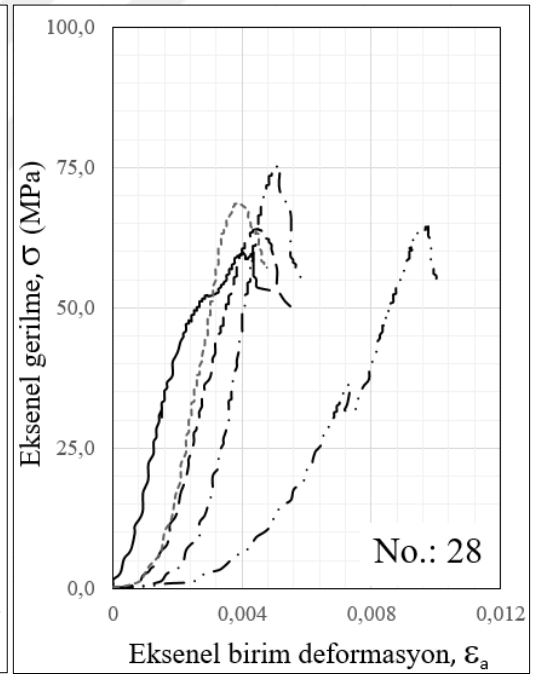
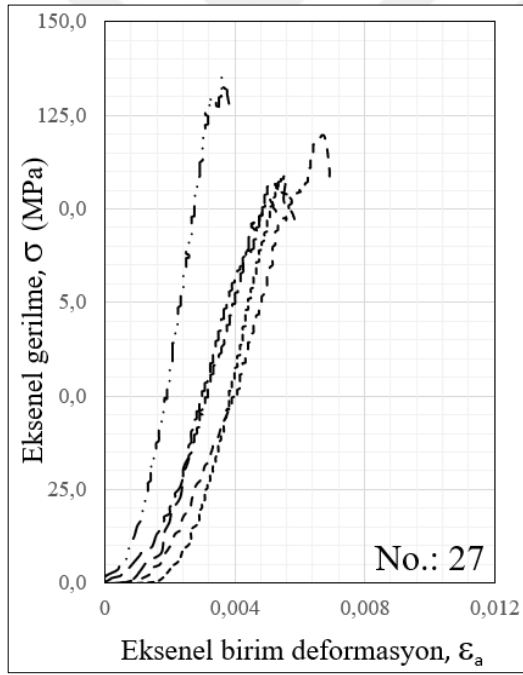
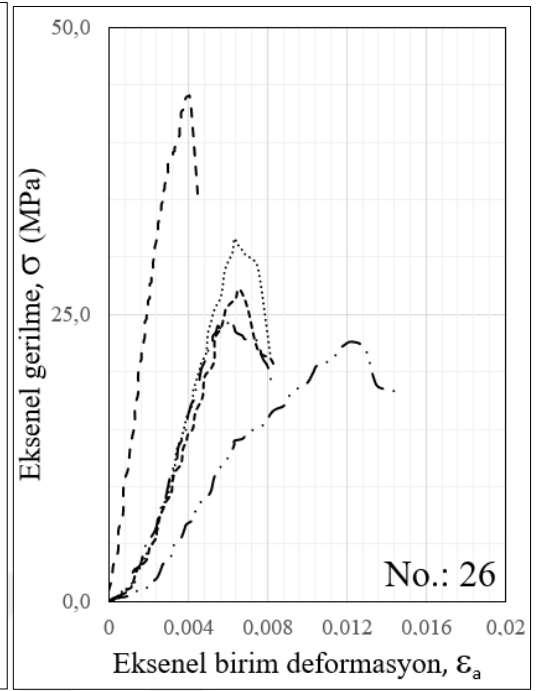
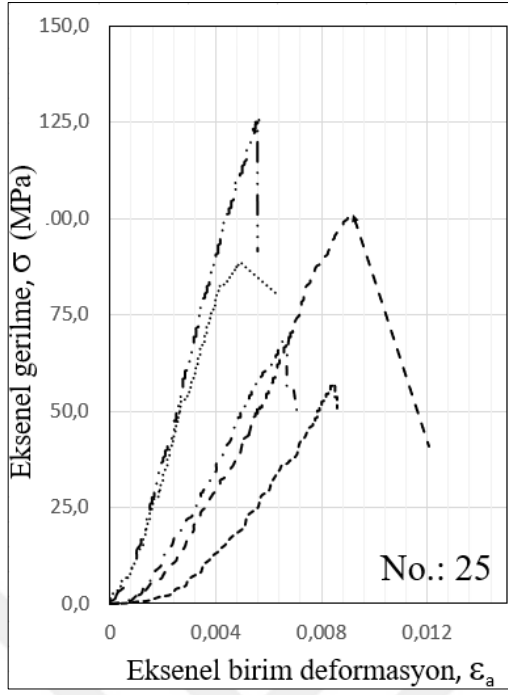


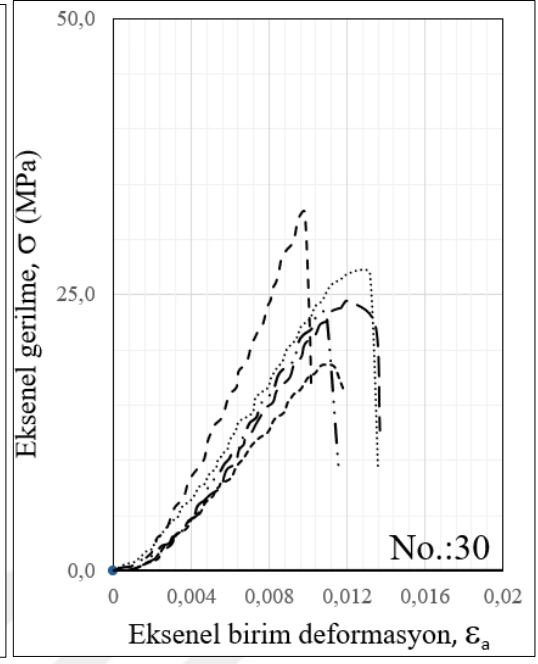
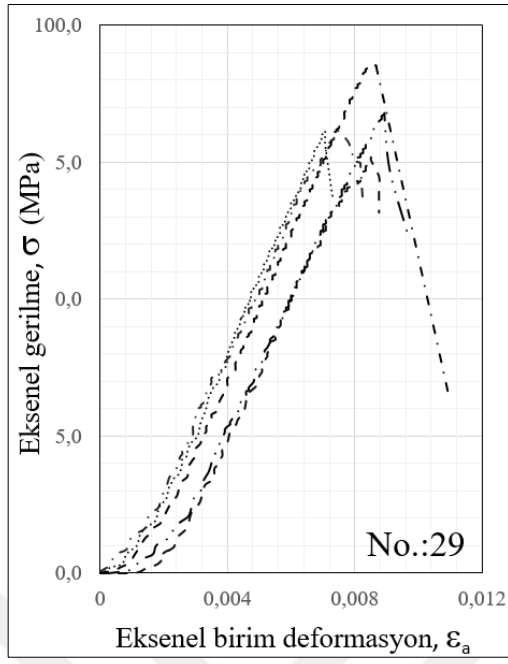












EK 2 TEMEL SÜRTÜNME AÇILARI

Karot Numunelerle Belirlenen Temel Sürtünme Açısı

Numune No.	Deney Sayısı															Ortalama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
01	40,5	39,5	39,7	39,2	40,3	40,7	40,9	38,5	40,8	40,3	39,5	39,9	38,9	38,1	39,5	39,8
02	42,4	41,3	41,2	41,5	41,8	41,3	40,7	39,5	40,7	40,3	38,5	39,9	39,6	40,1	39,7	40,6
03	42,3	42,8	43,6	43,3	42,8	42,9	43,1	43,6	43,4	42,2	42,8	42,6	42,9	43,0	43,1	43,0
04	40,1	40,5	40,8	39,8	39,5	40,9	40,8	39,5	41,1	40,1	40,3	39,6	40,6	40,4	40,2	40,3
05	42,3	39,5	38,9	39,2	40,2	41,5	40,6	39,5	39,7	40,2	40,6	39,9	39,2	39,4	40,1	40,1
06	43,1	42,2	43,6	42,5	42,8	42,6	42,8	42,1	42,8	41,6	42,7	42,1	41,5	42,9	41,6	42,5
07	41,2	39,5	39,6	39,2	40,2	42,3	41,3	40,5	41,2	40,6	39,5	39,7	40,4	40,8	40,2	40,4
08	44,7	44,3	43,9	43,8	44,6	44,9	44,3	43,3	44,8	43,9	43,9	44,3	44,3	44,3	43,9	44,2
09	38,2	39,1	40,6	40,4	40,9	40,2	41,1	40,9	41,2	40,7	40,2	41,2	40,8	40,2	41,1	40,5
10	43,5	42,6	42,8	41,2	41,3	42,1	41,7	41,3	41,8	41,6	41,1	41,8	41,9	42,6	42,3	42,0
11	42,1	42,8	42,6	42,8	42,3	40,9	43,2	43,9	43,5	43,5	43,2	42,2	44,1	43,4	43,8	43,0
12	44,1	43,8	43,6	43,9	43,8	44,1	43,7	43,5	43,8	44,2	44,0	43,2	43,5	42,9	42,8	43,7
13	40,8	41,1	39,6	41,2	42,3	41,4	40,8	40,3	40,6	39,5	41,3	40,6	41,2	40,3	42,5	40,9
14	41,3	42,4	42,9	42,3	43,3	41,6	42,4	42,2	41,8	43,2	43,6	43,2	42,7	43,4	43,6	42,7
15	44,2	43,6	44,4	42,3	43,6	42,2	43,9	44,1	42,9	43,8	44,2	43,8	43,6	41,8	43,1	43,4
16	41,2	41,8	40,9	40,2	40,4	41,3	39,1	40,5	42,0	40,8	41,1	40,8	41,9	41,2	41,8	41,0
17	36,4	35,2	36,8	36,2	36,1	37,8	37,2	35,5	35,4	36,7	35,2	36,6	34,2	35,4	35,8	36,0
18	40,9	39,5	42,6	39,9	40,6	40,2	38,9	38,6	38,9	38,3	38,5	38,7	39,2	38,8	39,5	39,5
19	41,5	39,6	37,8	37,9	38,2	39,0	39,7	40,2	39,1	39,2	37,9	37,6	38,5	39,2	38,2	38,9
20	41,6	42,4	41,8	42,2	42,8	44,6	43,7	43,7	42,1	43,6	43,2	43,2	41,3	42,4	42,1	42,7
21	44,1	43,2	43,5	42,6	41,5	41,3	41,5	42,9	41,7	43,4	42,6	42,8	43,1	42,5	42,6	42,6
22	37,4	38,1	37,8	38,5	39,2	38,3	38,6	38,4	38,9	38,4	38,8	37,8	38,9	38,3	37,7	38,3
23	38,4	38,7	39,2	39,5	39,8	39,6	40,2	40,6	38,6	40,5	39,8	40,5	39,7	40,9	40,8	39,8
24	43,9	41,4	43,6	41,8	42,4	42,6	42,9	40,4	41,6	41,4	40,8	41,5	42,3	40,8	41,1	41,9
25	41,4	38,9	39,5	39,9	39,2	38,8	39,3	39,4	39,9	40,5	40,8	40,5	40,3	40,8	41,6	40,1
26	41,2	41,4	41,9	41,2	42,1	41,2	41,3	41,5	42,3	42,4	41,2	41,6	42,5	41,1	42,1	41,7
27	40,5	39,1	37,9	39,6	38,5	38,6	37,9	38,5	39,5	38,0	37,6	38,9	38,5	38,6	37,8	38,6
28	43,4	43,6	43,2	44,5	43,7	43,6	44,2	43,5	44,1	44,2	43,2	43,3	42,9	43,9	43,6	43,7
29	41,3	42,3	43,1	43,3	43,1	43,4	42,1	41,2	43,3	42,2	42,6	43,9	43,0	42,5	43,2	42,7
30	40,1	41,2	39,2	41,2	40,2	40,5	39,9	41,2	38,5	39,5	39,8	39,9	40,1	40,2	40,9	40,2

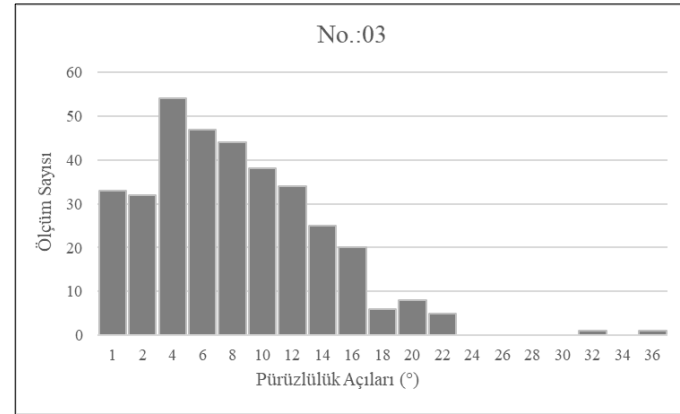
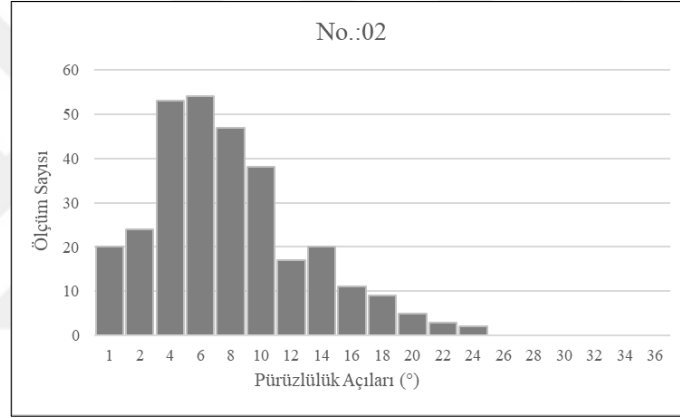
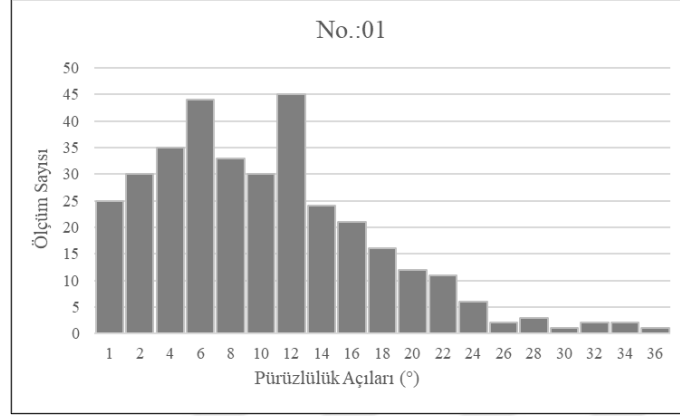
Testere İzli Blok Numunelerle Belirlenen Temel Sürtünme Açıları

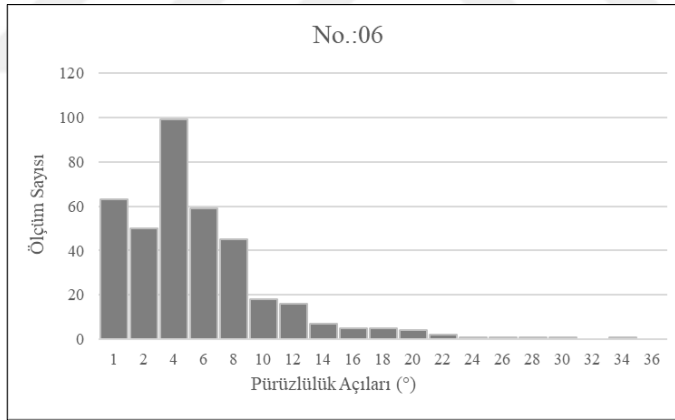
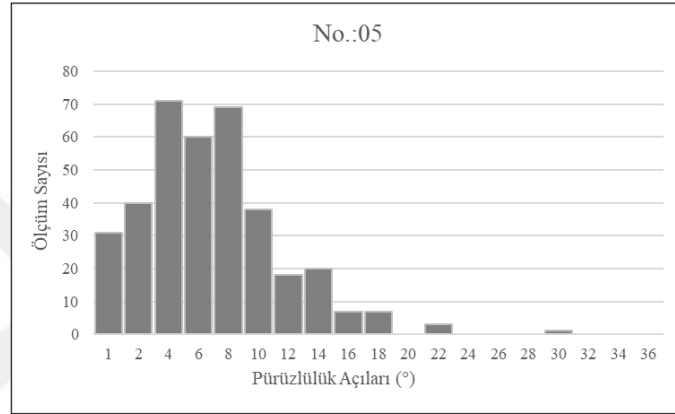
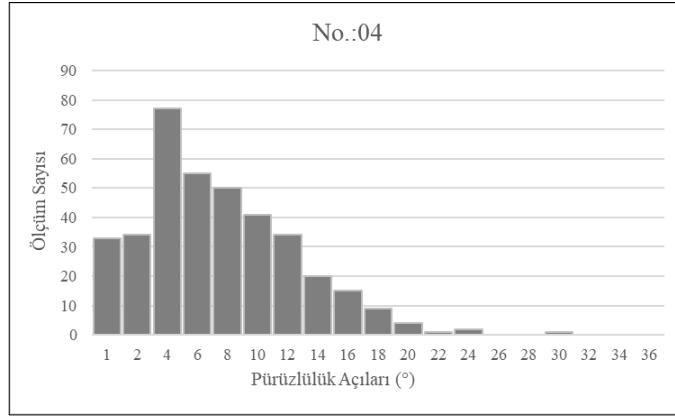
Numune No.	Deney Sayısı															Ortalama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
01	28,7	28,9	26,2	28,0	27,4	28,4	27,8	30,1	29,5	29,9	29,1	30,2	30,8	30,4	30,1	29,0
02	29,9	28,5	27,2	28,7	28,1	27,3	27,1	28,0	28,1	28,3	28,6	29,6	27,0	28,0	28,0	28,2
03	34,4	33,9	34,1	34,2	34,0	35,1	33,8	33,6	34,2	35,1	35,1	35,5	35,6	34,3	35,6	34,6
04	30,4	33,2	34,1	32,2	30,3	31,3	30,3	30,9	30,5	31,2	30,1	29,3	31,1	29,7	30,8	31,0
05	33,5	34,4	34,6	34,7	33,0	35,1	33,8	32,2	32,1	32,6	32,0	33,3	33,4	33,2	33,6	33,4
06	29,0	30,5	29,6	29,9	29,7	29,3	29,5	29,9	28,9	30,1	30,0	30,5	31,2	30,4	31,0	30,0
07	28,6	29,5	29,3	30,1	30,9	31,5	32,1	32,0	31,2	32,4	32,0	31,5	29,9	31,3	32,6	31,0
08	32,4	33,6	33,8	33,0	33,5	34,1	34,4	33,4	32,3	33,0	33,4	32,3	32,5	33,2	33,5	33,2
09	31,5	32,7	35,5	34,6	35,2	35,5	36,2	36,1	35,7	36,4	36,2	35,9	35,2	35,5	36,1	35,2
10	35,1	34,4	34,4	35,2	34,7	34,6	32,5	33,5	34,2	34,4	33,7	35,2	34,0	34,7	34,9	34,4
11	34,6	33,4	32,5	32,6	31,6	33,3	32,6	33,7	32,9	33,9	32,9	33,2	32,1	33,4	33,2	33,1
12	32,1	31,8	34,2	34,8	33,2	34,0	34,1	32,4	33,4	34,4	32,9	33,8	34,1	33,2	34,6	33,5
13	37,2	37,2	37,4	36,5	36,1	37,4	36,5	37,3	36,9	36,8	37,2	36,5	35,9	37,6	37,3	36,9
14	36,2	35,1	35,4	35,2	34,7	34,1	34,2	33,6	34,4	34,6	35,7	34,8	34,9	35,2	34,0	34,8
15	36,2	37,1	36,6	36,5	37,1	37,2	37,7	37,4	37,7	37,1	36,6	37,4	36,1	36,4	36,8	36,9
16	32,6	32,1	33,3	32,5	33,5	32,5	32,7	33,3	33,1	34,2	32,5	32,7	32,4	32,2	33,5	32,9
17	33,0	31,3	31,6	30,3	32,5	33,5	30,2	31,4	31,2	31,0	29,5	28,9	32,1	31,1	31,7	31,3
18	34,1	34,7	34,8	34,2	33,2	32,8	34,1	32,9	32,4	33,6	33,2	34,5	34,2	32,9	34,1	33,7
19	33,4	34,1	34,7	35,1	35,5	34,1	34,2	35,2	35,3	34,9	35,3	34,6	34,3	34,8	35,2	34,7
20	35,3	36,2	36,6	35,1	35,7	35,4	35,4	34,9	35,4	35,6	34,5	35,2	34,2	34,8	35,0	35,3
21	28,4	27,1	28,0	27,3	27,4	28,1	26,9	27,6	27,9	28,5	28,0	28,2	28,0	27,7	27,7	27,8
22	32,0	33,7	30,9	31,6	31,3	31,1	31,5	33,5	31,7	31,2	30,4	32,1	30,7	32,1	31,5	31,7
23	27,3	27,4	28,1	27,0	27,2	26,6	26,6	27,6	26,6	26,4	26,9	26,7	27,1	28,1	27,7	27,1
24	29,8	28,7	29,1	30,2	29,4	27,7	27,5	28,2	27,4	28,1	27,8	28,0	27,2	27,5	28,4	28,3
25	34,3	33,2	32,8	33,6	33,5	33,6	34,0	34,5	33,4	32,8	32,6	33,7	33,0	33,3	33,0	33,4
26	35,3	35,1	35,0	35,3	34,6	36,5	36,0	35,1	35,0	36,4	35,1	36,0	35,7	35,1	36,0	35,5
27	35,6	34,5	31,2	32,3	31,2	30,5	30,9	30,0	30,5	31,9	30,7	30,9	31,2	31,1	30,8	31,5
28	33,4	32,3	31,5	32,1	31,4	31,7	32,1	32,5	33,1	33,4	33,3	33,9	32,3	32,4	32,6	32,5
29	31,5	31,2	32,6	32,8	31,6	32,8	33,1	33,9	32,2	33,9	34,3	31,9	32,6	33,6	33,9	32,8
30	32,3	32,9	32,1	32,4	33,1	32,2	32,2	32,6	33,2	33,6	32,4	31,2	31,4	32,3	32,1	32,4

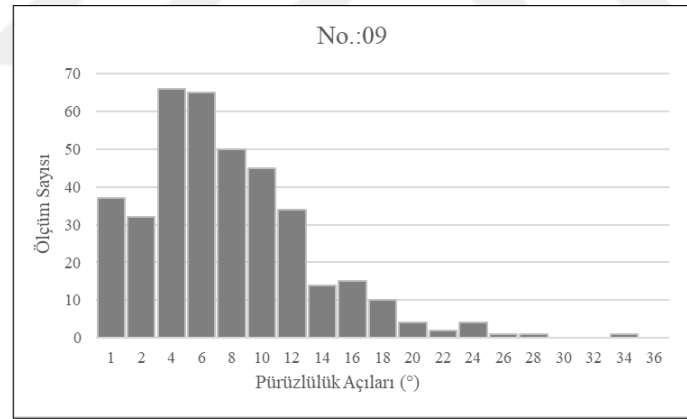
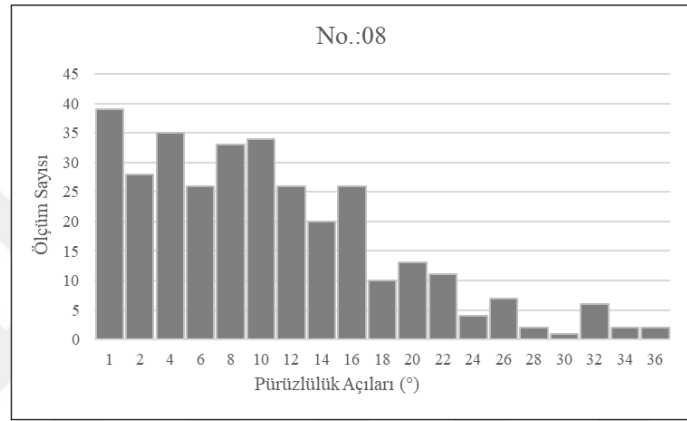
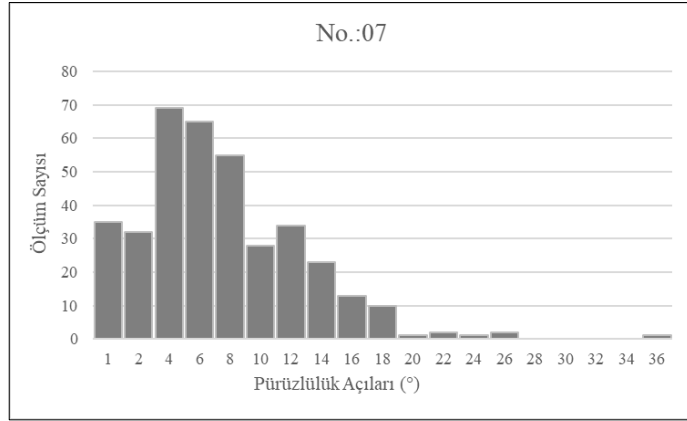
Zımparalanmış Yüzeylerle Belirlenen Temel Sürtünme Açıları

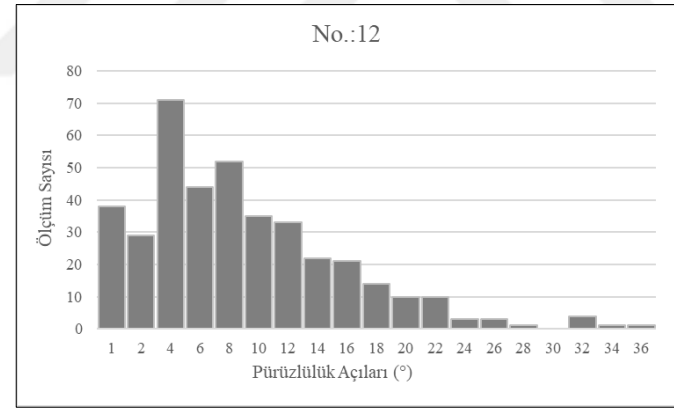
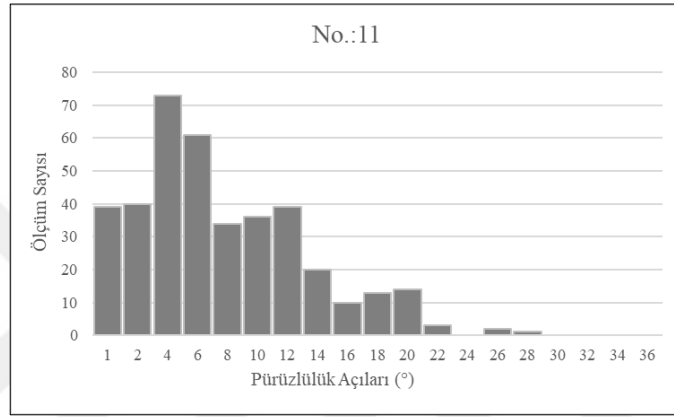
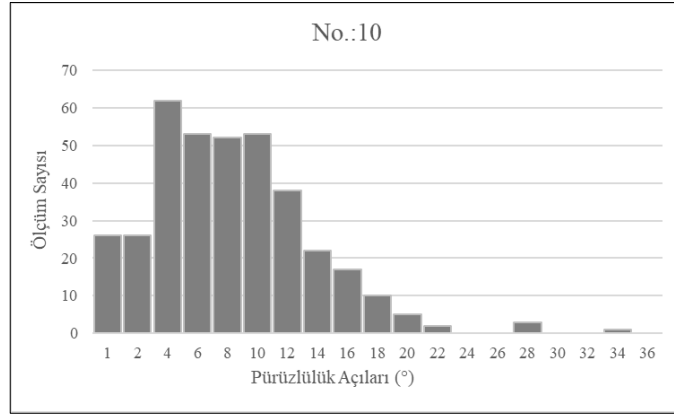
Numune No.	Deney Sayısı															Ortalama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
01	22,9	23,3	23,9	23,5	22,8	24,5	23,7	23,9	23,1	24,1	23,1	23,2	23,6	24,1	23,6	23,6
02	25,6	25,2	24,5	24,1	24,8	22,2	24,5	24,5	23,9	24,1	25,1	24,4	24,8	23,9	25,1	24,4
03	30,1	32,1	33,2	32,6	32,4	32,6	31,3	32,4	32,6	31,9	33,1	33,4	31,2	32,9	32,5	32,3
04	30,1	32,2	30,9	32,0	31,6	32,3	30,9	29,2	30,7	31,1	30,6	29,9	30,8	30,6	31,5	31,0
05	35,4	30,9	29,7	34,2	35,2	35,2	35,1	34,4	35,2	35,7	36,0	35,3	34,6	36,1	34,6	34,5
06	27,2	28,6	28,5	29,0	24,6	28,7	24,2	29,1	25,3	25,5	26,5	28,2	28,6	29,1	28,9	27,5
07	26,3	25,3	24,4	24,7	26,1	24,2	25,1	26,5	25,3	25,6	25,8	25,1	26,3	26,1	26,5	25,6
08	24,6	24,6	25,1	25,6	26,4	26,7	27,6	27,4	28,3	24,7	27,6	27,5	26,7	27,6	28,6	26,6
09	23,6	23,8	23,9	23,1	23,4	23,7	22,9	23,3	23,7	24,4	26,4	25,7	25,7	26,7	26,9	24,5
10	26,4	27,4	28,4	30,1	30,0	29,0	30,5	29,5	28,4	29,5	29,5	28,7	28,1	29,1	28,6	28,9
11	25,8	25,2	25,8	27,4	26,2	28,1	28,7	27,7	27,7	26,2	28,4	29,6	27,6	28,9	28,5	27,4
12	27,5	27,7	26,4	26,0	25,1	26,6	25,5	26,7	26,8	25,6	25,5	26,4	27,2	27,5	26,6	26,5
13	27,4	25,3	26,8	26,3	27,4	26,3	27,7	28,4	27,8	28,6	28,4	27,0	27,5	27,1	27,7	27,3
14	25,0	24,4	24,3	24,6	25,8	26,6	26,1	26,8	27,0	26,5	27,0	26,3	26,4	25,7	26,9	26,0
15	29,2	23,7	25,7	26,8	27,0	27,3	26,9	26,4	25,9	27,9	26,5	26,9	27,3	27,1	26,5	26,7
16	25,6	24,4	26,8	26,5	26,2	27,1	26,9	26,6	26,2	26,9	25,4	26,4	27,1	26,6	27,1	26,4
17	25,6	26,0	27,8	27,4	26,7	27,4	27,2	28,1	27,2	28,4	27,1	26,6	26,2	27,3	27,8	27,1
18	27,8	26,6	27,2	28,8	25,6	26,6	27,9	27,2	27,4	29,0	25,6	26,3	26,5	26,2	26,8	27,0
19	30,1	28,9	27,3	29,6	29,1	27,8	28,6	28,5	28,9	29,1	28,4	28,4	28,3	27,9	28,2	28,6
20	31,6	28,4	31,3	28,4	30,0	28,4	25,8	29,4	28,7	28,7	27,4	26,5	27,9	27,5	29,2	28,6
21	31,1	26,1	24,2	25,8	25,5	26,5	25,6	25,3	25,1	24,6	24,5	26,2	25,7	25,2	25,7	25,8
22	22,3	21,1	22,6	23,1	23,5	22,5	23,4	24,1	23,6	23,8	24,8	24,5	24,3	24,7	23,1	23,4
23	23,5	24,4	24,2	23,5	22,4	23,2	24,1	23,8	24,5	24,2	24,4	24,4	24,6	24,2	24,1	24,0
24	29,7	30,5	29,5	30,8	28,5	30,0	29,1	29,7	30,1	30,5	28,5	31,2	29,4	30,8	28,2	29,7
25	26,9	26,8	26,1	27,4	25,9	26,0	25,8	24,3	25,1	24,6	25,3	26,3	25,9	25,1	25,3	25,8
26	30,2	29,4	29,8	27,6	28,7	27,5	26,6	28,2	27,5	28,1	27,6	27,8	28,5	26,5	27,7	28,1
27	21,5	20,1	21,1	20,9	20,2	21,3	22,5	20,6	21,6	20,2	21,4	22,5	20,1	19,2	20,1	20,9
28	24,1	26,5	26,3	26,7	25,9	27,1	27,0	25,9	28,1	26,2	27,1	29,2	28,3	28,0	27,0	26,9
29	25,5	24,6	24,6	24,6	24,9	25,0	24,2	25,2	25,0	24,7	24,4	24,3	24,2	25,3	24,1	24,7
30	30,1	29,4	28,7	29,2	29,3	28,7	29,4	28,9	29,4	30,5	29,6	28,8	29,4	30,2	30,5	29,5

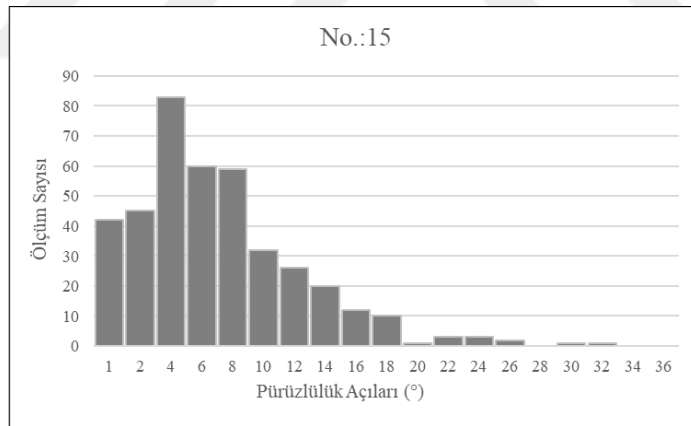
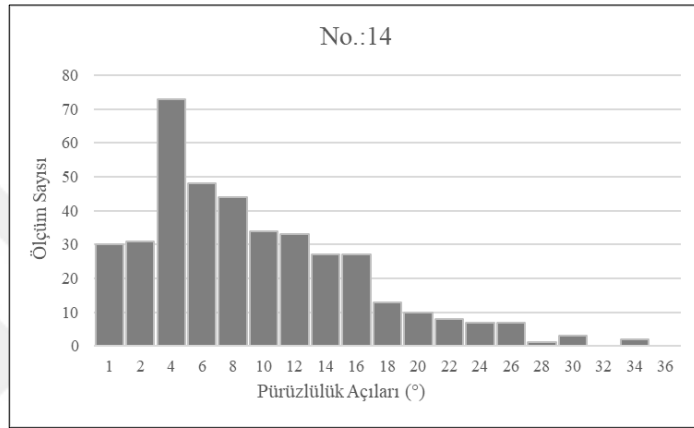
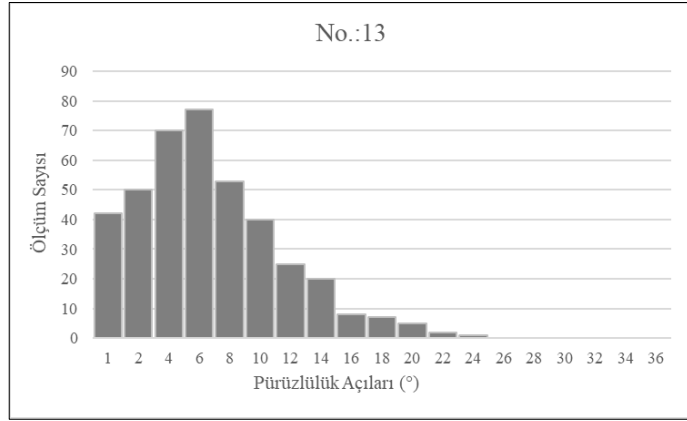
EK 3 PROFİLOMETRE DENEY SONUÇLARI

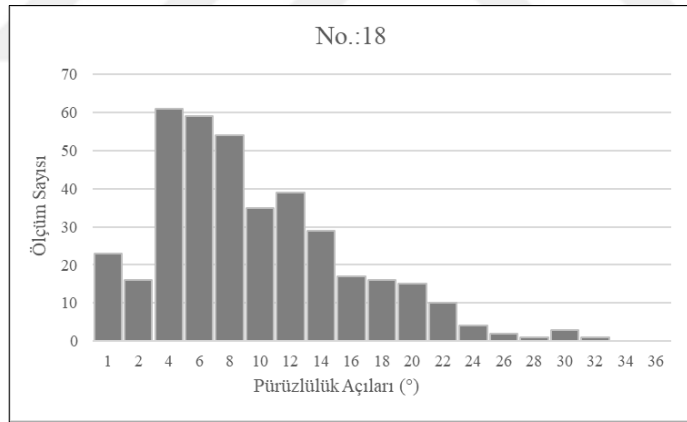
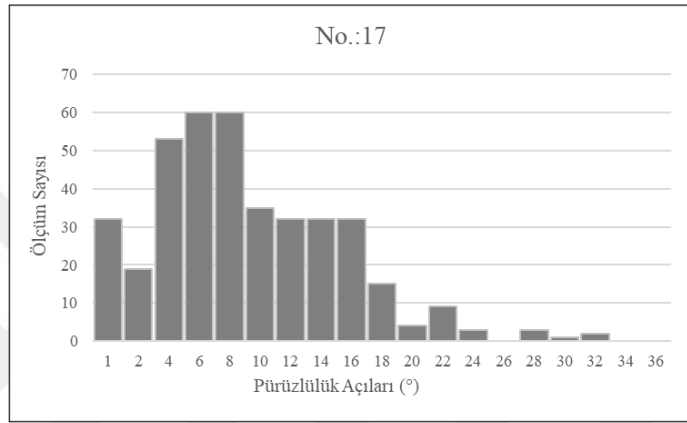
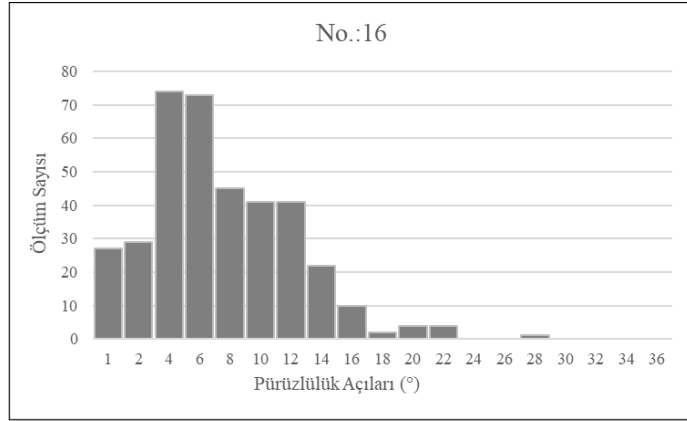


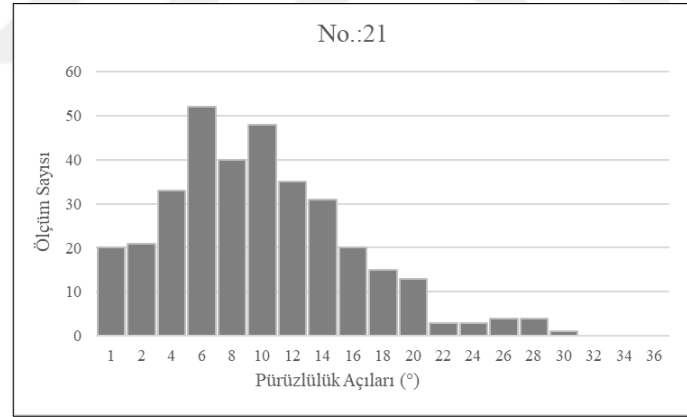
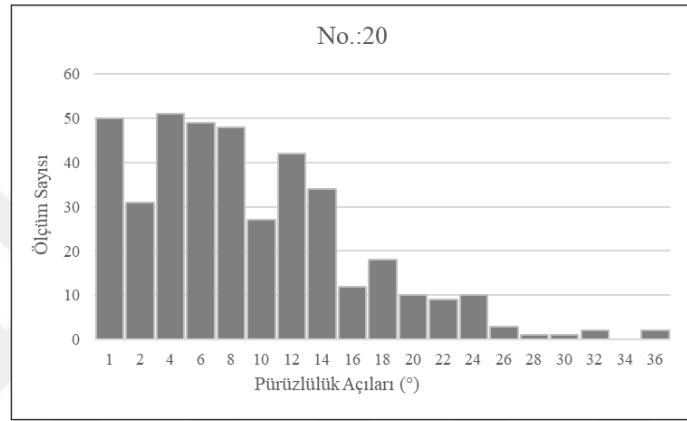
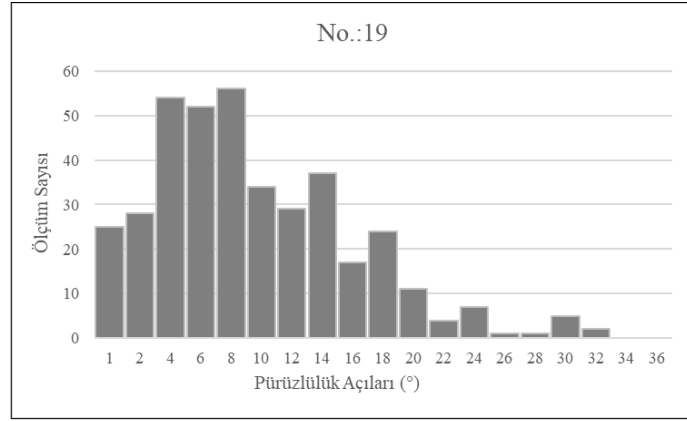


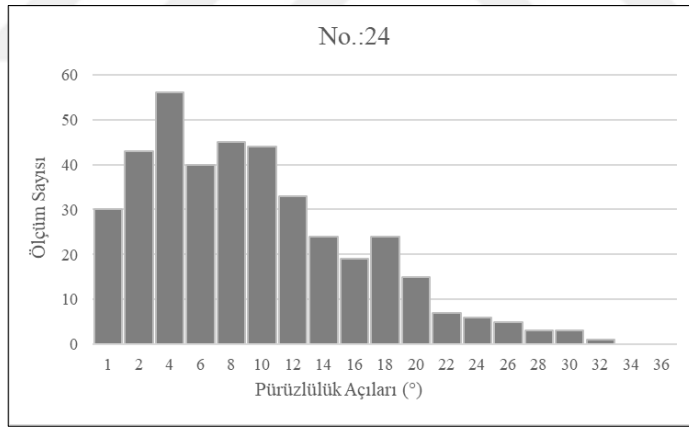
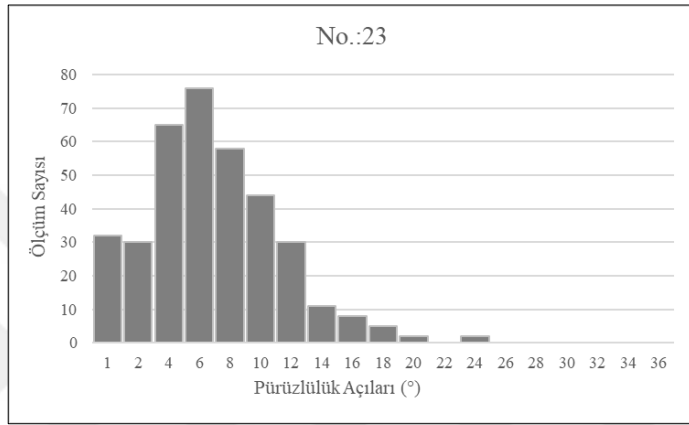
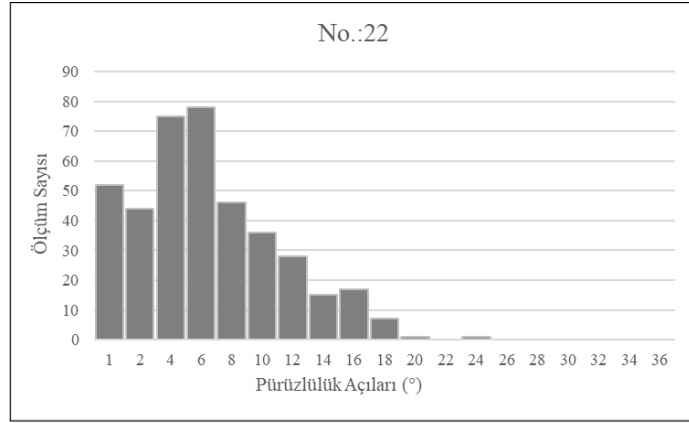


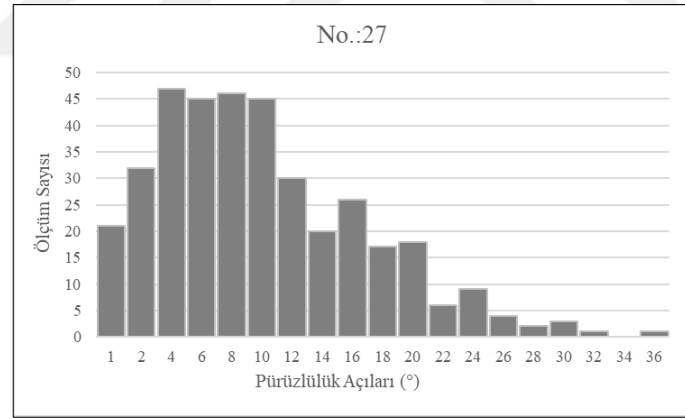
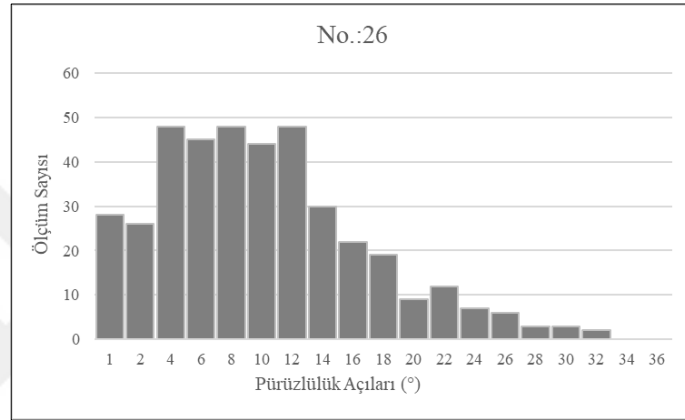
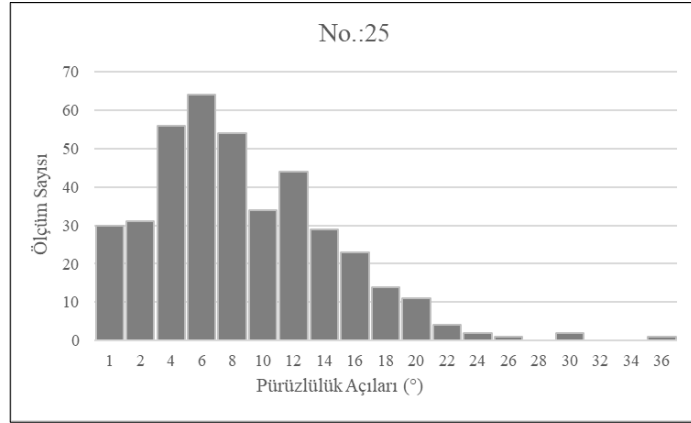


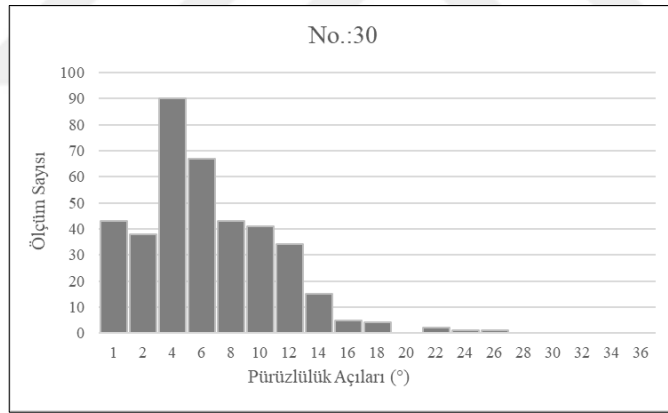
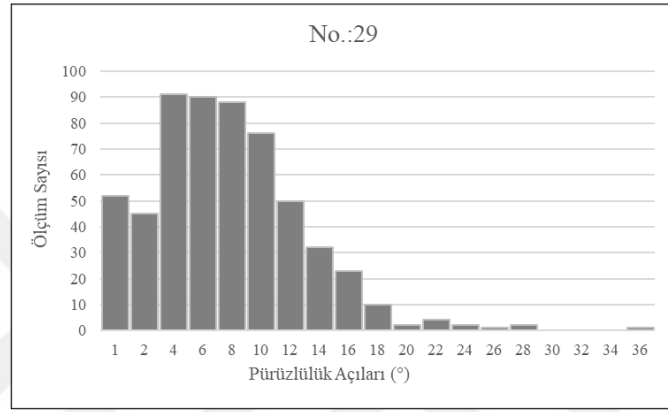
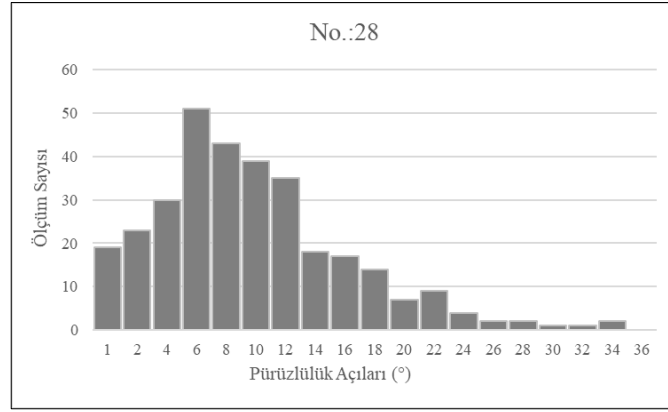




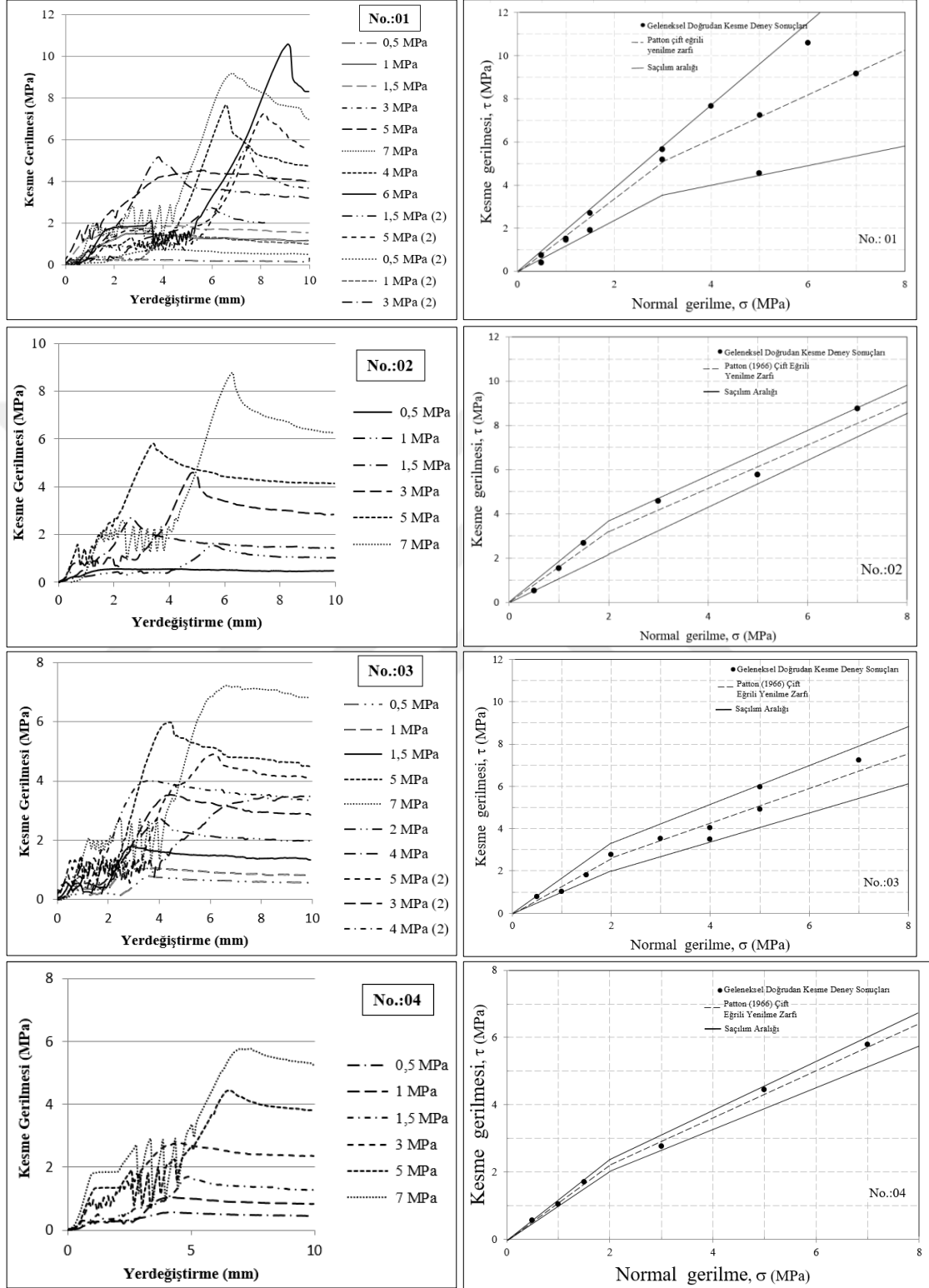


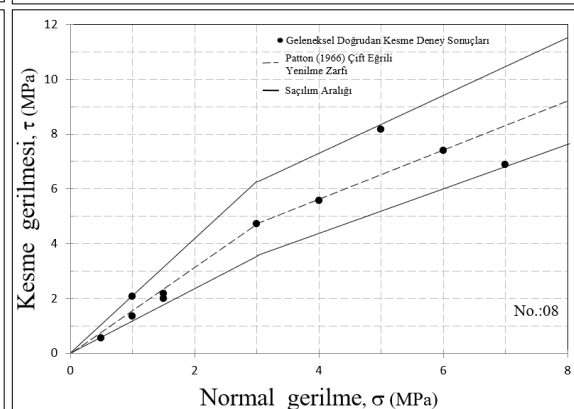
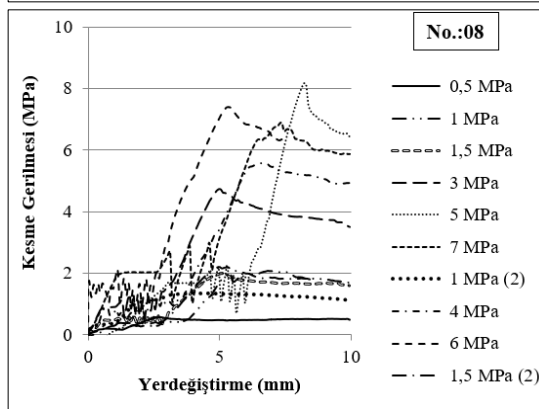
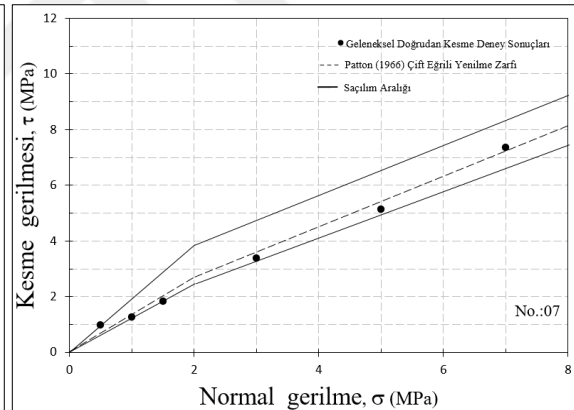
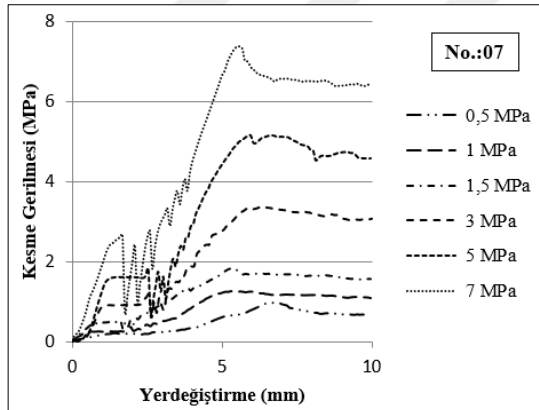
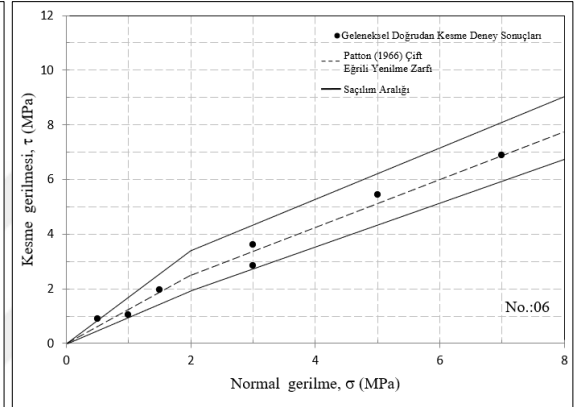
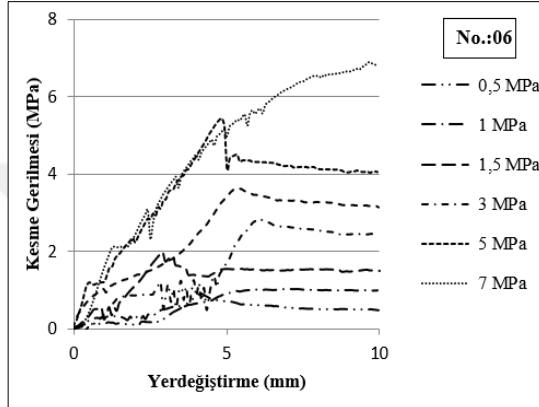
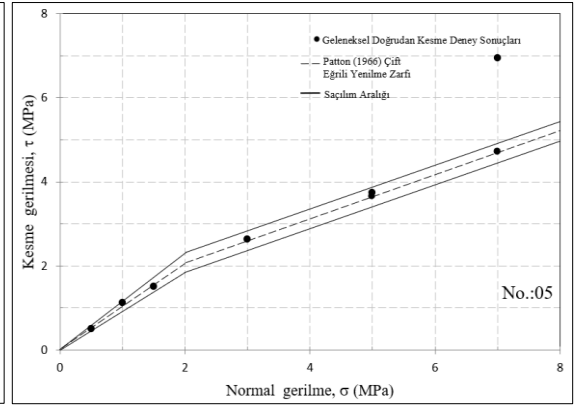
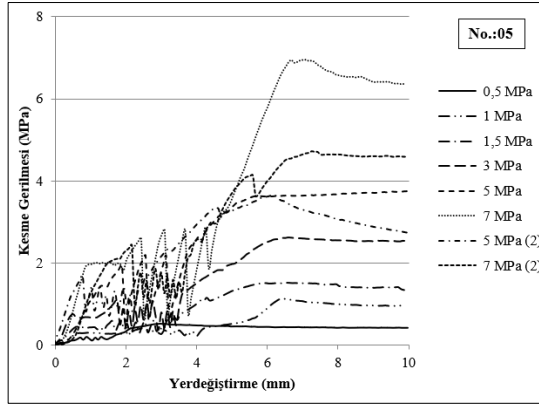


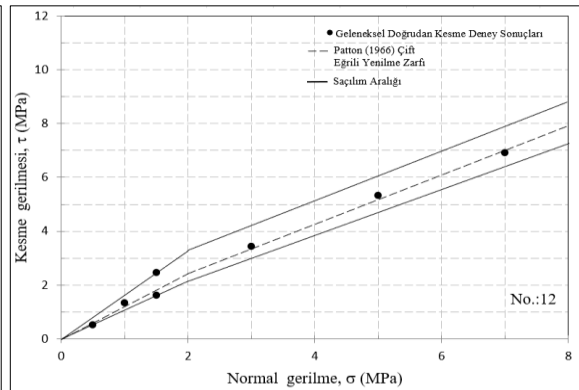
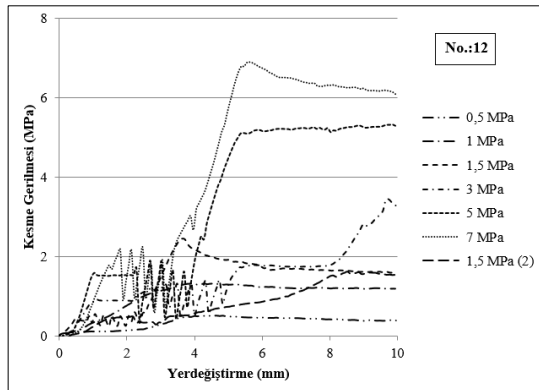
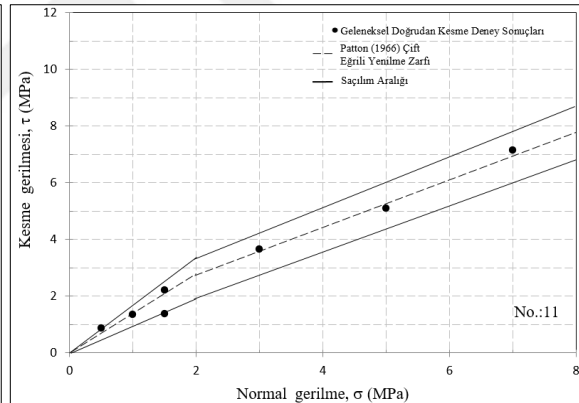
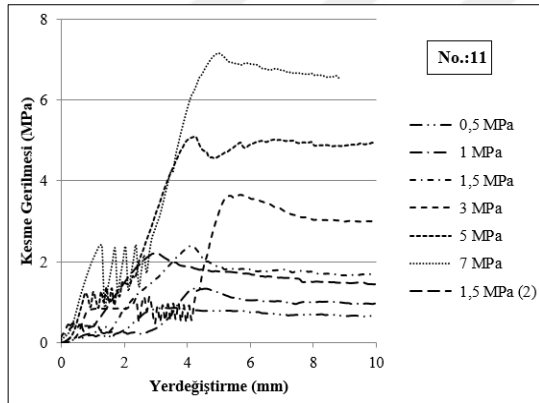
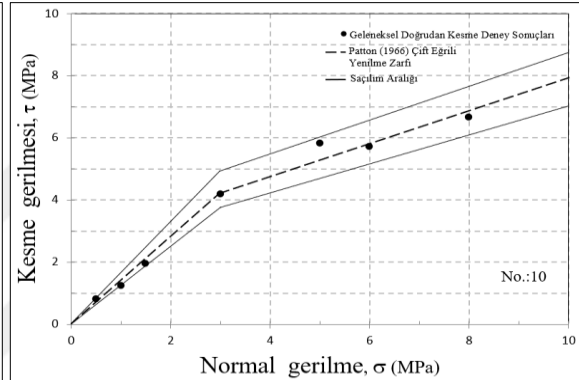
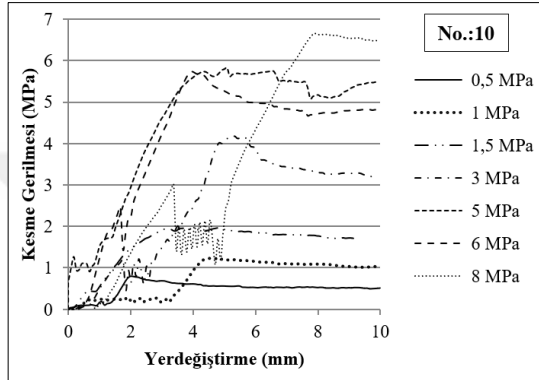
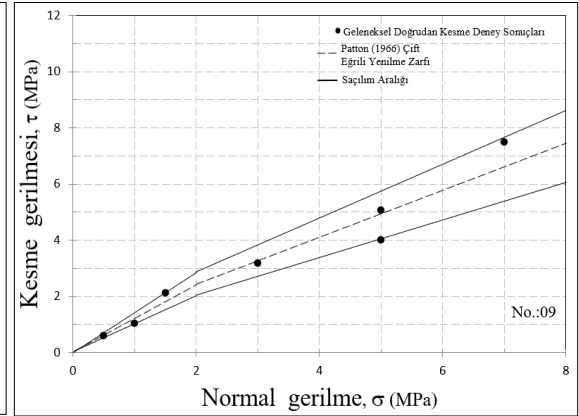
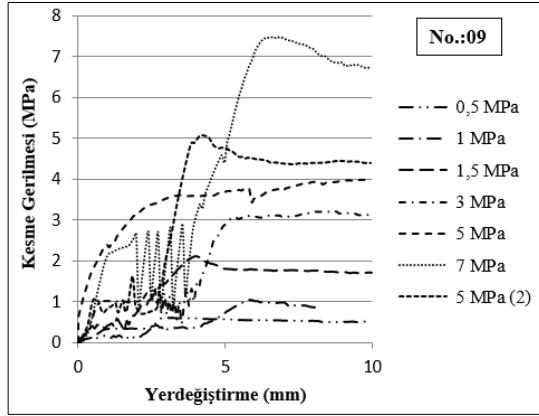


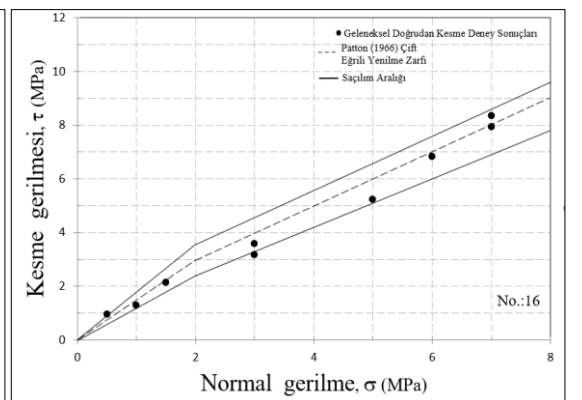
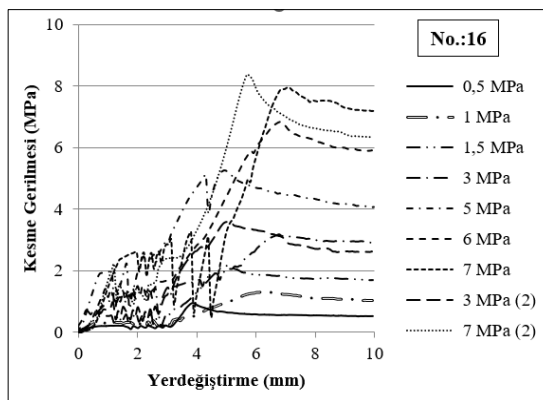
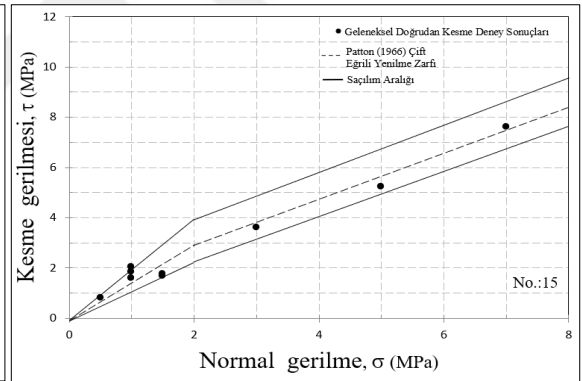
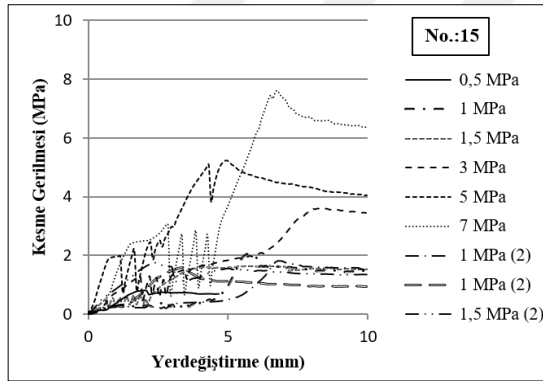
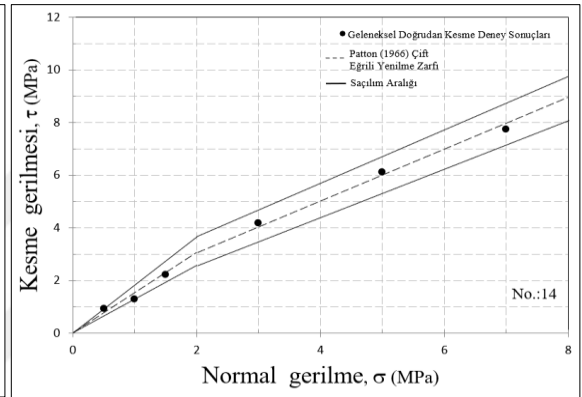
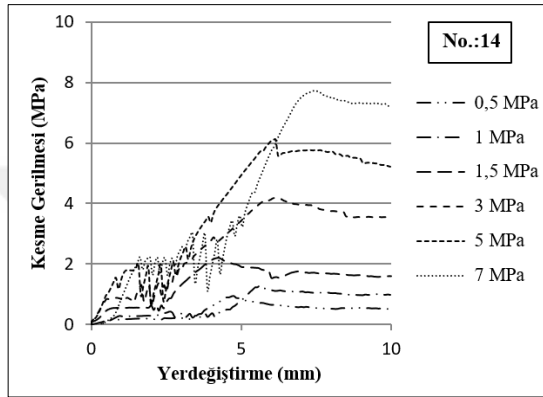
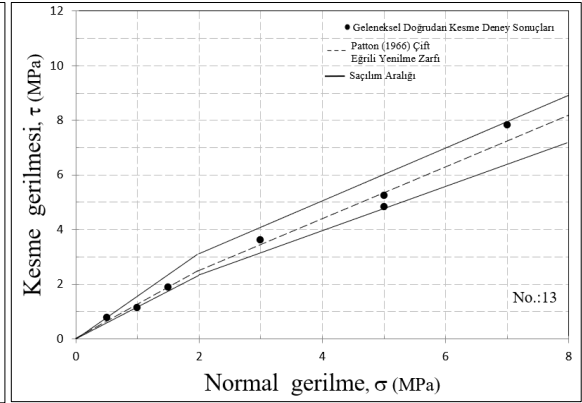
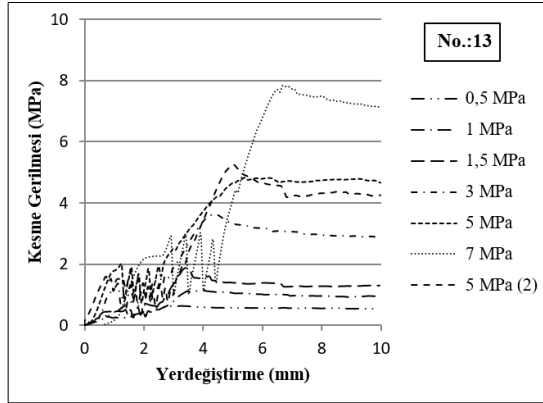


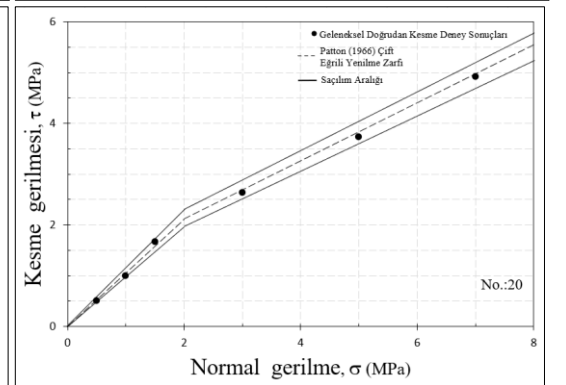
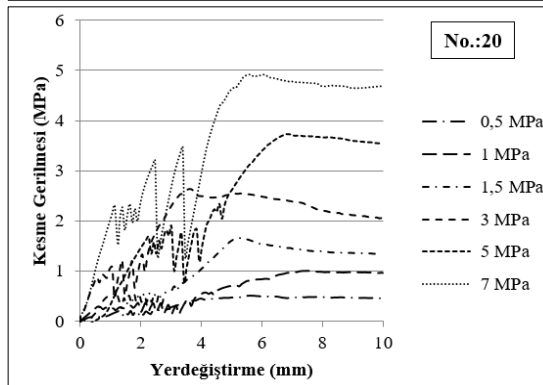
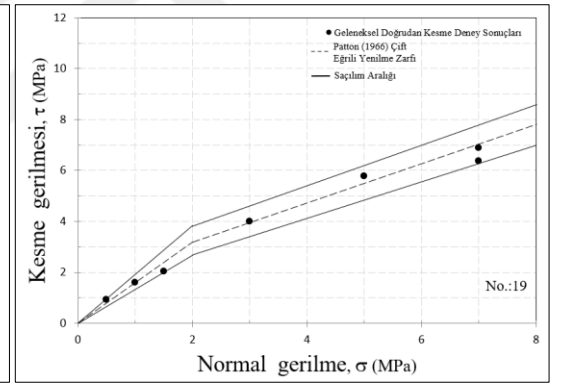
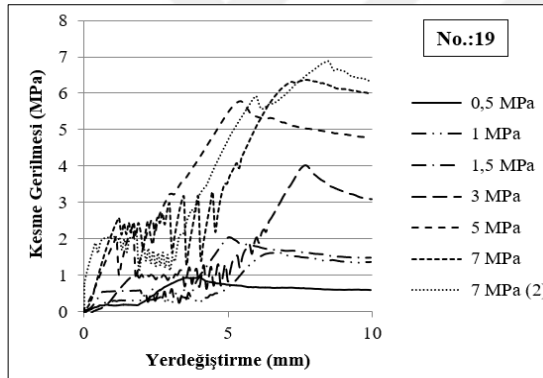
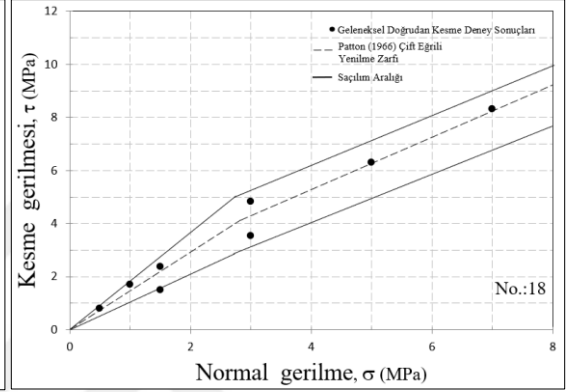
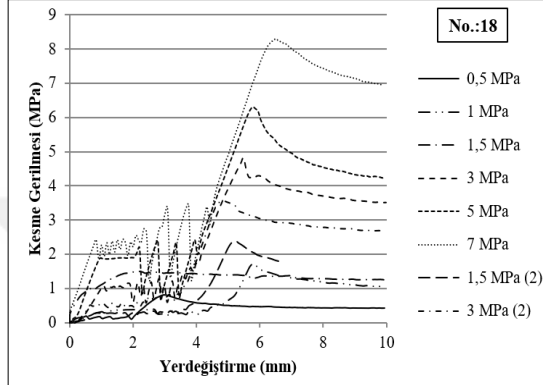
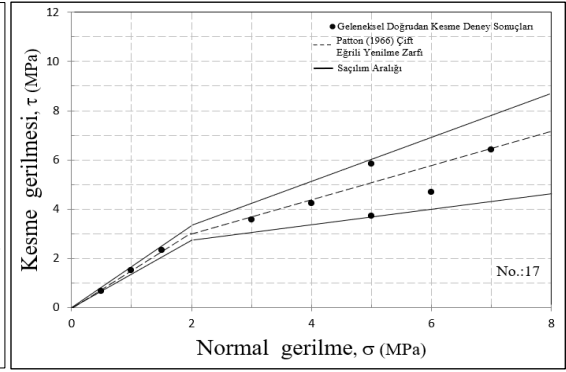
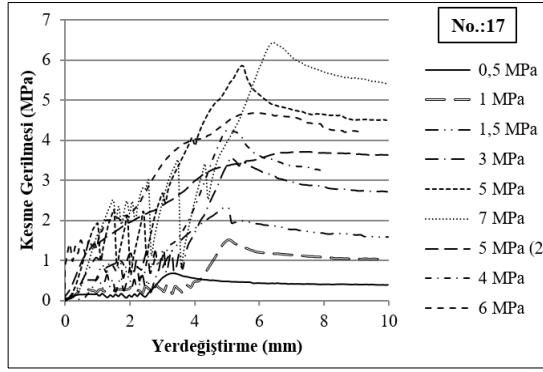
EK 4 PATTON (1966) ÇİFT EĞRİLİ YENİLME ZARFLARI

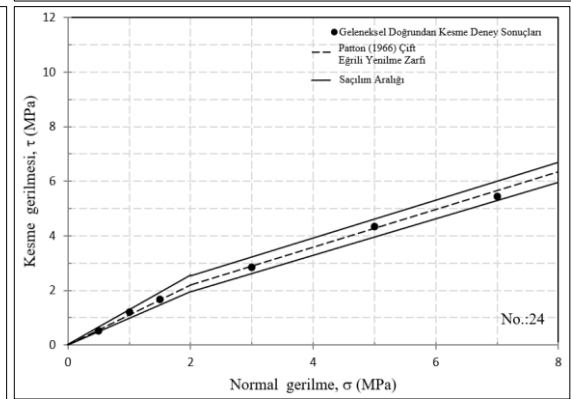
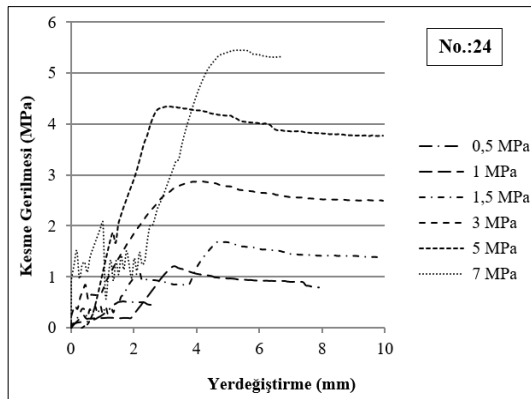
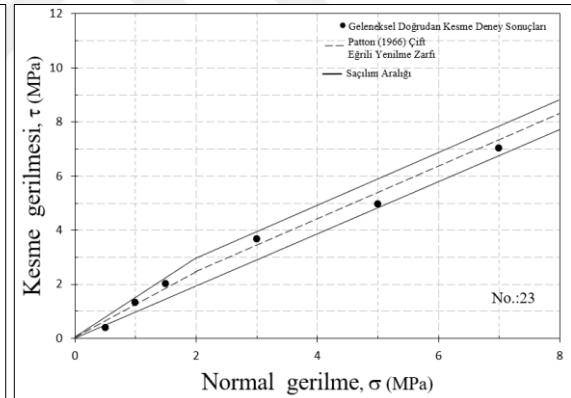
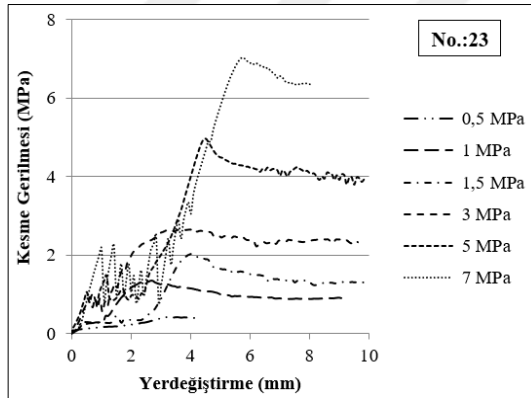
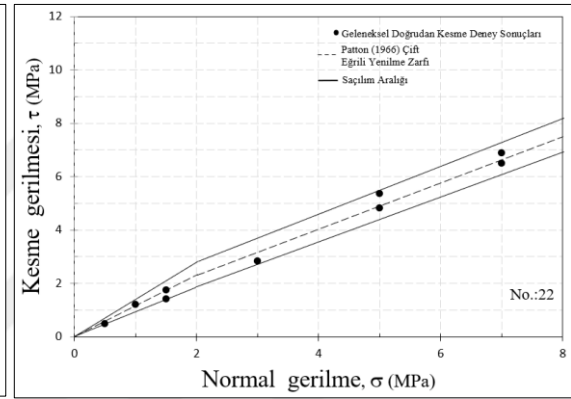
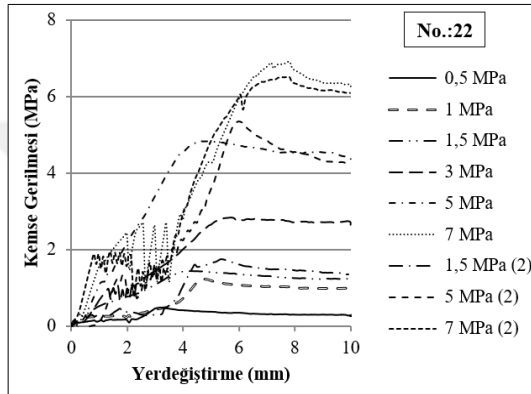
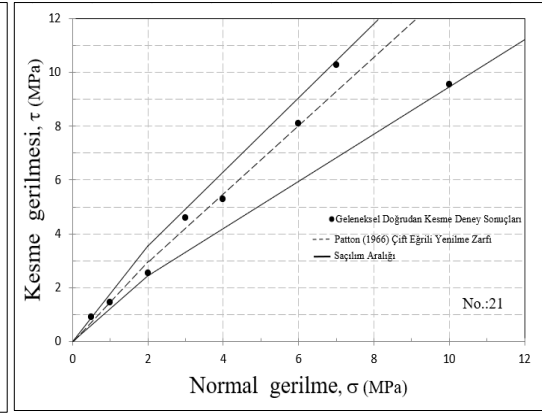
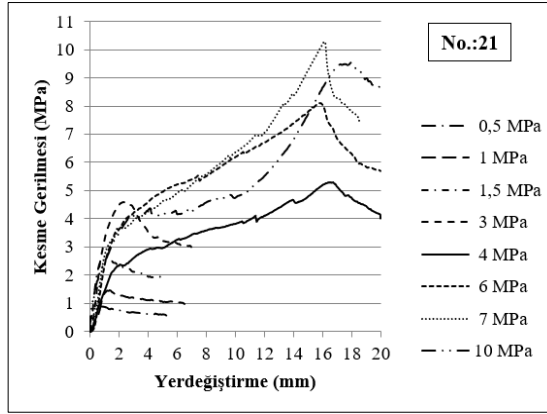


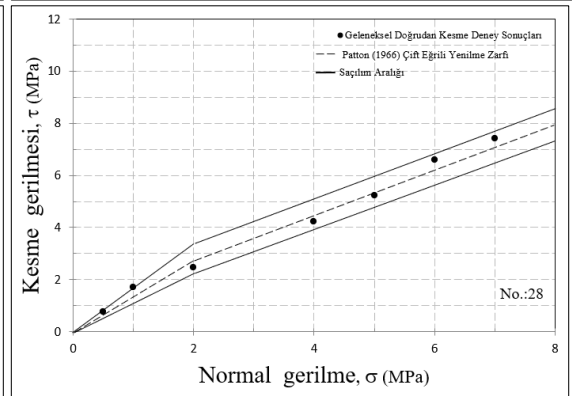
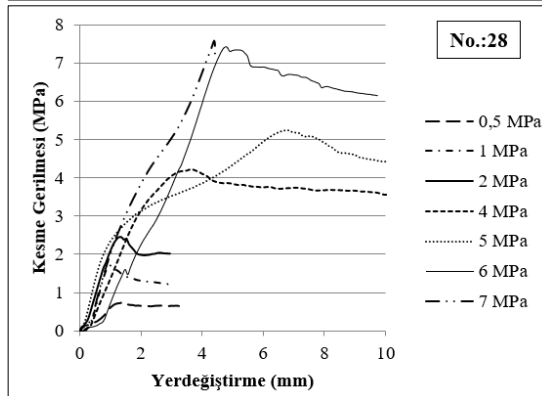
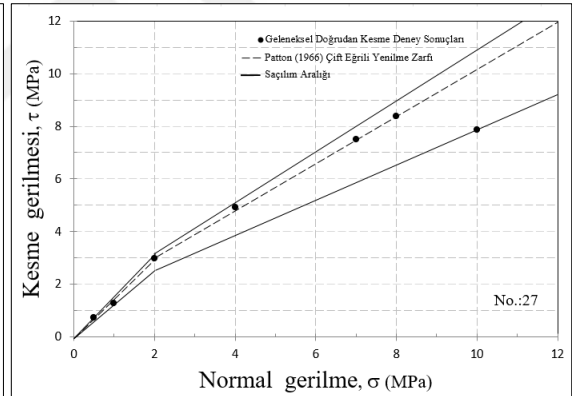
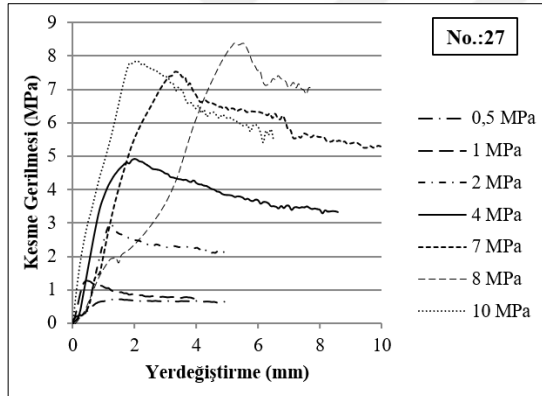
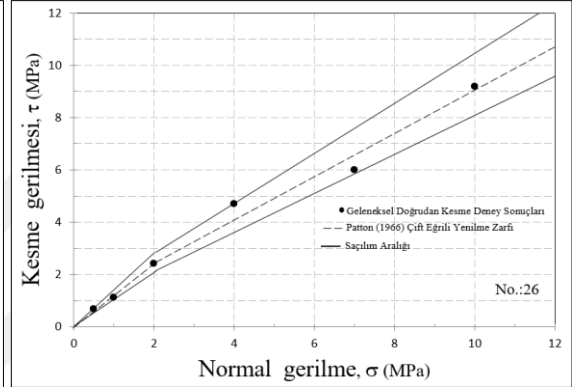
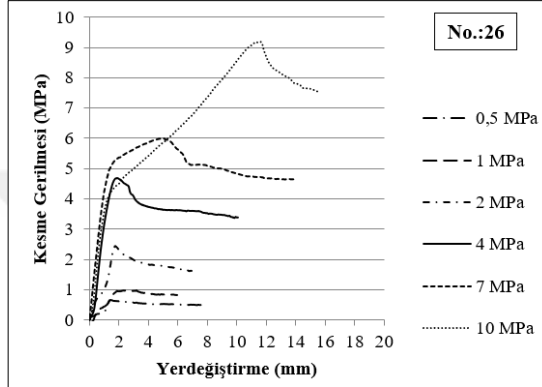
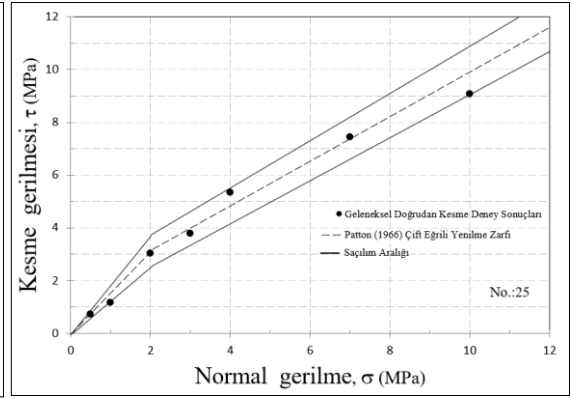
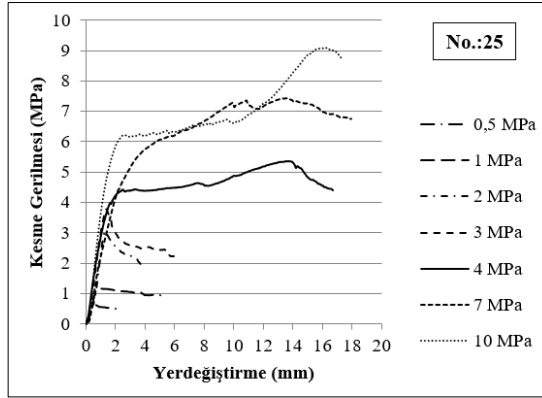


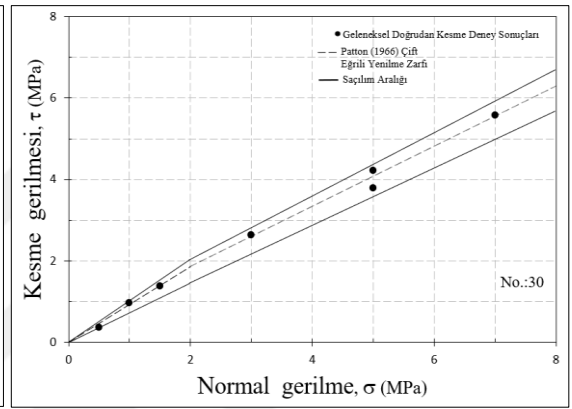
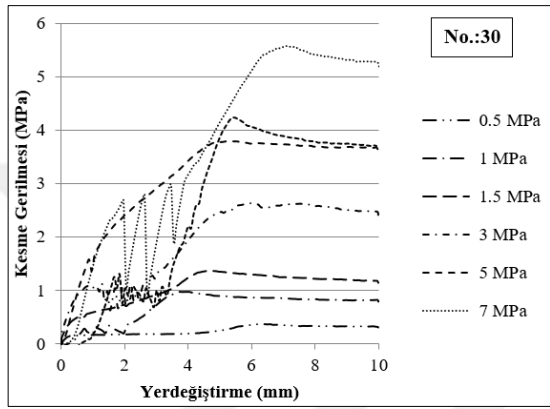
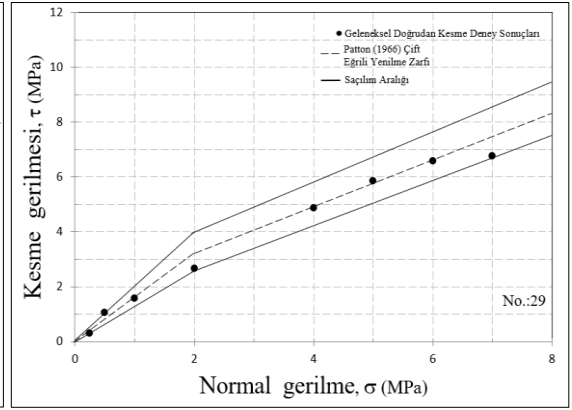
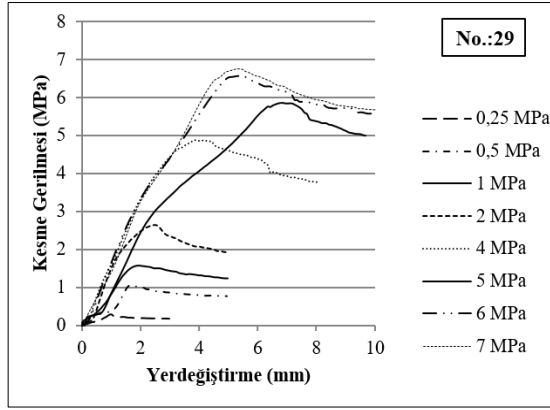




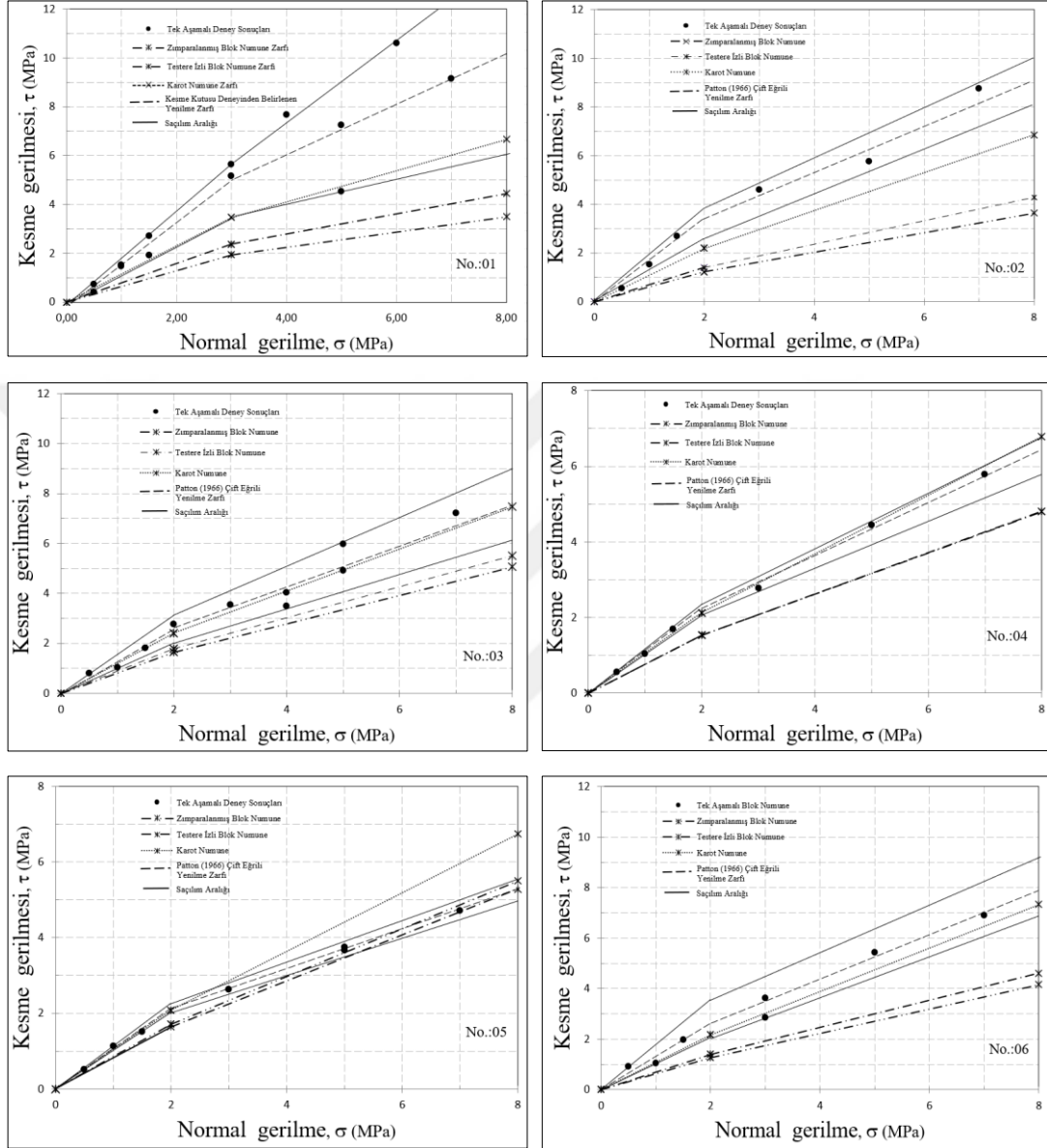


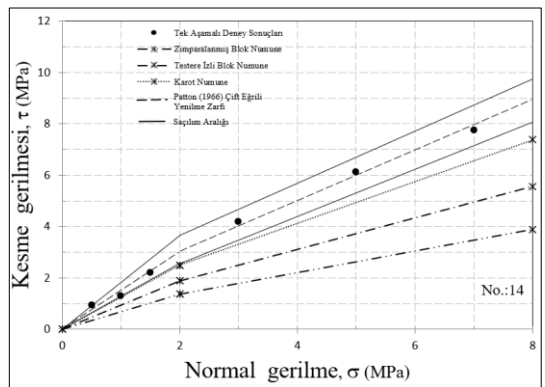
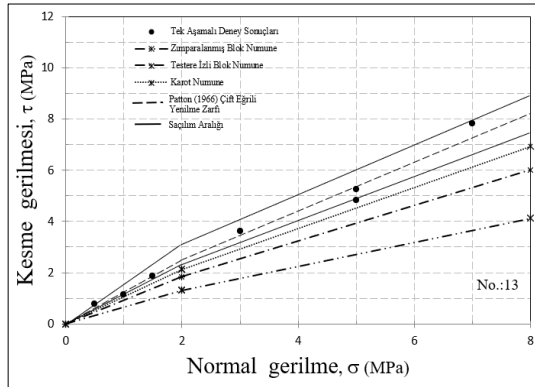
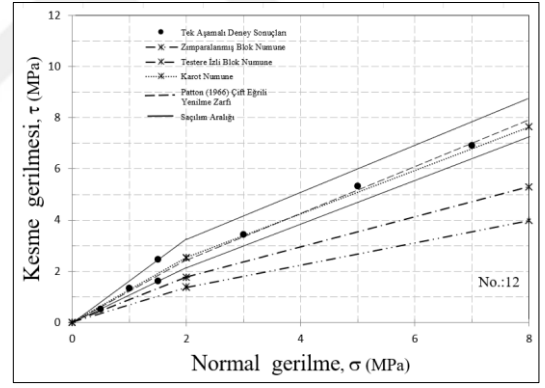
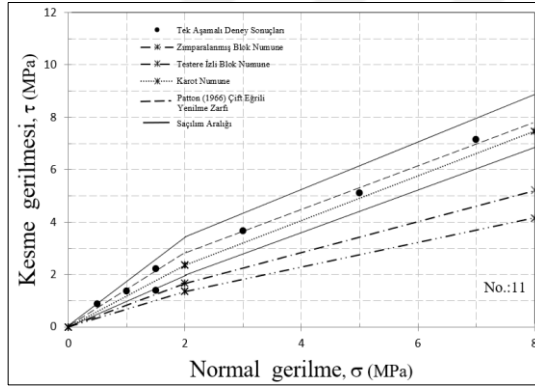
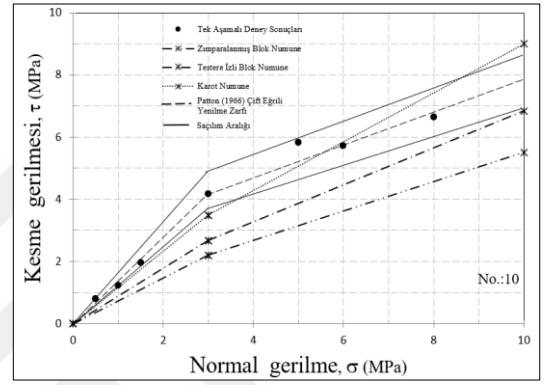
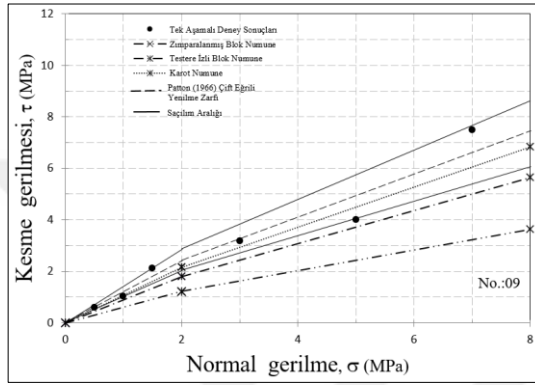
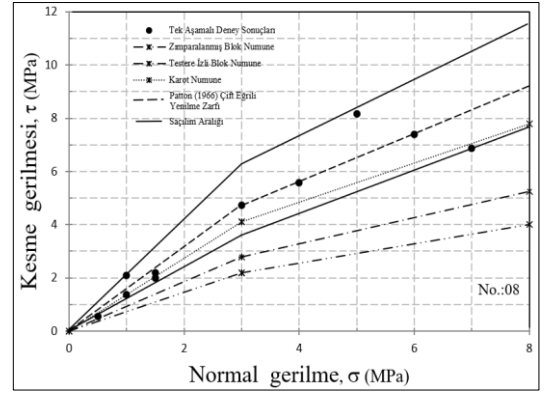
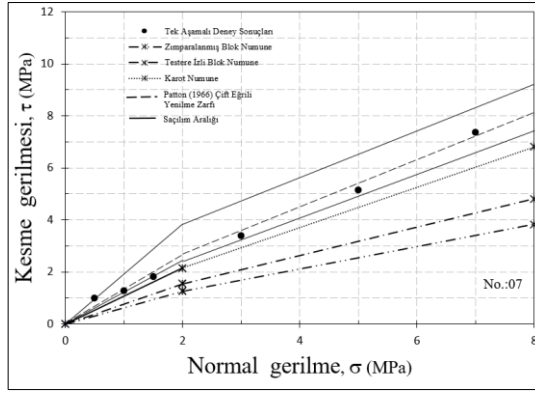


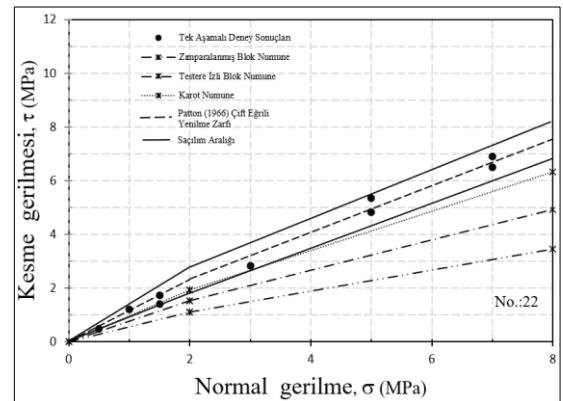
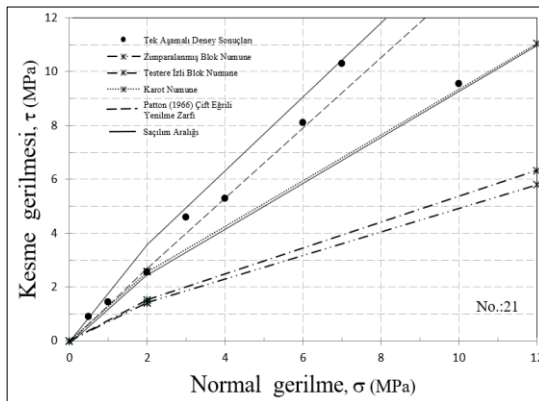
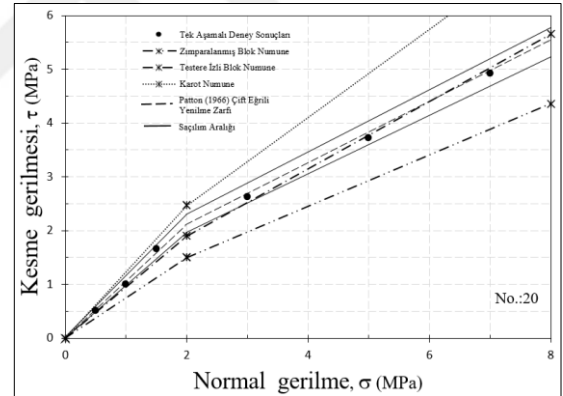
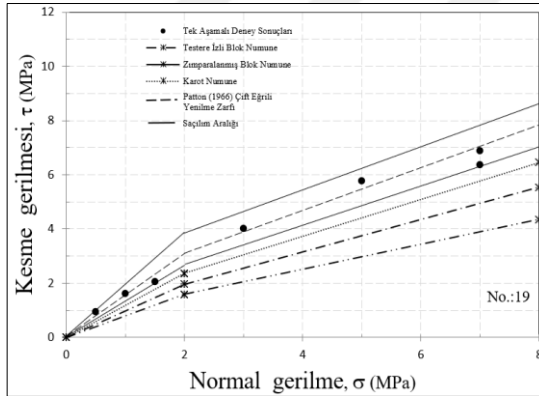
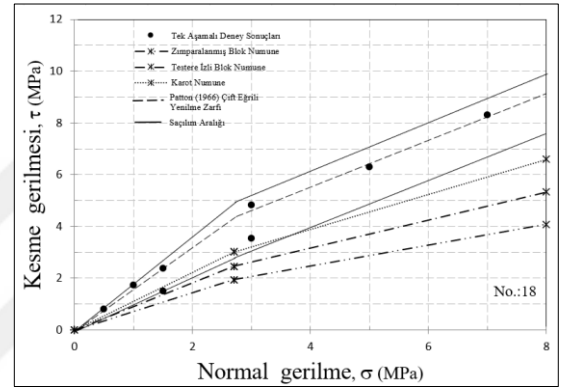
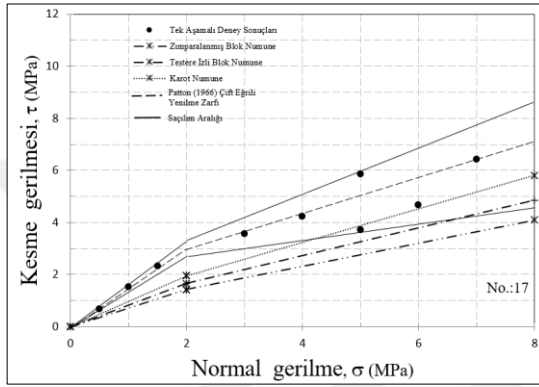
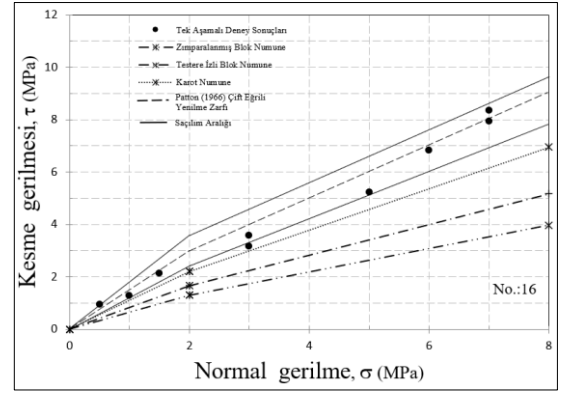
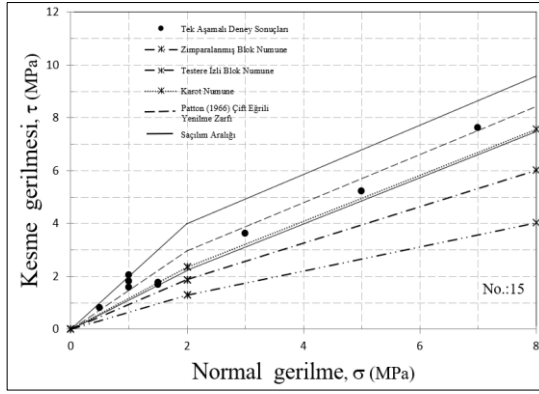


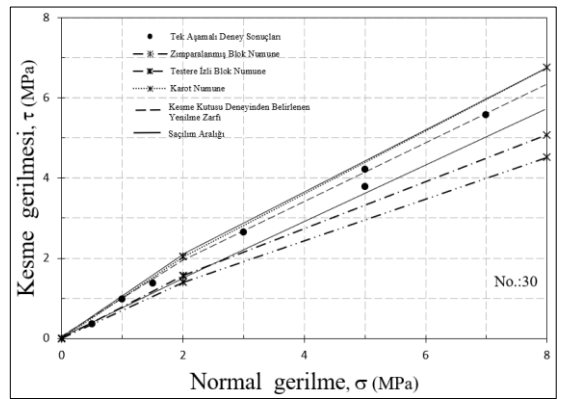
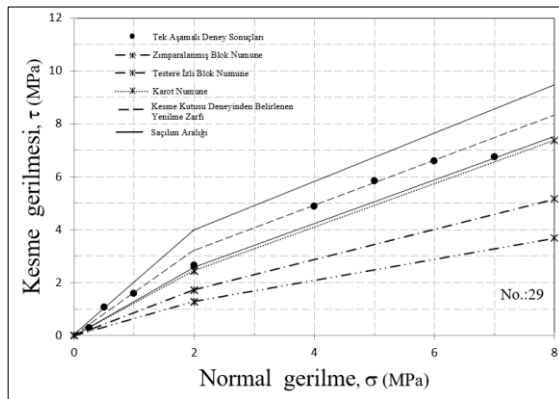
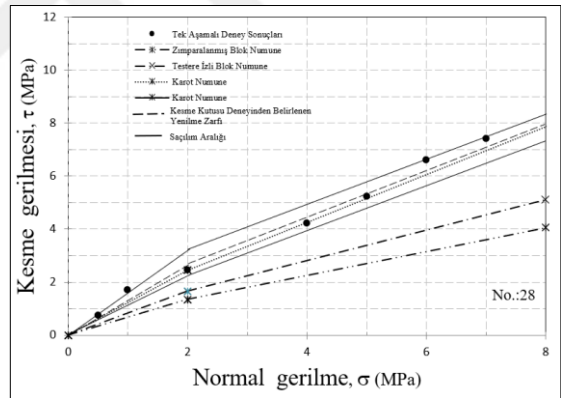
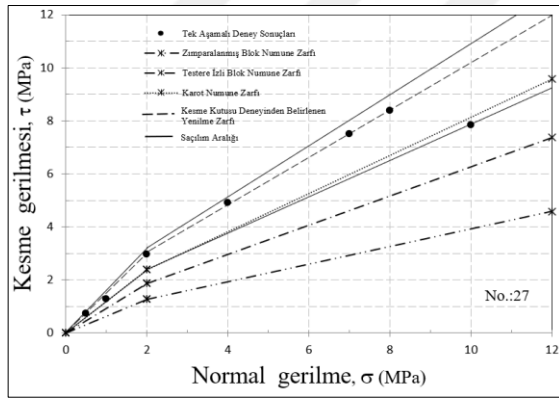
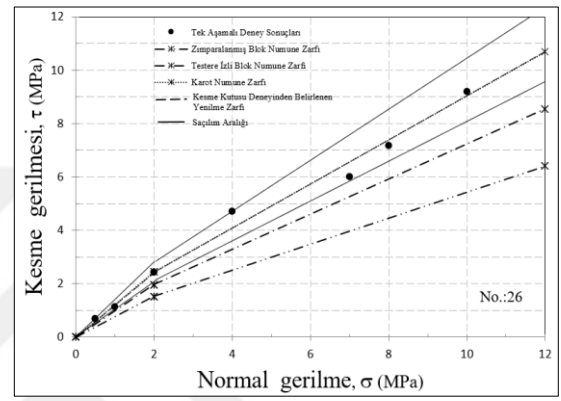
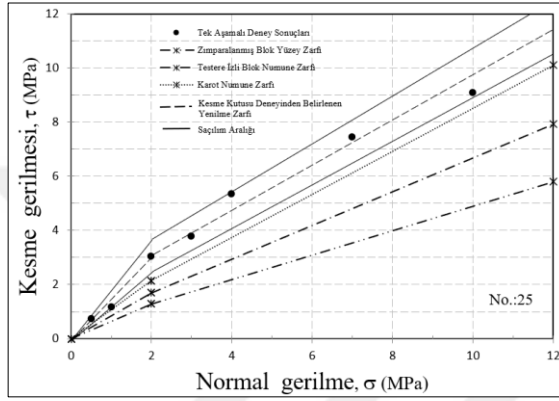
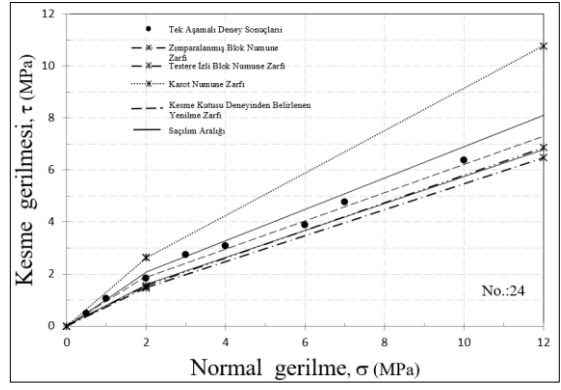
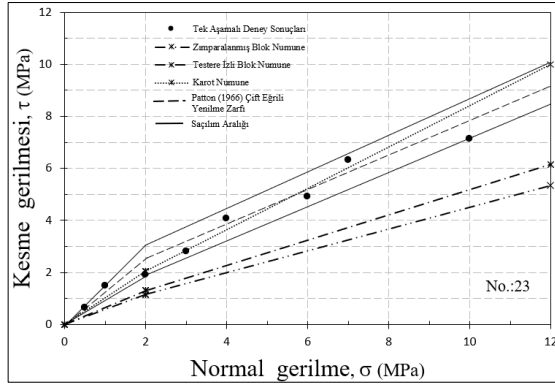


EK 5 PATTON (1966) YENİLME ÖLÇÜTÜNÜN FARKLI YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

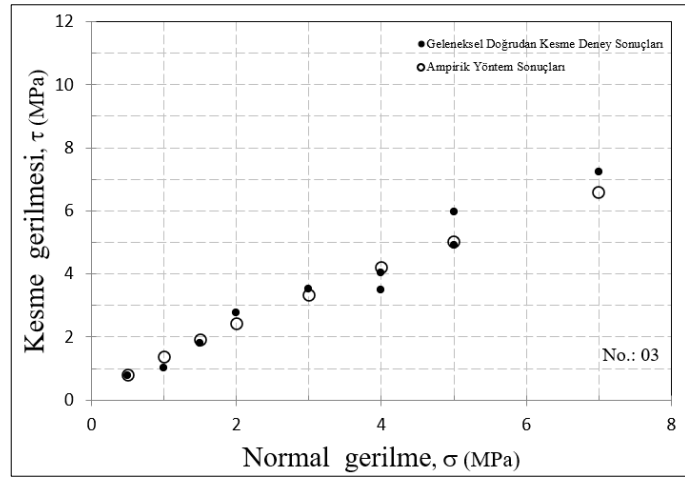
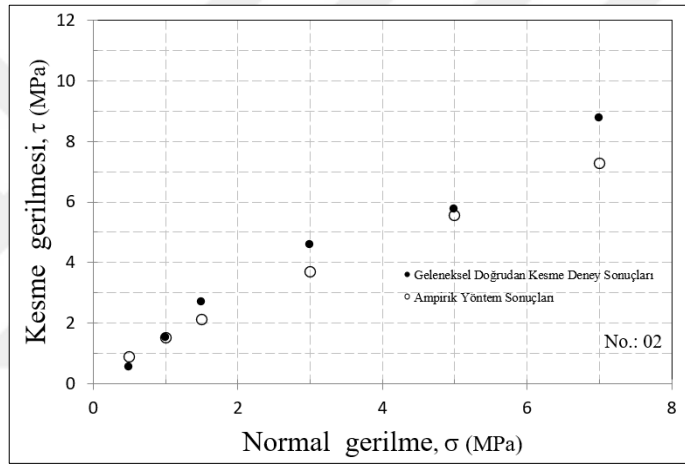
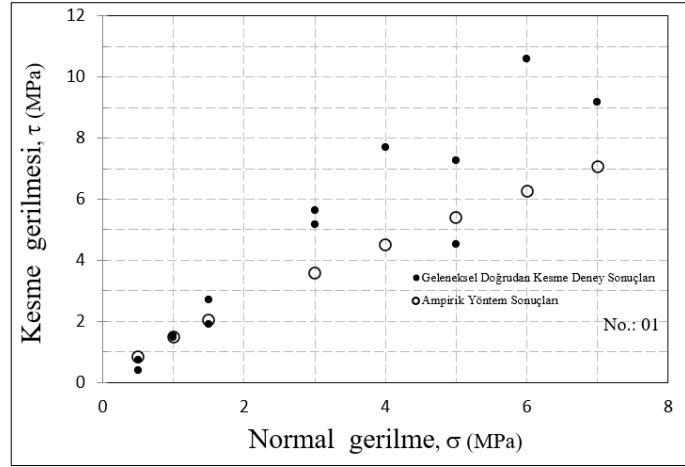


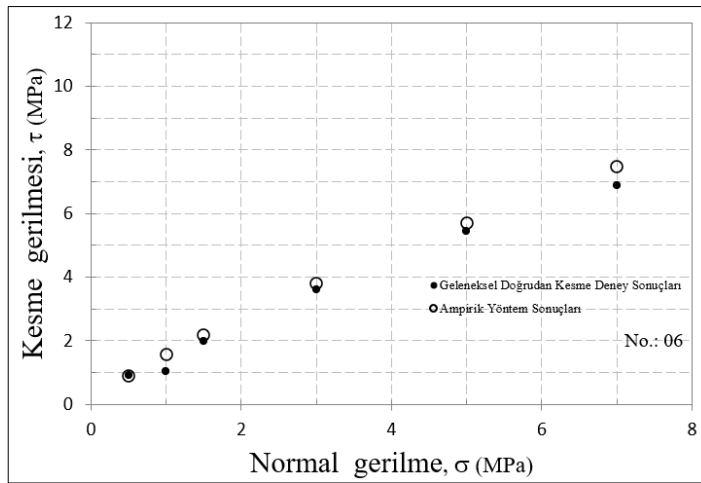
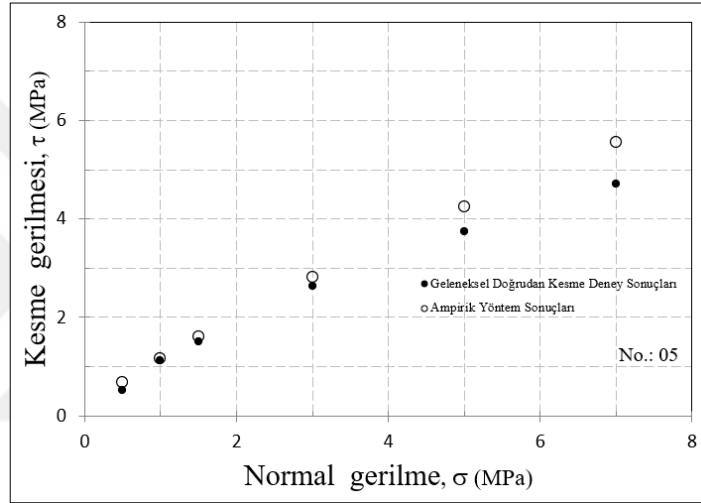
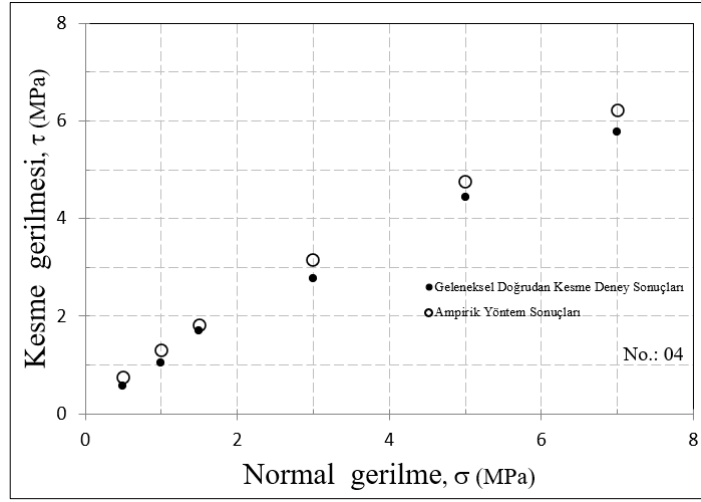


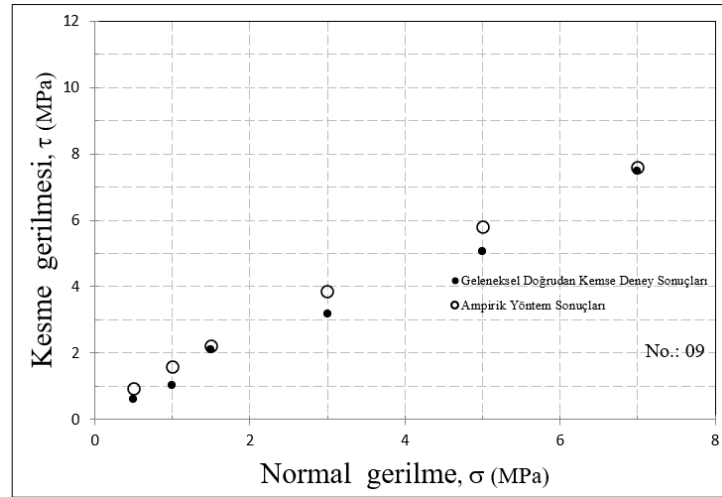
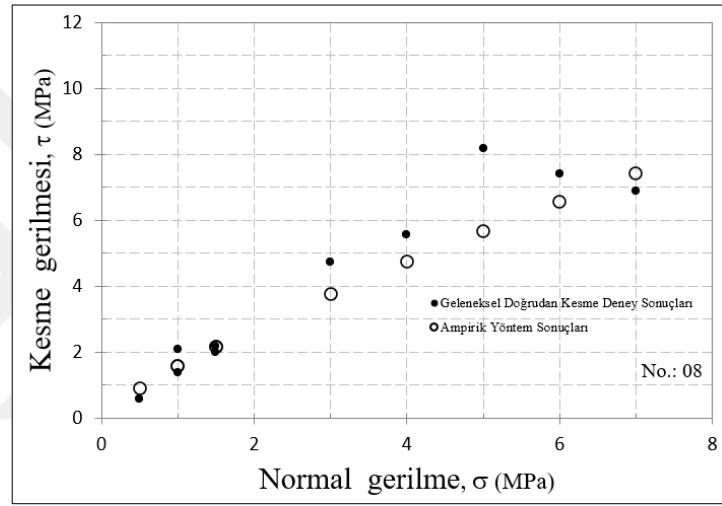
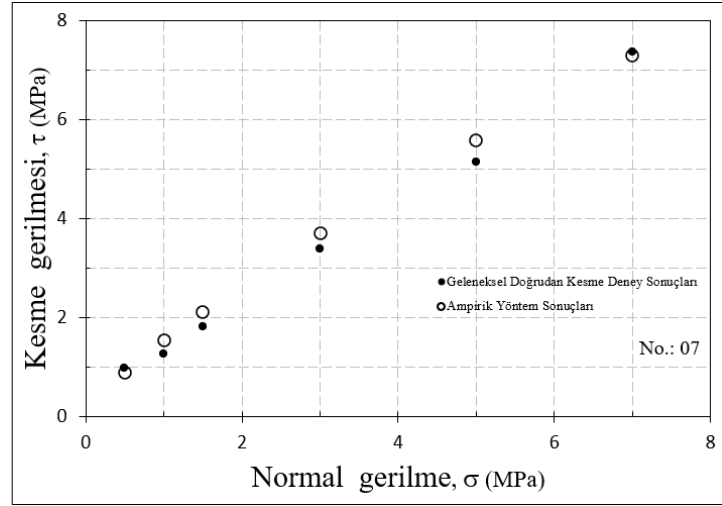


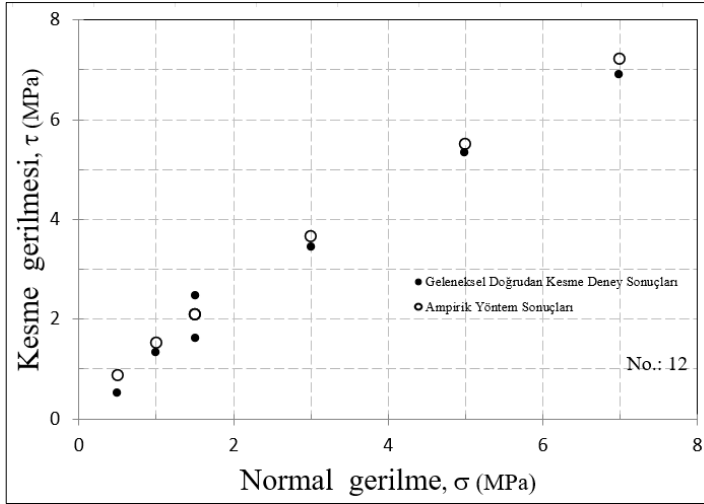
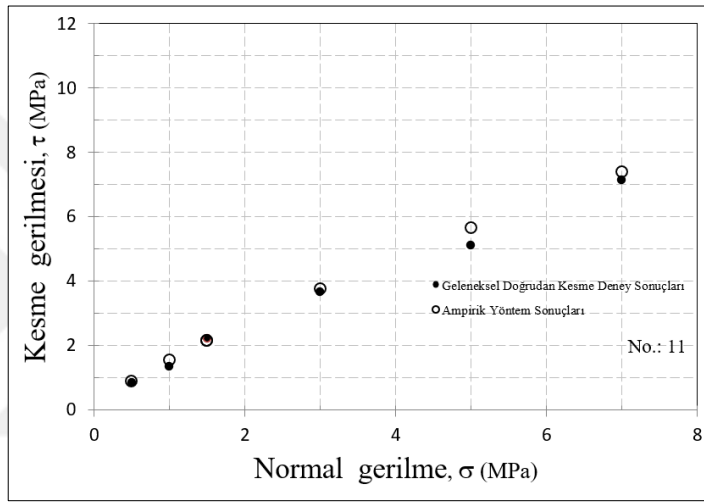
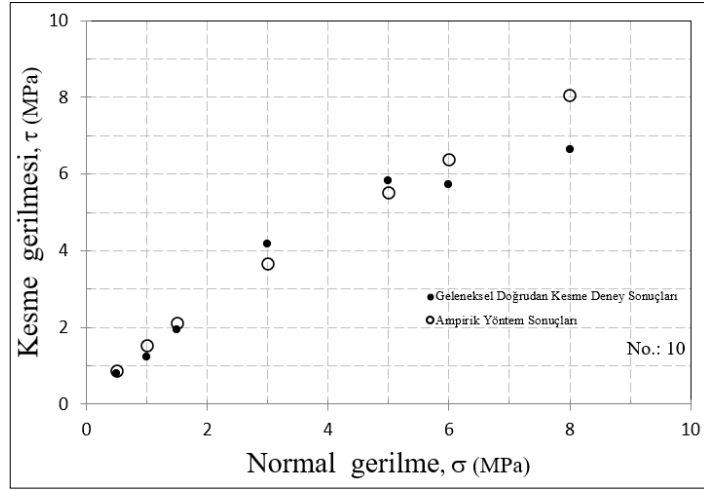


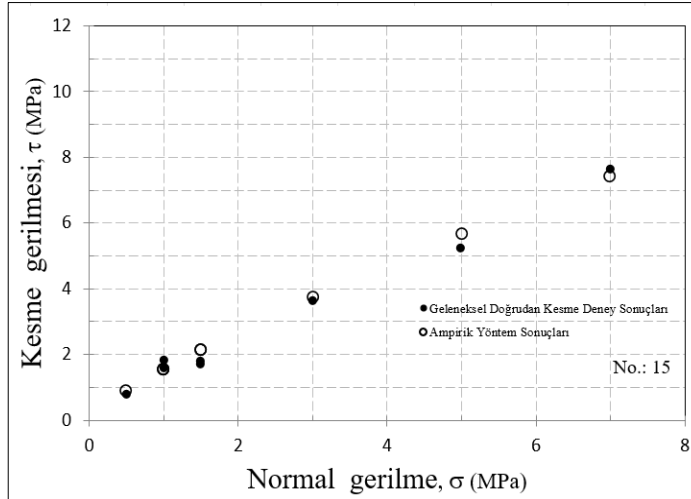
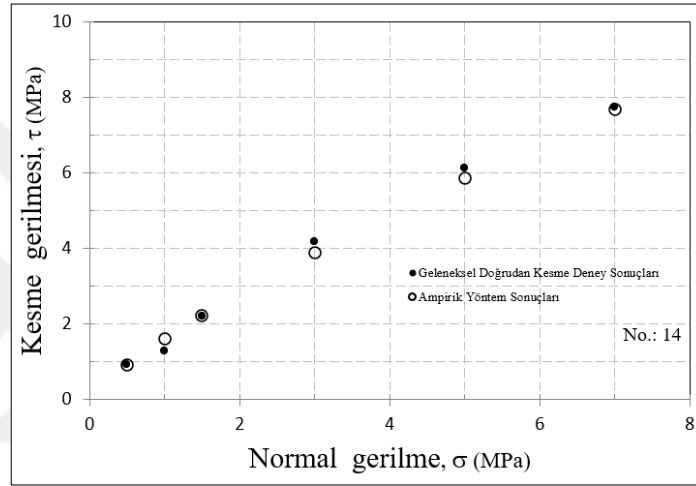
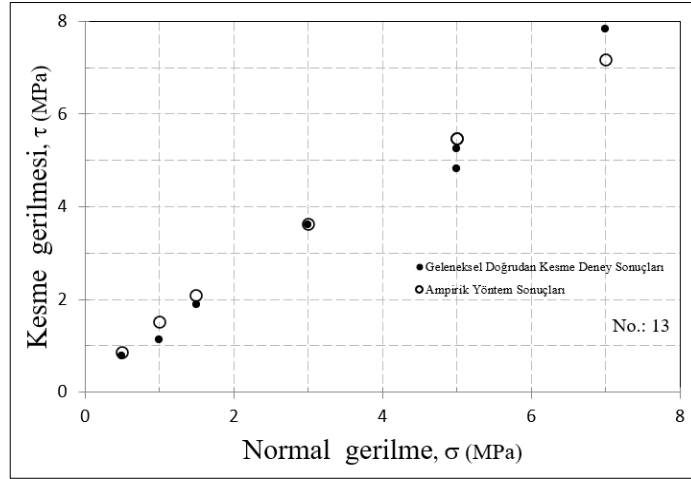
EK 6 REGRESYON ANALİZ SONUÇLARI

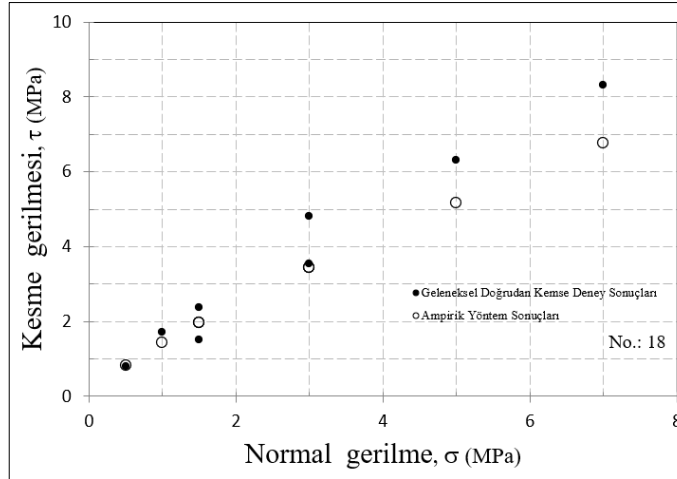
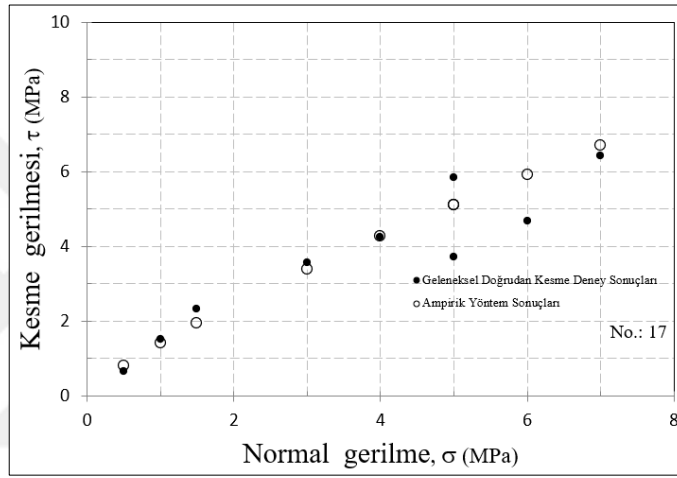
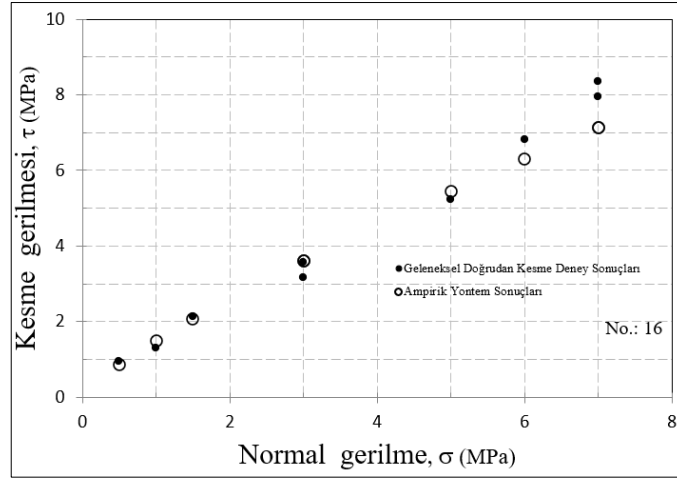


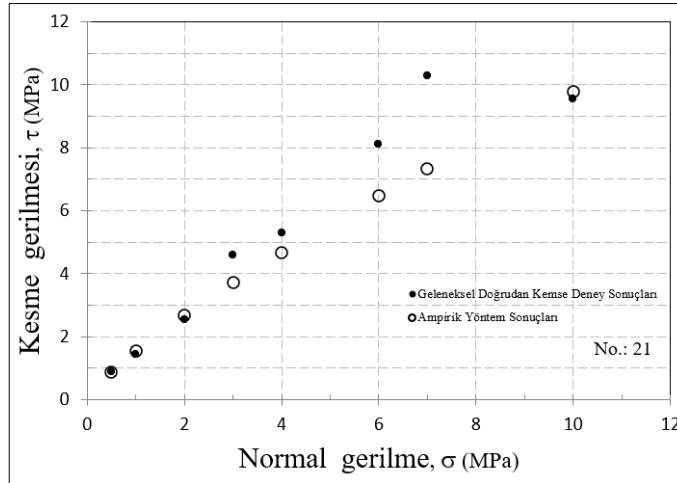
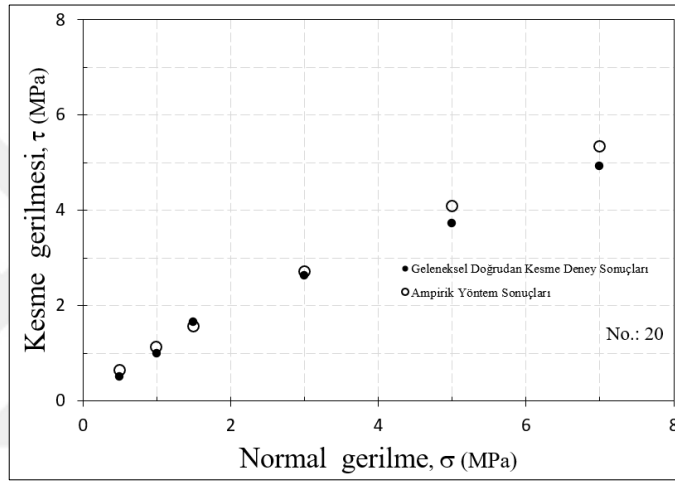
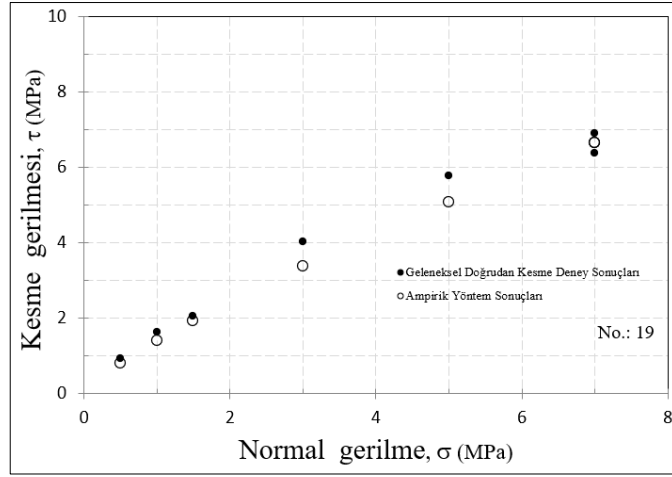


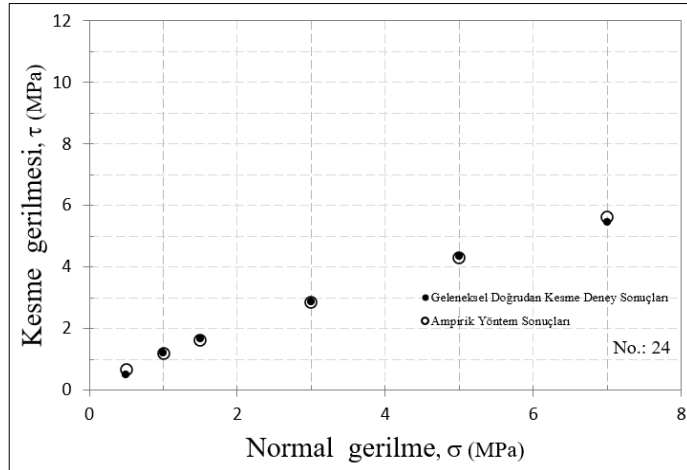
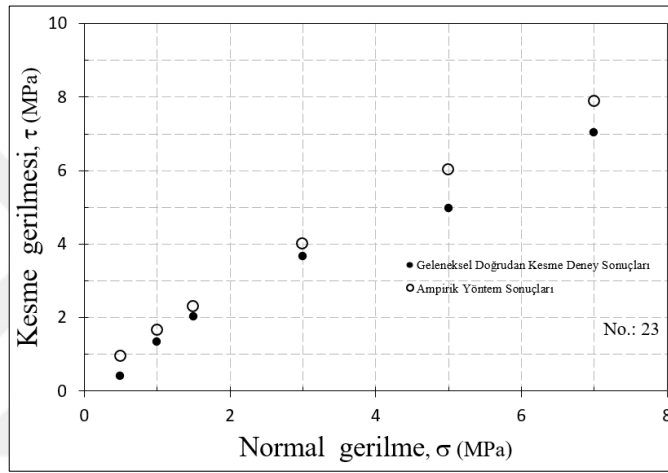
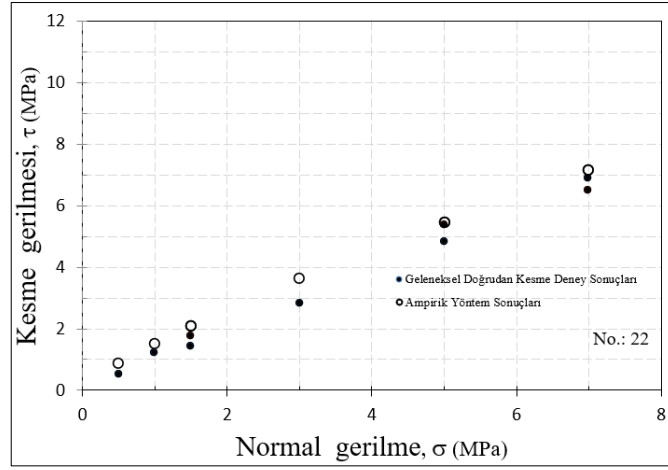


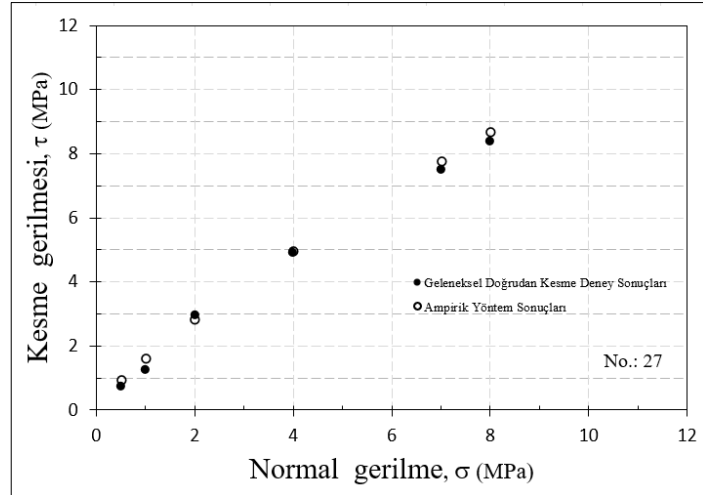
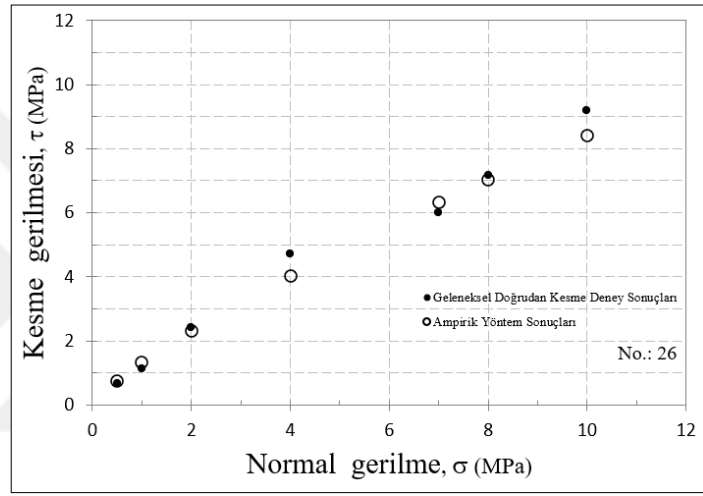
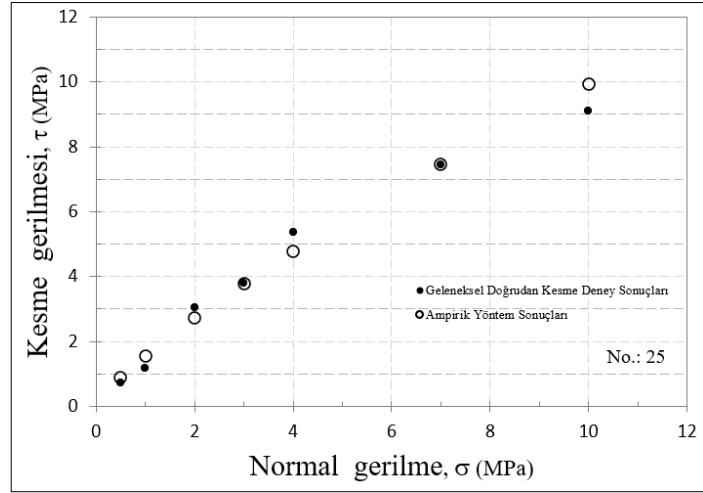


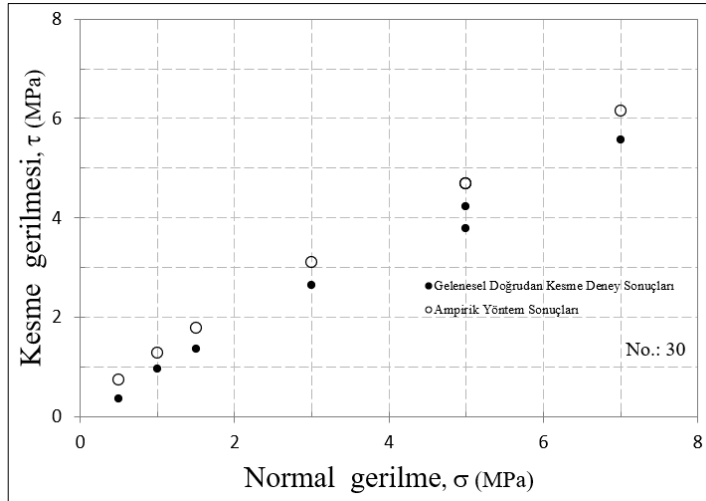
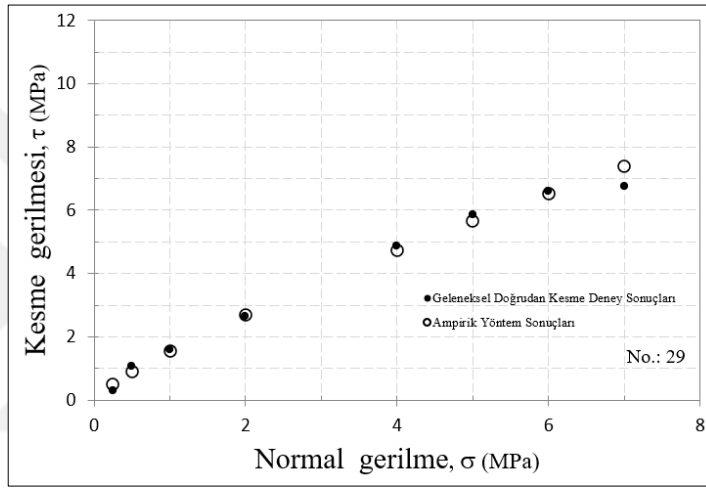
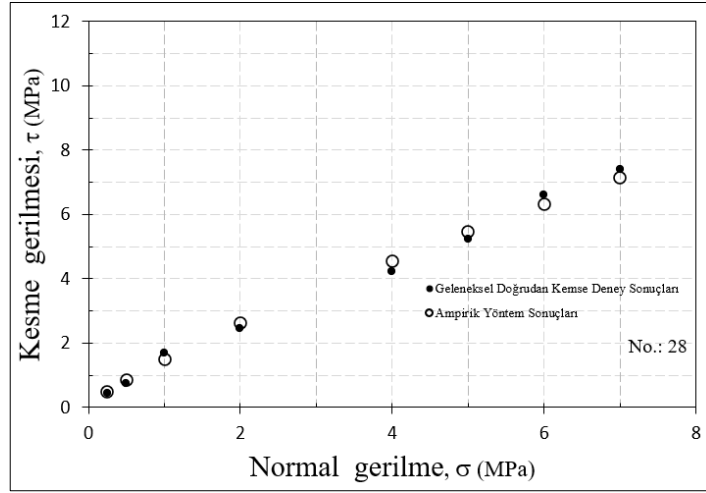






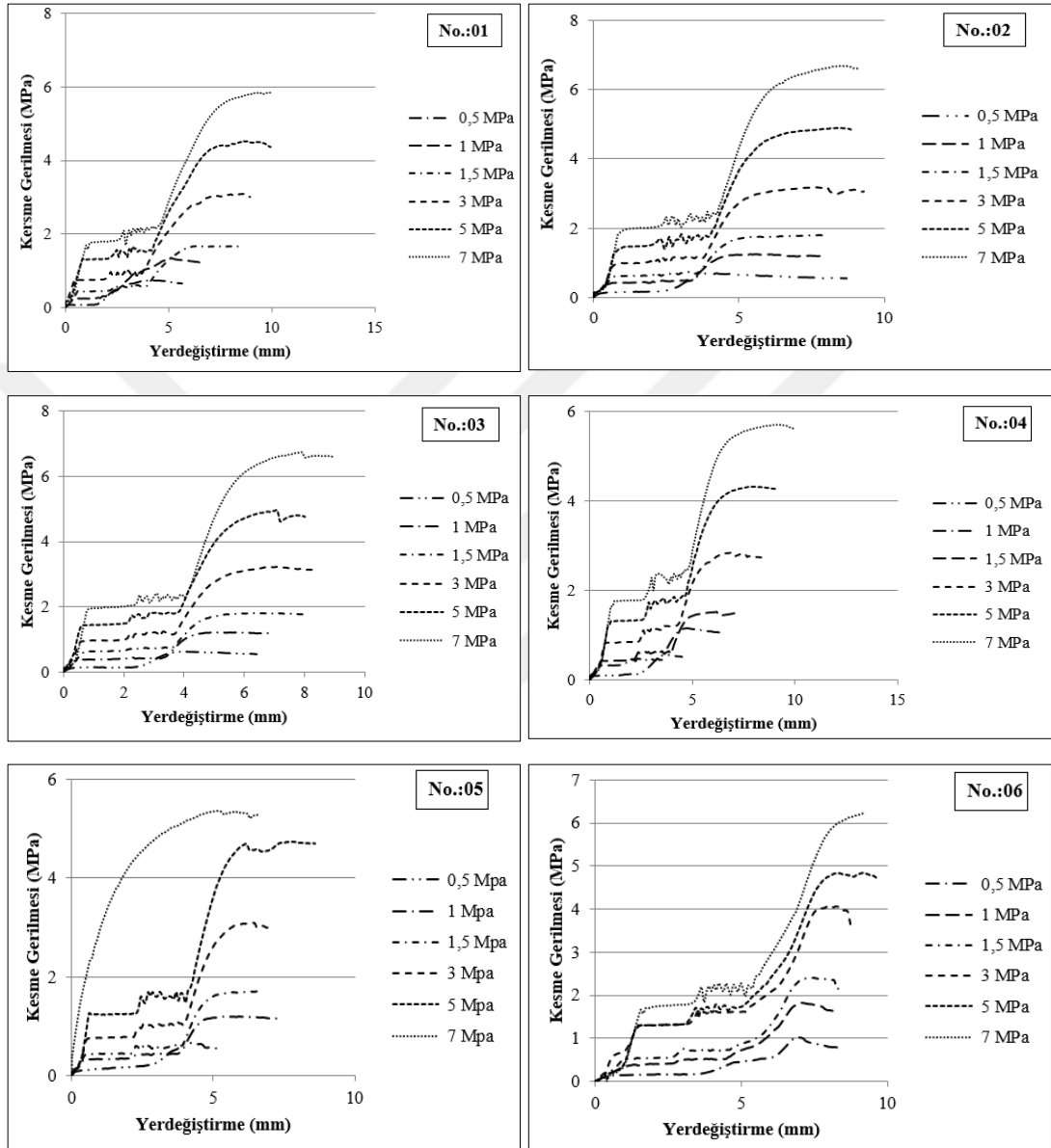


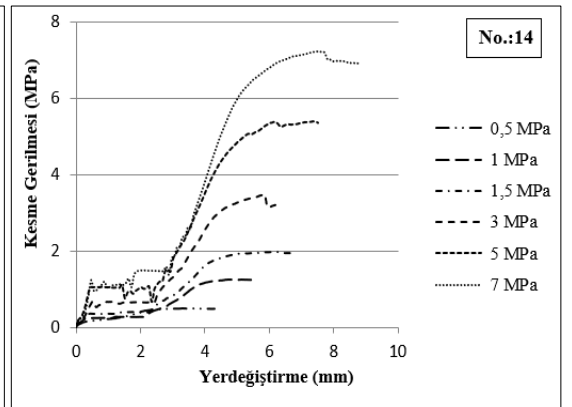
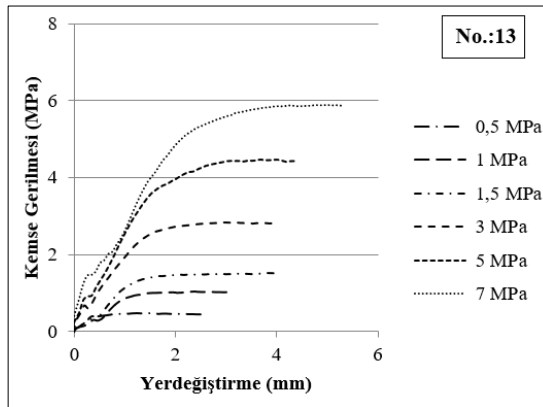
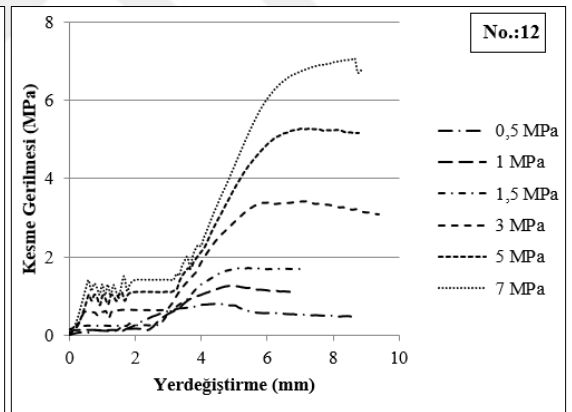
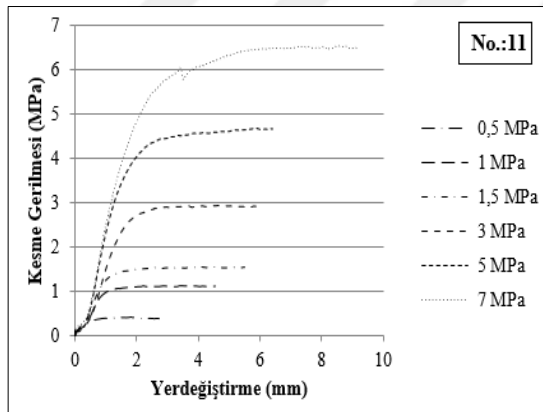
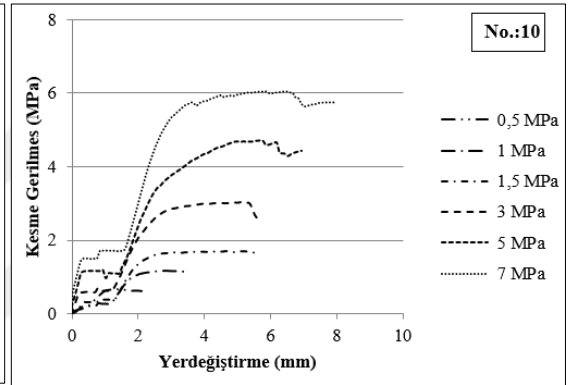
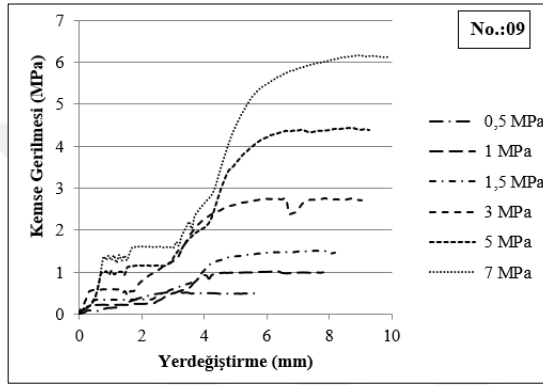
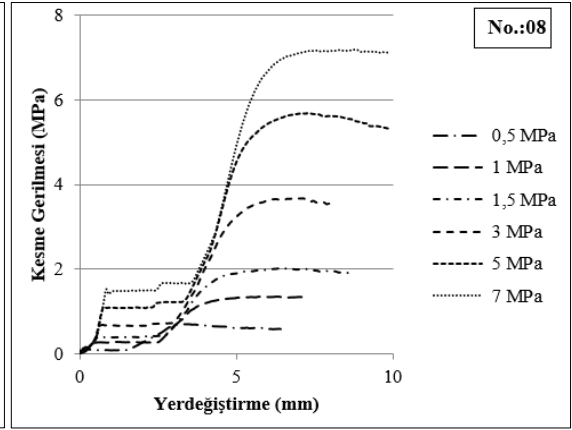
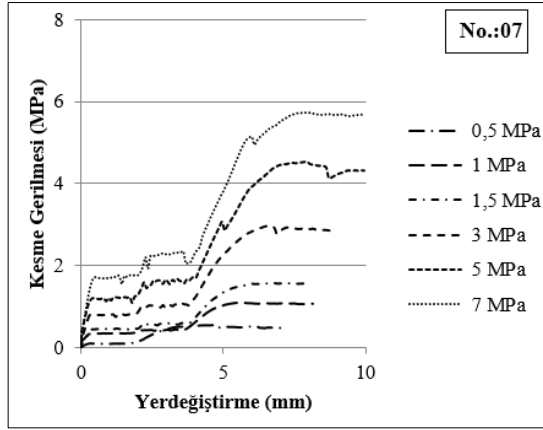


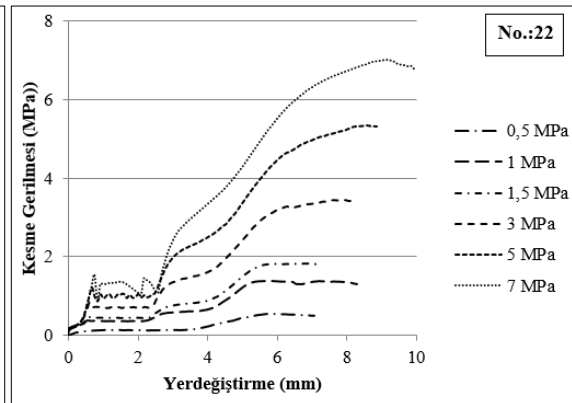
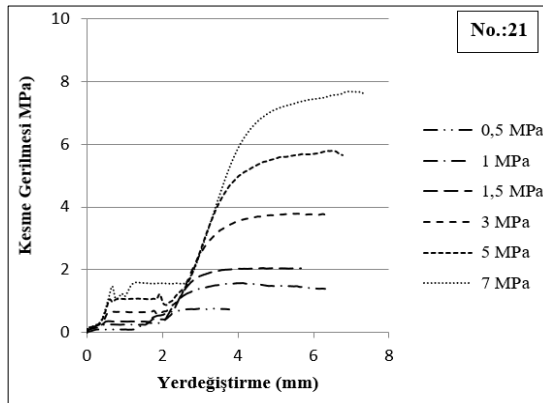
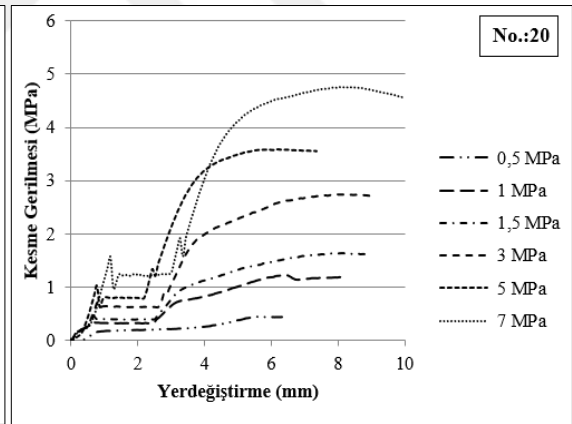
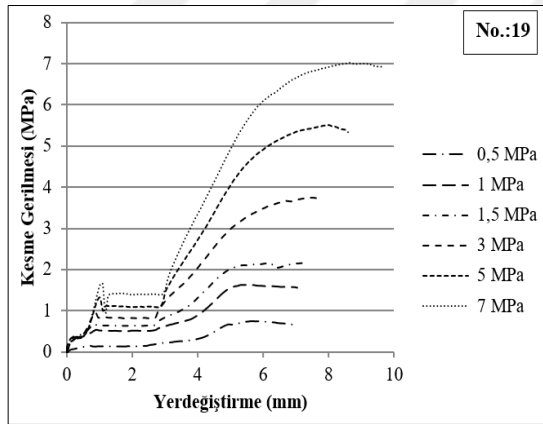
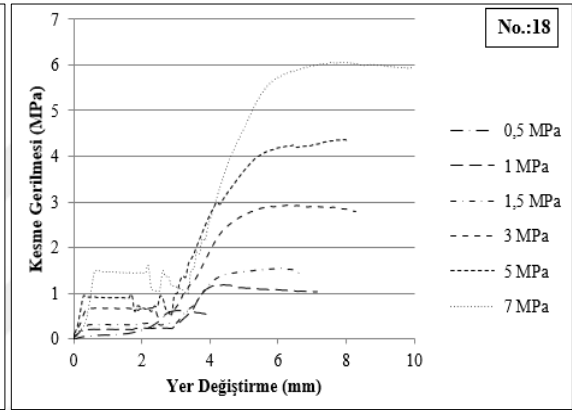
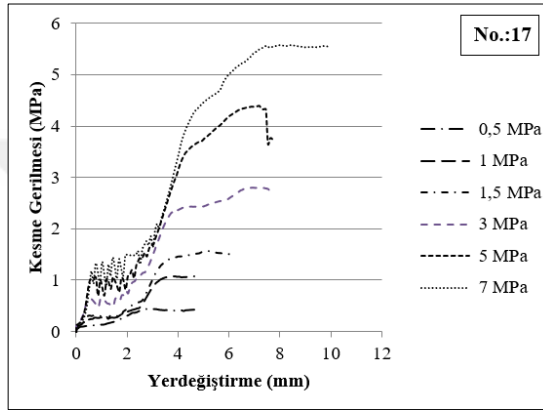
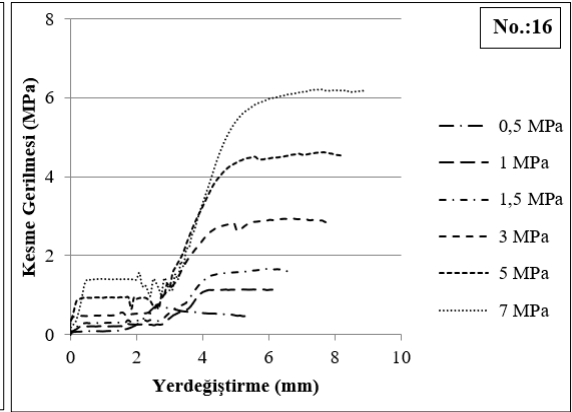
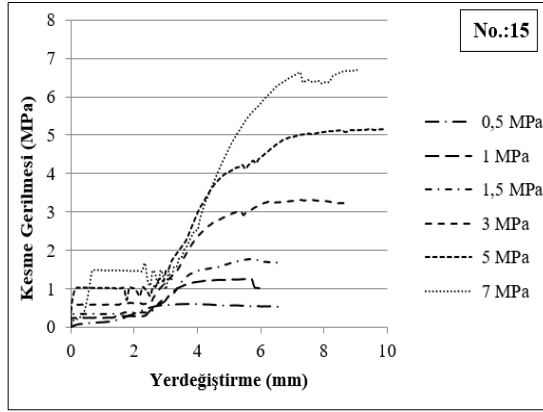


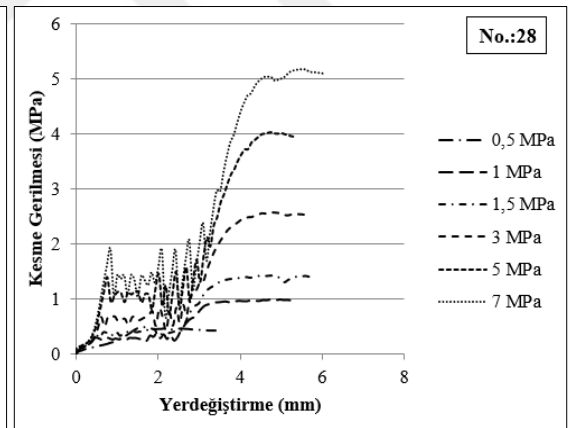
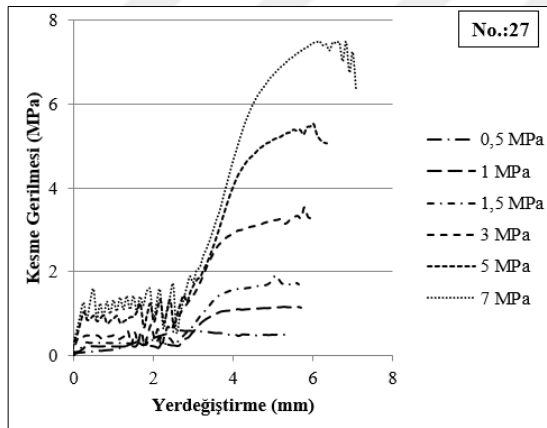
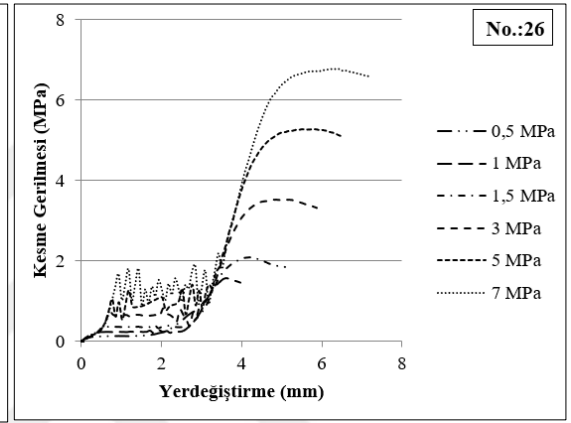
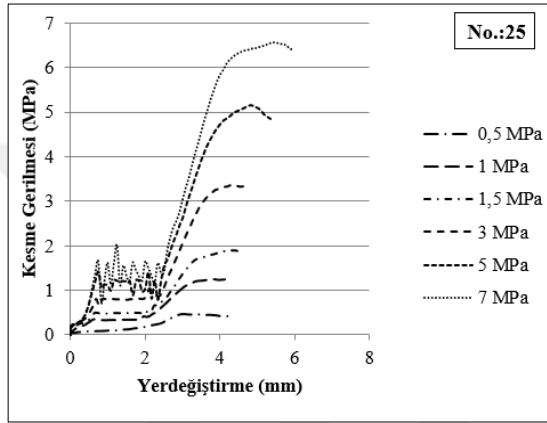
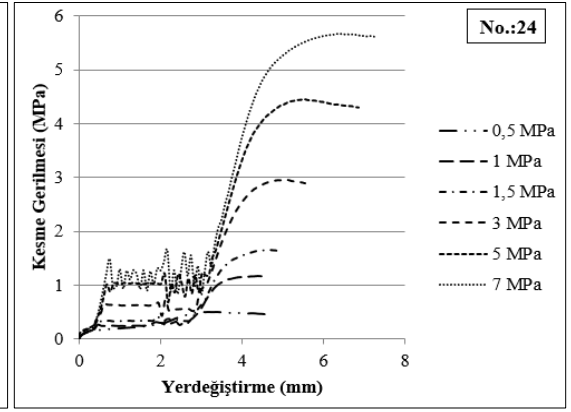
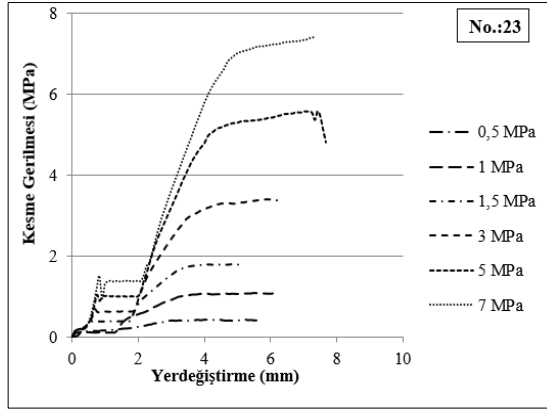
EK 7 ÇOK AŞAMALI DENEY SONUÇLARI

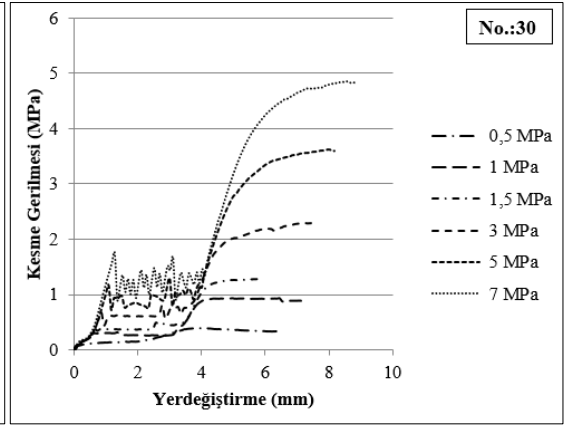
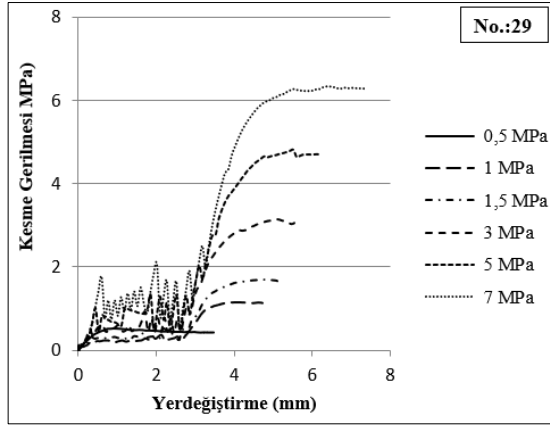
Ek 7.a) Kesme Gerilmesi – Yer Değiştirme Grafikleri











Ek 7.b) Kesme Gerilmesi - Normal Gerilme Grafikleri

