

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**SÜREKSİZLİKLERDE DOLGUNUN KESME DAYANIMINA ETKİSİNİN
NİCELLEŞTİRİLMESİ**

Aylin FİDAN ÜZGÜN

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2025

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Aylin FİDAN ÜZGÜN tarafından hazırlanan " **Süreksizliklerde Dolgunun Kesme Dayanımına Etkisinin Nicelleştirilmesi** " adlı tez çalışması **08.05.2025** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Kamil KAYABALI
Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK
Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Ergün TUNCAY
Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Kamil KAYABALI
Ankara Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Mustafa FENER
Ankara Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Veysel IŞIK
Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ayşe KARAKEÇİLİ
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davranıldığı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

...../...../2025

Aylin FİDAN ÜZGÜN

ÖZET

Doktora Tezi SÜREKSİZLİKLERDE DOLGUNUN KESME DAYANIMINA ETKİSİNİN NİCELLEŞTİRİLMESİ

Aylin FİDAN ÜZGÜN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kamil KAYABALI

Kaya kütlesi dayanımını etkileyen en önemli iki faktör yapısal jeoloji özellikleri ve litolojidir. Litoloji kaya malzemesinin dayanımını kontrol ederken, yapısal özellikler daha çok değişik şekillerdeki süreksizliklerle kaya kütlesinin dayanımını kontrol etmektedir. Süreksizliklerin varlığına ve sayısına bağlı olarak dayanımın azaldığı, süreksizliklerin dolgulu olması durumunda dayanımın dolgunun kalınlığına ve dolgu türüne bağlı olarak değiştiği, belli bir dolgu kalınlığından sonra dayanımın bu dolgu malzemesi tarafından kontrol edildiği ve dayanım parametrelerinin dolgu ile aynı olduğu bilinmektedir. Aralarında açıklık bulunan yüzeyler zamanla kil, kalsit ve kuvars gibi malzemeler ile doldurularak dolgulu süreksizlikleri oluşturmaktadır. Aynı kaya türü olsa bile, dolgulu ve dolgusuz süreksizliklerin makaslama dayanımını denetleyen özellikler değişmekte ve süreksizliğin makaslama dayanımı, dolgunun türü ve kalınlığından etkilenmektedir.

Bu araştırmanın amacı, dolgulu süreksizliklerin statik kesme gerilmelerinin dolgusuz durum ile karşılaştırılarak dolgu türü ve kalınlığına bağlı kesme gerilmesinde meydana gelen değişimi nicel olarak ortaya koymak ve pratik bir eşitlik geliştirmektir. Bu kapsamda materyal olarak toplam 6 çeşit kaya ve 3 çeşit dolgu türü 1, 3 ve 5 mm kalınlıkta uygulanarak kullanılmıştır. Doğal süreksizliklerle çalışmanın pratik güçlükleri dikkate alınarak, 6 farklı kaya çeşidine ait 15 cm'lik kübik bloklar özel olarak yarılarak test edilmeye elverişli özdeş düzlemler elde edilmiştir. Yapay olarak elde edilen süreksizlikler yapay dolgularla birlikte doğrudan kesme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, doğrudan kesme deneyinden elde edilen kesme gerilmesinin uygulanan normal gerilme, kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı, dolgu malzemesinin kohezyonu ve dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısının fonksiyonu olduğu görülmüştür. Kesme dayanımının belirlenmesi amacıyla regresyon katsayısı 0,835 olan ampirik bir ilişki geliştirilmiştir.

Haziran 2025, 150 sayfa

Anahtar kelimeler: Süreksizlik, pürüzlülük genliği, dolgu kalınlığı, dolgu malzemesi, statik kesme dayanımı, dolgulu kesme dayanımı

ABSTRACT

PhD Thesis

QUANTIFICATION OF THE EFFECT OF THE FILLING MATERIAL ON THE SHEAR STRENGTH OF DISCONTINUITIES

Aylin FİDAN ÜZGÜN

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

Supervisor: Prof. Dr. Kamil KAYABALI

The two most important factors affecting rock mass strength are structural geology characteristic and lithology. While lithology controls the strength of the rock material, structural properties mainly control the strength of the rock mass with discontinuities of various shapes. It is known that the strength decreases depending on the presence and number of discontinuities, and, if the discontinuities are filled, the strength varies depending on the thickness of the fill material and the type of fill material. After a certain filling thickness, the strength is controlled by this fill material, and the strength becomes that of the fill material. Apertures in discontinuities are usually filled with materials such as clay, calcite and quartz. Even if it is the same rock type, the properties that control the shear strength of filled and unfilled discontinuities vary and the shear strength of the discontinuity is affected by the type and thickness of the fill.

The aim of this research is to quantitatively reveal the change in shear stress depending on the filler type and thickness by comparing the static shear stresses of filled discontinuities with the unfilled situation and to develop a practical equation. Six types of rocks and three types of fillers were used as materials, with thicknesses of 1, 3 and 5 mm. Considering the practical difficulties of working with natural discontinuities, 15 cm cubic blocks of six different rock types were specially split and identical planes suitable for testing were obtained. Artificially obtained discontinuities were subjected to direct shear testing with artificial fillings. According to the results obtained, it was seen that the shear stress obtained from the direct shear test was a function of the applied normal stress, the uniaxial compressive strength of the rock, the cohesion of the filling material and the angle of internal friction of the filling material. An empirical relationship with a regression coefficient of 0.835 was developed to determine the shear strength.

June 2025, 150 pages

Key words: Discontinuity, roughness amplitude, fill thickness, fill material, static shear strength, filled shear strength

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde bana rehberlik eden ve destek olan, bilgi, deneyim ve sabrını esirgemeyen kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Kamil KAYABALI'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam süresince yaptığı yönlendirmeler, yapıcı eleştiriler ve öneriler bu tezin tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Bu çalışmanın değerlendirilmesi ve geliştirilmesi sürecinde her türlü desteği sağlayan, olumlu eleştiri ve önerileri ile tezime değer katan sayın tez izleme komite üyeleri Prof. Dr. Ergün TUNCAY (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü) ve Prof. Dr. Mustafa FENER (Ankara Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü) hocalarıma teşekkür ederim.

Doktora süreci boyunca desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Turgay BEYAZ (Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü) hocama, tez çalışması sırasında yardım ve desteğini her daim eksik etmeyen kıymetli meslektaşım Mehmet YAKUT'a (DSİ Genel Müdürlüğü, TAKK Daire Başkanlığı) teşekkür ediyorum.

Eğitim sürecimin her aşamasında, özellikle destek hissettiğim her an bilgisi, sabrı, azmi ile yanımda olan, tezin geliştirilmesi için pratik önerileri ve tasarımları ile süreci tamamlamamda büyük katkıları olan eşim, meslektaşım Çağdaş ÜZGÜN'e doktora sürecinde aramıza katılan ve bana ilham kaynağı olan çocuklarıma, her zaman yanımda olan aileme en derin şükranlarımı sunarım.

Aylin FİDAN ÜZGÜN

Ankara, Haziran 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	2
ETİK	1
ÖZET	2
ABSTRACT	3
TEŞEKKÜR	4
SİMGELER DİZİNİ	7
ŞEKİLLER DİZİNİ	8
ÇİZELGELER DİZİNİ	11
1.GİRİŞ	12
2.KAYNAK ÖZETLERİ	19
2.1 Süreksizliklerin Kesme Dayanımının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar	19
2.2 Dolgulu Süreksizliklerin Kesme Dayanımlarının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar	24
3. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER	27
3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler	27
3.1.1 Kayalar	29
3.1.2 Dolgu malzemeleri	29
3.1.3 Dolgu yayma tarakları	30
3.1.4 Baltalı pres	30
3.1.5 Profilometre	31
3.1.6 Doğrudan kesme deney seti	32
3.1.7 SPSS yazılımı	34
3.1.8 DATAFIT yazılımı	36
3.2 Çalışmada Kullanılan Yöntemler	36
3.2.1 Yapay süreksizlik yüzeylerinin elde edilmesi	36
3.2.2 Pürüzlülük açılarının belirlenmesi	38
3.2.3 Pürüzlülük genliğinin belirlenmesi	40
3.2.4 Dolgu malzemesinin seçimi	43
3.2.5 Dolgu kalınlığının ayarlanması	47
3.2.6 Dolgunun kesme dayanımının tayini	48
3.2.7 Dolgulu süreksizliklerde doğrudan kesme deneyleri	51
3.3 Süreksizliklerin Kesme Dayanımına Dair Önerilen Modeller	53
3.3.1 Mohr-Coulomb yöntemi	54
3.3.2 Patton yöntemi	55
3.3.3 Ladanyi ve Archambault yöntemi	56

3.3.4 Jaeger yöntemi.....	56
3.3.5 Barton yöntemi.....	57
4. BULGULAR.....	60
4.1 Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri	60
4.2 Tek Eksenli Sıkışma Deneyi.....	60
4.3 Süreksizliklerin Pürüzlülük Açısı.....	60
4.4 Süreksizliklerin Pürüzlülük Genliği.....	62
4.5 Doğrudan Kesme Deneyleri	63
4.6 Dolgulu ve Dolgusuz Süreksizlik Kesme Dayanımlarının Karşılaştırılması	70
4.7 Doğrudan Kesme Ek Deneyleri	85
4.7.1 Ek deney numunelerinin pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliği:	86
4.7.2 Ek deney numunelerinin kesme dayanımı deneyleri:	87
4.7.3 Ek deney numunelerinin kesme dayanımı ile dolgusuz süreksizlik kesme dayanımlarının karşılaştırılması:	87
5. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER VE DOLGULU SÜREKSİZLİKLERİN KESME DAYANIMININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK AMPİRİK İLİŞKİNİN GELİŞTİRİLMESİ.....	94
5.1 SPSS Yazılımı ile Yapılan İstatistiksel Analizler	95
5.2 DATAFIT ile Yapılan Ek Analizler:	101
5.2.1. Yumuşak dolgu için yapılan ek analizler:.....	101
5.2.2. Sert dolgular için yapılan ek analizler:	102
5.3 İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi:	103
6. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	105
KAYNAKLAR	111
EKLER	117
EK 1 KESME GERİLMESİ-YER DEĞİŞTİRME ve KESME GERİLMESİ NORMAL GERİLME GRAFİKLERİ	118
ÖZGEÇMİŞ.....	150

SİMGELER DİZİNİ

a	Pürüzlülük genliği (mm)
c	Kohezyon (MPa)
i	Pürüzlülük açısı ($^{\circ}$)
R^2	Belirleme (regresyon) katsayısı
t	Dolgu kalınlığı (mm)
ϕ	Sürtünme açısı ($^{\circ}$)
σ_c	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
σ_n	Normal gerilme değeri (MPa)
τ	Kesme dayanımı/gerilmesi (MPa)

Kısaltmalar

ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu
JCS	Süreksizlik yüzeyi sıkışma dayanımı
JRC	Süreksizlik pürüzlülük katsayısı
kPa	Kilopaskal
MPa	Megapaskal
UCS	Uniaxial compressive strenght (MPa)
TESD	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Kil dolgulu süreksizlik (Naghadehi, 2015) (solda) kalsit dolgu içeren fay zone (Peacock, 2023) (sağda)	14
Şekil 1.2 İtalyan Alplerinin Dolomit Bölgesi'nin güneydoğu kesiminde inşa edilen Vaiont barajı (Hardenberg, 2011)	14
Şekil 1.3 Vaiont barajından gelen dalgadan sonra Longarone köyünün görünümü (solda) ve heyelan sonrası barajın (sağda) görüntü (Hardenberg, 2011)	15
Şekil 1.4 Ağcagüney heyelanında topoğrafyanın 2011 mart ayı (solda) ve 2012 mart ayı (sağda) görünümü (Çoşgunlu vd. 2018).....	16
Şekil 1.5 Gürpınar heyelan bölgesinin genel görünümü (solda) ve bölgede oluşan heyelan gölü (sağda) (İmre, 2011)	17
Şekil 2.1 Patton'ın çift eğrili yenilme modeli (Patton, 1966)	20
Şekil 2.2. 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)..	20
Şekil 2.3 Jaeger (1971) tarafından önerilen yenilme ölçütünün kavramsal görünümü...	21
Şekil 2.4 JRC belirlenmesinde kullanılan pürüzlülük profilleri (Barton ve Choubey, 1977).....	22
Şekil 3.1 Tez çalışmasında takip edilen eylem akış şeması	28
Şekil 3.2. Başlangıçta kullanılan dişli taraklar (a) ve yeniden tasarlanan alternatif taraklar (b).....	30
Şekil 3.3 a) Baltalı pres cihazı ve yardımcı aparatları b) numune yerleşimi	31
Şekil 3.4 Profilometre deney cihazının detayları; 1) Kaide, 2) Yükseklik ayarlama kolu, 3)ayar düğmesi, 4) Ölçüm ünitesi eğim ayar 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 Klasik deney yönteminde alçı ile doldurulup sabitlenen kaya örnekleri (numune boyutları 15x15 cm).....	33
Şekil 3.6 Ayar vidaları ve çelik destekler yardımıyla istenilen boyutta numune sabitleyebilen kalıplar ve numunelerin sabitlenmiş görüntüleri (numune boyutları 15x15 cm)	33
Şekil 3.7 Kaya üst bloğunun yerleştirilmesi ve bloğu kuşatacak çelik plaka desteklerinin dizilimi	34
Şekil 3.8 Çalışmada kullanılan kesme deney cihazından değişik görüntüler	35
Şekil 3.9 Baltalı pres düzeneğinde kübik numunelerde yapay süreksizlik oluşturulması (solda) ve kılavuz hat çizilmiş numuneler (sağda).....	37
Şekil 3.10 Deney için kullanılabilir (solda) ve konkav/konveks kırılmış yüzeylere ait görüntüler (sağda) (numune ebatları 15 cm'dir)	38
Şekil 3.11 Kaya süreksizliğinden el profilometresiyle pürüzlülük ölçümü (Ulusay ve Sönmez, 2007).....	39
Şekil 3.12 Pürüzlülük açılarının belirlenmesinde kullanılan elektromekanik profilometre cihazı (Kayabalı vd. 2024)	39
Şekil 3.13 Ölçüm için farklı yönlerden alınan süreksizlik profillerin şeması.....	40

Şekil 3.14 Elektromekanik profilometre ile ölçülmüş yüzey profillerinden bir ekran görünümü	40
Şekil 3.15 Süreksizlik yüzeylerinin dalgalılığı ve pürüzlülüğü (Ulusay ve Sönmez, 2007).....	41
Şekil 3.16 Dolgu malzemesinin kalınlığı ile pürüzlü süreksizlik yüzeyin genliği arasındaki ilişki (ISRM, 1981).....	41
Şekil 3.17 Tez kapsamında üretilen yöntem ve ISRM (1981)'de önerilen yöntemin karşılaştırması.....	42
Şekil 3.18 Casagrande yöntemi kullanılarak büzülme limitinin belirlenmesi (Holtz ve Kovacs, 1981'den)	44
Şekil 3.19 Üç mm kalınlıkta serilmiş kuru kil (solda) ve büzülme limitine getirilmiş kil (sağda).....	45
Şekil 3.20 Sert-1 dolgu uygulanarak kalınlık ayarlaması yapılmış alt blok (yapay düzlem boyutları 15 cm x 15 cm'dir).....	46
Şekil 3.21 Sert-2 dolgu uygulanarak kalınlık ayarlaması yapılmış alt blok (yapay düzlem boyutları 15 cm x 15 cm'dir).....	47
Şekil 3.22 Dolgu kalınlığı ayarlama da kullanılmış farklı dış yüksekliğine sahip taraklar	48
Şekil 3.23 Çalışma kapsamında üretilen dolgu yayma tarakları	48
Şekil 3.24 Kil dolgu üzerinde yapılan doğrudan kesme deney sonuçları	49
Şekil 3.25 Reçine (solda) ve alçı (sağda) dolgu malzemelerinden hazırlanan deney numuneleri.....	50
Şekil 3.26 Sert-1 (alçı) ve sert-2 (reçine) dolgularına ait $\tau - \sigma$ grafikleri	50
Şekil 3.27 Kesme deneyine hazırlık aşamaları a) baltalı pres ile yarılan numuneler, b) çelik plakalar ile sabitlenmiş numune ve süreksizlik yüzeyine uygulanmış kil dolgu, c) dolgulu süreksizlik yüzeyi üzerine üst bloğun yerleştirilmesi, d) çelik plakaların üst blok etrafına yerleştirilmesi, e) kesme kutusu üst bloğunun numune üzerine konumlandırılması.....	52
Şekil 3.28 Süreksizlik yüzeyine sert-2 dolgu uygulanmış numuneler	53
Şekil 3.29 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	55
Şekil 3.30 Jaeger (1971) ampirik kesme dayanım modeli; a) kesme dayanımı - normal gerilme grafiği, b) log (p) - normal gerilme grafiği	57
Şekil 3.31 Barton ve Choubey 1977 tarafından önerilen pürüzlülük profilleri ve karşılık gelen JRC değerleri (Vallejo ve Ferrer 2002'den)	58
Şekil 4.1 Doğrudan kesme deneyi sonrası a) yumuşak dolgu, b) sert-1 dolgu ve c) sert-2 dolgu uygulanmış numunelere örnekler	65
Şekil 4.2 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında yumuşak dolgulu numunenin kesme gerilmesi - yer değiştirme grafiği	66
Şekil 4.3 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında yumuşak dolgulu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği	66
Şekil 4.4 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-1 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - yer değiştirme grafiği	67
Şekil 4.5 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-1 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği	67

Şekil 4.6 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-2 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - yer değiştirme grafiği	68
Şekil 4.7 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-2 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği	68
Şekil 4.8 AF-1 kayasına ait a) yumuşak, b) sert-1 ve c) sert-2 dolgu uygulanmış statik kesme deneyi sonrası kaya fotoğrafları	69
Şekil 4.9 AF-1 (diyabaz) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	72
Şekil 4.10 AF-1 (diyabaz) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	73
Şekil 4.11 AF-1 (diyabaz) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	74
Şekil 4.12 AF-2 (mermer) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	75
Şekil 4.13 AF-2 (mermer) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	76
Şekil 4.14 AF-2 (mermer) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	77
Şekil 4.15 AF-3 (litik tüf) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	78
Şekil 4.16 AF-3 (litik tüf) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	79
Şekil 4.17 AF-3 (litik tüf) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	80
Şekil 4.18 AF-4 (ignimbrit) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	88
Şekil 4.19 AF-5 (trakit) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	89
Şekil 4.20 AF-6 (granodiyorit) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri	90
Şekil 5.1 Deneysel yöntem ile önerilen ampirik eşitlik sonucundan elde edilen sonuçların kıyaslanması	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Kaya ve zemin dayanımlarına ait sınıflandırılma (ISRM 1981).....	59
Çizelge 4.1 Kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri (Beyhan, 2024'den).....	61
Çizelge 4.2 Kaya numunelerinin UCS sonuçları (Beyhan, 2024'den)	61
Çizelge 4.3 Profilometre cihazı ile elde edilen süreksizliklere ait pürüzlülük açıları.....	62
Çizelge 4.4 Profilometre cihazı ile elde edilen süreksizliklere ait pürüzlülük genlikleri.....	63
Çizelge 4.5 Uygulanacak dolgu kalınlıklarının, her bir kaya türü için belirlenen pürüzlülük genliği değerlerine oranı (t/a oranı)	63
Çizelge 4.6 Süreksizliklerde dolgu varlığında elde edilen kesme dayanımı sonuçlarının dolgunsuz durum ile olan % değişimi. Burada kil için $c = 0$ MPa, $\phi = 23,2^\circ$; alçı için $c = 5$ MPa, $\phi = 59^\circ$ ve reçine için $c = 3$ MPa, $\phi = 68^\circ$ 'dir.....	82
Çizelge 4.7 Ek deney yapılacak kaya numunelerine ait bilgiler	86
Çizelge 4.8 Araştırmaya sonradan dahil edilen üç kayanın ortalama süreksizlik pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliği değerleri.....	86
Çizelge 4.9 Araştırmaya sonradan dahil edilen üç kaya için uygulanacak dolgu kalınlıklarının, her bir kaya türü için belirlenen pürüzlülük genliği değerlerine oranı (t/a oranı).....	87
Çizelge 4.10 Ek numunelerin dolgulu süreksizlik kesme gerilmesinin dolgunsuz kesme gerilmesi ile % değişim oranları.....	91
Çizelge 5.1 Regresyon analizi için kullanılan parametreler.....	95
Çizelge 5.2 Doğrusal regresyon analizlerinde sağlanması gereken koşullar	96
Çizelge 5.3 AF-1, AF-2 ve AF-3 kayalarından elde edilen veri tabanının katsayılar tablosu	96
Çizelge 5.4 AF-1, AF-2 ve AF-3 kayalarından elde edilen veri tabanının ANOVA Tablosu	97
Çizelge 5.5 AF-1, AF-2 ve AF-3 kayalarından elde edilen veri tabanının model özeti tablosu	97
Çizelge 5.6 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanına ait katsayılar tablosu	98
Çizelge 5.7 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanına ait ANOVA tablosu	98
Çizelge 5.8 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanına ait model özeti tablosu	99
Çizelge 5.9 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanından t/a ve i parametresi çıkarıldıktan sonraki katsayılar tablosu.....	99
Çizelge 5.10 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanından t/a ve i parametresi çıkarıldıktan sonraki ANOVA tablosu.....	99
Çizelge 5.11 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanından t/a ve i parametresi çıkarıldıktan sonraki model özeti tablosu	100

1.GİRİŞ

Kaya mekaniği, kaya malzemeleri ve kaya kütlelerinin mekanik davranışlarını teorik ve uygulamalı olarak inceleyen bir bilim dalıdır. Kaya mekaniği disiplininin 20. yüzyılda ortaya çıktığı yaygın düşünce olsa da 18. yüzyılın üçüncü çeyreğine ait Avrupa literatüründe kaya malzemelerinin mekanik özelliklerine yönelik deneysel çalışmaları içeren yayınların olduğu bilinmektedir (Coulomb 1776; Heyman 1972).

Kaydedilen ilk kaya mekaniği deneysel çalışması 1770 yılı civarında kilise sütunlarında kullanılacak numunelerin sıkışma dayanımlarını ölçmede kullanılmış, kaldıraç sistemli bir test cihazına dayanmaktadır (Ulusay 2015). İlk deneysel çalışmalar bu tarihlerde yapılmış olsa da 1950’li yılların sonundan itibaren ivme kazanmaya başlayan kaya mekaniği çalışmaları artan nüfus ve değişen teknolojik yöntemlere göre gelişerek günümüzdeki halini almıştır.

Sanayi devrimi ile başlayan gelişim sürecinde temel ve şev kazılarının, tünellerin, madenlerin sayısının artması, petrol üretiminin başlaması 19. yüzyılda kaya kütlesi davranışlarının daha detaylı olarak incelenmesini ve yer mühendisliği uygulamalarına bilimsel yaklaşımın kazandırılmasını sağlamıştır. Yine ulaşım ağlarının genişlemesi, hızlı şehirleşme, yeraltı kaynaklarının büyük ölçekli kullanımı, büyüyen tesislere ve enerjiye olan ihtiyacı arttırmış, 19. yüzyıl öncesine göre çok daha büyük mühendislik yapılarının ortaya çıkmasına, el ile yapılan zor ve zaman alıcı kazıların makineler ile yapılmasına ve üretimde verimin artırılmasına katkı sağlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte sayısı artan mühendislik yapıları ile zor zemin koşullarında projelendirmeler yapılmış, büyüyen boyutlar nedeniyle emniyetli mühendislik çalışmalarının yapılabilmesi için kaya kütlelerinin mekanik davranışları daha yakından incelenmeye başlanmıştır.

Kaya kütlesi, ihmal edilebilir düzeyde çekme dayanımına sahip olan ve farklı yönlerde gelişmiş süreksizlikler ile bu yapısal süreksizlikler tarafından ayrılmış sağlam (intact) kaya malzemesinin birlikte bulunduğu bir sistemdir (Ulusay, 2001). Süreksizlik terimi kaya kütlelerinde herhangi bir ayrım veya zayıflık düzlemine işaret eder (de Vallejo ve

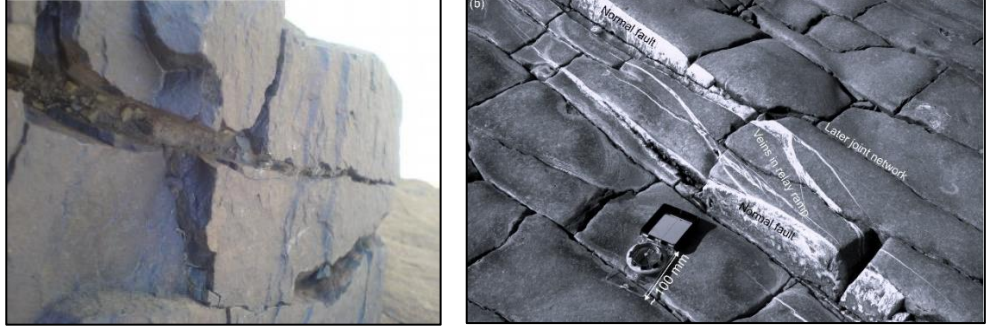
Ferrer, 2011). Kaya kütlesine ait dayanım, şekil değiştirme ve hidrolik özellikleri süreksizlik düzlemlerinin varlığı kontrol eder. Süreksizlikler içeren sert bir kayanın dayanımını belirlemede göz önüne alınan en önemli husus kesme dayanımıdır ve süreksizlikler kaya kütlesini daha zayıf ve daha kolayca şekil değiştirebilir hale getirerek mühendislik yapısı açısından kaya kütlesinin mekanik davranışını değerlendirmeyi oldukça zorlaştırır (de Vallejo ve Ferrer, 2011).

Süreksizlikler, kaya kütlesi içinde bulunan eklem, tabaka düzlemi, fay, klivaj, foliasyon, çatlak gibi mekanik süreksizlik yüzeyleri veya kırıklardır. Kaya kütleleri sürekli, homojen ve izotrop malzemelerden olmayıp, çeşitli süreksizlikler tarafından kesilirler. Bu nedenle, dış yüklere maruz kalabilen söz konusu kütlelerin davranışı, içerdikleri süreksizliklerin özellikleri dikkate alınmadan gerçeğe yakın şekilde analiz veya önceden tahmin edilemez. Kaya kütlesinin tanımlanmasında en önemli aşama, süreksizliklere ait özelliklerin tanımlanmasıdır (Ulusay ve Sönmez 2007).

Kaya kütlesindeki süreksizliklerin kesme (veya makaslama) dayanımının tayini arazide sınırlı koşullarda mümkündür. Bunun için önce kaya şev analizinde yüzeyden veya tünel durumunda yeraltından birincil ve ikincil düzensizlikleri içerecek boyutta “özdeş” numunelerin derlenmesi gerekir. Bir kaya mostrasında veya yeraltından birbirinin çok benzeri olan (özdeş), laboratuvarında bir yenilme zarfı elde etmeye yetecek sayıda birkaç adet blok numunenin alınabilmesi çok zor bir süreçtir. Süreksizliklere ait süreksizlik türü, pürüzlülüğü, dalgalılığı ve süreksizlik yüzeyine ait dayanım, bozuşma derecesi, su durumu vb. gibi özellikleri yüzleklerde (mostralarda) veya sondaj karotları üzerinde değişik ölçüm teknikleri kullanarak tayin etmek ve/veya tanımlamak mümkündür. Tüm bu özelliklerin kaya kütlesinin dayanımının belirlenmesi aşamasında doğru şekilde tanımlanması gerekir.

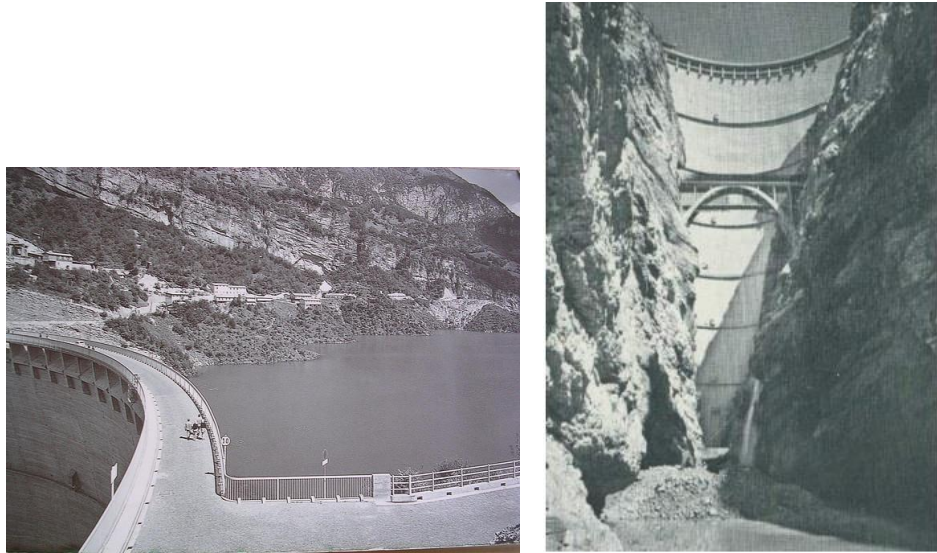
Süreksizlik yüzeylerinde dolgunun varlığı durumunda ise süreksizlik kesme dayanımı dolgu malzemesinin özelliklerinden ve kalınlığından büyük oranda etkilenmektedir. Dolgu maddesinin türü ve mühendislik özellikleri kaya şev analizlerinde ve mühendislik yapılarının inşasında önemli temel verileri sağlamaktadır. ISRM (1981)’e göre dolgu malzemesi süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasını dolduran ve

genellikle kaya malzemesinden daha zayıf olan malzemedir (Şekil 1.1). Bu nedenle kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde daha etkin bir rol oynamaları beklenir.



Şekil 1.1 Kil dolgulu süreksizlik (Naghadehi, 2015) (solda) kalsit dolgu içeren fay zone (Peacock, 2023) (sağda)

Süreksizliklerde dolgunun varlığı duraylılığı önemli şekilde etkileyebilir. Planlama aşamasında dolguların teşhis edilmesi ve tasarımda uygun dayanım parametrelerinin kullanılması önemlidir. Bu duruma örnek olarak İtalya’da 1963’te meydana gelen ve 2500 can kaybıyla sonuçlanan Vaiont heyelanı verilebilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 İtalyan Alplerinin Dolomit Bölgesi’nin güneydoğu kesiminde inşa edilen Vaiont barajı (Hardenberg, 2011)

Barajın inşası sırasında üç test sondajı yapılmış olup mevcut zayıflık alanları tespit edilememiş, ayrıca sismik analizler, kıyıların yerinde oluşmuş yüksek elastisite modülüne sahip çok sağlam kayadan oluştuğunu ortaya koymuştur (Muller 1964). Ancak, 1963'te Şekil 1.3'de verilen yamaçta heyelan nedeniyle felaket boyutunda bir hareket meydana gelmiş, Longarone köyü nüfusunun üçte biri yok olmuştur (Hardenberg, 2011). Heyelanın nedenleri incelendiğinde, kayma yüzeyi üzerinde bulunan 5-15 cm kalınlığındaki kil katmanının yükselen su seviyesi ile birlikte gözenek basıncının artması ve kayma direncinin azalması sonucu yüksek hızlı bir kayma hareketinin gelişmesi olduğu anlaşılmıştır (Voight ve Faust, 1982, 1992).



Şekil 1.3 Vaiont barajından gelen dalgadan sonra Longarone köyünün görünümü (solda) ve heyelan sonrası barajın (sağda) görüntü (Hardenberg, 2011)

Süreksizliklerde dolgu varlığının duraylılığa etkisinin çarpıcı bir örneği de Karadeniz bölgesinde meydana gelen heyelanlardır (Şekil 1.4).

Samsun Yukarı Ağcagüney heyelanında ilk kayıtlar 1984 yılına dayanmasına rağmen 2011 yılında heyelanın hızlandığı ve yapılarda hasar oluşturacak boyuta geldiği, 127 ha. büyüklüğünde alanın etkilendiği, mahalle ve grup içi yollarda heyelan kaynaklı çökmelerin meydana geldiği ve topoğrafyada 12 metreye varan düşey atım ve atım önü göllenmelere sebep olduğu belirtilmiştir (Çoşkunlu vd., 2018). Bu alanda yapılan sondaj ve izleme çalışmalarında sedimanter kaya grubu malzemenin arasında ince jipsli seviyeler bulunduğu ve kaymaların jipsli seviyelerin su ile teması sonucu geliştiği anlaşılmıştır.



Şekil 1.4 Ağcagüney heyelanında topoğrafyanın 2011 mart ayı (solda) ve 2012 mart ayı (sağda) görünümü (Çoşgunlu vd. 2018)

Dolgu varlığının kesme dayanımına olan etkisi, malzemenin kalınlığına ve dayanım parametrelerine bağlıdır. Kalınlık açısından değerlendirildiğinde, süreksizlik yüzeyindeki düzensizliklerin genliğinin %25-50'sinden daha fazla olması durumunda çok az veya sıfır kaya-kaya dokanağı bulunmakta, süreksizliğin kesme dayanımının özellikleri dolgu ile aynı olmaktadır (Goodman, 1970).

Kesme dayanımı – yerdeğiştirme davranışı, süreksizliklerde dolgu bulunduğu durumlarda kesme dayanımı ile birlikte dikkat edilmesi gerekli bir diğer etmendir. Şev duraylılığı analizlerinde bu davranış, kesme dayanımı ile yerdeğiştirme arasında bir azalım olma olasılığının bulunup bulunmadığına işaret etmesi bakımından önemlidir. (Wyllie ve Mah, 2004)

Dolgu malzemesinin kalınlığına bağlı olarak gelişen heyelanlara İstanbul Beylikdüzü ilçesinde bulunan Gürpınar heyelanları örnek olarak gösterilebilir. Bölgede İmre (2011) tarafından yapılan tez çalışmasında tüfitler arasında kalın kil dolguların bulunduğu, kireçtaşı biriminin kum ve çakıl mercekleri ile kesildiği ve kaymaların bu seviyelerde meydana geldiği, yeraltı suyu etkisi ile geniş alanlarda heyelanlar ve yapılarda ciddi hasarlar görüldüğü, heyelan göllerinin oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 1.5).

Kaya kütlesindeki süreksizliklerin kesme dayanımının tayin edilmesi, örnekleme ve laboratuvar aşamasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle zaman alıcı bir süreçtir. Kesme dayanımını etkileyen süreksizliklerin yüzey sertliği, süreksizliğin pürüzlülüğü, süreksizlik dolgusu ve su varlığı gibi faktörlerin kaya kütlesinin dayanımının belirlenmesi aşamasında doğru şekilde tanımlanması gerekir. Süreksizlik yüzeylerinin dolgulu olması durumunda süreksizlik kesme dayanımı dolgu türüne ve dolgu kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Kaya türü değişmese bile dolgulu ve dolgusuz süreksizliklerin makaslama dayanımını kontrol eden faktörler değişmekte ve kaya kütlesinin makaslama dayanımı dolgu türü ve kalınlığından etkilenmektedir.



Şekil 1.5 Gürpınar heyelan bölgesinin genel görünümü (solda) ve bölgede oluşan heyelan gölü (sağda) (İmre, 2011)

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda genellikle laboratuvarda üretilen pürüzlülük açısı (i) belli testere dişi şekilli yapay modeller (Goodman 1970, Ladanyi ve Archambault 1977, Lama 1978, Kutter vd. 1979, Phien-Wej vd. 1990, Ehrle 1990, Papaliangas vd. 1993, Indraratna 2005, 2008, 2013, Sinha vd. 2000, Sadaghiani 2014) ve yapay süreksizlikler üzerinde dolgu kalınlığının süreksizlik dayanımı üzerindeki etkisi (Lama 1978, Papaliangas 1993, Kanji 1974, De Toledo vd. 1993) ve sınırlı olarak da süreksizlik kesme dayanımına dolgu etkisi incelenmiştir. Doğal kaya numunelerinin kullanıldığı çalışmalarda ise (Tulinov vd. 1971, De Toledo vd. 1993, Naghadehi 2015, Karakuş vd. 2016, Demirezen 2019) tek tip dolgu malzemesi kullanılarak dolgu kalınlığının etkisini konu alan araştırmalar yürütülmüştür.

Kaya kütlelerinin dayanımını doğrudan kontrol eden süreksizlik dolgusu ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Literatürde genellikle laboratuvar modelleri ve tek t  p dolgu malzemesi ile deneylerin yürütüldüğü görülmektedir. Araştırma konusu ile ilgili olarak yapılan literatür taramasında süreksizliklerdeki dolgu varlığının en belirgin etkisinin kaya kütlesindeki eklemleri ayırması ve kaya-kaya kontağını azaltması olarak görülmüştür. Dolgulu süreksizliklerde dolgu kalınlığındaki artışa karşılık kesme dayanımının azalması bu görüşü desteklemiştir. Temiz süreksizliklerin kesme davranışı pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Goodman 1976, Patton 1966, Barton ve Choubey 1977, Bandis 1980). Ayrıca kaya mühendisliğinde kesme parametreleri için pek çok model ve ampirik formül geliştirilmiştir. Ancak, dolgulu süreksizliklerde yapılan çalışmalar daha zor olduğundan dolayı literatürde daha az çalışma mevcuttur.

Bu tezin amacı tek eksenli sıkışma dayanımları ve kökenleri farklı birkaç çeşit kayada oluşturulan yapay süreksizlikler üzerinde farklı tür, dayanım ve kalınlıklarda dolgular kullanmak suretiyle dolgulu süreksizliklerin kesme dayanımını tayin etmek; elde edilen bu dayanımları aynı koşullarda hazırlanmış dolgusuz, taze yüzeylerin kesme dayanımları ile karşılaştırmak ve farklı tür, dayanım ve kalınlıklardaki yapay dolgu malzemelerinin kesme dayanımını nasıl değiştirdiğini sayısal verilerle ortaya koymaktır.

2.KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Süreksizliklerin Kesme Dayanımının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

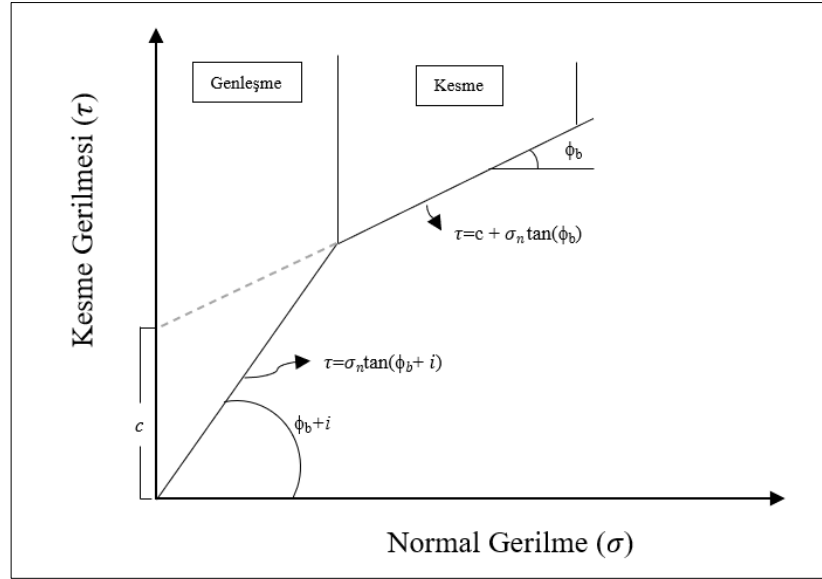
Bu bölümde süreksizliklerin kesme dayanımının ortaya konulması için yapılan çalışmalar ve önerilen modeller kısaca tanıtılmıştır. Süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesi ve süreksizlik kesme dayanımına etki eden parametrelerin belirlenmesine yönelik çalışmalar pek çok araştırmacı tarafından yürütülmüştür (Patton 1966, Jaeger 1971, Barton 1971a, 1971b, Coulson 1972, 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.).

Süreksizlik yüzeyleri genellikle pürüzlü bir yapıdadır. Fakat, 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.

Patton (1966) süreksizliklerin kesme direncinin temel sürtünme açısı (ϕ_b) ile pürüzlülük açısı (i) olarak iki bileşen içerdiğini belirtmiştir. Patton (1966)'a göre, pratik olarak hiçbir pürüzlülük yüzeyinde tıraşlanma söz konusu olmadığı düşük normal gerilme koşullarında, süreksizliklerin kesme dayanımını (τ) aşağıdaki gibidir.

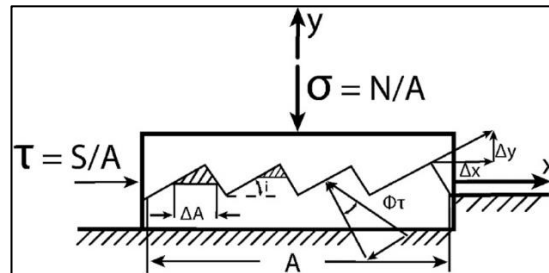
$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$$

Bu eşitlikte σ_n normal gerilme, ϕ_b temel sürtünme açısı ve i pürüzlülük açısıdır. Patton (1966) düşük ve yüksek normal gerilmeleri dikkate alan, deneysel olarak gözlemlenen pürüzlü süreksizlik yüzeyleri için çift eğrili bir yenilme zarfı önermiştir (Şekil 2.1). Yenilme mekanizmasındaki değişim, kesme dayanım zarfının eğiminde meydana gelen değişim ile belirlenir.



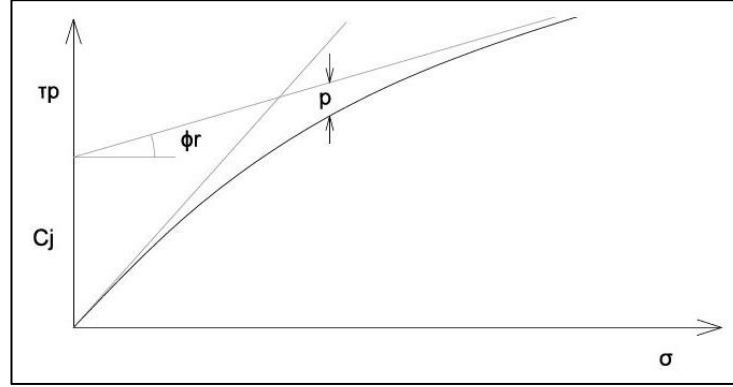
Şekil 2.1 Patton'ın çift eğrili yenilme modeli (Patton, 1966)

Ladanyi ve Archambault (1969) kesme mukavemeti kriteri, malzeme mukavemeti parametrelerini, kesme alanı oranını, genleşmeyi ve pürüzlülük açısını içeren bir kriterdir. Testere dişli düzenli pürüzlülüklerden oluşan süreksizlik yüzeyinde kaymanın gerçekleşeceği ve pürüzlerin kırılacağı alanların belirlenerek kesme dayanımının tayin edilmesini esasına dayanır. Bu araştırmacılar kesme deneyi sırasında gerilmenin eşit olarak dağılmayacağını dolayısıyla bazı süreksizliklerin doruk gerilme değerine ulaşmadan kırılabileceğini varsaymıştır. Önerilen ölçütün şematik gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. 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)

Jaeger (1971) süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmış ve süreksizliklerin davranışlarını modellemek için doğrusal olmayan bir eşitlik önermiştir. Önerilen ölçütün şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir.

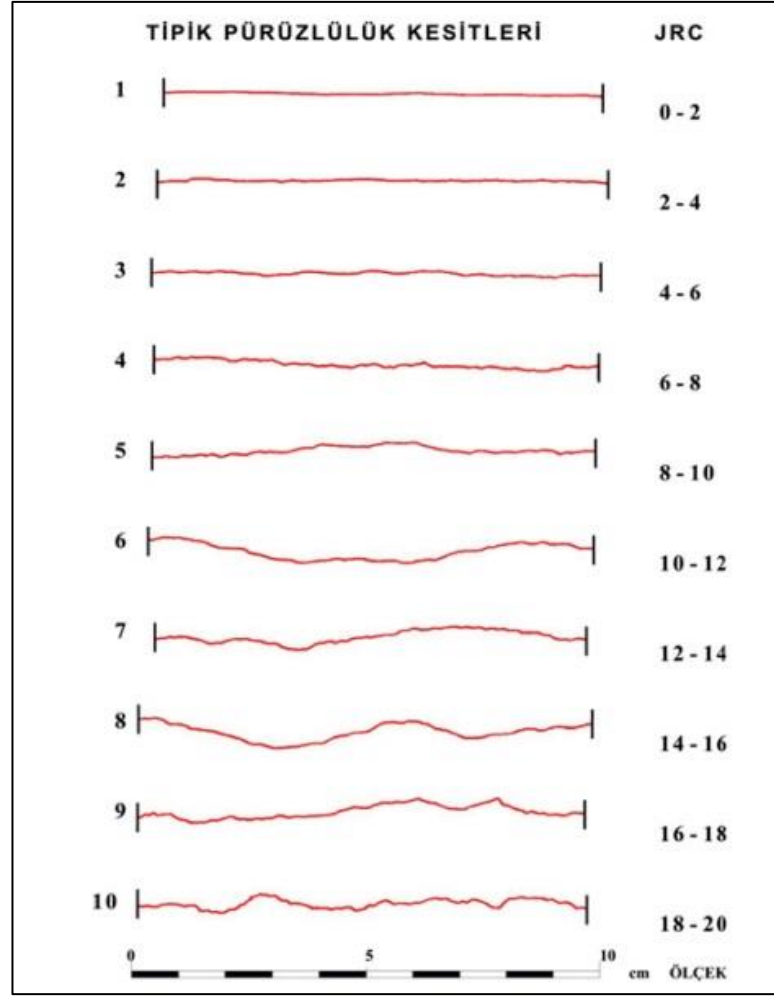


Şekil 2.3 Jaeger (1971) tarafından önerilen yenilme ölçütünün kavramsal görünümü

Barton ve Choubey (1977)'e göre genellikle yüzey pürüzlülüğü makaslama dayanımını arttırıcı yöndedir ve bu dayanım artışı kayadaki duraylılık açısından oldukça önemlidir (Barton vd., 1974). Barton (1973 ve 1976) doğal kaya eklemlerin davranışlarını içeren çalışma sonucunda aşağıda verilen yenilme ölçütünü önermiştir.

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

Burada, JRC eklem pürüzlülük kat sayısı ve JCS ise eklem yüzey dayanımıdır. JRC değerinin bulunabilmesi için ölçülen pürüzlülük kesitleri, Şekil 2.4'te verilen ve Barton ve Choubey (1977) tarafından tanımlanan pürüzlülük kesitleri ile karşılaştırılır.



Şekil 2.4 JRC belirlenmesinde kullanılan pürüzlülük profilleri (Barton ve Choubey, 1977).

Barton ve Choubey (1977) bozuşmuş kayalardaki eklem yüzeylerinin doğrudan makaslama kutusu deney sonuçlarını kullanmış ve bozuşmuş süreksizlikler için makaslama dayanım formülünü aşağıdaki bağıntı olarak revize etmiştir.

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

Burada ϕ_r artık sürtünme açısıdır. Barton ve Choubey (1977) artık sürtünme açısının tahmini için aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20\left(\frac{r}{R}\right)$$

Burada, r bozuşma yüzeyinin veya ıslak yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeri, R ise bozuşmamış yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeridir.

Bandis (1980) kesme dayanımında ölçek etkisini farklı boyutlara sahip numuneler üzerinde incelemiş ve doruk kesme dayanımı üzerinde ölçek etkisinin bulunduğunu göstermiştir. Pürüzlü yüzeylerin düz yüzeylere oranlara daha fazla ölçek etkisinde kaldığını, bunun sebebinin büyük ölçekli numunelerin farklı pürüzlülükler barındırması, ayrıca boyut ile birlikte JRC ve JCS değerinde meydana gelen azalmaya bağlı olduğunu belirtmiştir.

Haque (1999) dolgulu ve dolgusuz süreksizliklerin kesme dayanımı özelliklerini sabit normal rijitlik (CNS) ve sabit normal yük (CNL) sınır koşullarında incelemiştir. Çeşitli koşullarda gerçekleştirilen deneylerin sonucunda CNS koşullarında dolgusuz süreksizliklerin kesme yer değiştirme oranında artışa katkı sağladığı ve CNL testine göre gerçeğe daha yakın sonuçlar sunduğu görülmüştür. Dolgulu ve CNS koşullarındaki süreksizliklerde kesme dayanımının dolgusuz koşullara göre önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Pik kesme dayanımına karşılık gelen yer değiştirme miktarının dolgu kalınlığının artışıyla paralel olduğu fakat bu artışın dolgu kalınlığının (t) pürüzlülük genliğini (a) aşınca kadar devam ettiği anlaşılmıştır.

Gravel vd. (2015) çeşitli arazi koşullarında kullanılabilen basit bir kesme deney cihazı kullanarak yerinde kesme deneyleri uygulamıştır. Çalışma sonucunda birinci derece pürüzlülüğün ve süreksizlik yüzeylerinin kenetlenmesi ve yüksek sürtünme açısı değerlerinin düşük dayanım değerlerine sahip olduğu düşünülen bir kayada yüksek kesme dayanımı parametreleri sunabileceğini göstermiştir. Laboratuvar ortamına kıyasla yerinde yapılan deneylerde pürüzlülüğün kesme dayanımı ve genişleme üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır.

Özvan (2010) süreksizlik yüzeyindeki bozuşmanın ve yüzeylerdeki pürüzlülük parametresinin pürüzlülük üzerindeki etkisini incelediği çalışmasında farklı bozuşma

derecesine ve farklı kökene sahip kayalar üzerinde pürüzlülük açılarını belirlemiştir. Yapılan çalışmada kayanın kökenine bağlı olarak pürüzlülük oluşum mekanizmaları farklılık gösterdiğinden kesme dayanımını arttırıcı ve azaltıcı yönde etkiler bulunduğu anlaşılmıştır. ISRM (1981)'de genel kabul gören pürüzlülüğün artışı ile süreksizlik düzlemlerinde kesme dayanımında da artış olacağı koşulunun tüm kayalar için geçerli olmayabileceği bu çalışma sonucunda belirlenmiştir.

2.2 Dolgulu Süreksizliklerin Kesme Dayanımlarının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Dolgulu süreksizliklerde makaslama dayanımını kontrol eden en önemli parametreler arasında dolgunun türü ve kalınlığı bulunmaktadır. Pürüzlü süreksizliklerde dolgulu eklemlerin kesme davranışı eklem yüzeyinin geometrisine ve dolgu malzemesinin kalınlığına bağlıdır. Lama (1978), Papaliangas (1993) gibi araştırmacılar dolgu kalınlığı arttığında kesme dayanımının azaldığını belirtmiş, Kanji (1974) yaptığı çalışmada eklemlerin pik kesme dayanımının dolgulu süreksizliklerden daha düşük olabileceğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca De Toledo ve De Freitas (1993) dolgulu süreksizliklerin kesme dayanımının eklem yüzeyinin geometrisine bağlı olduğunu belirtmiştir. Fakat dolgu kalınlığı pürüz yüksekliğinin iki katı olduğunda kaya-kaya kontağı kesilir ve dayanım dolgu malzemesi tarafından kontrol edilmeye başlanır (Jahanian vd. 2015).

Goodman (1970) tarafından yapılan çalışmada testere dişi biçimli eklemler ezilmiş mika ile doldurulmuş ve kalınlık/genlik (t/a) oranı 1,25'in altında olan oranlarda eklemlerin dayanımının dolgulu olanlardan daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tulinov ve Molokov (1971) kireçtaşı, kumtaşı ve marn örnekleri ile dolgu malzemesi olarak kalınlığı 5-6 mm olan kum ve kil kullanmıştır. İnce bir kum tabakası dolgusunun yumuşak ve sert kayalar üzerindeki sürtünme davranışını incelemişler, sert kayaların içsel sürtünme açısının marn gibi yumuşak kayalara göre dolgudan daha az etkilendiğini belirtmişlerdir.

Ladanyi ve Archambault (1977)'ın beton bloklar arasına kaolin kili kullanılarak yapılan doğrudan kesme deneylerinin sonucu Goodman (1970) ile benzerdir. Araştırmacılar ayrıca dolgulu süreksizliklerde daha dik pürüzlülük açısı ve düşük t/a oranlarının kesme dayanımının etkilediğini belirtmişlerdir.

Lama (1978) gerilme çatlaklarının benzerlerini kullanarak yaptığı bir dizi testte, sert jips ve kaolin dolgu kullanmıştır. $t/a = 0,35-0,72$ arasında olduğunda eklemlerin kesme dayanımı düşmekte, $t/a = 0,07-0,25$ arasında olduğunda dayanım neredeyse %50 azalmakta, $t/a > 2,0$ olduğunda eklem dayanımı dolgu malzemesi tarafından kontrol edilmektedir.

Kutter ve Routhernberg (1979) yaptıkları çalışmada yüzey pürüzlülüğü arttığında kil dolgulu eklemlerin de dayanımının arttığını, ancak kum dolgulu eklemlerde yüzey pürüzlülüğünün dayanıma etkisinin olmadığını gözlemiştir.

Phien-Wej vd. (1990) doğrudan kesme testini fırında kurutulmuş bentonit ile dolgulu jips örnekleri üzerinde uygulamıştır. Sonuçlara göre eklemlerin dayanımı $t/a = 2,0$ olduğunda dolgunun dayanımına eşit olduğunu rapor etmişlerdir.

Ehrle (1990) epoksi reçine ve kum kullanarak yaptığı örneklerde dolgu malzemesi olarak kum karışımı, kaolinit, barit, jips ve su kullanmış; ayrıca yüzey pürüzlülüğü (JRC) 0-10 arasında değişen örnekler hazırlamıştır. Deney sonuçlarına göre dolgu malzemesi içsel sürtünme açısını azaltırken eklemlerin kohezyonunu arttırdığı gözlenmiştir.

Papaliangas vd. (1993) kaolin dolgulu süreksizliklerde yaptıkları deneylerde t/a oranı 0,1'den düşük olduğunda temiz eklemlerin kesme dayanımının dolgulu olanlara göre %50 daha az olduğu, t/a oranı arttığında dayanımın azalmaya devam ettiğini gözlemişlerdir. Mermer tozu gibi sürtünmeli dolguların kesme dayanımını daha az düşürdüğünü, en düşük kesme dayanımını kaolin için $t/a = 1,0$ ve mermer tozu için $t/a = 1,5$ olduğunda elde edildiği belirtilmiştir.

Hutson ve Dowding (1990) pürüzlerin tıraşlanma mekanizmasında süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğü, uygulanan normal gerilme ile birlikte süreksizlik UCS değerinin önemli rolü olduğunu belirtmişlerdir.

De Toledo ve De Freitas (1993) kumtaşı ve Gault kilinde kesme davranışı üzerinde dolgunun etkisini tanımlamak için halka kesme deneyi uygulamışlardır. Eklemler iki farklı gerilme seviyesinde ve 1,0 MPa sabit normal gerilme altında birleştirilmiştir. Sonuçlara göre t/a oranı 1,0'den büyük olduğunda eklemlerin kesme dayanımı dolgu ile aynı olduğunu, $t/a < 1,0$ olduğunda kaya-kaya kontağı meydana geldiği için eklemlerin kesme dayanımının yüzey pürüzlülüğü tarafından kontrol edildiğini belirtmişlerdir.

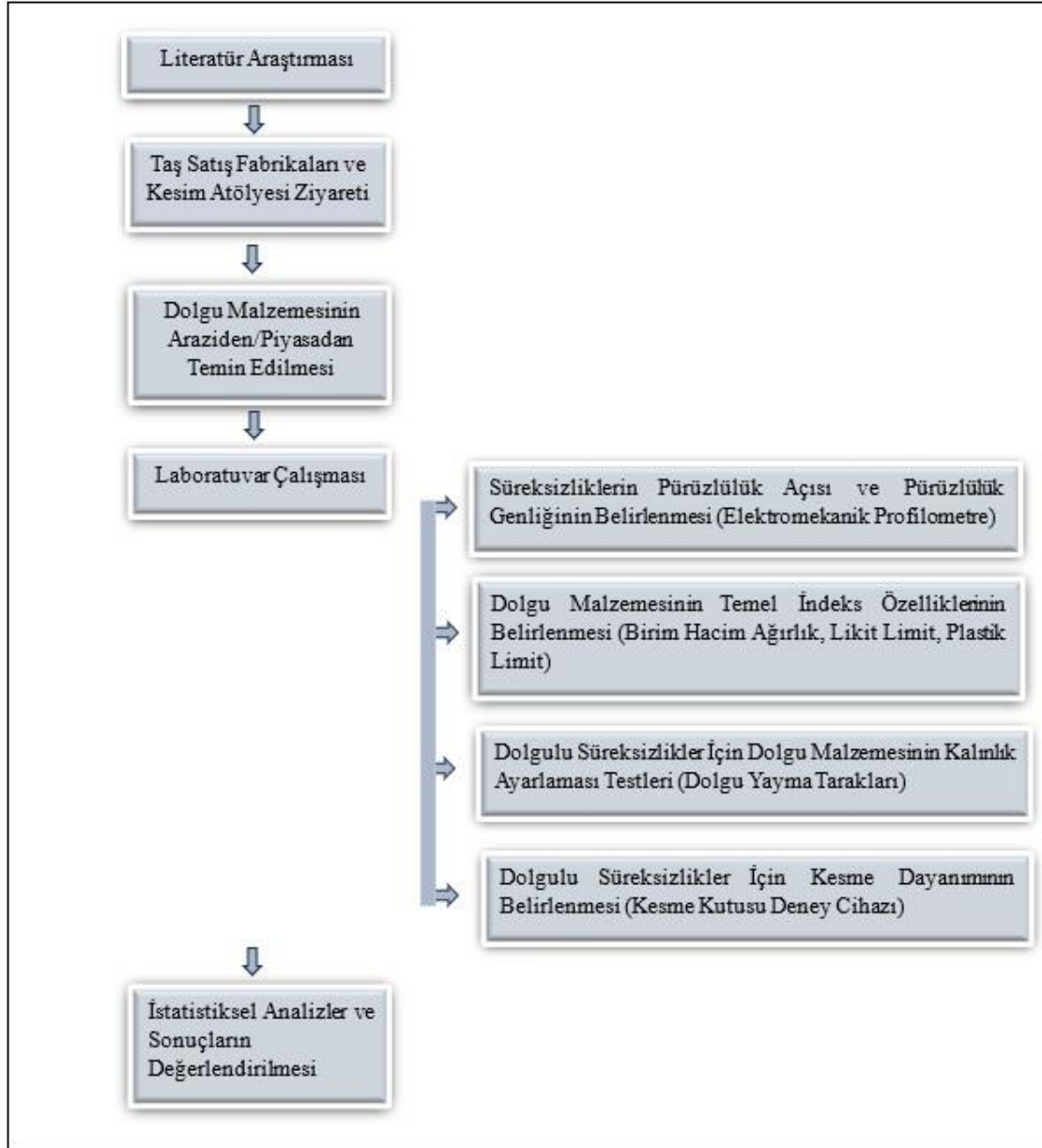
3. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Tez çalışması, arazi çalışmaları, büro çalışmaları ve deney sonuçlarının değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Arazi çalışmaları kapsamında tez çalışması için kullanılacak toplam 6 farklı kaya örneğinin temini sağlanmıştır. Örneklerin homojen ve kırıksız olmasını sağlamak amacıyla taş satış fabrikalarından temin edilmesi yoluna gidilmiştir. Birbirinden farklı dayanıma sahip kaya numunelerinin seçilmesine özen gösterilmiş olup, tek eksenli sıkışma dayanımı sonuçları aynı kaya örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmadan (Beyhan, 2024) alınmıştır. Yumuşak dolgu olarak kullanılacak kil malzemesinin temini için Ankara ili içerisinde farklı lokasyonlardan kil numuneleri alınmış ve laboratuvara nakledilmiştir. Yine düşük ve yüksek dayanımlı sert dolguyu temsil edici dolgu malzemeleri piyasadan temin edilmiştir. Büro çalışmasında dolgulu süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesi ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Bu kapsamda kesme dayanımının belirlenmesi için temel oluşturan Patton çift eğrili yenilme zarfı ve önerilen diğer yöntemler incelenmiştir. Laboratuvar çalışmaları kapsamında kaya satış fabrikalarından temin edilen küp taşların özellikleri belirlenmiş, pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliği tayinleri yapılmıştır. Dolgu malzemeleri için araziden alınan yumuşak dolgu numuneleri üzerinde zemin parametreleri belirlenmiş, piyasadan temin edilen sert dolgu malzemeleri için tek eksenli ve üç eksenli sıkışma deneyleri yapılmıştır. Dolgu malzemesinin süreksizlik yüzeylerine uygulanması ve kalınlık ayarlaması yapılabilmesi için çeşitli teknikler geliştirilip yardımcı malzeme üretimi yaptırılmıştır. Kesme kutusu deneylerinin daha pratik uygulanmasını sağlamak için yeni deney kalıpları tasarlanmış ve deneme testleri yapıldıktan sonra çalışma kapsamında deneylerde kullanılmıştır. Tez çalışmasına ait akış diyagramı Şekil 3.1’de verilmiştir.

3.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Araştırmada malzeme olarak kaya ve çeşitli dolgu türleri kullanılmıştır. Çalışma ile ilgili deneyler için kullanılan düzenekler baltalı pres, elektromekanik profilometre, doğrudan kesme deney seti, üç eksenli sıkışma dayanımı deney cihazı ve zeminde doğrudan kesme deney cihazıdır. Verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi için

SPSS ve DATAFIT yazılımları kullanılmıştır. İlgili deney cihazlarının kullanılması ve deney numunelerinin hazırlanmasında güncel standartlara ve prosedürlere uyulmuştur. Çalışmada kullanılan malzemelere ait ayrıntılar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1 Tez çalışmasında takip edilen eylem akış şeması

3.1.1 Kayalar

Süreksizlikler üzerinde yapılması gereken doğrudan kesme deneylerinin normal şartlarda doğal süreksizlik yüzeylerini içeren kayalar üzerinde uygulanması gerekir. Ancak, bu tez çalışması gibi parametrik bir çalışmada yeterli çeşitlilikte ve sayıda doğal kaya numunesinin elde edilmesindeki zorluklar, çalışma boyunca numune devamlılığının olması ve özdeş numunelerin kullanılması gerekliliği ile ekonomik boyut dikkate alınarak, deneylerde kullanılacak süreksizliklerin laboratuvar ortamında oluşturulması yolu tercih edilmiştir. Bu amaçla deneyler için kullanılacak kaya numuneleri taş kesim fabrikalarından temin edilmiştir. Elde edilen numuneler 15x15x15 cm boyutunda olup, gözle görülebilecek herhangi bir süreksizlik içermemesine dikkat edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılacak kaya örneklerinin homojen ve izotrop olması ayrıca dayanım çeşitliliği sunmasına özen gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere önce 3 çeşit kaya numunesi temin edilmiş olup, elde edilen sonucun performans değerlendirmesi için 3 çeşit kaya sonradan çalışmaya dahil edilmiştir. Toplamda 6 farklı dayanım ve kökene sahip kayalar deney programı kapsamında kullanılmıştır.

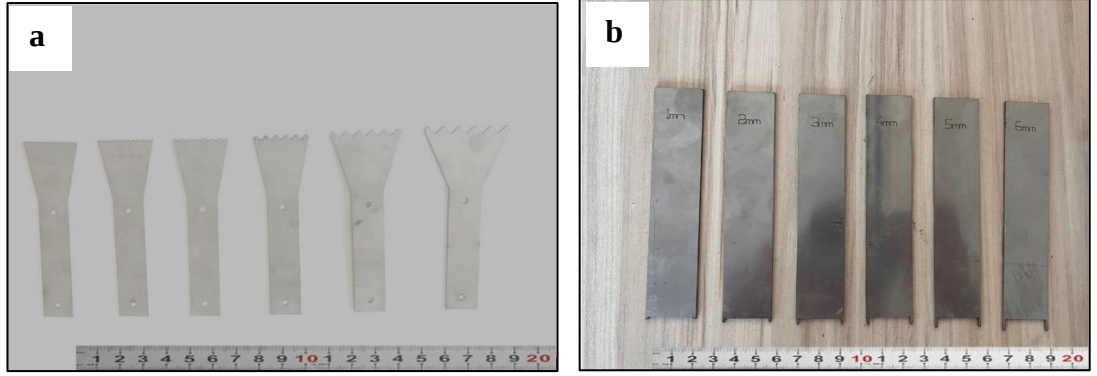
3.1.2 Dolgu malzemeleri

Süreksizlik dolgusu olarak kullanılmak üzere 3 farklı çeşit dolgu malzemesi araziden ve piyasadan temin edilmiştir. Yumuşak (kil) dolguyu temsilen Ankara civarında farklı noktalardan numuneler alınmış ve Atterberg deneyleri uygulanmıştır. Çalışma amacına uygun olacak şekilde plastikliği orta derecede bir dolgu malzemesi kullanılması planlanmış ve araziden temin edilen numuneler arasından laboratuvar da yapılan deneme testleri sonucu $LL = 50,5$ ve $PL = 32,2$ olan kil malzemesi dolgu uygulanmasına ve hedeflenen kalınlığın yüzeye eşit şekilde uygulanmasına imkan tanıdığından deneyler için tercih edilmiştir. Sert-1 (kalsit) dolguyu temsilen klasik alçı malzemeleri ile birlikte diğer katkılı alçılar denenmiştir. Sert-1 dolgu olarak isimlendirilen dolgu malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ISRM standartlarına uygun olarak belirlenmiş, farklı koşullar altında dayanımı yüksek ve tutarlı sonuç veren, piyasa adı *Moldastone CN* olan, alfa alçı adıyla bilinen malzeme kullanılmıştır. Sert-2 (kuvars ya da amorf silis) dolguyu temsilen reçine kullanılmıştır. Genel amaçlı polyeşter reçine içerisine tuz

katkısı eklendikten sonra ASTM D 7012 standartlarına uygun tek eksenli sıkışma dayanımı tayin edilmiştir.

3.1.3 Dolgu yayma tarakları

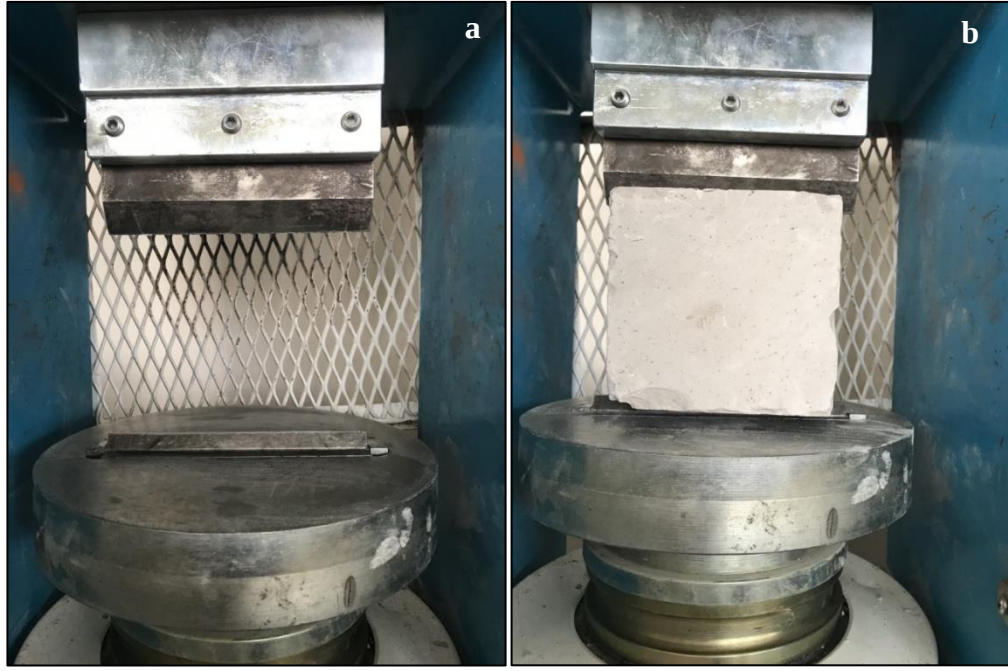
Süreksizlik yüzeyine uygulanacak farklı kalınlıklardaki dolgunun kalınlık ayarlaması için yöntem olarak çelik bilyeler ve farklı diş yüksekliğine sahip (0,5 – 6,0 mm) dolgu yayma tarakları denenmiş olup hedeflenen kalınlık elde edilemediğinden Şekil 3.2’de verilen 1,0- 6,0 mm arasında değişen diş yüksekliğine sahip dolgu yayma tarakları imal ettirilmiş ve dolgu kalınlıkları bu taraklar yardımıyla ayarlanmıştır.



Şekil 3.2. Başlangıçta kullanılan dişli taraklar (a) ve yeniden tasarlanan alternatif taraklar (b)

3.1.4 Baltalı pres

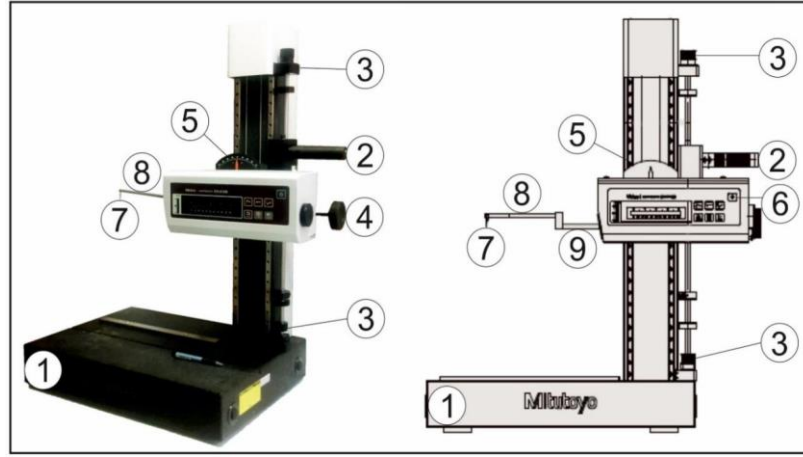
Statik yükler altında dolgulu kesme deneylerinin yapılması amacıyla 15x15x15 cm boyutlarında numuneler üzerinde yapay süreksizlikler oluşturularak deney numuneleri hazırlanmıştır. Habibzadeh (2020) tarafından yapılan çalışmada laboratuvar koşullarında baltalı pres yardımıyla oluşturulan süreksizliklerin özdeş özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir. Tez kapsamında kullanılacak numunelerde yapay süreksizlik oluşturulması amacıyla UCS deney aletinde bazı kısımlar modifiye edilmiş ve baltalı pres cihazı olarak kullanılmıştır. Pres başlığı yerine kesme aparatları deney cihazı üzerine monte edilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 a) Baltalı pres cihazı ve yardımcı aparatları b) numune yerleşimi

3.1.5 Profilometre

Baltalı pres cihazı yardımıyla oluşturulan süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ölçümleri laboratuvarında elektromekanik profilometre cihazıyla yapılmış, yüzey pürüzlülük profilleri çıkarılmış ve pürüzlülük açıları belirlenmiştir. Ölçümler Mitutoyo marka cihazla (Şekil 3.4) kesme yönüne paralel ve kesme yönüne dik olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Cihazın ölçüm kapasitesi, yatay yönde 10 cm ve düşey yönde 5 cm'dir. Ölçüm hızı 0,02 ile 5 mm/s arasında değişmektedir. Çalışma kapsamında ölçüm hızı 1 mm/s olarak seçilmiştir. Bu cihazda yüzey taramasında kullanılan sivri kısım, destek mekanizması ile desteklenmekte ve sürücü ünitesine bağlı olarak çalışmaktadır. Sivri ucun süreksizlik yüzeyinde gezdirilmesi sırasında sivri uç dikey ekseninde hareket etmektedir. Tarama esnasında cihaz üzerinde bulunan kaya numunesinin hareketsiz kalması ölçüm hassasiyeti için gereklidir. Tarama işlemi tamamlandıktan sonra pürüzlülük verileri yatay ve düşey düzlemede bilgisayar programına aktarılır.



Şekil 3.4 Profilometre deney cihazının detayları; 1) Kaide, 2) Yükseklik ayarlama kolu, 3)ayar düğmesi, 4) Ölçüm ünitesi eğim ayar 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)

3.1.6 Doğrudan kesme deney seti

Doğrudan kesme deneyleri için 15x15x15 cm boyutlarında örnekler kullanılmış olup, numune hazırlama sürecini de kısaltmak amacıyla, klasik yöntemde alçı vb. malzemeler ile sabitlenerek kullanılan kalıplar (Şekil 3.5) uygun boyut ve özelliklerde vidalar ve çelik destekler kullanılarak yeniden tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 3.6). Doğrudan statik kesme deneyleri kapsamında, 10-20 cm aralığındaki tüm boyutlarda kaya numuneler için uygun olacak şekilde iki adet kaya kesme kutusu numune kalıbı imal ettirilmiştir. Numune hazırlamanın zorluğu ve sabitleme amaçlı kullanılacak herhangi bir harç malzemesinin kuruma süresi de göz önüne alınarak, süreci oldukça hızlandıracak şekilde ayar vidaları ve çelik plaka destekler yardımıyla numune sabitleyebilecek bir sistem tasarlanmıştır.

Öncelikle kaya numunenin alt bloğu alt numune kalıbına yerleştirilip, ayar vidaları yardımıyla sabitlenmektedir. Sabitlenen kaya alt bloğunun üzerine süreksizlik yüzeyi tamamen örtüşecek şekilde kaya üst bloğu yerleştirilir. Tamamen uyumlu şekilde yerleştirilen üst bloğun kenarlarına yükseltme amaçlı çelik aparatlar, onların da üzerine numune üst bloğunu kuşatacak şekilde çelik plaka sabitleme destekleri yerleştirilir (Şekil 3.7). Numune kalıbının üst bloğu yerleştirilip, alt blok ile kenarları birbirine denk

gelecek şekilde hizalanarak ayar vidaları sıkılır. Böylece numune üst bloğu ile kalıbı da sabitlenmiş olur.



Şekil 3.5 Klasik deney yönteminde alçı ile doldurulup sabitlenen kaya örnekleri (numune boyutları 15x15 cm)



Şekil 3.6 Ayar vidaları ve çelik destekler yardımıyla istenilen boyutta numune sabitleyebilen kalıplar ve numunelerin sabitlenmiş görünüşleri (numune boyutları 15x15 cm)



Şekil 3.7 Kaya üst bloğunun yerleştirilmesi ve bloğu kuşatacak çelik plaka desteklerinin dizilimi

Deney cihazı "Wille Geotechnik" tarafından üretilmiştir (Şekil 3.8). Normal ve kesme yükleri, hidrolik pompalar ile uygulanmaktadır. Hidrolik pompalar en fazla 300 kN'luk normal ve kesme yükü uygulamaktadır. Cihaz statik ve dinamik kesme deneyi yapabilmektedir. Normal ve kesme yer değiştirmeleri % 0,5 hassasiyet ile çalışan yer değiştirme göstergeleriyle ölçülmektedir. Çalışma kapsamındaki kesme deneyleri sabit yük yöntemi (CNL) ile gerçekleştirilmiştir Normal ve kesme yerdeğiştirme miktarları % 0,5 hassasiyet ile çalışan yerdeğiştirme göstergeleri ile ölçülür. Deformasyon ölçerler 25 mm ölçüm aralığına sahiptir ve 0,001 mm hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Düşey deformasyon ölçer üst çerçeveye bağlanır ve dönüştürücü ile ölçülür. Yatay deformasyon ölçer, alt kesme kutusu kısmına sabitlenmiş bir LVDT (Doğrusal Değişken Diferansiyel Dönüştürücü) ile ölçülmektedir. Deney sırasında soğutma işlemini yapabilmek için sürekli akışa sahip şebeke suyu gereklidir. Elde edilen dayanım verilerini kayıt altına almak için veri toplayıcı ve inceleme yapabilmek için yüksek çözünürlüğe sahip dönüştürücüler kullanılmaktadır. Deneyler GEOsys yazılımı ile kayıt altına alınmaktadır.

3.1.7 SPSS yazılımı

SPSS (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 ve hem basit hem de oldukça karmaşık istatistiksel analizler için çeşitli prosedürler uygular (Frude 1987).



Şekil 3.8 Çalışmada kullanılan kesme deney cihazından değişik görünümeler

SPSS sosyal bilimler, pazar araştırmaları, sağlık bilimleri, eğitim araştırmaları ve işletme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Araştırmacılar, akademisyenler ve iş profesyonelleri genellikle SPSS'yi kullanarak veri toplanması, veri ayıklama, veri analizi ve sonuçların raporlama gibi işlemleri gerçekleştirir. 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 raporları görüntüler (Oakdale Engineering, 2008).

3.2 Çalışmada Kullanılan Yöntemler

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan yöntemler tanıtılmıştır. Yapay süreksizlik yüzeylerinin ne şekilde oluşturulduğu, pürüzlülük açılarının tayini, pürüzlülük genliğinin belirlenmesi, dolgu malzemesinin seçimi ve ilgili parametrelerin belirlenmesinin hangi standartlara uygun olarak gerçekleştirildiği, deney numunelerinin teste uygun hale nasıl getirildiği ve deney düzeneğinde test edildiği hususları izleyen alt bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2.1 Yapay süreksizlik yüzeylerinin elde edilmesi

Çalışma kapsamında uygulanması planlanan doğrudan kesme deneyi için araziden numune alınması, alınan numunelerin özdeş özelliklere sahip olması oldukça zordur. Tutarlı ve kıyaslanabilir veri elde edilebilmesi için deneylerde kullanılacak dolgulu

süreksizliklerin yapay olarak laboratuvar koşullarında oluşturulması daha uygulanabilir bir yoldur. Tez kapsamında kullanılacak numunelerde yapay süreksizlik oluşturulması amacıyla UCS deney aletinde bazı kısımlar modifiye edilmiş ve baltalı pres cihazı olarak kullanılmıştır. Yükleme başlığı yerine kesme aparatları deney cihazı üzerine monte edilmiştir. 15x15x15 cm kübik numuneler tam ortadan, kesme yönüne paralel olacak şekilde bir kılavuz hat çizilip bu hat boyunca yarılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Baltalı pres düzeneğinde kübik numunelerde yapay süreksizlik oluşturulması (solda) ve kılavuz hat çizilmiş numuneler (sağda)

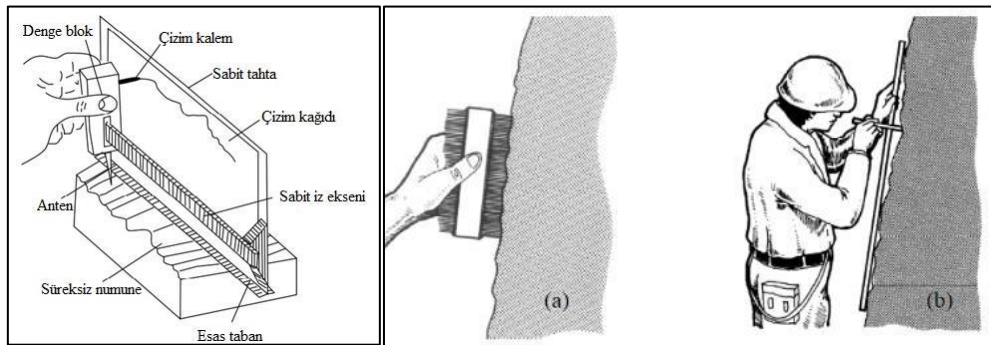
Baltalı pres yardımıyla yapay süreksizlikler oluşturulduktan sonra kesme deneyini etkileyecek hatalı durumlar ve konkav/konveks kırılan yüzeylere ait numuneler ayıklanmış, deneye uygun olan numuneler kesme deneylerinde kullanılmak üzere depolanmıştır. Deneye uygun olan ve olmayan numunelere ait yüzey görüntüleri Şekil 3.10 de verilmiştir.



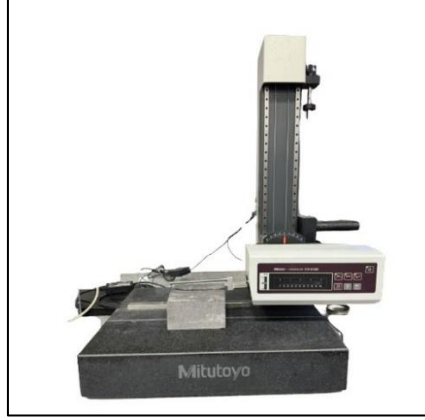
Şekil 3.10 Deney için kullanılabilir (solda) ve konkav/konveks kırılmış yüzeylere ait görüntüler (sağda) (numune ebatları 15 cm’dir)

3.2.2 Pürüzlülük açılarının belirlenmesi

Baltalı pres cihazı yardımıyla oluşturulan süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ölçümleri laboratuvarıda elektromekanik profilometre cihazıyla yapılmış ve pürüzlülük açıları ile pürüzlülük genlikleri belirlenmiştir. Kaya mekaniğinde süreksizliklerin pürüzlülük değerlendirmesi klasik yöntemde el profilometresi (Şekil 3.11) ile tayin edilir. Bu çalışmada pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo marka CV-2100 model cihazla gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz daha hassas ölçüm yapabilen elektromekanik bir ölçüm cihazıdır (Şekil 3.12).



Şekil 3.11 Kaya süreksizliğinden el profilometresiyle pürüzlülük ölçümü (Ulusay ve Sönmez, 2007)

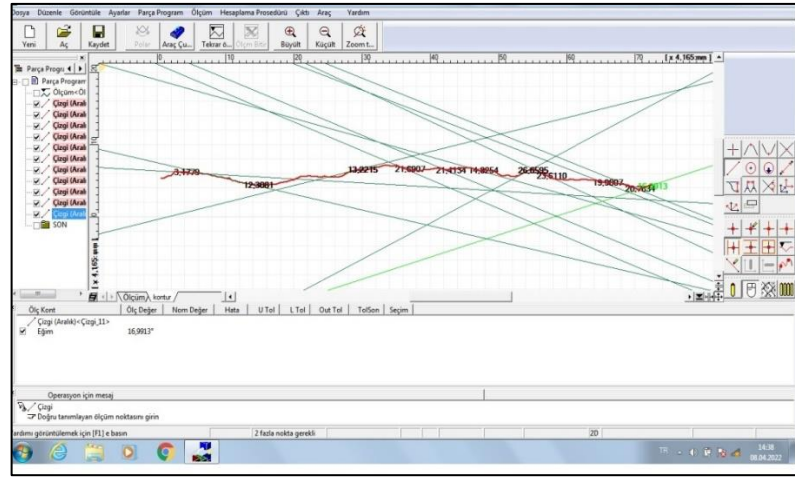


Şekil 3.12 Pürüzlülük açılarının belirlenmesinde kullanılan elektromekanik profilometre cihazı (Kayabalı vd. 2024)

15 cm boyutlu örnekler için profilometre cihazında manevra yetersizliğinden (bir seferde sadece 10 cm tarayabilmesinden) dolayı iki aşamada ölçüm gerçekleştirilmiştir. Küp örneğin kenar ortalarından ve köşegenlerden yapılan ölçümler (Şekil 3.13) sonucunda her bir küp numune için 8 adet profil ölçümü alınmış, 3 farklı küp numune üzerinde ölçümler tekrarlanmış, toplamda 24 farklı profil üzerinden ilgili kaya türü için pürüzlülük açısı (i) açısı hesaplaması yapılmıştır. Ölçümler kesme yönüne dik ve kesme yönünde olacak şekilde yapılmıştır. Aynı örnekler için ölçüm yönü değişmesine rağmen sonucun değişmediği görülmüştür. Tarama yüzeyi bilgisayar programına aktarılmış, programın ölçüm araçları vasıtasıyla en az 10 adet pürüzlülük açısı ölçümü yapılmıştır (Şekil 3.14). Her bir kaya çeşidi için alınan ölçümlerin aritmetik ortalamaları hesaplanmış ve bu sonuç süreksizlik pürüzlülük açısı (i) olarak değerlendirilmiştir.



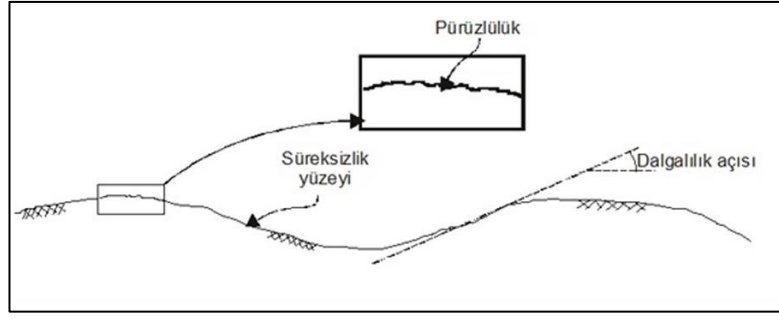
Şekil 3.13 Ölçüm için farklı yönlerden alınan süreksizlik profillerinin şeması



Şekil 3.14 Elektromekanik profilometre ile ölçülmüş yüzey profillerinden bir ekran görünümü

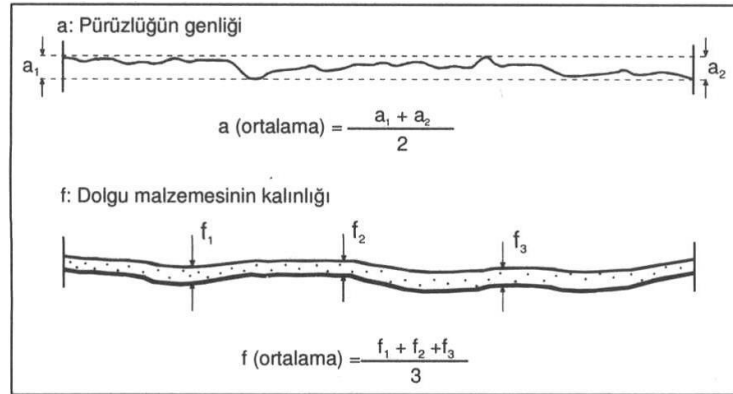
3.2.3 Pürüzlülük genliğinin belirlenmesi

Pürüzlülük ve dalgalılık süreksizlik yüzeyindeki küçük ve büyük ölçekli düzlemsellikten sapmanın ölçüsüdür. Dalgalılık, düzlemsellikten büyük ölçekte bir sapmayı gösterirken küçük ölçekteki sapmalar ise pürüzlülük olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.15). Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımında pürüzlülük de dalgalılık da önemlidir. Süreksizlik açıklığı ya da dolgu malzemesinin kalınlık artışı pürüzlülüğün süreksizliğin makaslama dayanımı üzerindeki etkisinin azalmasına neden olmaktadır. (Ulusay ve Sönmez, 2007).



Şekil 3.15 Süreksizlik yüzeylerinin dalgalılığı ve pürüzlülüğü (Ulusay ve Sönmez, 2007)

ISRM (1981) tarafından önerilen pürüzlülüğün genliğinin hesaplanması ile ilgili yöntem incelenmiş olup, yöntemde bahsedilen dip ve pik noktalara bir teğet çizilmesi suretiyle bir aralık belirlenmesi ve profilin başlangıç ve bitiş noktasındaki kalınlık ortalamasını alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Süreksizlik dolgusu ile ilgili kalınlık ölçümü de benzer şekilde üç farklı noktadan okuma alınarak ve bu değerlerin aritmetik ortalamasının hesaplanması esasına dayanmaktadır (Şekil 3.16).



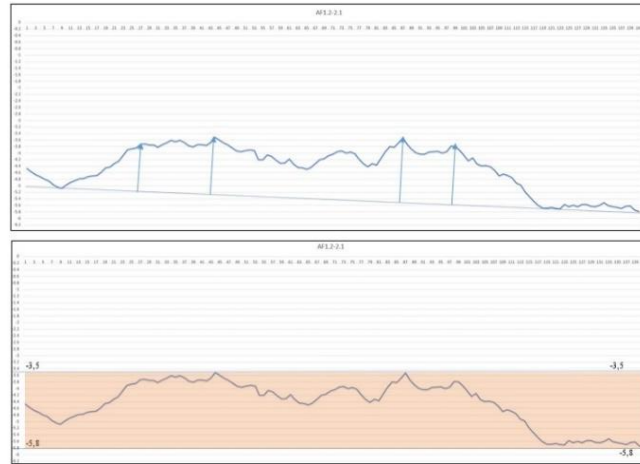
Şekil 3.16 Dolgu malzemesinin kalınlığı ile pürüzlü süreksizlik yüzeyin genliği arasındaki ilişki (ISRM, 1981).

Ancak, ISRM (1981) sadece bir dip ve pik değer belirleyerek genlik hesabı yapılmasını önermektedir. Dolgulu süreksizliklerde kesme deneyi esnasında kaya yüzeyleri maksimum pik ya da dip değere sahip pürüzlere temas etmeden önce de farklı yüksekliklere sahip pürüzlere de temas edeceğinden, sadece en yüksek değerleri kullanmanın gerçek duruma uygun olmayacağı düşünülmektedir. Bu yüzden pürüzlülük genliği hesabı, sayısallaştırılan süreksizlik yüzeyinin maksimum dip

noktasına bir teğet çizilerek bu çizgi üzerinde kalan pik değerlerin ortalaması alınmak suretiyle hesaplanmıştır.

Her bir küp numune için 8 farklı profilde 4 farklı yönde ölçümler alınmış ve ölçümler 3 farklı küp numune üzerinde tekrarlanmıştır. Dolayısıyla bir kaya türü için 24 adet profil ölçümü yapılmış ve yukarıda bahsedildiği şekilde 24 profilin içerdiği deney esnasında temas olabilecek tüm pik değerler göz önünde bulundurularak hesaplama yapılmıştır. Tüm bu değerlerin ortalaması deney esnasında kullanılacak dolgu kalınlığı miktarının tespit edilmesi için belirleyici olacaktır.

Şekil 3.17’de tez kapsamında kullanılacak hesaplama yöntemi ve ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemle ait grafikler sunulmuştur. Tez için benimsenen yöntem kullanılarak örnek profil için 2,06 mm değeri hesaplanmıştır. ISRM (1981)’e göre hesaplama yapıldığında örnek profilin pürüzlülük genliği 2,30 mm’dir. Tezin ana amaçlarından olan farklı dolgu kalınlığı koşullarının sağlanabilmesi ve doğru analiz yapılabilmesi için dolgu kalınlığı (t) / pürüzlülük genliği (a) (yani t/a) değerinin mümkün olan en kapsamlı şekilde tespit edilmesi önemlidir. Dolayısıyla, çalışma bu benimsenen yöntem ışığında ilerlemiştir.



Şekil 3.17 Tez kapsamında üretilen yöntem ve ISRM (1981)’de önerilen yöntemin karşılaştırması

Yapılacak deneylerde uygulanacak dolgu kalınlığı AF-1 numunesi için $a = 1,85$ mm, AF-2 numunesi için $a = 2,62$ mm, AF-3 numunesi için $a = 1,97$ mm, AF-4 numunesi için $a = 2,33$ mm, AF-5 numunesi için $a = 2,71$ mm, AF-6 numunesi için $a = 2,94$ mm pürüzlülük genliğine göre hesaplanacaktır. Bu bilgiler ışığında kullanılacak dolgu kalınlıkları 1, 3 ve 5 mm olarak belirlenmiştir.

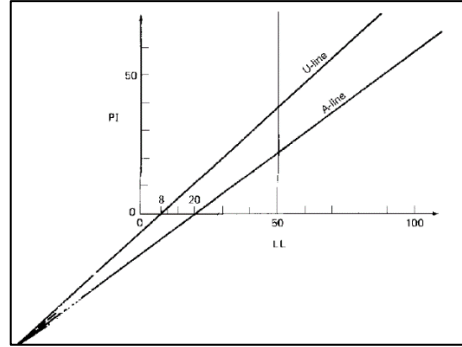
3.2.4 Dolgu malzemesinin seçimi

ISRM (1981)'e göre dolgu malzemesi süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasını dolduran ve genellikle kaya malzemesinden daha zayıf olan malzemedir. Bu nedenle kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde önemli bir rol oynamaları beklenir. Çalışma kapsamında doğada sıklıkla karşılaşılan kil, kalsit ve amorf silis dolguyu temsil edici şekilde 3 farklı dolgu türü kullanılmıştır. Kil dolgu yumuşak dolgu olarak, kalsit dolguyu temsil eden dolgu sert-1 dolgu olarak ve amorf silis dolguyu temsil eden dolgu sert-2 dolgu olarak adlandırılmıştır. Sert-1 dolgu için 25 MPa, sert-2 dolgu için 50 MPa mertebesinde dayanım elde edilmesi hedeflenmiştir. Dolgular ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

Yumuşak dolgu: Koni düşürme deney yöntemi ile likit limit değeri (LL=50,5) ters ekstrüzyon deney düzeneği ile de plastik limiti (PL= 32,2) tayin edilen plastikiği orta derecede olan dolguda hedeflenen kalınlıkların sağlanabilmesi için bir dizi deneme testi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle LL ve PL değerine kadar su içeriğinde kil numuneleri hazırlanmış ve süreksizlik yüzeylerine uygulanmıştır. LL değerinde hazırlanan dolgu farklı kalınlıklarda dolgu uygulanmasına uygun olmadığından, PL seviyesine getirilen killer ile deneyler tekrarlanmıştır. Farklı normal gerilmeler altında yapılan testler sonucunda dolgu kalınlığında deney sonrası durumda kalınlık kayıpları yaşandığı ve hedeflenen kalınlığının sağlanamadığı tespit edilmiştir. Normal gerilme altında kil dolgunun yapay süreksizlik düzleminden dışarı taşması zaten zor bir aşama olan dolgu kalınlık ayarlanması sürecini daha da güçleştirmiştir. Denemeler ve gözlemler sonucunda dolgu numunesinin su içeriğinin büzülme limitinde uygulanmasının daha kontrol edilebilir ve uygulanabilir bir süreç sağlayacağına karar verilmiştir.

Bu çalışmada büzülme limiti deneysel olarak belirlenmemiş, Casagrande tarafından önerilen ve Şekil 3.18'de yer alan diyagram kullanılmıştır. Diyagramda U ve A hatlarının kesiştiği noktadan, zeminin likit limit ve plastisite indisi kesişim noktasına doğru çizilen doğrunun likit limit eksenini kestiği yerdeki değer büzülme limitini yaklaşık olarak vermektedir (Holtz ve Kovacs, 1981). Kil dolgu için kullanılacak dolgu malzemesinin büzülme limiti %23,5 olarak belirlenmiştir.

Kil dolgu için kuru kil numunesi büzülme limitinde ıslatılarak karıştırıldıktan sonra yapay süreksizlik yüzeyine serilmesi yoluna gidilmiştir. Kıvamın yarı katı halde olması hazırlanan karışımın üniform bir kalınlıkta serilmesine izin vermemiştir. Bunun yerine, kuru kil numunesi hedef kalınlığı tutturmak için uygun derinlikteki dişli tarakla (Şekil 3.2b) yapay süreksizlik üzerine yayılmış; daha sonra büzülme limitine karşılık gelen miktarda sprey ile sulama yapılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.18 Casagrande yöntemi kullanılarak büzülme limitinin belirlenmesi (Holtz ve Kovacs, 1981'den)

Sulama sırasında yüzeye sıkılan suyun düzlem dışına taşmaması için azami özen gösterilmiştir. Bu şekilde 1, 3 ve 5 mm kalınlıkta hazırlanan kil dolgular için doğrudan kesme deneyleri yapmak suretiyle kil dolgunun kohezyonu ve içsel sürtünme açısı belirlenmiştir.



Şekil 3.19 Üç mm kalınlıkta serilmiş kuru kil (solda) ve büzülme limitine getirilmiş kil (sağda)

Sert-1 dolgu (alfa alçı): Kalsit, karbonatlı kayaları oluşturan ve kimyasal formülü CaCO_3 olan genellikle endüstride kullanılan bir mineraldir. Çeşitli şekillerde kristalleşebilen kalsit minerali camsı parlaklıkta ve renksiz saydam yapıdadır. Kalsiyum karbonat sert bir mineral değildir. Saf kalsitin sertliği Mohs skalasına göre 3 civarındadır. Çalışma kapsamında dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanan kalsit dolguyu temsilen farklı katkılara sahip alçı karışımları denenmiştir. Kalsitin mineral dayanımı için doğrudan yapılmış bir çalışma bulunmamakla beraber jips (alçı) dayanımından daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu yüzden klasik alçı malzemesi ile birlikte diğer katkılı alçılar da denenmiş olup, farklı koşullar altında dayanımı yüksek ve tutarlı sonuç veren, piyasada Moldastano CN adı ile bilinen alfa alçı malzemenin kullanılmasına karar verilmiştir. Alfa alçı çoğunlukla veya tamamen kalsiyum sülfat hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)’dan oluşan, ince bölünmüş, kokusuz bir toz olarak görünür. Çalışma kapsamında kullanılması planlanan alçıdan üretim reçetesine uygun alçı ve su karışımı kullanılarak önerilen sürede karıştırılarak, ISRM standartlarına uygun şekilde silindirik numuneler hazırlanmış ve UCS deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre çalışmanın amacına uygun olacak şekilde, alfa alçının 25 MPa dayanım gösterdiği ve düşük dayanımlı sert dolgu olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Süreksizlik yüzeyine üreticinin belirttiği şekilde hazırlanan dolgu malzemesi farklı kalınlıklarda alt blok yüzeyine uygulanmış beklenmeden üstü blok kapatılmış ve 24 saat oda sıcaklığında kuruma sağlandıktan sonra testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20). Özel bir alçı malzemesi olduğundan deney sonunda kırılan numuneler incelendiğinde tam

kuruma sağlandığı, numunenin merkezinde herhangi bir nemlilik bulunmadığı görölmüştür.

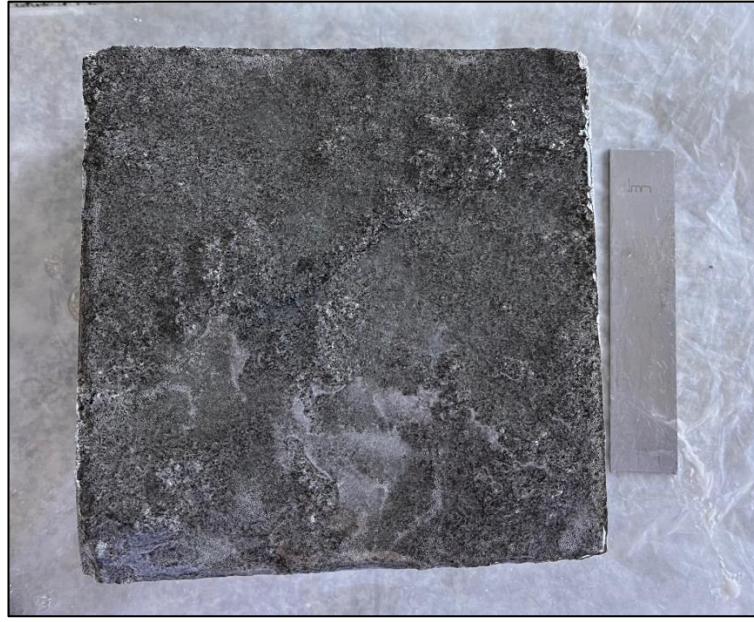
Sert-2 dolgu (reçine): Polyester reçineler, hızlı kürlenme ve pratik olarak kalıplanabilme özelliklerine sahiptir (Strong 2008). Hızlı kürlenebilen ve sertleşebilen yapıları vardır. Sıcaklığa ve UV ışınlara dayanıklıdır (Tursun 2019). Çalışma kapsamında seçilen polyester reçinede hızlandırıcı olarak kobalt katkısı kullanılmaktadır. Kobalt yüzeyde kurutucu etki yapmakta ve havanın inhibitör etkisine karşı koymaktadır. Bu yüzden kobalt hızlandırıcı ile çok ince tabakalarda dahi yapışkan olmayan yüzeyler elde edilebilmektedir (Yılmaz, 2006).



Şekil 3.20 Sert-1 dolgu uygulanarak kalınlık ayarlaması yapılmış alt blok (yapay düzlem boyutları 15 cm x 15 cm’dir)

Reçine malzemesi için jelleşme süresi malzemenin pelte kıvamına gelme süresidir. Reçine bu süre içinde kalıpta son şekline getirilmelidir. Bu süre kışın 8-10 dakika, yazın 10-12 dakika arasında değişmektedir. Kürlenme süresi ise, polyester reçineye hızlandırıcı ve sertleştirici katkılar eklendikten sonra kimyasal olarak kararlı, fiziksel olarak da sert bir yapıya dönüşme süresidir. Polyester reçinenin genel kürlenme süresi 25-30 dakikadır; ancak, tam kürlenme sağlanması için 24 saat beklenmesi önerilmektedir. Yapılan dayanım testleri sonucu polyester reçinenin tek eksenli sıkışma dayanımı 70 MPa olarak belirlenmiştir. Hedeflenen 50 MPa dayanıma ulaşılması için

reçine içerisine bazı katkı malzemeleri ekleyerek dayanımın azaltılması gerekmiştir. Reçine içerisine tuz karıştırıldığı durumda UCS 55 MPa olmuş ve çalışma kapsamında yüksek dayanımlı sert dolgu olarak kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 3.21). Çalışma kapsamında seçilen üç farklı kaya türü için 1 mm ve 3 mm dolgu kalınlığında tuz katkılı reçine süreksizlik dolgusu olarak uygulanmış ve statik kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

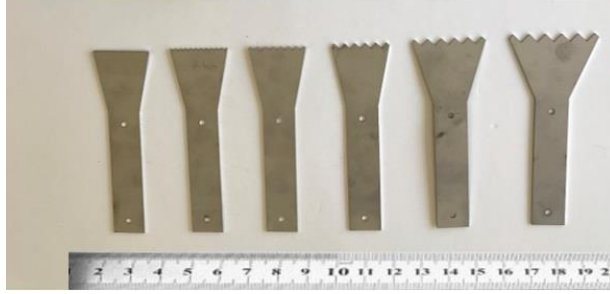


Şekil 3.21 Sert-2 dolgu uygulanarak kalınlık ayarlaması yapılmış alt blok (yapay düzlem boyutları 15 cm x 15 cm'dir)

3.2.5 Dolgu kalınlığının ayarlanması

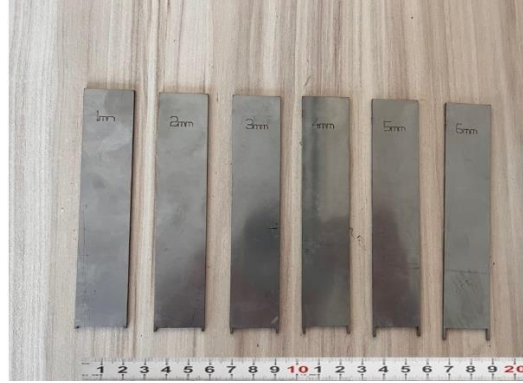
Dolgu kalınlığının ayarlanması için öncelikli yöntem olarak diş yüksekliği 1-6 mm arasında değişen dolgu yayma tarakları kullanılmıştır (Şekil 3.22). Başlangıçta 90 derece dişli taraklar kullanılarak tarakların diş yüksekliğinin yarısına karşılık gelecek yükseklikte dolgu kalınlığı elde edilmesi hedeflenmiş; ancak, büzülme limitinde uygulanan kil dolguda istenilen kalınlıklara ulaşamadığı görülmüştür. Ek yöntem olarak Demirezen (2019)'da uygulanan farklı çaplardaki çelik bilyeler yardımıyla kayada oluşturulan yapay süreksizliğe uygulanacak dolgu kalınlığının her noktada sabit

tutulması yöntemi denenmiştir. Ancak, çalışma kapsamında seçilen normal gerilmeler altında bilyelerin ezilmesi ya da küreselliğinin bozulması söz konusu olup, dolgu kalınlığı ayarlaması için kullanılamayacağı anlaşılmıştır.



Şekil 3.22 Dolgu kalınlığı ayarlama amacıyla kullanılmış farklı diş yüksekliğine sahip taraklar

Dolgu kalınlığının ayarlanması için Şekil 3.23'te verilen eşit ve sabit kalınlıkta dolgu sermeye imkân tanıyan alternatif bir dolgu yayma tırağı ürettirilmiştir.



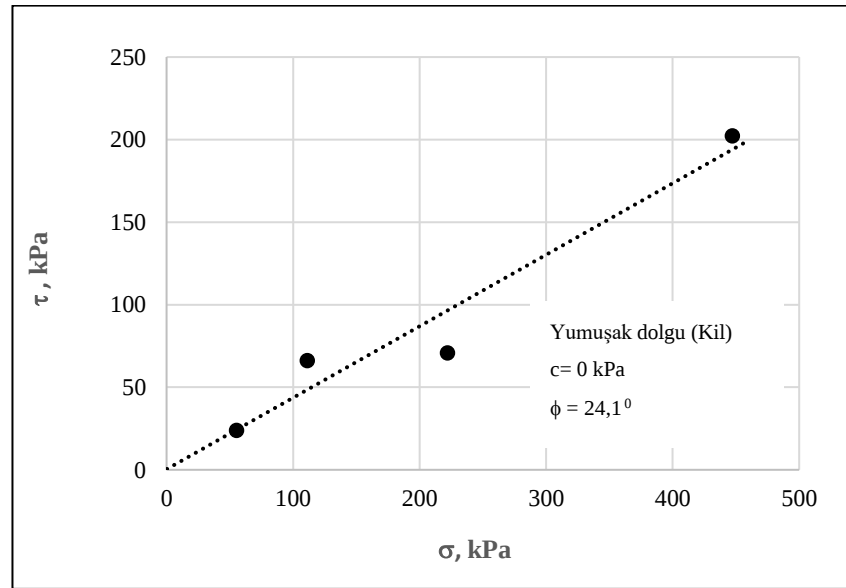
Şekil 3.23 Çalışma kapsamında ürettirilen dolgu yayma tıraşları

3.2.6 Dolgunun kesme dayanımının tayini

Çalışma kapsamındaki kil, alçı ve reçine dolguların kesme dayanımları farklı deney yöntemleri ile belirlenmiştir. Kil dolgu için zeminlerde doğrudan kesme deney düzeneği kullanılmıştır. Bunun için, 6 cm x 6 cm x 1 cm ebadındaki kaya levhaları arasına önce uygun 3 cm kalınlıkta dolgu yerleştirilmiş, dolgu maddesinin konsolide olması sağlandıktan sonra 0,5 mm/dak hızında makaslama uygulanmış; bu şekilde büzülme

limitinde yüzeye uygulanan kil dolgunun c ve ϕ değerleri hesaplanmıştır. Dört farklı normal gerilme uygulanmış ve bu normal gerilme değerlerine karşılık gelen kesme gerilmeleri Mohr- Coulomb yenilme kriteri ile hesaplanmış, regresyon analizlerinde girdi olarak kullanılmıştır. Yumuşak dolgu için $c = 0$ kPa ve $\phi = 24,1^\circ$ olarak elde edilmiştir (Şekil 3.24).

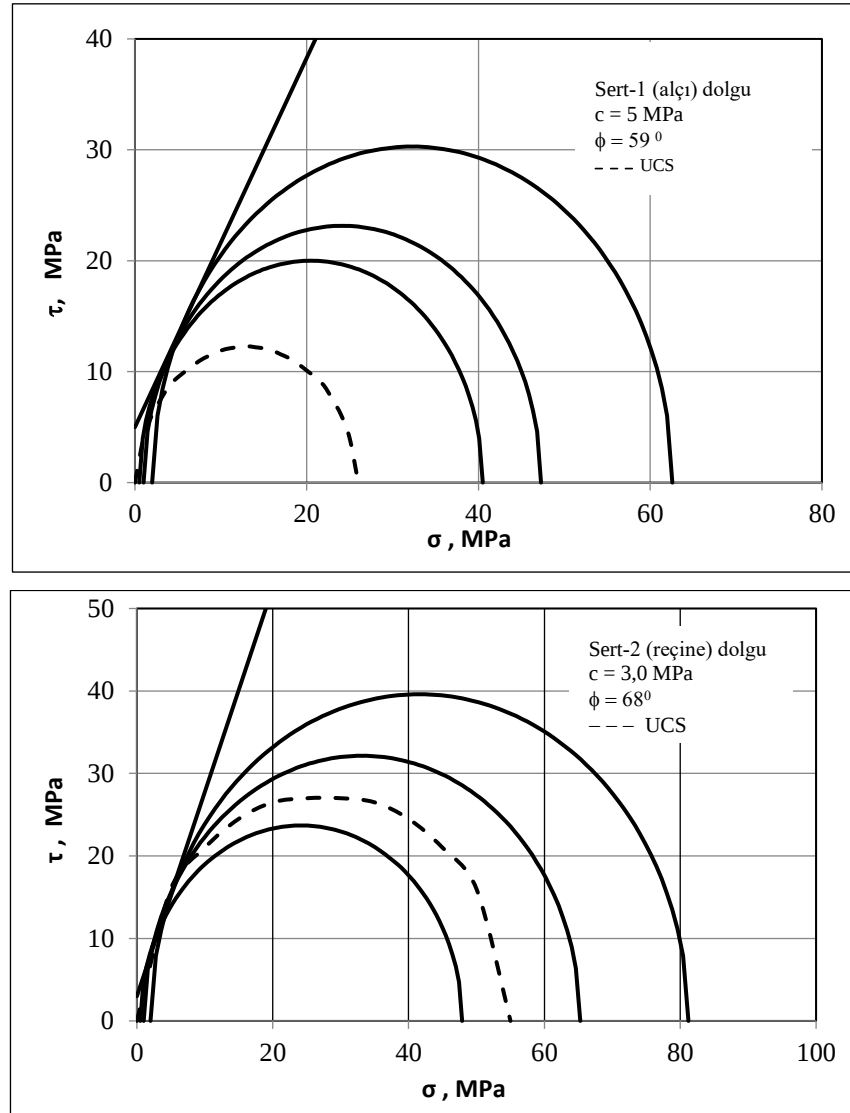
Alçı ve reçine için TS699 üç eksenli basınç dayanımı standardına uygun deney numuneleri hazırlanarak deneyler uygulanmış ve dayanım parametreleri c ile ϕ elde edilmiştir (Şekil 3.25). Kil numunesinde olduğu gibi 6 farklı normal gerilmeye karşılık gelen kesme gerilmeleri, UCS sonuçları da dahil edilerek grafiğe eklenmiş, Mohr- Coulomb yenilme kriteri ile hesaplanmış ve Bölüm 4'te verilen regresyon analizlerinde girdi olarak kullanılmıştır. Sert-1 dolgu için $c = 5$ MPa ve $\phi = 59^\circ$; sert-2 dolgu için $c = 3$ MPa ve $\phi = 68^\circ$ olarak elde edilmiştir. Şekil 3.26'da deney sonuçlarını gösterir $\tau - \sigma$ grafikleri sunulmuştur.



Şekil 3.24 Kil dolgu üzerinde yapılan doğrudan kesme deney sonuçları



Şekil 3.25 Reçine (solda) ve alçı (sağda) dolgu malzemelerinden hazırlanan deney numuneleri



Şekil 3.26 Sert-1 (alçı) ve sert-2 (reçine) dolgularına ait $\tau - \sigma$ grafikleri

3.2.7 Dolgulu süreksizliklerde doğrudan kesme deneyleri

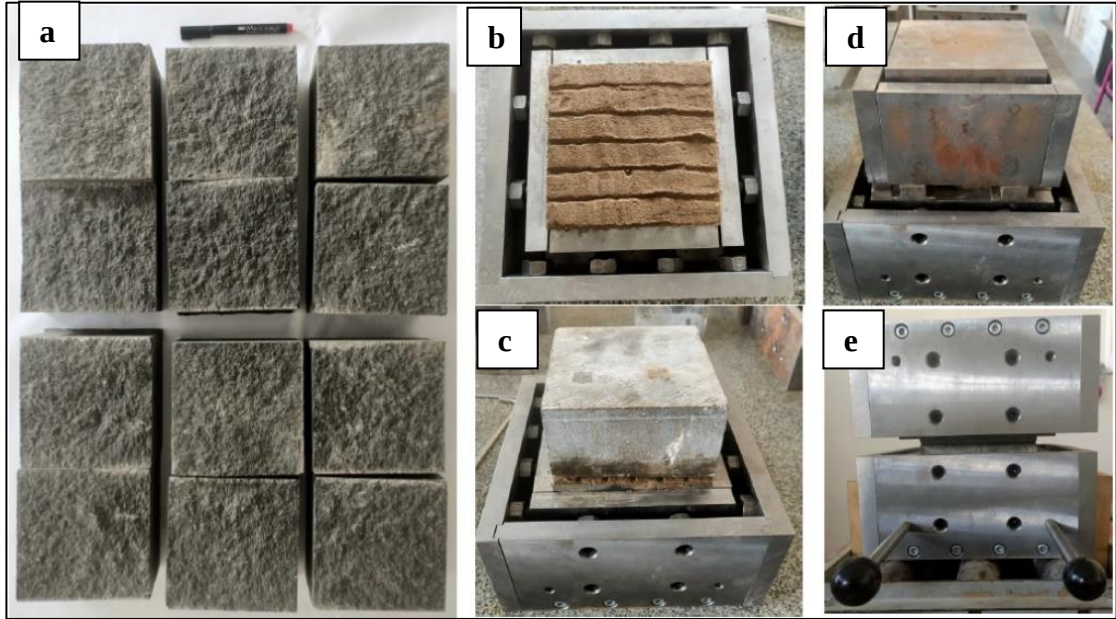
Doğrudan kesme deneylerinde kullanılan makina (Şekil 3.8) servo kontrollüdür. Kesme kutusu kalıbının içerisine yerleştirilen deney düzeneği cihaz içerisine konulur ve deney yapmaya uygun hale getirilir. Literatürden seçilen normal gerilmelerde kesme deneyleri gerçekleştirilir. Statik doğrudan kesme deneylerinde kesme hızı sabit 1 mm/dk seçilmiştir. Normal gerilme belirlenirken deney kutusunun ve cihaz başlığının ağırlığı dikkate alınmış, hesaplama yapılarak uygulanması planlanan normal gerilmeden çıkartılmış ve yük kalibrasyonu yapıldıktan sonra deneyler uygulanmıştır. Numunelere 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 6,0, ve 8,0 MPa normal gerilmeleri uygulanmıştır. Deneyler tamamlandıktan sonra bilgisayar yazılımı kullanılarak yük–deformasyon grafiği çizilmiştir. Grafiklerin pik yaptığı noktalar yenilme yükü olarak tanımlanmıştır. Statik koşullarda yapılan doğrudan kesme deneylerinde ASTM D5607 standardı kullanılmıştır.

Deney numunelerinin hazırlanması: Çalışma kapsamında uygulanacak 6 farklı normal gerilme için yapay süreksizlik içeren 6 adet numune seçilmiş olup, 3 farklı dolgu türü, 3 farklı dolgu kalınlığı ve 3 farklı kaya türü için toplamda 162 adet küp numune deney programı için hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılacak kayaların pürüzlülük genliğine göre dolgu kalınlığı 1 mm, 3 mm ve 5 mm olarak belirlenmiştir. Doğrudan kesme deneyi numunenin kesme kutusu kalıplarına yerleştirilmesi, kesme kutusu kalıplarının kesme kutusu deney düzeneğine yerleştirilmesi ve deneyin uygulanması aşamalarından oluşmaktadır.

Deney çalışmasının ilk aşamasında baltalı pres ile yarılan numunenin alt bölümü kalıbın içerisine yerleştirilir (Şekil 3.27). Numunenin kenarlarına çelik plaka yerleştirildikten sonra deney esnasında numunenin sabit kalması ve hareket etmemesi için plakaların etrafında bulunan setskur civatalar sıkılarak alt parça sabitlenir (b). Sabitlenen numune üzerine numunenin üst bölümü yerleşilir (c). Dolgu türüne göre dolgu malzemesi üst blok konulmadan ya da her iki blok üst üste getirildikten sonra da kalıba yerleştirilebilir. 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 doğrudan kesme deney düzeneğinin (Şekil 3.8) haznesine yerleştirilir ve yük uygulanmasına geçilir.

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 kullanılır. Burada normal yük milinin haznenin üst kısmında yer alan boşluğa yerleştiğini kontrol etmek için indirilen piston sağa sola hareket ettirilerek kontrol edilir. Geosys Premium programı vasıtasıyla numune için belirlenen deney parametreleri girilerek deney başlatılır.



Şekil 3.27 Kesme deneyine hazırlık aşamaları a) baltalı pres ile yarılan numuneler, b) çelik plakalar ile sabitlenmiş numune ve süreksizlik yüzeyine uygulanmış kil dolgu, c) dolgulu süreksizlik yüzeyi üzerine üst bloğun yerleştirilmesi, d) çelik plakaların üst blok etrafına yerleştirilmesi, e) kesme kutusu üst bloğunun numune üzerine konumlandırılması

Yumuşak (kil) dolgulu numunelerin hazırlanması: Yapay süreksizlik oluşturulmuş kaya numunesi deney kalıplarına yerleştirildikten sonra dolgu kuru olarak serilmiş, dolgu yayma tarakları ile kalınlık ayarlaması yapılmış ve spreylenmiş su uygulanarak

büzölme limiti su içeriğine getirilmiştir (Şekil 3.23). Üst blok kapatıldıktan sonra numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve beklenmeden 6 farklı normal gerilme altında deneyler uygulanmıştır.

Sert-1 (alçı) dolgulu numunelerin hazırlanması: Yapay süreksizlik oluşturulmuş kaya numuneleri üzerine farklı kalınlıklarda alçı dolgu, dolgu yayma tarakları ile uygulanmıştır. Priz süresi çok kısa olduğu için üst blok kapatılmış ve süreksizlik yüzeyine tam temas etmesi sağlanmıştır. Oda sıcaklığında 24 saat kuruma sağlandıktan sonra deneyler uygulanmıştır.

Sert-2 (reçine) dolgulu numunelerin hazırlanması: Yapay süreksizlik oluşturulmuş kaya numuneleri üzerine farklı kalınlıklarda tuz katkılı reçine dolgu, dolgu yayma tarakları ile uygulanmıştır. Dolgu kalınlığına bağlı olarak dolgu malzemesinin kurlenme süresi başlamadan tabakalar şeklinde uygulanmış ve istenilen kalınlığa erişildiğinde üst blok kapatılarak 24 saat oda sıcaklığında kuruma sağlandıktan sonra deneyler uygulanmıştır. Temsili bir görünüm Şekil 3.28’de verilmiştir.



Şekil 3.28 Süreksizlik yüzeyine sert-2 dolgu uygulanmış numuneler

3.3 Süreksizliklerin Kesme Dayanımına Dair Önerilen Modeller

Bu bölümde süreksizliklerin kesme dayanımının ortaya konulması için önerilen modeller tanıtılmıştır. Süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesi 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.).

Süreksizlik yüzeyleri genellikle pürüzlü bir yapıdadır. Fakat, 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.

3.3.1 Mohr-Coulomb yöntemi

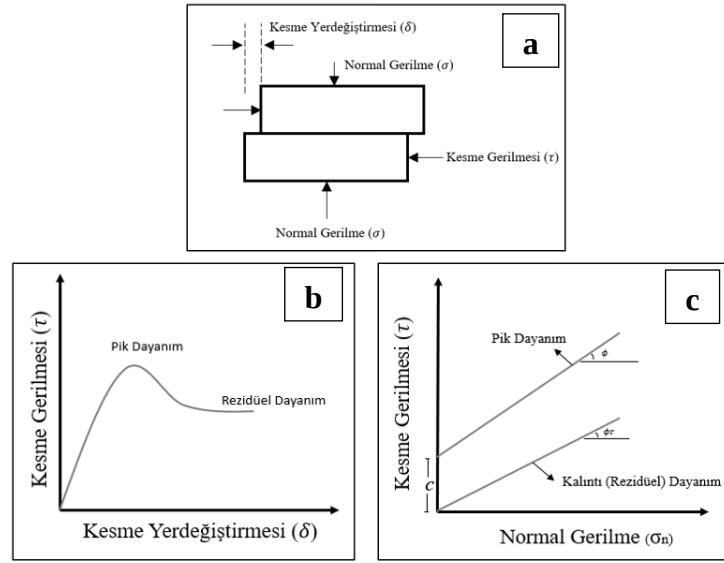
Mohr-Coulomb yenilme ölçütü jeoteknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve doğrusal bir yenilme zarfını esas alan bir ölçüttür. Genel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

Burada; τ : Kesme dayanımı, σ : Normal gerilme, c : Görünür kohezyon ve ϕ : İçsel sürtünme açısıdır. Yöntemin yenilme zarfı şekil 3.29’da verilmiştir. Kalıntı (rezidüel) dayanım durumunda görünür kohezyon (c) sıfır değerine düşecektir; bu durumda ϕ_r ve σ arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olur.

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

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



Şekil 3.29 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

3.3.2 Patton yöntemi

Patton (1966) eklemlerin kayma davranışının normal gerilme ve pürüzlülük ile bağlantılı olduğunu ortaya çıkaran ilk araştırmacıdır (Grasselli, 2001). Patton, düşük normal gerilme altında pürüzlülük yüzeylerinin hiçbirinde tıraşlanma söz konusu olmadığında süreksizlik kesme gerilmesini aşağıdaki eşitlik ile ifade etmiştir.

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

Bu eşitlikte, σ normal gerilme, ϕ_b temel sürtünme açısı ve i pürüzlülük açısıdır. Patton pürüzlü yüzeyler için çift eğrili bir model önermiştir. Yüksek normal gerilmeler için doruk kesme dayanımı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$\tau_p = c_p + \sigma \tan \phi_r \quad (3.4)$$

Burada, c_p : görünür kohezyon, ϕ_r : rezidüel sürtünme açısıdır.

3.3.3 Ladanyi ve Archambault yöntemi

Ladanyi ve Archambault'un (1969) önerdiği enerji yöntemi temelli yenilme modelinde pürüzlülük, hacimsel genişleme, genişlemeden kaynaklı sürtünme değeri ve pürüzlülüğe uygulanan kesme kuvveti modelin ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Buna göre toplam kayma dayanım kuvveti T_p aşağıdaki denklemle ifade edilir:

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

Burada T_p : pik kesme kuvveti, 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 tepe kesme dayanımı aşağıdaki eşitlikte sunulmuştur.

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

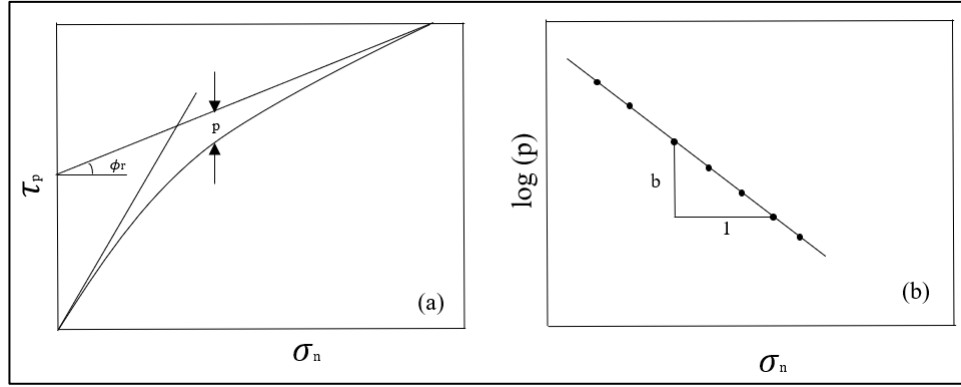
Burada; $\theta_p = \arctan (v_p/u_p)$ olup, v_p/u_p de kırılma anındaki normal (v_p) ve kesme (u_p) yerdeğiştirmesi arasındaki oran (genişleme oranı) olarak tanımlanır; τ_{rock} : kırılmı (intact) kayanın dayanımını ifade eder.

3.3.4 Jaeger yöntemi

Jaeger (1971) süreksizliklerin kesme dayanımını belirlemek için düşük ve yüksek normal gerilmelerin de dahil edildiği ampirik bir yöntem önermiştir. Jaeger (1971) Patton'ın çift eğrili doğrusal yöntemini doğrusal olmayan bir yöntem ile incelemiştir. Kesme gerilmesi-normal gerilme ilişkisi üstel olarak belirlenen ve 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 3.30'da $\log (p)$ kullanılarak b değerlerinin elde edilmesi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.30 Jaeger (1971) ampirik kesme dayanım modeli; a) kesme dayanımı - normal gerilme grafiği, b) log (p) - normal gerilme grafiği

3.3.5 Barton yöntemi

Barton (1974) yaygın olarak kullanılan bir model olup, düzensiz pürüzler içeren süreksizliklerin kesme gerilmesinin tayini için geliştirilmiştir. Normal gerilme ile kesme dayanımı ilişkisi deneysel olarak modellenmiş olup, Patton'ın çift eğrili yenilme kriterine benzer. Barton (1974) modeli Barton ve Choubey (1977) bu modelde bazı modifikasyonlar yaparak aşağıdaki eşitlik ile tanımlamıştır.

$$\tau_p = \sigma_n \tan [\phi_b + JRC \log(JCS/\sigma_n)] \quad (3.8)$$

Burada,

JRC : Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük katsayısı

JCS : Süreksizlik yüzeyinin dayanımı

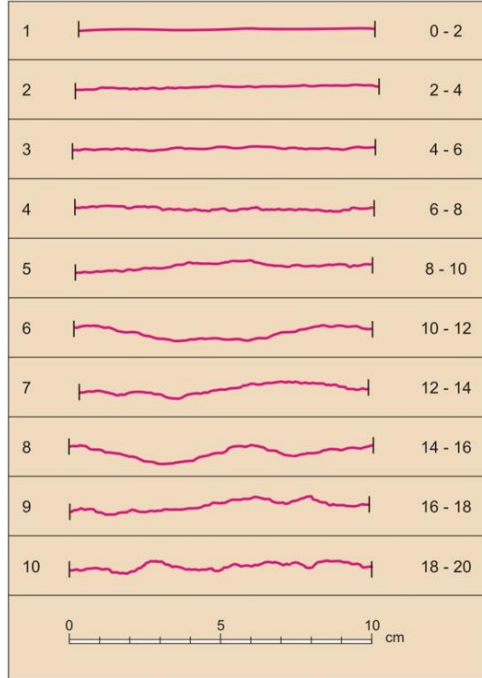
σ_n : Normal gerilme

ϕ_b : Temel sürtünme açısı (pürüzsüz–düz yüzeyler için)

Bağıntıdaki JRC eklem pürüzlülük katsayısı, JCS eklem yüzeyindeki sıkışma dayanımını temsil eder. Eklem yüzeyi bozuşmamış ise JCS değerinin kayacın tek eksenli sıkışma dayanımına eşit olduğu kabul edilir. Ayrıca, JCS Schmidt çekici vasıtasıyla da belirlenebilmektedir.

JRC Değerinin Belirlenmesi: JRC kaya kütleli sınıflama puanlaması (RMR) değeri ve tünelcilik indeksinde (Q) eklemin pürüzlülük değerinin belirlenmesinde yaygın olarak

kullanılan bir parametredir. Barton ve Choubey (1977) 0-20 arasında 10 adet pürüzlülük profili belirlemiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.31 Barton ve Choubey 1977 tarafından önerilen pürüzlülük profilleri ve karşılık gelen JRC değerleri (Vallejo ve Ferrer 2002'den)

JCS Değerinin Belirlenmesi: Kesme dayanımını kontrol eden bozuşmuş malzemenin kalınlığı, süreksizlik yüzeyi boyunca değişebilmektedir. Bu değişiklik JCS/σ_n oranına bağlıdır. Düz yüzeylerde malzeme kalınlığı 1 mm kadar az olabiliyorken, pürüzlü ve bozuşmuş yüzeylerde birkaç mm'ye kadar çıkabilmektedir. JCS çizelge 3.1'de verilen basit arazi deneyleri ile karot veya blok numunelere uygulanan nokta yük deneylerinden veya süreksizlik yüzeyinde yapılan Schmidt çekici deneyi ile tahmin edilebilir (Wyllie ve Mah 2004).

Çizelge 3.1 Kaya ve zemin dayanımlarına ait sınıflandırılma (ISRM 1981).

Sınıf	Tanım	Arazide Teşhisi	Tek eksenli sıkışma dayanımının yaklaşık aralığı (MPa)
R6	Aşırı sağlam kaya	Numuneden sadece jeolog çekici ile küçük parça koparılabilir	> 250
R5	Çok sağlam kaya	Numuneyi kırmak için jeolog çekici ile çok sayıda vuruş gerekir	100 – 250
R4	Sağlam kaya	Numuneyi kırmak için jeolog çekici ile birden fazla vuruş gerekli	50 – 100
R3	Orta sağlam kaya	Cep çakısı ile çizilemez veya soyulamaz; numune jeolog çekici ile kuvvetli tek darbede kırılabilir	25 – 50
R2	Zayıf kaya	Cep çakısı ile soyulabilir; jeolog çekici ile kuvvetlice vurulduğunda kayada sığ oyuk gelişebilir	5 – 25
R1	Çok zayıf kaya	Jeolog çekicinin ucu ile kuvvetlice vurulduğunda ufalanabilir; cep çakısı ile soyulabilir	1 – 5
R0	Aşırı zayıf kaya	Raptiye ile çizilebilir	0,25 – 1
S6	Katı kil	Raptiye güçlükle girer	> 0,5
S5	Çok sert kil	Raptiye kolaylıkla girer	0,25 – 0,5
S4	Sert kil	Başparmakla kolaylıkla bastırılabilir de güçlükle batar	0,1 – 0,25
S3	Sağlam kil	Orta düzey çaba ile başparmak birkaç inç batar	0,05 – 0,1
S2	Yumuşak kil	Başparmak kolaylıkla birkaç inç batabilir	0,025 – 0,05
S1	Çok yumuşak kil	Yumruk kolaylıkla birkaç inç batabilir	< 0,025

4. BULGULAR

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan kayaların: i) mineralojik-petrografik özellikleri, ii) tek eksenli sıkışma dayanımları, iii) pürüzlülük açıları ve pürüzlülük genliği, iv) doğrudan kesme dayanımı ile dolguların: v) kesme dayanımları, vi) içsel sürtünme açıları ve vii) kohezyonları ortaya konulmuştur. Konuyla ilgili bilgiler aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

4.1 Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan kayaları da içeren 30 farklı kaya numunesi üzerinde yürütülen bir doktora tezinde (Beyhan, 2024) kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri tanımlanmıştır. Beyhan (2024), kaya türlerinin ince kesitlerini hazırlamış, polarizan mikroskobu kullanılarak incelenmiş ve kaya tanımlaması yapmıştır. Çalışma kapsamında deney programına dahil edilen 3 farklı kaya ve çalışmaya sonradan eklenen 3 kaya türü ile birlikte toplam 6 farklı kayanın mineralojik ve petrografik özellikleri çizelge 4.1’de sunulmuştur.

4.2 Tek Eksenli Sıkışma Deneyi

Çalışma kapsamında kullanılan 6 farklı kaya numunesinin tek eksenli sıkışma dayanımı Beyhan (2024) tarafından tamamlanan çalışmadan elde edilmiştir. Beyhan (2024) ASTM D 2938 standardına uygun olarak her bir kaya türü için 5’er adet deney gerçekleştirmiş olup, deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan 6 farklı kaya için, elde edilen sonuçlar incelendiğinde en düşük dayanım değerinin 30,0 MPa ile litik tuf numunesinde, en yüksek dayanım değerinin ise 115,0 MPa ile granodiyorit numunesinde olduğu belirlenmiştir.

4.3 Süreksizliklerin Pürüzlülük Açısı

Laboratuvar ortamında baltalı pres yardımıyla oluşturulan taze süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açıları profilometre cihazı ile belirlenmiştir. Ölçüm tutarlılığını arttırmak

amacıyla her bir kaya türü için 3 farklı küp numune üzerinde, kenarlarının ortasından ve köşegenlerden olmak üzere dört hat boyunca süreksizlik yüzey profilleri belirlenmiş ve pürüzlülük açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde en yüksek pürüzlülük açısının 16° ile AF-3 (litik tuf), AF-5 (trakit) ve AF-6 (granodiyorit) numunelerinde, en düşük pürüzlülük açısının 14° ile AF-4'de (vitrik tuf) olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.1 Kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri (Beyhan, 2024'den)

Numune No	Dokusu	Özel Doku	Bileşimi	Bozuşma	Kaya Adı
AF-1	Holokristalen	Zonlu Doku	Plajiyoklaz, piroksen, amfibol, eser miktarda opak mineraller	Opasitleşme	Diyabaz
AF-2	Granoblastik Doku	-	Kalsit, ankerit ve az miktarda aragonit	-	Mermer
AF-3	Hiyaloklastik Doku	Zonlu Doku	Plajiyoklaz, kalsit, opak mineraller, bazalt, trakibazalt, kuvarsit, andezit kaya parçaları	Demiroksitleşme	Litik Tuf
AF-4	Hiyaloklastik	Zonlu	Kuvars, plajiyoklaz, amfibol, volkan camı kıymığı, kaya parçaları	-	Vitrik Tuf
AF-5	Hipohiyalin Porfiritik Doku	Zonlu Doku, Akma Doku	Plajiyoklaz, Sanidin, Piroksen, Amfibol ve eser miktarda opak mineraller	Opaklaşma	Trakit
AF-6	Holokristalen	Zonlu Doku, Poikilitik Doku	Ortoklaz, Plajiyoklaz, Mikrolin, Kuvars, Amfibol, Biyotit, Titanit, Opak Mineraller	Serizitleşme, Kloritleşme	Granodiyorit

Çizelge 4.2 Kaya numunelerinin UCS sonuçları (Beyhan, 2024'den)

Numune No	Kaya Adı	σ_{c1} (MPa)	σ_{c2} (MPa)	σ_{c3} (MPa)	σ_{c4} (MPa)	σ_{c5} (MPa)	σ_{Min} (MPa)	σ_{Max} (MPa)	σ_{ort} (MPa)
AF-1	Diyabaz	130,7	81,3	68,7	56,4	59,7	56,4	130,7	79,4
AF-2	Mermer	64	59,8	75,3	64,5	68,6	64,0	75,3	66,4
AF-3	Litik Tuf	44,1	22,7	24,2	31,6	27,2	22,7	44,1	30,0
AF-4	Vitrik Tuf	65,7	61,8	77,9	63,1	65,5	61,8	77,9	66,8
AF-5	Trakit	56,8	88,5	101,1	69,2	126,3	69,2	156,8	88,4
AF-6	Granodiyorit	108,7	135,2	107,3	119,6	102,7	102,7	135,2	115

Çizelge 4.3 Profilometre cihazı ile elde edilen süreksizliklere ait pürüzlülük açıları

Numune No	Kaya Adı	Pürüzlülük Açısı (i)
AF-1	Diyabaz	15
AF-2	Mermer	14
AF-3	Litik Tüf	16
AF-4	Vitrik Tüf	14
AF-5	Trakit	16
AF-6	Granodiyorit	16

4.4 Süreksizliklerin Pürüzlülük Genliği

Laboratuvar ortamında baltalı pres yardımıyla oluşturulan taze süreksizlik yüzeylerinin yüzey profilleri profilometre ile sayısallaştırılmış, bu yüzeyin maksimum dip noktasına bir teğet çizilerek bu çizgi üzerinde kalan pik değerlerin ortalaması alınmak suretiyle hesaplanmıştır.

Her bir küp numune için 4 farklı yönde ölçümler alınmış ve ölçümler 3 farklı küp numune üzerinde tekrarlanmıştır. Her bir kaya türü için 12 adet profil ölçümü alınmış ve deney esnasında temas olabilecek tüm pik değerler göz önünde bulundurularak hesaplama yapılmıştır. Tüm bu değerlerin ortalaması deney esnasında kullanılacak dolgu kalınlığı miktarının tespit edilmesi için belirleyici niteliktedir.

Tezin ana amaçlarından olan farklı dolgu kalınlığı koşullarının sağlanabilmesi ve doğru analiz yapılabilmesi için dolgu kalınlığı (t) / pürüzlülüğün genliği (a) oranının mümkün olan en kapsamlı şekilde tespit edilmesi önemlidir. Çizelge 4.4'te tez kapsamında kullanılacak kaya numunelerine ait pürüzlülük genliği ölçüm sonuçları toplu olarak verilmiştir.

Numunelere uygulanan 1, 3 ve 5mm dolgu kalınlıklarında, dolgu kalınlığının (t) Çizelge 4.4'te verilen pürüzlülük genliği (a) değerlerine oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.5' de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Profilometre cihazı ile elde edilen süreksizliklere ait pürüzlülük genlikleri

Numune No	Kaya Adı	Pürüzlülük Genliği (mm)
AF-1	Diyabaz	1,84
AF-2	Mermer	2,62
AF-3	Litik Tüf	1,97
AF-4	Vitrik Tüf	2,33
AF-5	Trakit	2,71
AF-6	Granodiyorit	2,94

Çizelge 4.5 Uygulanacak dolgu kalınlıklarının, her bir kaya türü için belirlenen pürüzlülük genliği değerlerine oranı (t/a oranı)

Numune No	Dolgu Kalınlığı (mm)	Ortalama Pürüzlülük Genliği (mm)	t/a
AF-1	1	1,85	0,54
	3		1,62
	5		2,70
AF-2	1	2,62	0,38
	3		1,15
	5		1,91
AF-3	1	1,97	0,51
	3		1,52
	5		2,54
AF-4	1	2,33	0,43
	3		1,29
	5		2,15
AF-5	1	2,71	0,37
	3		1,11
	5		1,85
AF-6	1	2,94	0,34
	3		1,02
	5		1,70

4.5 Doğrudan Kesme Deneyleri

Tez çalışması kapsamında geleneksel doğrudan kesme deney yöntemi statik ve dolgulu koşullarda uygulanarak süreksizliklerin kesme dayanımı belirlenmiştir. Deneyler Wille Geoteknik tarafından tasarlanan kesme kutusu cihazı kullanılarak farklı mineralojik

petrografik ve jeomekanik özelliklere sahip 6 farklı kaya türü için 32 kaya seti üzerinde yapılmıştır. Bir set numune 6 farklı normal gerilmeyi temsil etmektedir.

Her bir kaya türü için normal gerilme, dolgu türü ve kalınlığına bağlı olarak deney set sayısı belirlenmiştir. Bir kaya türü için 6 farklı normal gerilme altında (0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 6,0 ve 8,0 MPa) yumuşak dolgu için 3 set, sert-1 dolgu için 3 set ve sert-2 dolgu için 2 set olmak üzere toplam 8 set (48 adet) deney yapılmıştır. Bu deneyler 3 farklı kaya türü için (AF-1, AF-2, AF-3) uygulanmıştır. Sert-2 dolgu için 5 mm dolgu kalınlığı cihaz kapasitesinden kaynaklı olarak uygulanamamıştır. Doğrudan kesme deneyleri sonuçlarına bakılarak pratik amaçlar için kullanılabilecek bir eşitlik önerilmiş olup, önerilen eşitliğin performans değerlendirmesi için deney programına 3 farklı kaya (AF-4, AF-5, AF-6) daha eklenmiştir. AF-4 için yumuşak dolgu 3 set, AF-5 için sert-1 dolgu 3 set ve AF-6 için sert-2 dolgu 2 set kullanılmış olup toplamda 48 adet deney çalışmaya eklenmiştir. Ek deneyler ile çalışma kapsamında toplamda 192 adet dolgulu statik kesme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar kesme gerilmesi-normal gerilme grafiğine aktarılmıştır. Grafikteki konumunun olağanın dışında olduğu deney sonuçlarında ilgili deney aynı normal gerilme altında yeni bir numune ile tekrarlanmıştır. Hiçbir deney numunesi ikinci kez kullanılmamıştır.

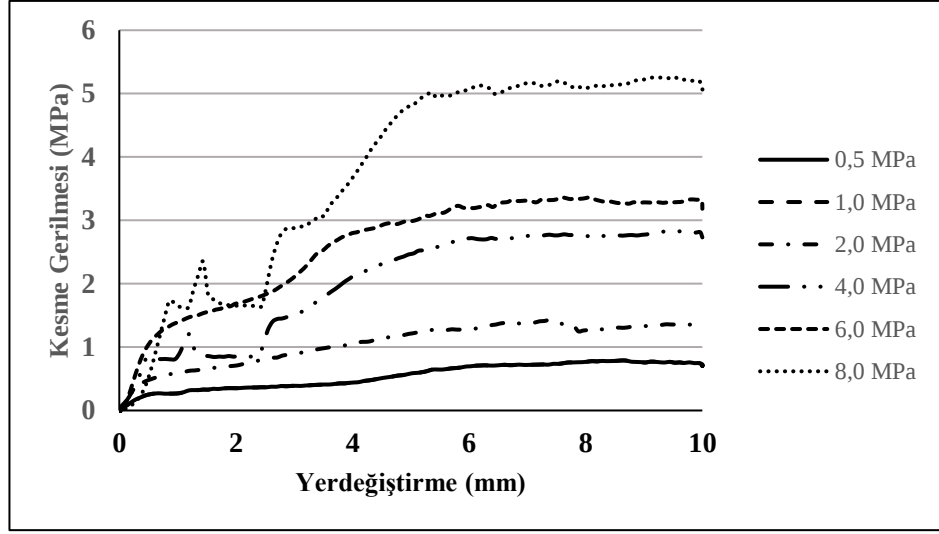
Deneylerde dolgulu numuneye uygulanan normal gerilme sonrasında kesme gerilmesi değeri genellikle doruk noktaya ulaşır rezidüel konuma geçtikten sonra deney tamamlanır. Ancak, dolgu türüne ve dolgu davranışına bağlı olarak farklı ilerleyen deney sonuçları da izlenmiştir. Kesme kutusu cihazı ile cihazın bağlı olduğu Geosys Premium programı ile kesme gerilmesi-yerdeğiştirme grafiği eş zamanlı olarak takip edilerek kaydedilmiştir. Bu verilerden elde edilen doruk kesme dayanımı ve normal gerilme verilerine göre kesme gerilmesi – normal gerilme grafikleri oluşturulmuştur. Kesme deneyleri tamamlandıktan sonra numuneler fotoğraflanmıştır (Şekil 4.1).

Doğrudan kesme deneyine tabi tutulan bazı kaya türlerine ait kesme gerilmesi - yerdeğiştirme ve kesme gerilmesi - normal gerilme grafikleri Şekil 4.2 - Şekil 4.7’de

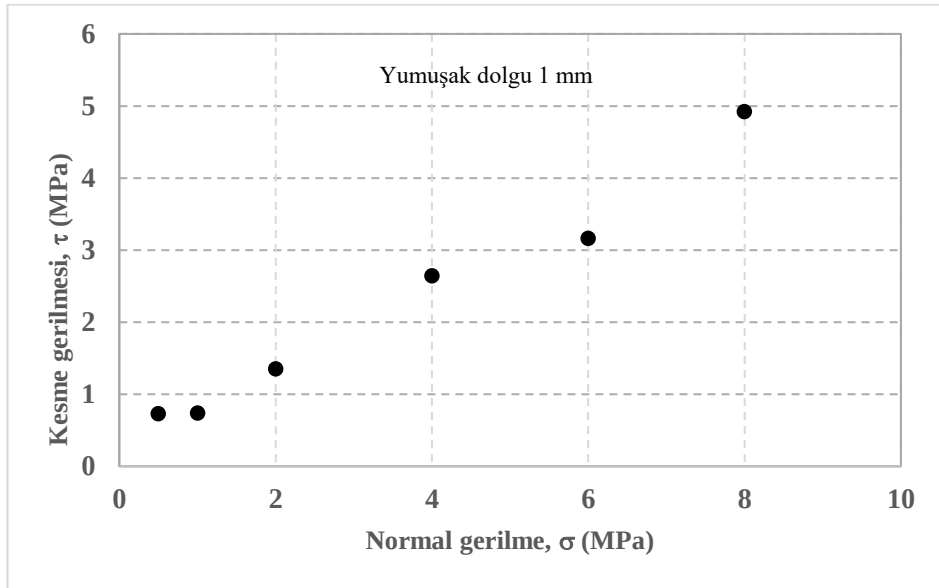
verilmiştir. Doğrudan kesme deneylerine ait toplu sonuçlar Ek 1’de verilmiştir. AF-1 kayasına ait yumuşak, sert-1 ve sert-2 dolgu uygulanmış statik kesme deneyi sonrası kaya fotoğrafları Şekil 4.8’de verilmiştir.



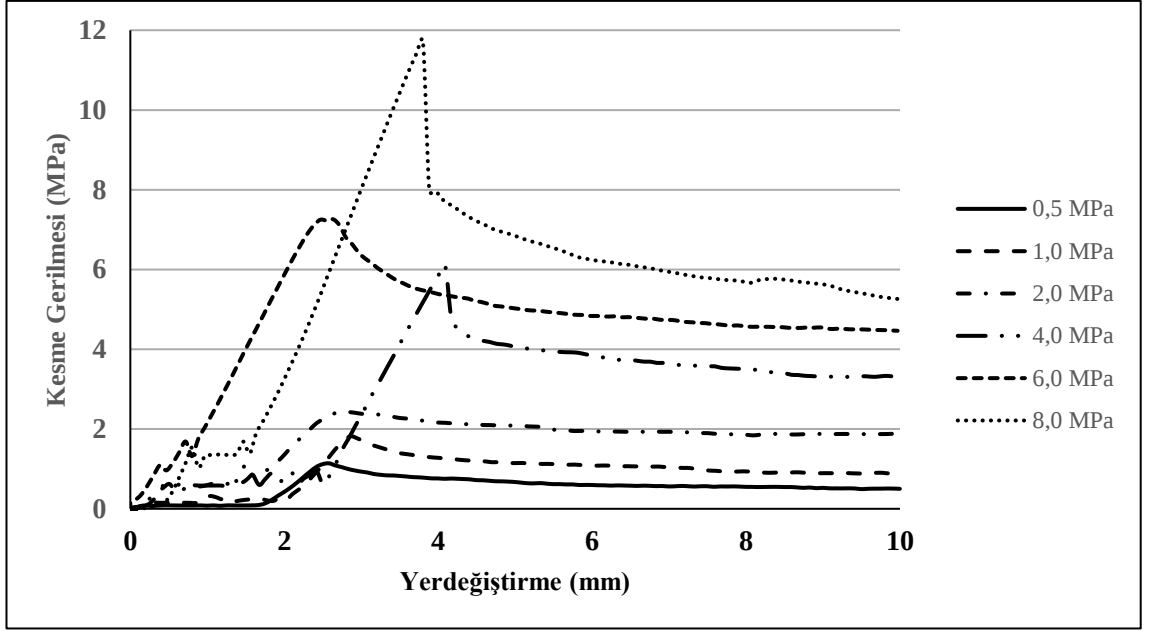
Şekil 4.1 Doğrudan kesme deneyi sonrası a) yumuşak dolgu, b) sert-1 dolgu ve c) sert-2 dolgu uygulanmış numunelere örnekler



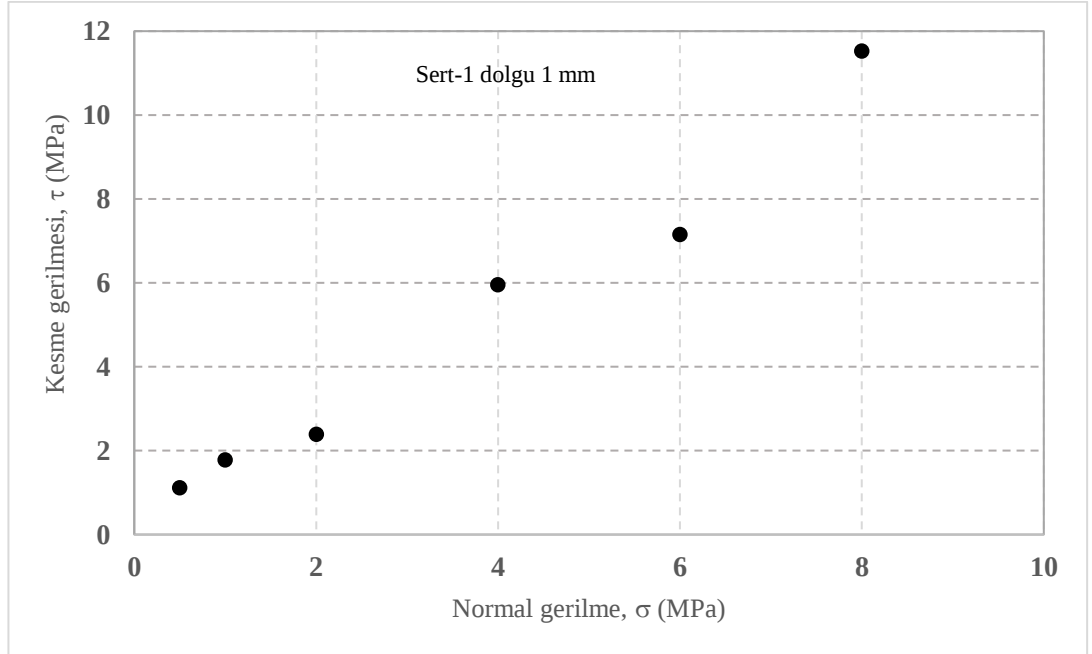
Şekil 4.2 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında yumuşak dolgulu numunenin kesme gerilmesi – yer değiştirme grafiği



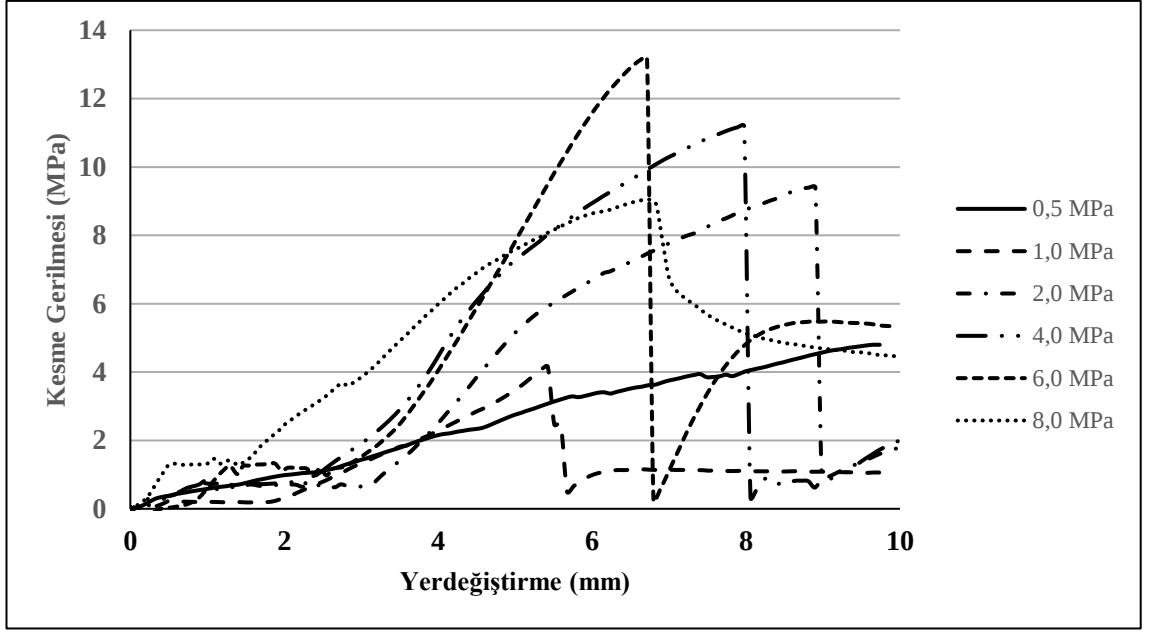
Şekil 4.3 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında yumuşak dolgulu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



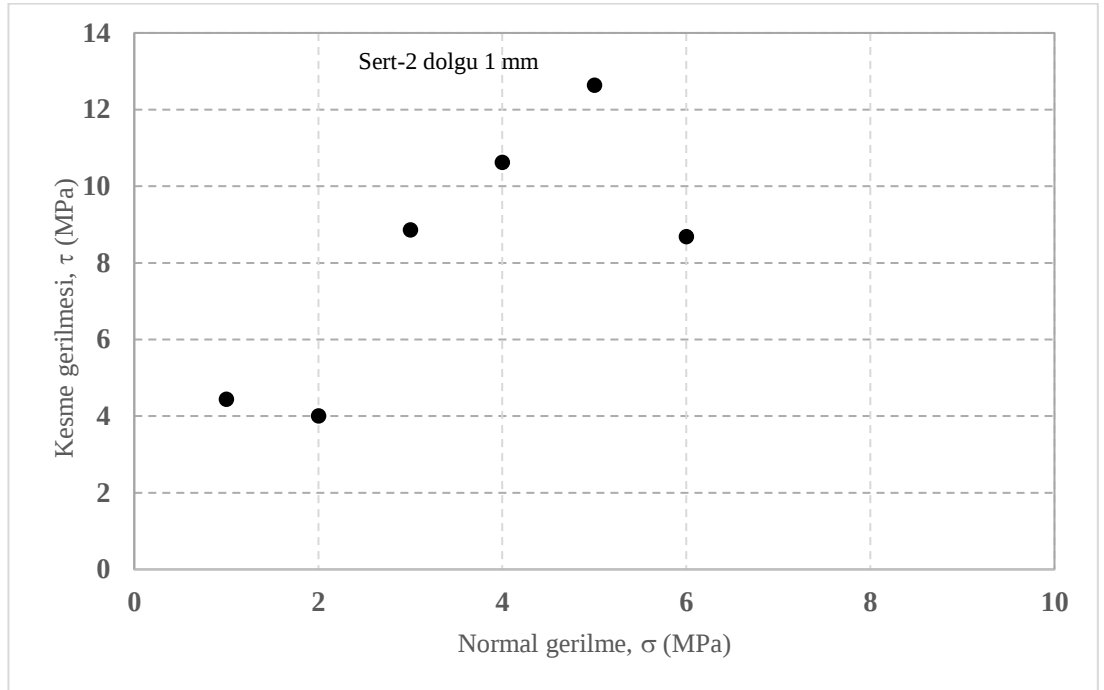
Şekil 4.4 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-1 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - yer değiştirme grafiği



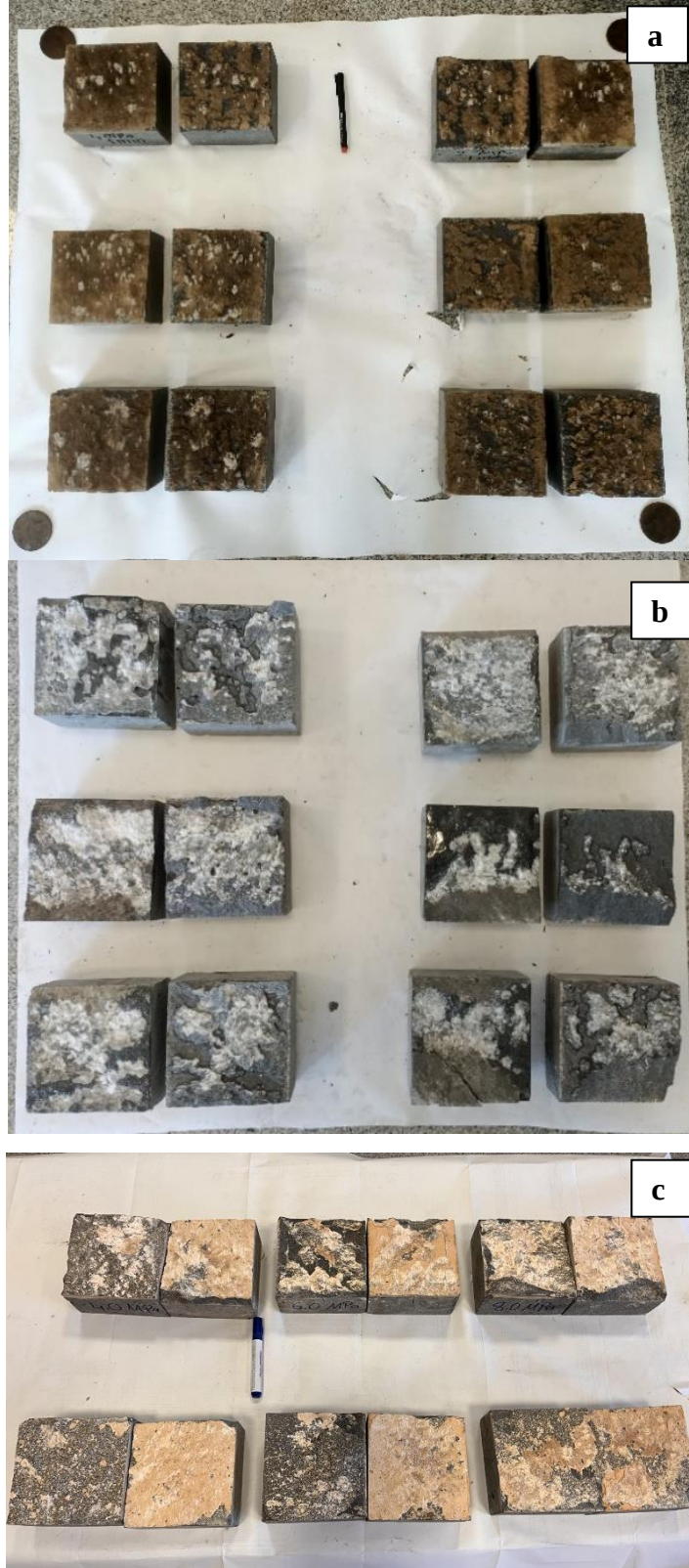
Şekil 4.5 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-1 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



Şekil 4.6 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-2 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - yer değiştirme grafiği



Şekil 4.7 AF-1 numunesinde 1 mm kalınlığında sert-2 dolgulu numunenin kesme gerilmesi - normal gerilme grafiği



Şekil 4.8 AF-1 kayasına ait a) yumuşak, b) sert-1 ve c) sert-2 dolgu uygulanmış statik kesme deneyi sonrası kaya fotoğrafları

Mokhtarian vd (2020,2025) yaptığı çalışmalarda farklı dolgu malzemelerini silindirik yüzeylere uygulamış ve üç eksenli sıkışma deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu deneyler sonucunda dayanımı yüksek dolgu malzemesinde dolgu ile kaya arasındaki yüzeyde kesmenin geliştiğini, ancak dayanımı daha düşük olan dolgularda yenilmenin dolgu malzemesi içinde gerçekleştiğini belirtmiştir.

Benzer şekilde tez kapsamında yapılan dolgulu kesme dayanımı deneylerinde yumuşak dolgu uygulanan süreksizlik yüzeylerinde yenilmeler dolgu malzemesi içinde gerçekleşmiş ve bazı pürüzlerin tıraşlandığı gözlenmiştir (Şekil 4.8a). Yumuşak dolgunun kalınlığı arttığında ise kaya-kaya kontağı kesildiği için tıraşlanmalar minimum düzeyde meydana gelmiştir. Sert-1 ve sert-2 dolgu için ise dayanımı yüksek dolgu malzemesi olduğundan yenilmeler genellikle dolgu malzemesi ve bitişindeki kaya arasındaki ara yüzeyde kesme kırılması olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.8b ve c). Dolgu kalınlığı arttıkça uygulanan normal gerilmeye de bağlı olarak kırılmalar ve kopmalar kaya numunelerinin gövdelerinde meydana gelmiştir. Özellikler sert-2 dolgu için 5 mm kalınlığında dolgu uygulanmış numunelerde deney yapmak bu sebeplerden dolayı mümkün olmamış, deney kalıbı içindeki kübik kaya numuneleri gövdelerinden kırılma eğilimi göstermiş ve cihazın kapasitesi aşılmıştır.

4.6 Dolgulu ve Dolgusuz Süreksizlik Kesme Dayanımlarının Karşılaştırılması

Jeoteknik etütlerde süreksizlikler boyunca kaymaya karşı direnç, dolgu malzemesinin kalınlığına, türüne ve dayanımına bağlı olup, dolgu malzemesi bu özellikleri ile önem taşır. Dolgu malzemesinin kaya numuneleri üzerindeki etkisi genellikle kesme dayanımının belirlenmesinde bir sorun olarak karşımıza çıkar. Aslında kaya kütlelerinde eklem gibi süreksizliklere sıklıkla rastlanır. Süreksizliğin varlığı kaya kütlelerinin davranışını değiştirecektir. Bu olay, süreksizlik dolgu malzemesiyle doldurulduğunda daha da kötüleşmektedir (Saptono vd. 2014).

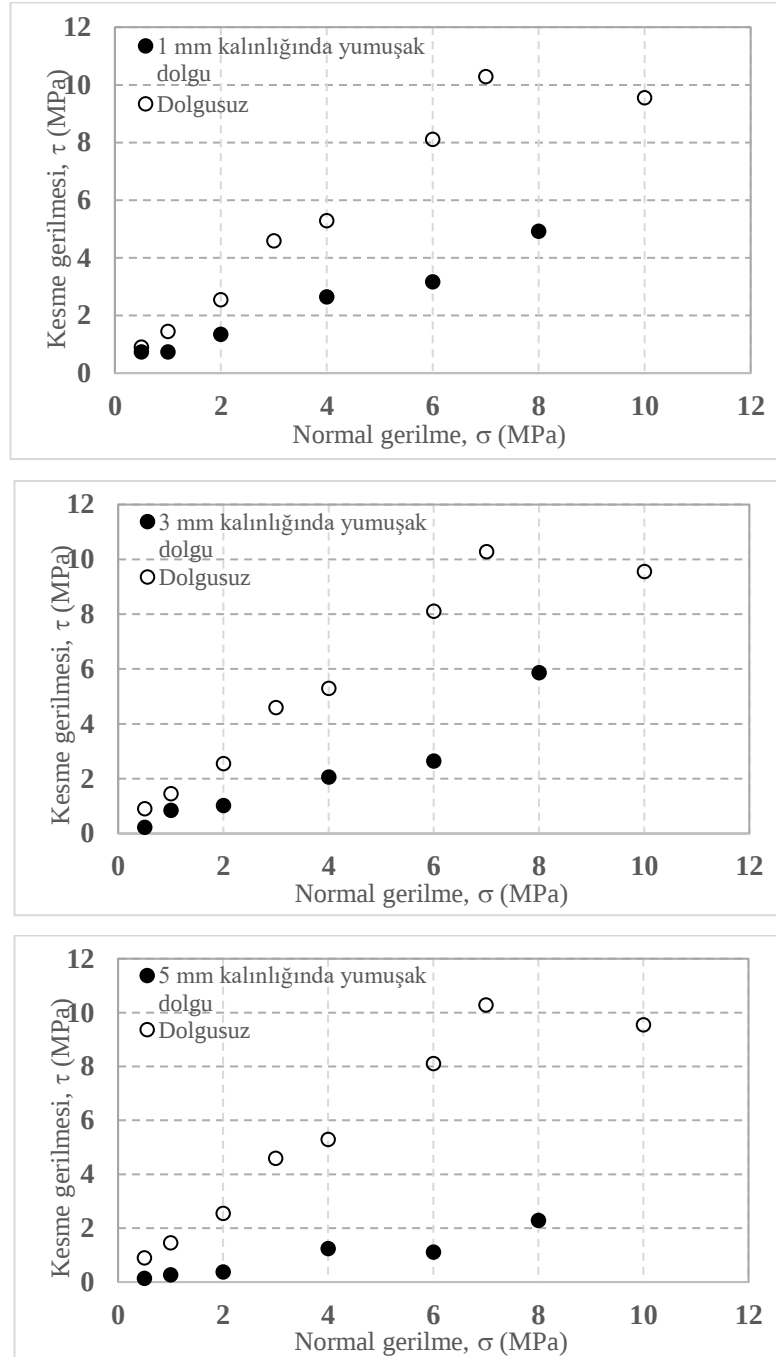
Dolgulu süreksizlikler üzerinde yapılan çalışmalarda Phien-Wej vd. (1990) ve Jahanian vd. (2015) dolgu kalınlığı pürüz yüksekliğinin 2 katı olduğunda kaya-kaya kontağı kesildiği için dayanım kontrolünün dolguya geçtiğini ve dolgunun dayanım

parametrelerinin önem kazandığını belirtmiştir. De Toledo ve De Freitas (1993) çalışmasına göre dolgu kalınlığı (t)/pürüzlülük genliği (a) oranı $> 1,0$ olduğunda eklemlerin kesme dayanımı dolgu ile aynı olurken, bu oran 1,0'den küçük olduğunda yüzey pürüzlülüğünün kesme dayanımı üzerinde etkisinin hala gözlenebildiğini belirtmiştir. Dolayısıyla, dolgulu süreksizliklerde kesme dayanımını belirleyen önemli parametrelerden birisi dolgunun kalınlığıdır. Papaliangas vd. (1993) yaptıkları çalışmada kaolin kilini dolgu malzemesi olarak kullanmış ve dolgulu süreksizlikler üzerinde bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Buna göre kil dolgulu süreksizliklerde t/a oranı 0,1'den küçük olduğunda kesme dayanımının temiz eklemlere göre %50 daha yüksek sonuç verdiğini, ancak t/a oranı arttığında kesme dayanımında azalmanın gözlemlendiğini, mermer tozu gibi sürtünmeli dolguların ise kesme dayanımını daha az düşürdüğünü belirtmiştir. Dolgunun kalınlığı yanında dolgunun türünün de kesme dayanımını etkileyen önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

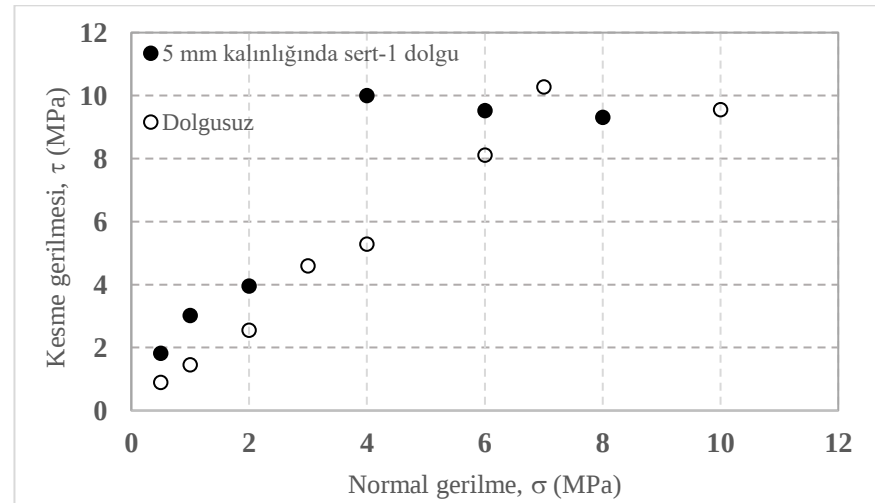
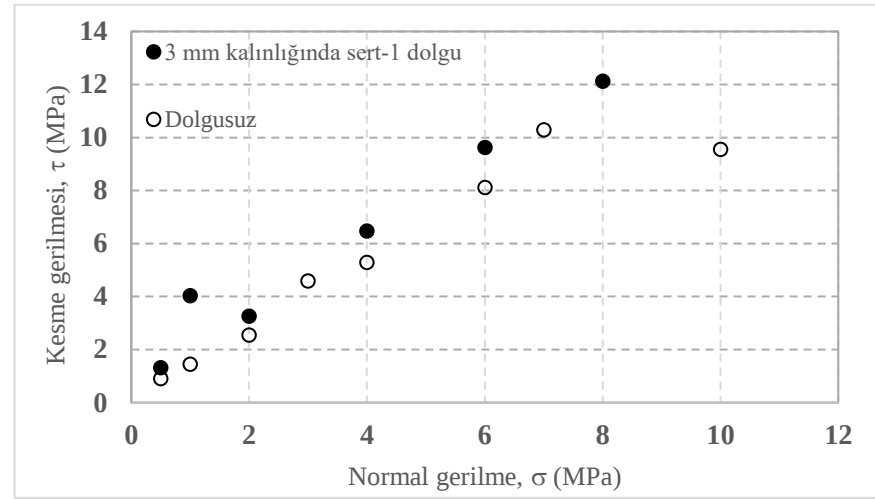
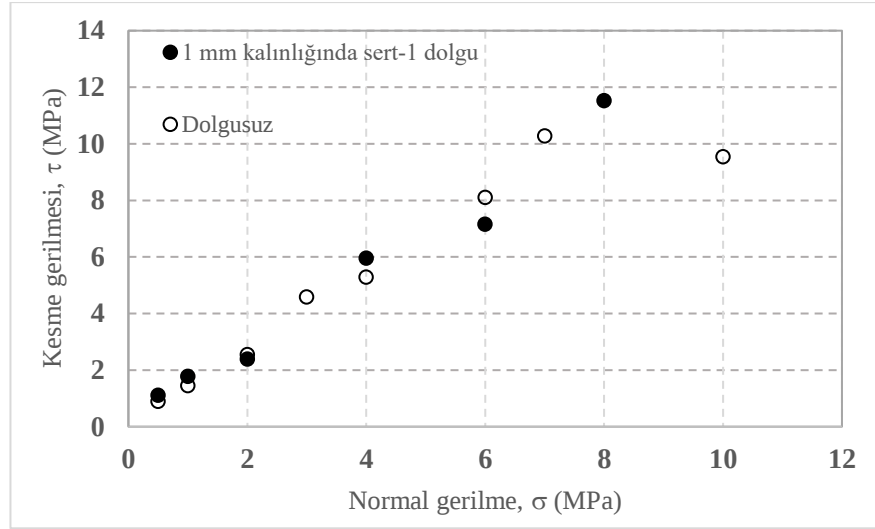
Bu çalışmanın amacı tek eksenli sıkışma dayanımı geniş bir aralıkta değişen kayalar için yapay olarak elde edilmiş süreksizlik yüzeylerinin dolgulu koşullarda bir dizi doğrudan kesme deneyi yapıldıktan sonra belirlenecek dayanımların dolgusuz dayanımlar ile karşılaştırılması ve dolgulu süreksizliklerin dolgusuz koşullara göre nasıl değiştiğinin farklı dayanımdaki kayalara ve farklı dolgu türlerine göre sayısal olarak belirlenmesi, dolgu türü ve kalınlığının süreksizlik kesme dayanımına etkisinin gerçek duruma en yakın koşullarda incelenmesidir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, dolguların dayanımı azaltıcı ve arttırıcı yönde etki ettikleri olduğu bilindiğinden, doğal süreksizliklerde sıklıkla karşılaşılan dolgu türlerinin doğal kaya numuneleri üzerinde yapay olarak oluşturulan süreksizlik yüzeylerine uygulanarak laboratuvar koşullarında temsil edilmesi hedeflenmiş, dayanımı azaltacağı ve arttıracağı düşünülen farklı jeomekanik parametrelere sahip dolgular seçilmiş ve kesme deneyleri uygulanmıştır. Ancak, dolgu tür ve kalınlığının süreksizlik kesme dayanımına ne ölçüde etkidiğinin sayısal olarak belirlenebilmesi için dolgusuz koşullardaki kesme dayanımının bilinmesi gerekir. Bu amaçla dolgusuz süreksizliklerin kesme dayanımı ayrıca çalışılmamış olup aynı tez danışmanı tarafından yürütülen ve tamamlanan Beyhan (2024) doktora tezinden izin alınarak kullanılmıştır.

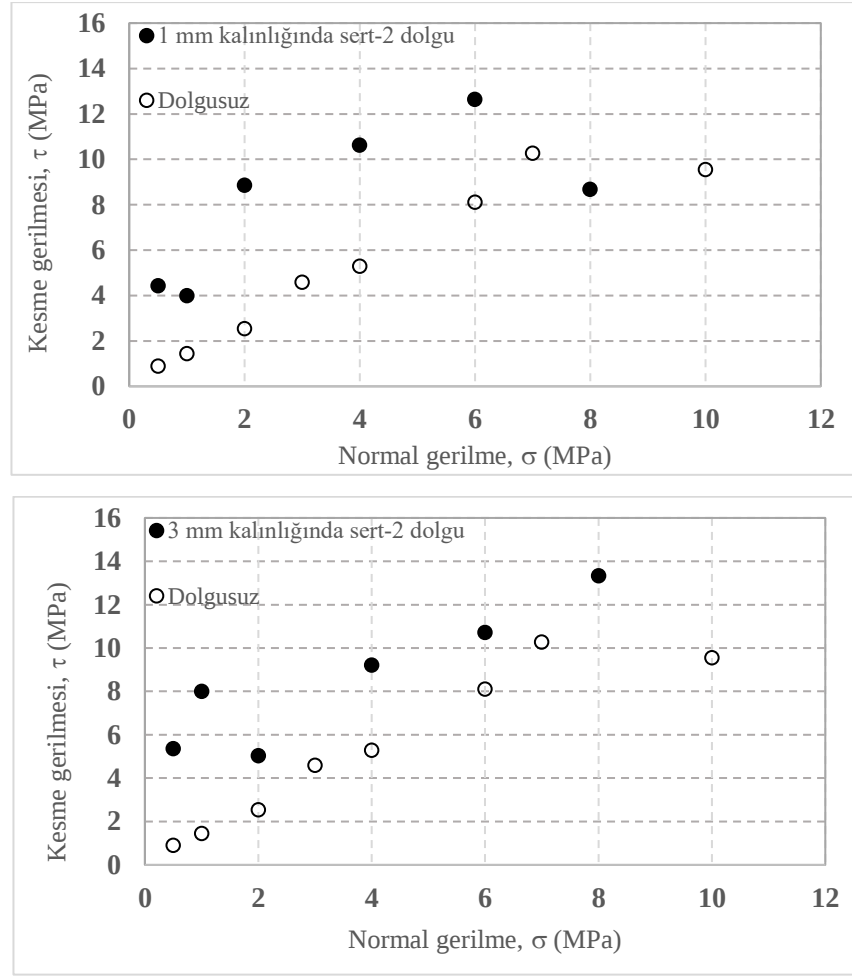
Çalışma kapsamında dolgulu süreksizlikler ile gerçekleştirilen kesme dayanımı deneyleri dolgusuz süreksizliklerin kesme dayanımları ile karşılaştırılmış, dolgu varlığının kesme dayanımı üzerindeki etkisi nicelleştirilmiştir. Dolgusuz ve dolgulu kesme dayanımı-normal gerilme grafikleri Şekil 4.9-4.17 arasında verilmiştir.



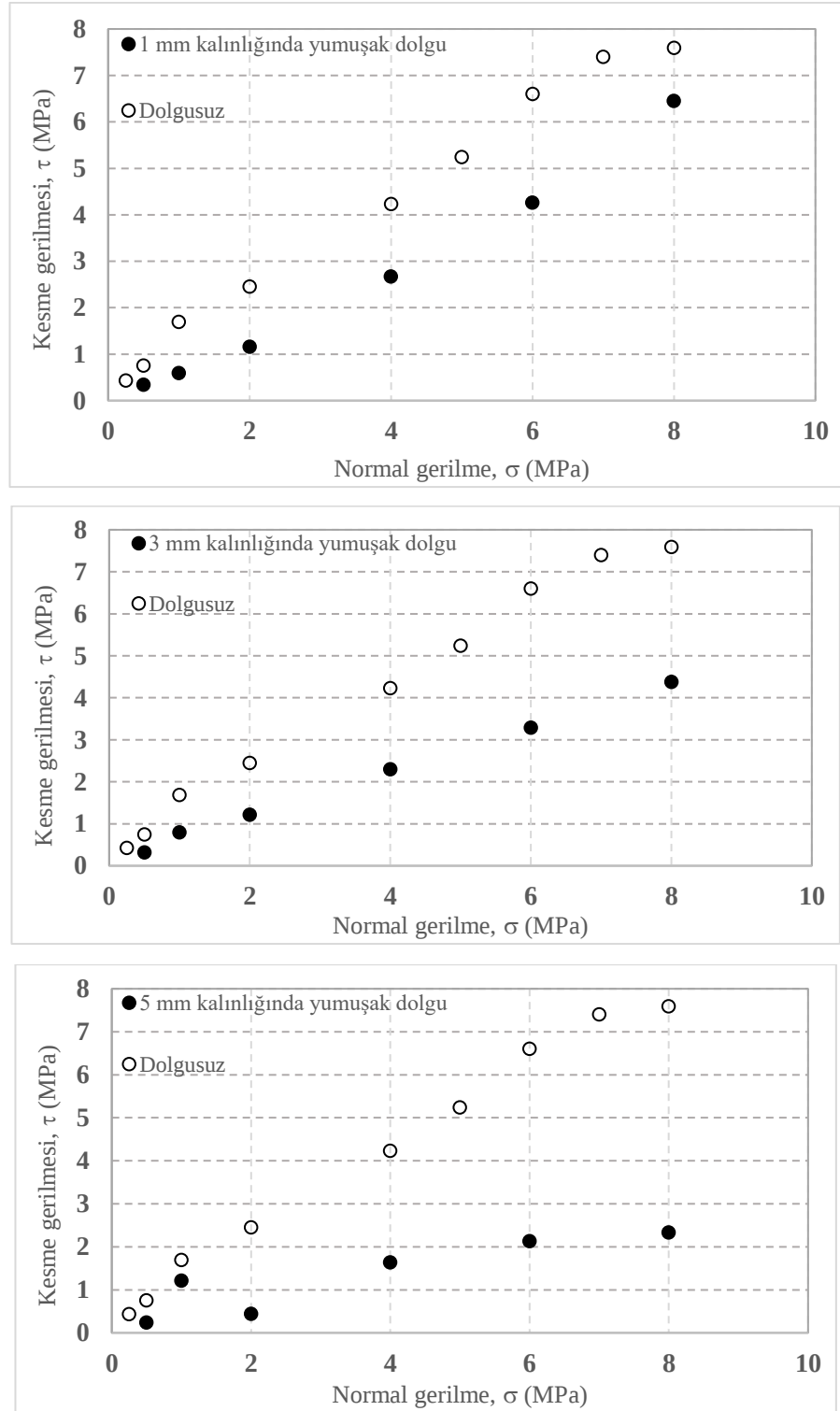
Şekil 4.9 AF-1 (diyabaz) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



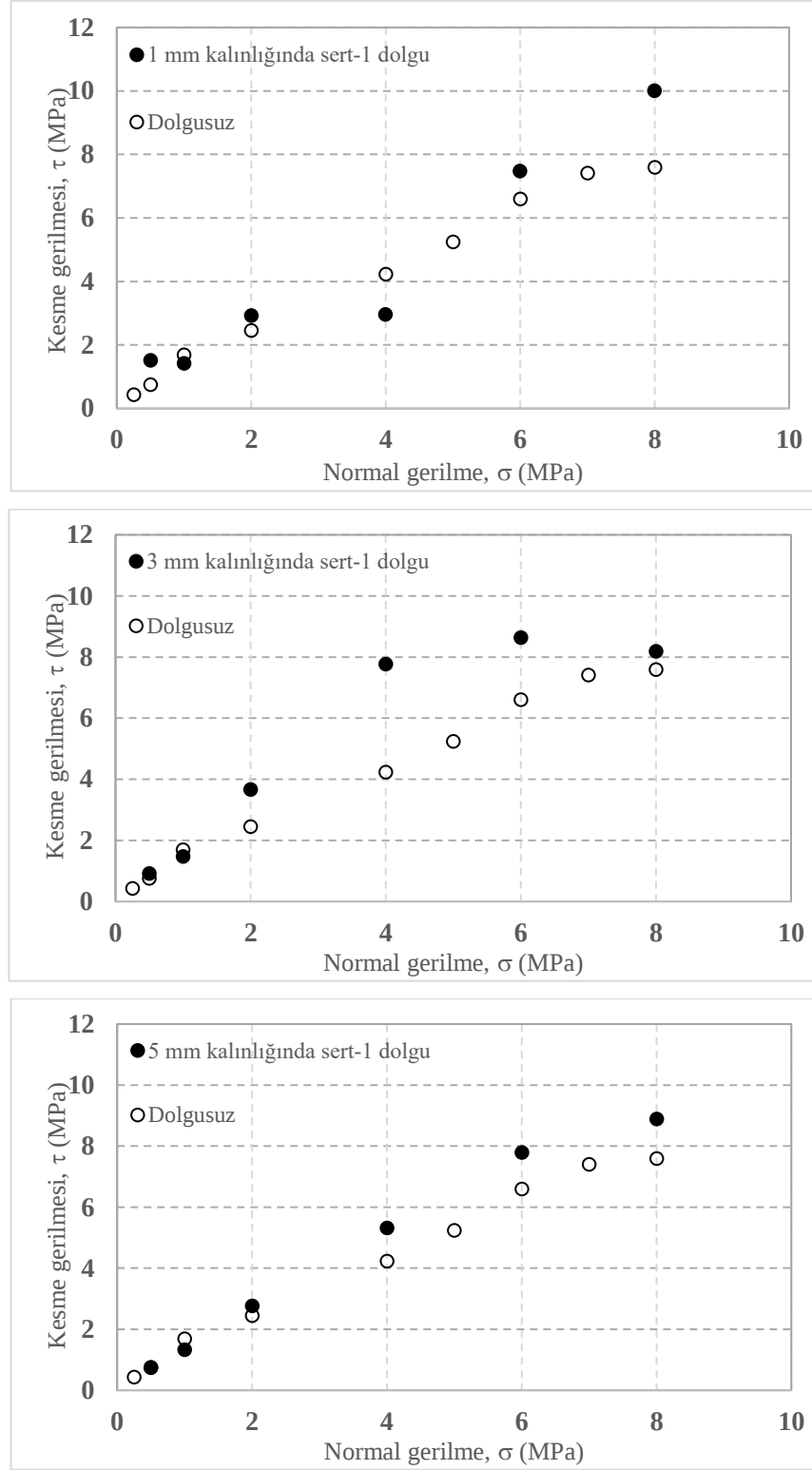
Şekil 4.10 AF-1 (diyabaz) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



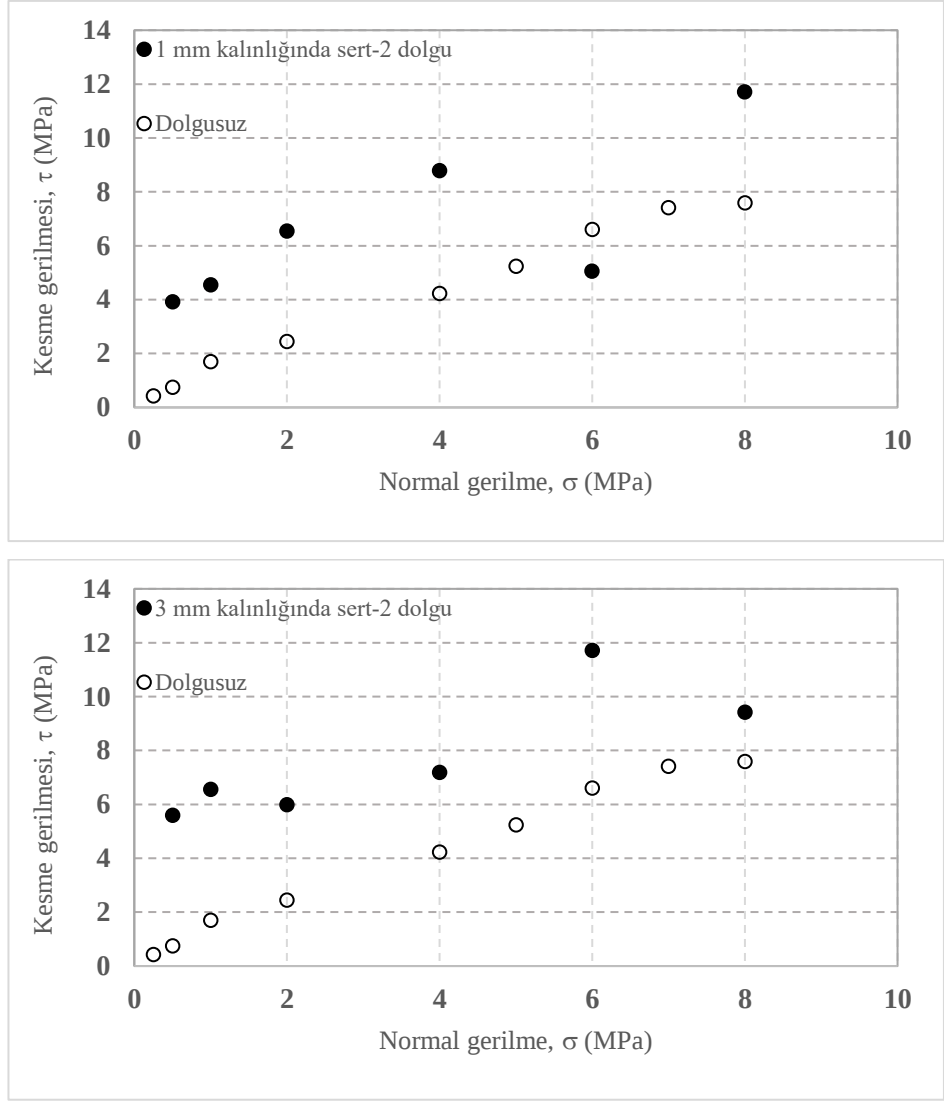
Şekil 4.11 AF-1 (diyabaz) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolguşuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



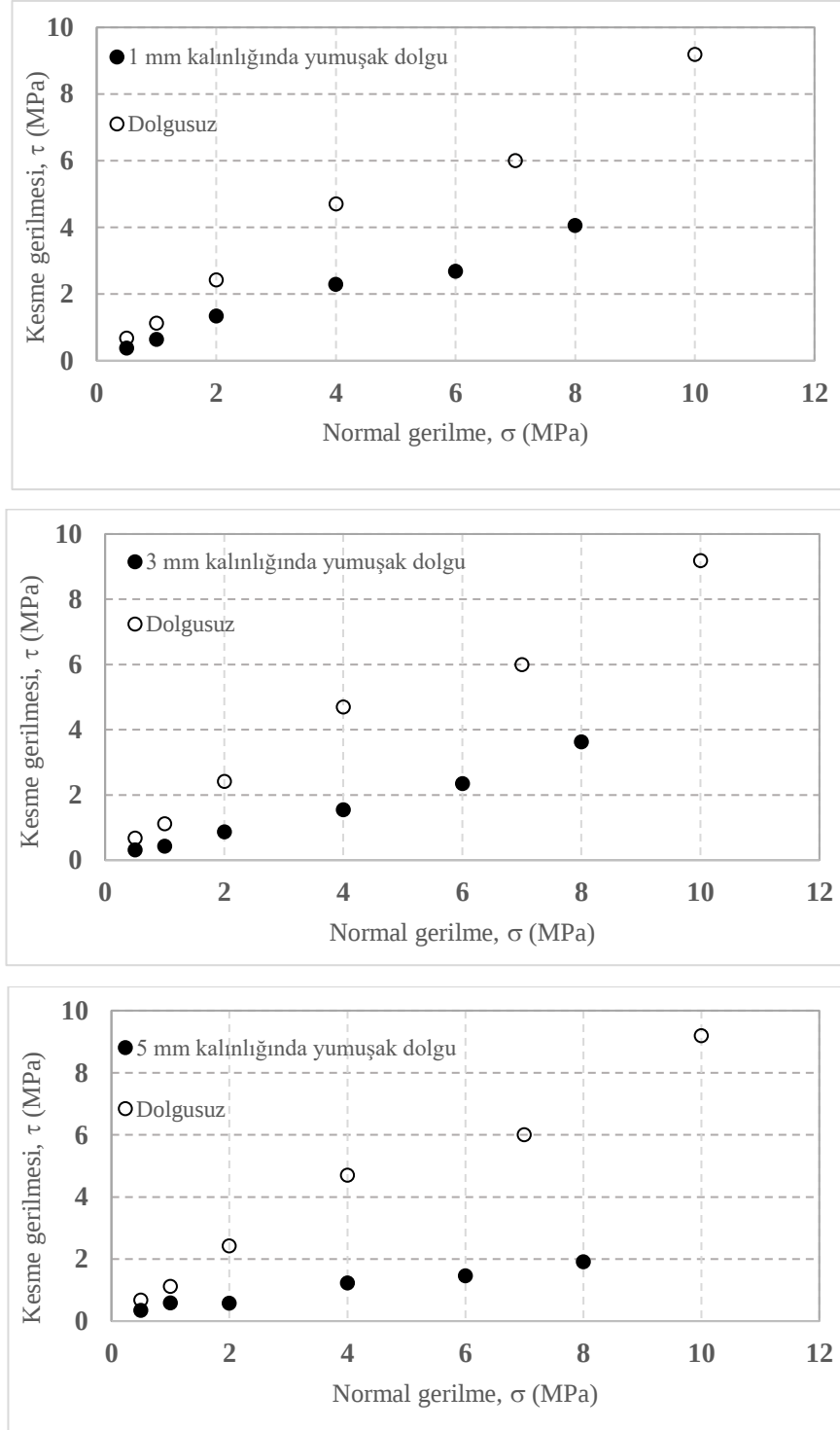
Şekil 4.12 AF-2 (mermer) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolgunsuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



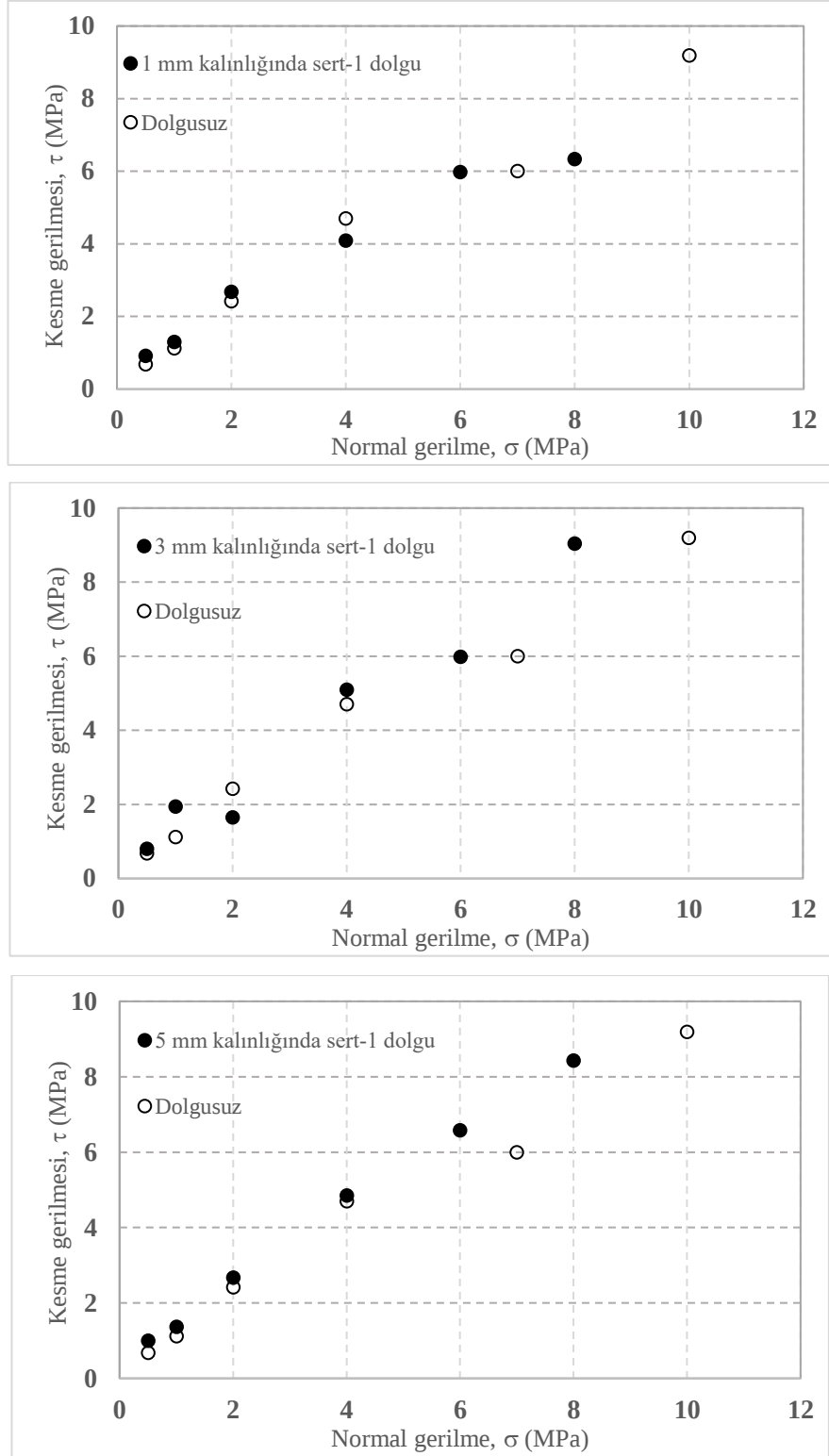
Şekil 4.13 AF-2 (mermer) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgu' kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



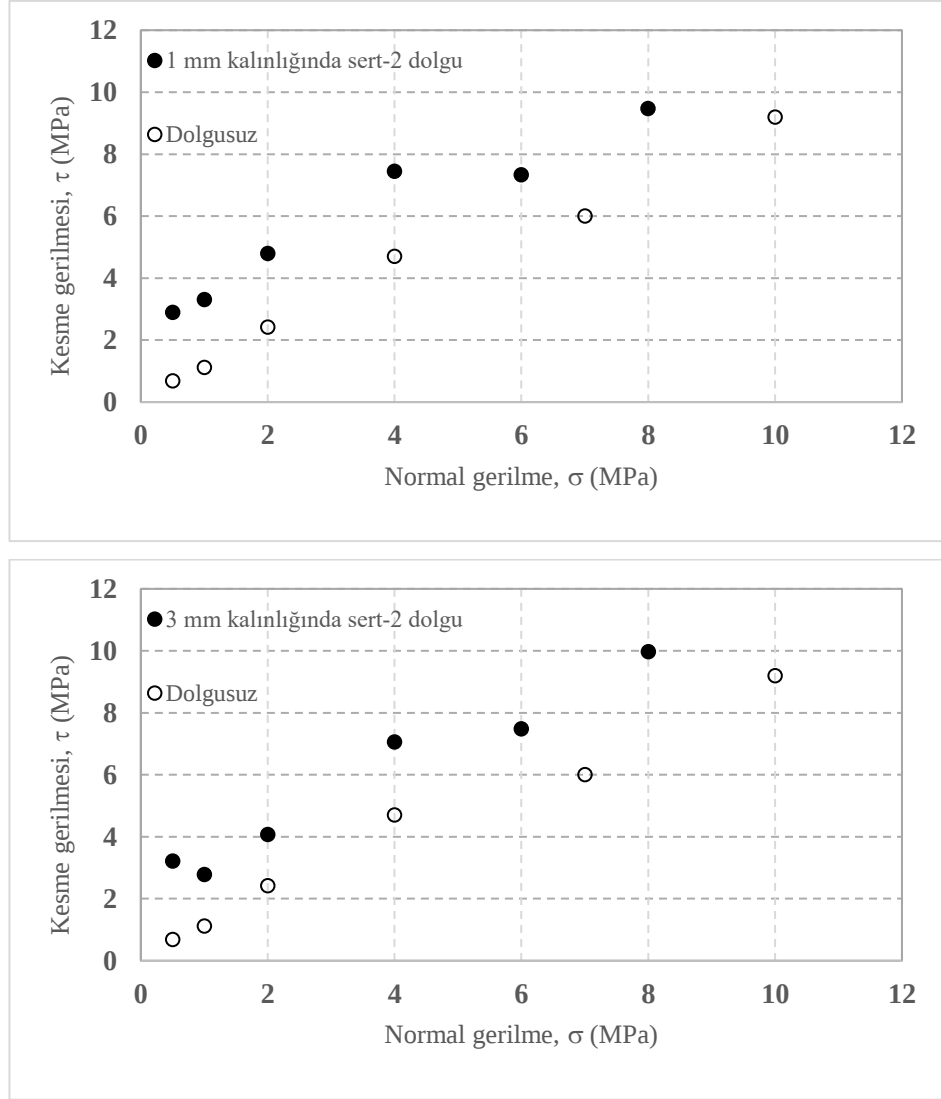
Şekil 4.14 AF-2 (mermer) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolgunsuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



Şekil 4.15 AF-3 (litik tüf) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolguşuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



Şekil 4.16 AF-3 (litik tuf) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



Şekil 4.17 AF-3 (litik tuf) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolgunsuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri

Lama (1978) gerilme çatlaklarının benzerini kullanarak yaptığı testlerde sert jips ve kaolin dolgu kullanmıştır. Buna göre t/a oranı 0,35-0,72 arasında olduğunda kesme dayanımında düşüşler olduğunu, 0,07-0,25 arasında kesme dayanımında %50 oranında azalma olduğunu ve t/a > 2,0 olduğunda eklem dayanımının dolgu malzemesi tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir. Çalışma kapsamında yumuşak dolgu kullanılan süreksizlik kesme dayanımlarında düşüşler olduğu gözlenmiş ve dolgunsuz dayanımlara göre bu düşüşün miktarı % cinsinden hesaplanmıştır. Lama (1978)'e benzer sonuçlar elde edilmiştir. Değişim miktarı % cinsinden hesaplanmış ve Çizelge 4.7'de ilgili

değişim miktarları verilmiştir. Burada τ_{UF} : Dolgusuz kesme dayanımını, τ_F : Dolgulu kesme dayanımını göstermektedir.

Çalışma kapsamında ilk olarak kullanılan 3 çeşit kaya (AF-1, AF-2, AF-3) için dolgulu kesme dayanımlarının dolgusuz kesme dayanımlarına göre % cinsinden kesme dayanımı değişimleri incelendiğinde; yumuşak dolguda dolgu kalınlığı 1 mm olduğunda en çok %49 azalma olduğu, kalınlık 3 mm olduğunda en çok %61,2 azalma görüldüğü ve kalınlık 5 mm olduğunda kesme dayanımındaki azalmanın en çok %82,2 olduğu Çizelge 4.6'da görülmektedir. Kesme dayanımındaki değişimler dolgu kalınlığı (t) / pürüzlülük genliği (a) oranı açısından incelenecek olursa; t/a oranı 0,38-0,54 arasında olduğunda kesme dayanımında %43,3-49 arasında düşüş olduğu, t/a oranı 1,15-1,62 arasında olduğunda kesme dayanımında %49,7-61,2 arasında düşüş olduğu ve t/a oranı 1,91-2,70 arasında olduğunda kesme dayanımında %62,8-82,2 arasında düşüşlerin görüldüğü ve kesme dayanımının dolgu kontrolüne geçtiği anlaşılmaktadır. De Toledo ve De Freitas (1993)'e göre t/a < 1,0 olduğunda kaya-kaya kontağı olduğundan kesme davranışının yüzey pürüzlülüğü tarafından denetlendiği belirtilmiştir. Sonuçlara bakıldığında t/a oranı 0,38-0,54 arasında olan kesme dayanımlarında pürüzlülük genliği en yüksek olan AF-2 numunesinde (a = 2,62 mm) kesme dayanımında %43,3 ile en az düşüş miktarı gözlenmektedir. Kesme davranışında yüzey pürüzlülüğünün etkisi bariz bir şekilde görülmektedir.

Wang ve Nguyen (2022) yaptıkları çalışmada üç yaygın kaya dolgusunu kullanmış ve numunelere UCS deneyi uygulamıştır. Dolgu kullanımının kaya numunelerinin UCS skorunu yükseltebildiğini ve çatlaklı kayaların performansını arttırmada etkin rol oynadığını gözlemişlerdir. Sert-1 dolgu için benzer şekilde süreksizliklere uygulanan dolgunun kesme dayanımı artırıcı yönde etki ettiği görülmüştür. Dolgulu kesme dayanımlarının dolgu kalınlığı 1 mm olduğunda en çok %19,9 artış olduğu, kalınlık 3 mm olduğunda en çok % 30 artış görüldüğü ve dolgu kalınlığı 5 mm olduğunda en çok %60,4 artış olduğu Çizelge 4.7'de görülmektedir. Dolgusuz duruma göre % cinsinden kesme dayanımı değişimlerine bakıldığında; t/a oranı 0,38-0,54 arasında olduğunda %2,7-19,9 arasında artış olduğu, t/a oranı 1,15-1,62 arasında olduğunda %10,9-51,3 arasında artış olduğu ve t/a oranı 1,91-2,70 arasında olduğunda kesme dayanımında %8,6-60,4 arasında kesme dayanımda artışlar olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6 Süreksizliklerde dolgu varlığında elde edilen kesme dayanımı sonuçlarının dolgusuz durum ile olan % değişimi. Burada kil için $c = 0$ MPa, $\phi = 23,2^\circ$; alçı için $c = 5$ MPa, $\phi = 59^\circ$ ve reçine için $c = 3$ MPa, $\phi = 68^\circ$ 'dir.

		τ_{UF} (MPa)	τ_F (MPa)	Değişim (%)	Ort. Dğs. (%)
Diyabaz / Kil	1 mm	0,90	0,73	-18,9	-46,4
		1,45	0,74	-49,0	
		2,55	1,35	-47,1	
		5,29	2,64	-50,1	
		8,11	3,16	-61,0	
		10,28	4,92	-52,1	
	3 mm	0,90	0,22	-75,6	-58,2
		1,45	0,84	-42,1	
		2,55	1,02	-60,0	
		5,29	2,06	-61,1	
		8,11	2,64	-67,4	
		10,28	5,86	-43,0	
	5 mm	0,90	0,13	-85,6	-82,2
		1,45	0,27	-81,4	
		2,55	0,37	-85,5	
		5,29	1,24	-76,6	
		8,11	1,11	-86,3	
		10,28	2,29	-77,7	
Diyabaz / Alçı	1 mm	0,90	1,12	24,4	8,9
		1,45	1,78	22,8	
		2,55	2,39	-6,3	
		5,29	5,95	12,5	
		8,11	7,15	-11,8	
		10,28	11,52	12,1	
	3 mm	0,90	1,31	45,6	51,3
		1,45	4,03	177,9	
		2,55	3,26	27,8	
		5,29	6,47	22,3	
		8,11	9,62	18,6	
		10,28	11,85	15,3	
	5 mm	0,90	1,82	102,2	60,4
		1,45	3,02	108,3	
		2,55	3,95	54,9	
		5,29	10,00	89,0	
		8,11	9,52	17,4	
		10,28	9,31	-9,4	
Diyabaz / Reçine	1 mm	0,90	4,44	393,3	159,6
		1,45	4,00	175,9	
		2,55	8,86	247,5	
		5,29	10,62	100,8	
		8,11	12,63	55,7	
		10,28	8,68	-15,6	
	3 mm	0,90	5,36	495,6	197,0
		1,45	8,01	452,4	
		2,55	5,04	97,6	
		5,29	9,22	74,3	
		8,11	10,73	32,3	
		10,28	13,33	29,7	

		τ_{uf} (MPa)	τ_f (MPa)	Değişim (%)	Ort. Dğş. (%)
Mermer / Kil	1 mm	0,75	0,34	-54,7	-43,3
		1,69	0,59	-65,1	
		2,45	1,16	-52,7	
		4,23	2,67	-36,9	
		6,60	4,26	-35,5	
		7,59	6,45	-15,0	
	3 mm	0,75	0,32	-57,3	-49,7
		1,69	0,80	-52,7	
		2,45	1,22	-50,2	
		4,23	2,30	-45,6	
		6,60	3,29	-50,2	
		7,59	4,38	-42,3	
	5 mm	0,75	0,24	-68,0	-62,8
		1,69	1,21	-28,4	
		2,45	0,44	-82,0	
		4,23	1,64	-61,2	
		6,60	2,13	-67,7	
		7,59	2,33	-69,3	
Mermer / Alçı	1 mm	0,75	1,51	101,3	19,9
		1,69	1,42	-16,0	
		2,45	2,92	19,2	
		4,23	2,96	-30,0	
		6,60	7,47	13,2	
		7,59	10,00	31,8	
	3 mm	0,75	0,91	21,3	30,0
		1,69	1,47	-13,0	
		2,45	3,66	49,4	
		4,23	7,77	83,7	
		6,60	8,63	30,8	
		7,59	8,18	7,8	
	5 mm	0,75	0,74	-1,3	8,6
		1,69	1,33	-21,3	
		2,45	2,77	13,1	
		4,23	5,32	25,8	
		6,60	7,79	18,0	
		7,59	8,89	17,1	
Mermer / Reçine	1 mm	0,75	3,92	422,7	149,5
		1,69	4,55	169,2	
		2,45	6,54	166,9	
		4,23	8,78	107,6	
		6,60	5,05	-23,5	
		7,59	11,71	54,3	
	3 mm	0,75	5,59	645,3	208,2
		1,69	6,55	287,6	
		2,45	5,99	144,5	
		4,23	7,19	70,0	
		6,60	11,71	77,4	
		7,59	9,42	24,1	

τ_{uf} (MPa) τ_F (MPa) Değişim (%) Ort. Dğş. (%)					
Litik Tüf / Kil	1 mm	0,68	0,38	-44,1	-49,0
		1,12	0,64	-42,9	
		2,42	1,34	-44,6	
		4,70	2,29	-51,3	
		6,00	2,68	-55,3	
		9,19	4,05	-55,9	
	3 mm	0,68	0,32	-52,9	-61,2
		1,12	0,43	-61,6	
		2,42	0,87	-64,0	
		4,70	1,55	-67,0	
		6,00	2,35	-60,8	
		9,19	3,63	-60,5	
	5 mm	0,68	0,34	-50,0	-67,0
		1,12	0,59	-47,3	
		2,42	0,58	-76,0	
		4,70	1,23	-73,8	
		6,00	1,46	-75,7	
		9,19	1,91	-79,2	
Litik Tüf / Alçı	1 mm	0,68	0,91	33,8	2,7
		1,12	1,30	16,1	
		2,42	2,68	10,7	
		4,70	4,09	-13,0	
		6,00	5,97	-0,5	
		9,19	6,33	-31,1	
	3 mm	0,68	0,80	17,6	10,9
		1,12	1,94	73,2	
		2,42	1,65	-31,8	
		4,70	5,09	8,3	
		6,00	5,98	-0,3	
		9,19	9,04	-1,6	
	5 mm	0,68	1,00	47,1	14,0
		1,12	1,37	22,3	
		2,42	2,67	10,3	
		4,70	4,85	3,2	
		6,00	6,58	9,7	
		9,19	8,43	-8,3	
Litik Tüf / Reçine	1 mm	0,68	2,89	325,0	114,4
		1,12	3,29	193,8	
		2,42	4,70	94,2	
		4,70	7,34	56,2	
		6,00	7,12	18,7	
		9,19	9,06	-1,4	
	3 mm	0,68	3,21	372,1	111,9
		1,12	2,78	148,2	
		2,42	4,07	68,2	
		4,70	7,05	50,0	
		6,00	7,48	24,7	
		9,19	9,97	8,5	

Sert-2 dolgu için dolgu kalınlığı 1 mm olduğunda en çok %149,5 artış görüldüğü, dolgu kalınlığı 3 mm olduğunda ise en çok %208,2 artış olduğu Çizelge 4.6'da görülmektedir. t/a oranı 0,38-0,54 arasında olduğunda kesme dayanımında %114,4-159,6 arasında artış olduğu; t/a oranı 1,15-1,62 arasında olduğu durumda %197-208,2 arasında kesme dayanımını arttırıcı yönde etki ettiği anlaşılmaktadır.

Süreksizlik dolgusunun türüne, kalınlığına ve kaya türüne bağlı olarak dolgulu kesme dayanımı üzerinde nasıl etkidiği yapay süreksizlik düzlemleri ve farklı dolgu çeşitleri kullanılarak ortaya konulmuştur. Dolgulu süreksizlik içeren kayalarda inşa edilecek yapılarda kullanılması gereken parametreler konusunda yeni yaklaşımlar geliştirilmesi beklenir. Kaya kütlelerinin davranışının belirlenmesi, süreksizliklerin mekanik ve geometrik özelliklerinin karakterizasyonunu gerektirir (Tartoussi vd.2023).

Doğrudan kesme deneyinden elde edilen kesme gerilmesinin uygulanan normal gerilme, kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı, t/a oranı ve dolgunun tek eksenli dayanımının fonksiyonu olduğu düşünülmektedir. Ancak, bu bağımsız değişkenlerin kesme gerilmesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi için DATAFIT programı ile bazı analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında deneysel olarak elde edilen kesme gerilmesini (τ_{ex}) etkileyen bağımsız değişkenler, uygulanan normal gerilme (σ_n), kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c), dolgu kalınlığı/genlik oranı (t/a), dolgunun kohezyonu (C_{dolgu}), dolgunun içsel sürtünme açısı (ϕ_{dolgu}) ve pürüzlülük açısıdır (i). DATAFIT programı kullanılarak yapılan analizlerde aşağıda verilen eşitlik elde edilmiştir.

$$\tau = 0,79\sigma_n + 0,034 \sigma_c - 0,049t/a - 0,46 C_{dolgu} + 0,154\phi_{dolgu} + 0,20i - 9,86 \quad (4.3)$$

Eşitliğe göre bağımsız değişkenler yerine konulduğunda elde edilen R^2 değeri 0,83 olmaktadır.

4.7 Doğrudan Kesme Ek Deneyleri

Tez kapsamında 3 farklı kaya türünde 3 farklı tür dolgu kullanılarak 144 adet dolgulu statik kesme deneyi yapılmıştır. Bu 3 kaya türünden farklı 3 ayrı kaya türü daha belirlenerek önerilen eşitliğin sınanması için farklı kaya türleri üzerinde rastgele dolgu türü ve kalınlığında kesme deneylerinin uygulanması planlanmıştır. Bu kapsamda farklı dayanımlar sunan ignimbrit, trakit ve granodiyorit kayaları kullanılmıştır. Bu şekilde

ilave 48 deney daha yapılarak toplamda 192 adet deney gerçekleştirilmiştir. Kayalar ile ilgili detaylar Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Ek deney yapılacak kaya numunelerine ait bilgiler

Numune Kodu	Lokasyon	Renk	Kayaç Adı	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)
AF-4	Kayseri	Açık gri	İgnimbrit	66,8
AF-5	Gölbaşı	Pembe	Trakit	88,4
AF-6	Kaman	Gri pembe	Granodiyorit	114,7

4.7.1 Ek deney numunelerinin pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliği:

Süreksizliklerin pürüzlülük açısının belirlenmesi önceki kaya numunelerinde olduğu gibi elektromekanik profilometre yardımıyla ölçülmüştür. Ölçümler kesme yönüne dik ve paralel olacak şekilde tekrarlanmış ve her bir kaya türü için pürüzlülük açısı hesaplanmıştır. Pürüzlülük genliği hesapları da yine önceki numunelerde uygulandığı şekilde benimsenen yöntem ile; yani maksimum dip noktaya bir teğet çizilerek kesme deneyi sırasında temas olabilecek tüm piklerin ortalamasının alınmasına dayalı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Numunelere uygulanan 1, 3 ve 5mm dolgu kalınlıklarında, dolgu kalınlığının Çizelge 4.8’de verilen pürüzlülük genliği değerlerine oranları hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.8 Araştırmaya sonradan dahil edilen üç kayanın ortalama süreksizlik pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliği değerleri

Numune Kodu	Ortalama Pürüzlülük Açısı (i) (°)	Ortalama Pürüzlülük Genliği (mm)
AF – 4	14	2,33
AF – 5	16	2,71
AF – 6	16	2,94

Çizelge 4.9 Araştırmaya sonradan dahil edilen üç kaya için uygulanacak dolgu kalınlıklarının, her bir kaya türü için belirlenen pürüzlülük genliği değerlerine oranı (t/a oranı)

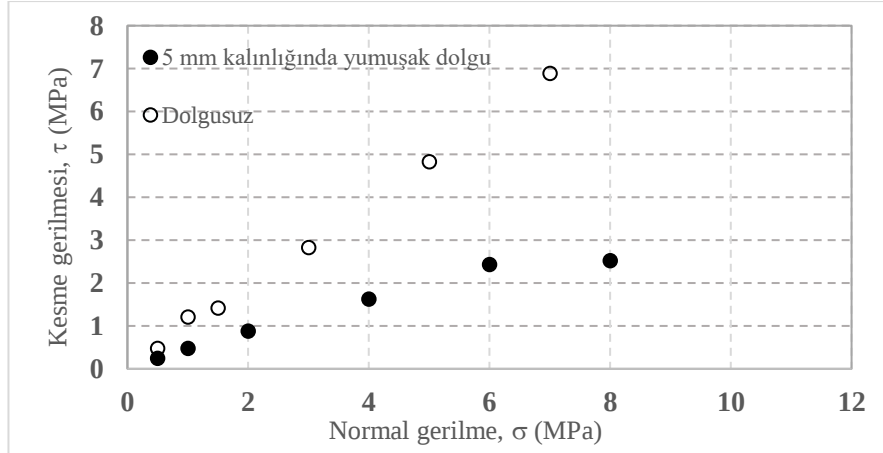
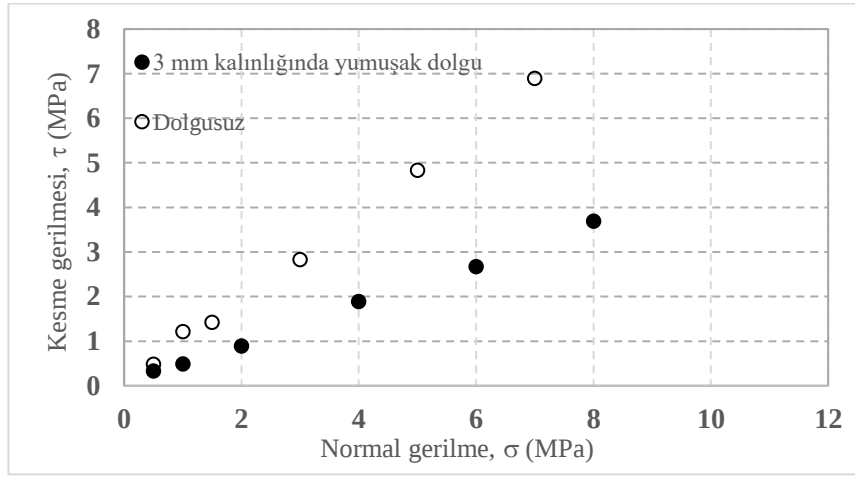
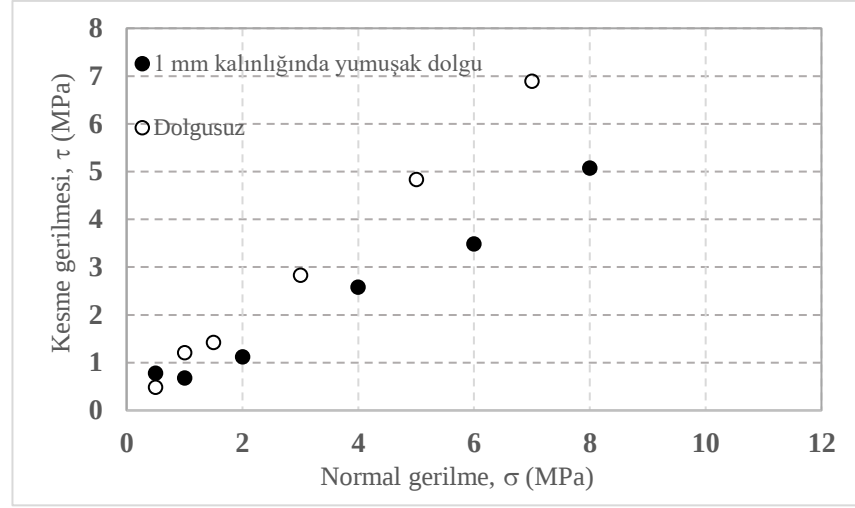
Numune Kodu	Dolgu Kalınlığı (mm)	Ortalama Pürüzlülük Genliği (mm)	t/a
AF-4	1	2,33	0,43
	3		1,29
	5		2,15
AF-5	1	2,71	0,37
	3		1,11
	5		1,85
AF-6	1	2,94	0,34
	3		1,02
	5		1,70

4.7.2 Ek deney numunelerinin kesme dayanımı deneyleri:

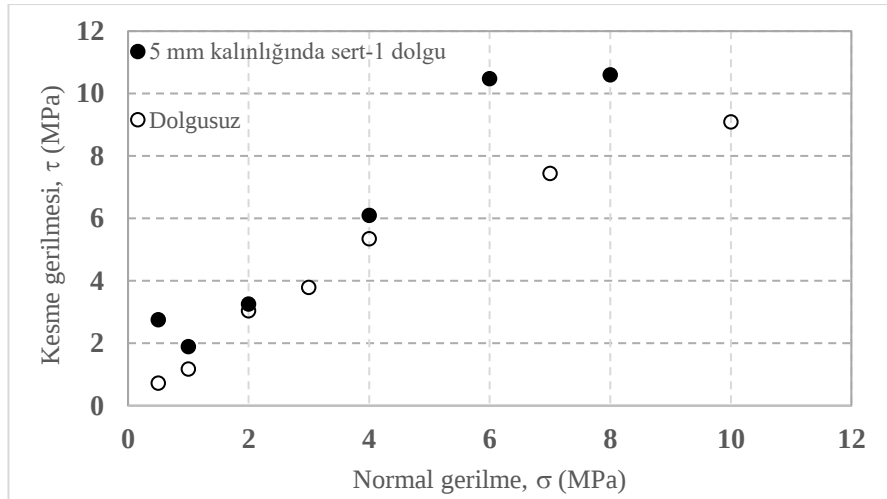
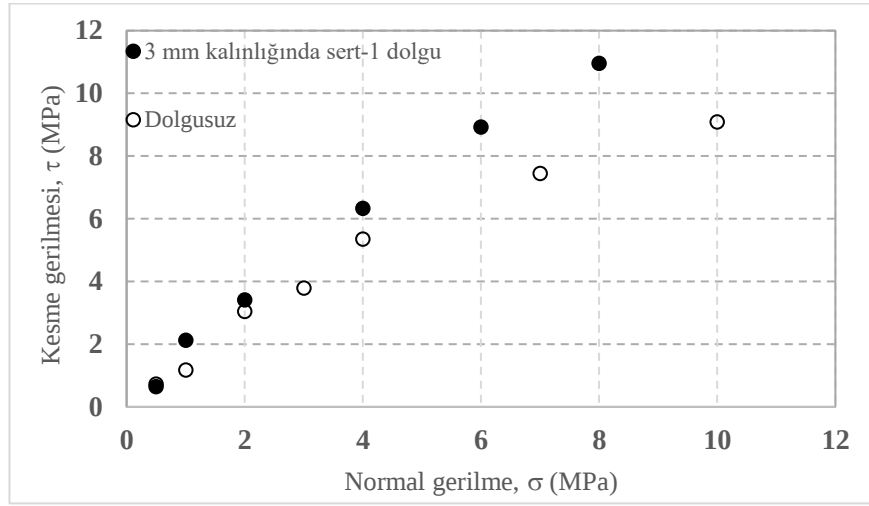
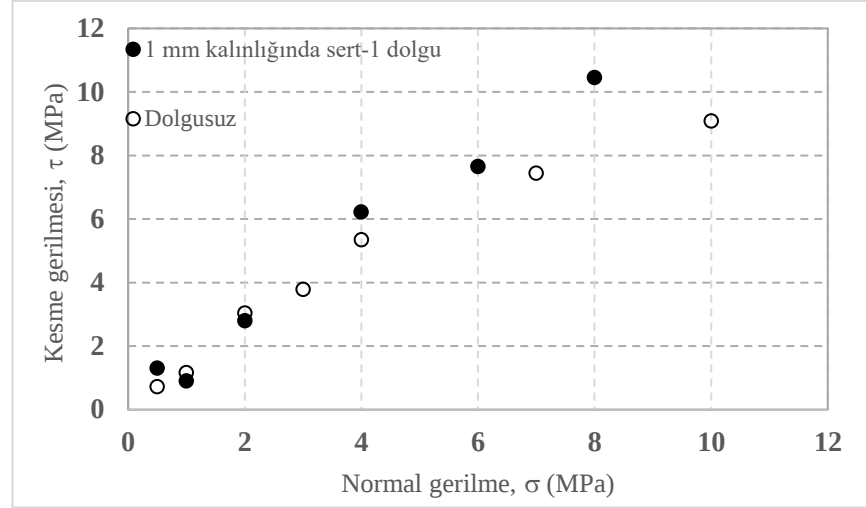
Ek numuneler üzerinde önceki deney programı ile aynı olacak şekilde 6 farklı normal gerilme (0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 6,0 ve 8,0 MPa) altında farklı kalınlıklarda uygulanmış dolgular ile doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her numune üzerinde 1 adet deney gerçekleştirilmiş olup, hiçbir numune deneylerde 2 kez kullanılmamıştır. Deney uygulama hızı 1 mm/dk olarak sabit şekilde uygulanmıştır. Statik yük altında yapılan deneylere ait doğrudan kesme deneyine tabi tutulan bazı kaya türlerine ait kesme gerilmesi - yerdeğiştirme ve kesme gerilmesi - normal gerilme grafikleri Ek 1’de verilmiştir.

4.7.3 Ek deney numunelerinin kesme dayanımı ile dolgusuz süreksizlik kesme dayanımlarının karşılaştırılması:

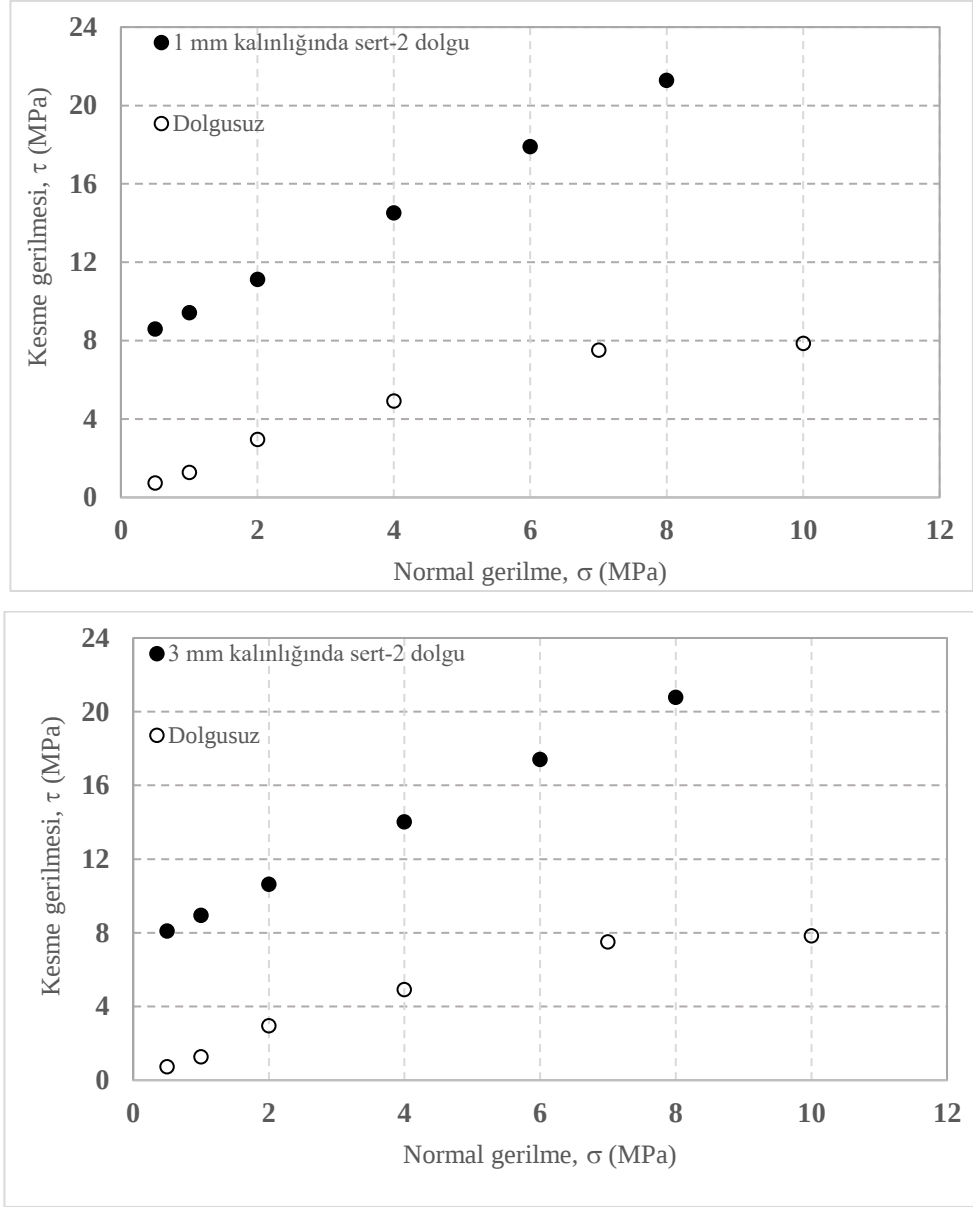
Önceki numunelerde olduğu gibi Beyhan (2024) tarafından yapılan çalışmadan alınan dolgusuz kesme dayanımı sonuçları ile ek numunelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Şekil 4.18-4.20 arasında verilmiştir.



Şekil 4.18 AF-4 (ignimbrit) kayacına ait yumuşak dolgulu ve dolgunsuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



Şekil 4.19 AF-5 (trakit) kayacına ait sert-1 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



Şekil 4.20 AF-6 (granodiyorit) kayacına ait sert-2 dolgulu ve dolgusuz kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri

Beyhan (2024)'ten alınan dolgusuz kesme dayanımı (τ_{UF}) deneysel olarak elde edilen dolgulu kesme dayanımları ile (τ_F) karşılaştırılmış ve değişim miktarları % cinsinden hesaplanmıştır. Çizelge 4.10'da ilgili değişim miktarı verilmiştir.

Çizelge 4.10 Ek numunelerin dolgulu süreksizlik kesme gerilmesinin dolgusuz kesme gerilmesi ile % değişim oranları

		τ_{UF} (MPa)	τ_F (MPa)	Değişim (%)	Ort. Dğs. (%)
İğnimbrit / Kil	1 mm	0,48	0,78	62,50	-10,94
		1,21	0,68	-43,80	
		1,42	1,12	-21,13	
		2,83	2,58	-8,83	
		4,83	3,48	-27,95	
		6,89	5,07	-26,42	
	3 mm	0,48	0,33	-31,25	-42,08
		1,21	0,49	-59,50	
		1,42	0,89	-37,32	
		2,83	1,89	-33,22	
		4,83	2,67	-44,72	
		6,89	3,69	-46,44	
	5 mm	0,48	0,25	-47,92	-50,30
		1,21	0,48	-60,33	
		1,42	0,88	-38,03	
		2,83	1,63	-42,40	
		4,83	2,43	-49,69	
		6,89	2,52	-63,43	
Trakit / Alçı	1 mm	0,72	1,31	81,94	33,09
		1,17	0,9	-23,08	
		3,04	2,8	-7,89	
		3,79	6,22	64,12	
		5,35	7,65	42,99	
		7,44	10,45	40,46	
	3 mm	0,72	0,64	-11,11	43,86
		1,17	2,12	81,20	
		3,04	3,41	12,17	
		3,79	6,33	67,02	
		5,35	8,92	66,73	
		7,44	10,95	47,18	
	5 mm	0,72	2,75	281,94	91,54
		1,17	1,89	61,54	
		3,04	3,25	6,91	
		3,79	6,09	60,69	
		5,35	10,47	95,70	
		7,44	10,6	42,47	
Granodiyorit / Reçine	1 mm	0,73	6,54	795,89	250,42
		1,27	6,65	423,62	
		2,96	7,1	139,86	
		4,92	8,67	76,22	
		7,51	10,7	42,48	
		7,85	9,77	24,46	
	3 mm	0,73	4,6	530,14	166,81
		1,27	5,03	296,06	
		2,96	5,14	73,65	
		4,92	7,52	52,85	
		7,51	8,67	15,45	
		7,85	10,42	32,74	

Çizelge 4.10’da verilen sonuçlar incelendiğinde, önceki numuneler ve deney sonuçlarına benzer değişim oranları elde edilmiştir. Yumuşak dolguda 1 mm kalınlık %10,9 oranında kesme gerilmesinde düşüşe sebep olurken 3 mm kalınlıkta %42,1 ve 5 mm kalınlıkta % 50,3 düşüş oranları görülmektedir. t/a oranının artışı ile doğru orantılı olarak kesme dayanımında meydana gelen azalılar önceki sonuçlar ile uyumludur.

Sert-1 dolgu için 1 mm dolgu kalınlığı %33,1 oranında kesme dayanımında artışa sebep olurken 3 mm kalınlık %43,9 ve 5 mm kalınlık %91,5 oranında kesme dayanımına arttırıcı yönde katkı sağlamaktadır. t/a oranı arttığında kesme dayanımında da artışlar görülmekte ve önceki sonuçlar ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Sert-2 dolgu için 1 mm dolgu kalınlığı %250 oranında kesme dayanımında artışa sebep olurken 3 mm kalınlık uygulandığında %167 artış görülmektedir.

Genel bir değerlendirme olarak, kaya türünden bağımsız olacak şekilde yumuşak dolgu uygulanan süreksizliklerin kesme dayanımı dolgusuz duruma göre azalma göstermektedir. Bu azalma miktarı dolgu kalınlığı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bir mm kil dolgu uygulanan süreksizliklerde dayanım azalması en çok %49 olurken, 3 mm kalınlıkta %61, 5 mm kalınlıkta %82 civarında azalmalar gözlenmiştir. Süreksizlik dolgusunun dayanımı azaltıcı ve arttırıcı yönde etki gösterebildiği bilinmektedir. Sert-1 dolgu için benzer durum artış eğilimi olarak izlenmektedir. 1 mm kalınlıkta en çok %33, 3 mm kalınlıkta %51 ve 5 mm kalınlıkta %91 civarında dayanıma artış yönünde katkı sağlandığı anlaşılmıştır. Sert-2 dolgu için 1 mm kalınlıkta en çok %250, 3 mm kalınlıkta %208 civarında artışlar görülmüştür. Dolgunun türüne ve kalınlığına bağlı olmak üzere süreksizlik yüzeylerinde dolgu varlığı dayanımın hem arttırıcı hem de azaltıcı yönde etki göstermektedir. Mühendislik çalışmalarında bir kestirimde bulunabilmek için dolgunun türü ve kalınlığının doğru şekilde saptanması önem arz etmektedir.

Çalışma kapsamında ek deney sonuçları da veri tabanına eklenerek DATAFIT yazılımı ile yeni bir değerlendirme yapılmıştır. Toplam 192 adet deney verisi ile gerçekleştirilen analiz sonucunda eşitlik aşağıda verildiği şekilde güncellenmiştir.

$$\tau = 0,8\sigma_n + 0,02 \sigma_c - 0,009t/a - 0,415 c_{dolgu} + 0,148\phi_{dolgu} - 0,060i - 4,93 \quad (4.4)$$

Eşitliğe göre bağımsız değişkenler yerine konulduğunda elde edilen R^2 değeri 0,83 olmaktadır. Bu değer önceki sonuçlar ile aynıdır. Rastgele seçilen kaya türü ve dolgularda dolgulu süreksizliklere ait kesme dayanımı sonuçları sistematik olarak yapılan deneyler ile aynı sonucu sunmaktadır. Çalışmanın ana hedeflerinden biri olan dolgulu süreksizliklerde kesme dayanımının nicelleştirilmesi ve bir ampirik ilişkinin geliştirilmesi bu sonuçla birlikte teorik olarak mümkündür. Laboratuvar koşullarında kesme dayanımı deneyi uygulanmasına gerek kalmadan ilgili parametrelerin bilinmesi durumunda dolgulu süreksizliklerin kesme dayanımı yüksek tutarlılıkta kestirilmektedir.

5. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER VE DOLGULU SÜREKSİZLİKLERİN KESME DAYANIMININ BELİRLENMESİNE YÖNELİK AMPİRİK İLİŞKİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Çalışma kapsamında dolgulu süreksizlikler üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deneylerinden elde edilen sonuçlar DATAFIT yazılımı yardımıyla önceki bölümde değerlendirilmiş ve bir ampirik eşitlik elde edilmiştir. Bu eşitliğe göre kesme dayanımını etkileyen uygulanan normal gerilme (σ_n), tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c), dolgu kalınlığı (t) / pürüzlülük genliği (a) oranı, dolgunun kohezyonu (c_{dolgu}), dolgunun içsel sürtünme açısı (ϕ_{dolgu}) ve pürüzlülük açısı (i) olmak üzere 6 farklı parametre bulunmaktadır. Bu eşitlikteki kesme dayanımını en kuvvetli şekilde etkileyen parametreler SPSS yazılımı ile incelenmiş, kesme dayanımını etkileyebilecek parametreler arasında bir ilişki olup olmadığına dair analizler yapılmıştır.

Bu kapsamda, dolgulu süreksizliklerin kesme dayanımının alternatif bir yöntem ile ortaya konulması için en başta belirlenen 3 farklı kaya türü (AF-1, AF-2, AF-3) üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinden belirlenen doruk kesme dayanımları ve Çizelge 5.1’de verilen parametreler kullanılmış, bir dizi istatistiksel analiz gerçekleştirilmiş ve bir eşitlik elde edilmiştir. Bu eşitliğin daha geniş veri tabanı ile sağlamasının yapılabilmesi için çalışmaya sonradan eklenen 3 farklı kaya üzerinde de (AF-4, AF-5, AF-6) aynı yöntemler izlenmiştir. Dolgulu kesme dayanımları tayin edilmiş, doruk kesme dayanımları ve ilgili parametreler kullanılarak veri tabanına eklenmiş ve istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Çoklu doğrusal regresyon analiz yöntemi kullanılmış olup bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisi incelenmiştir.

DATAFIT yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar ile SPSS yazılımından elde edilenler kıyaslanmış, dolgulu bir süreksizliğin kesme dayanımını en fazla etkileyen parametreler belirlenmiş ve bu parametreler arasında ampirik bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır.

Çizelge 5.1 Regresyon analizi için kullanılan parametreler

No	Parametreler	Değişken
1	Uygulanan normal gerilme, σ_n (MPa)	Bağımsız
2	Tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_c (MPa)	
3	Dolgunun kalınlığı, t (mm)	
4	Süreksizliklerin genliği, a (mm)	
5	Dolgunun kohezyonu, c_{dolgu} (kPa)	
6	Dolgunun içsel sürtünme açısı, ϕ_{dolgu} ($^\circ$)	
7	Pürüzlülük açısı, i ($^\circ$)	
8	Kesme gerilmesi, τ (MPa)	Bağımlı

5.1 SPSS Yazılımı ile Yapılan İstatistiksel Analizler

Çalışma kapsamında dolgulu süreksizlikler üzerinde gerçekleştirilen kesme deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak bu verilerin dolgulu süreksizliklerin kesme dayanımını ne ölçüde etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla veriler ile uyumlu olan çoklu doğrusal regresyon analizleri yapılmış ve belirleme katsayıları tayin edilmiştir. SPSS yazılımı ile doğrusal analizlerin gerçekleştirilmesi için Çizelge 5.2’de verilen koşulların sağlanması gereklidir.

Çoklu doğrusal regresyon, bağımlı bir değişkenin bir veya daha fazla bağımsız değişken tarafından açıklanmaya çalışıldığı bir istatistiksel analiz yöntemidir. Değişkenlerin hepsinin devamlı veri tipinde olması gerekir. Çoklu doğrusal regresyon, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni nasıl etkilediğini belirlemek ve bağımsız değişkenlerin farklı olması durumunda bağımlı değişkenin alması gereken değeri tahmin etmek için kullanılır.

Çizelge 5.2 Doğrusal regresyon analizlerinde sağlanması gereken koşullar

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

Tüm parametreler modele aktarılmış ve çoklu doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır. Model çıktıları incelenmiş ve ilgili gerekliliklerin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. İki bağımsız değişken arasındaki korelasyon katsayısının $< 0,7$ olması gerekir. Bu tür bir ilişki gösteren değişken tespit edilmemiştir.

Çizelge 5.3 AF-1, AF-2 ve AF-3 kayalarından elde edilen veri tabanının katsayılar tablosu

Katsayılar ^a									
Model	Standartsız Katsayılar		Standartlı Katsayılar	t	Anlamlılık (Sig.)	B için %95 Güven Aralığı		Çoklu Bağlantı İstatistikleri	
	B	Std Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Tolerans	VIF
(Sabit)	-9,865	3,510		-2,810	0,006	-16,805	-2,924		
Normal Gerilme	0,792	0,043	0,636	18,241	0,000	0,706	0,878	1,000	1,000
TESD	0,034	0,008	0,210	4,172	0,000	0,018	0,050	0,480	2,085
Kalınlık/genlik oranı	-0,050	0,159	-0,012	-0,313	0,755	-0,364	0,265	0,862	1,160
Dolgunun kohezyonu	-0,468	0,106	-0,301	-4,394	0,000	-0,678	-0,257	0,259	3,864
Dolgunun içsel sürtünme açısı	0,154	0,012	0,865	12,460	0,000	0,130	0,179	0,252	3,970
Pürüzlülük açısı	0,209	0,213	0,050	0,980	0,329	-0,213	0,630	0,459	2,179
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı									

Çizelge 5.3'te katsayıları verilen model için ANOVA tablosu Çizelge 5.4'te ve model özeti Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 AF-1, AF-2 ve AF-3 kayalarından elde edilen veri tabanının ANOVA Tablosu

ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	Anlamlılık (Sig.)
1	Belirleme	1372,829	6	228,805	114,387	0,000 ^b
	Kalıntı	247,037	137	2,000		
	Toplam	1646,866	143			
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı						
b. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzlülük açısı, dolgu içsel sürtünme açısı, normal gerilme, kalınlık/genlik oranı, TESD, dolgunun kohezyonu						

Çizelge 5.5 AF-1, AF-2 ve AF-3 kayalarından elde edilen veri tabanının model özeti tablosu

Model Özeti ^b					
Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	0,913 ^a	0,834	0,826	1,414	1,526
a. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzlülük açısı, dolgunun içsel sürtünme açısı, normal gerilme, kalınlık/genlik oranı, TESD, dolgunun kohezyonu					
b. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı					

ANOVA tablosu incelendiğinde (Çizelge 5.4) modelin anlamlılık değerinin 0,05'in altında olduğu ve anlamlı olduğu belirlenmiştir. Model özeti tablosuna bakıldığında (Çizelge 5.5) düzeltilmiş belirleme katsayısı 0,826 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla katsayı tablosunda (Çizelge 5.3) yer alan anlamlılık koşulu 0,05'in üstünde olan parametrelerin modelden çıkartılması söz konusudur. Bu parametrelerin modeli açıklamakta anlamlı bir katkısı olmadığı görülmektedir. İlgili parametrelerin (dolgu kalınlığı/pürüzlülük genliği oranı ve pürüzlülük açısı) veri tabanı genişletildikten sonraki analiz sonuçlarına göre modelde güncelleme yapılmıştır.

AF-1, AF-2 ve AF-3 kayalarından elde edilen veri tabanına göre oluşturulan model, daha sonra çalışmaya dahil edilen AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile güncellenmiştir. Genişletilen veri tabanında yapılan çoklu doğrusal regresyon analizine ait katsayı tablosu Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanına ait katsayılar tablosu

Katsayılar ^a									
Model	Standartsız Katsayılar		Standartlı Katsayılar	t	Anlamlılık (Sig.)	B için %95 Güven Aralığı		Çoklu Bağlantı İstatistikleri	
	B	Std Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Tolerans	VIF
(Sabit)	-4,936	1,930		-2,557	0,011	-8,744	-1,128		
Normal Gerilme	0,800	0,037	0,638	21,612	0,000	0,727	0,873	1,000	1,000
TESD	0,021	0,004	0,145	4,638	0,000	0,012	0,030	0,892	1,121
Kalınlık/genlik oranı	-0,010	0,137	-0,002	-0,070	0,945	-2,80	0,261	0,902	1,109
Dolgunun kohezyonu	-0,415	0,091	-0,265	-4,580	0,000	-0,594	-0,236	0,259	3,856
Dolgunun içsel sürtünme açısı	0,149	0,011	0,827	13,760	0,000	0,127	0,170	0,241	4,152
Pürüzlülük açısı	-0,68	0,126	-0,017	-0,542	0,588	-0,316	0,180	0,854	1,171
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı									

Çizelge 5.6 incelendiğinde Çizelge 5.3'e benzer sonuçlar elde edilmiştir. Katsayılar tablosunda Sig (anlamlılık) değeri her bağımsız değişkenin ayrı ayrı bağımlı değişken üzerindeki etkisinin istatistiksel anlamlılık değerini göstermektedir. Değer 0.05'in üstünde ise ilgili parametrenin modeli açıklamada anlamlı olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Veri tabanı ilave deney sonuçları ile güncellendikten sonra yapılan çoklu regresyon analizi incelendiğinde dolgu kalınlığı/pürüzlülük genliği ve pürüzlülük açısı parametresinin anlamlılık değeri 0,05'in çok üstündedir. Dolayısıyla modele bir katkısı olmadığından modelden çıkartılması gereklidir. Çizelge 5.6'da katsayıları verilen model için ANOVA tablosu Çizelge 5.7'de ve model özeti Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanına ait ANOVA tablosu

ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	Anlamlılık (Sig.)
1	Belirleme	1867,085	6	311,181	160,604	0,000 ^b
	Kalıntı	358,449	185	1,938		
	Toplam	2225,534	191			
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı						
b. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzlülük açısı, dolgunun içsel sürtünme açısı, normal gerilme, kalınlık/genlik oranı, TESD, dolgunun kohezyonu						

Çizelge 5.8 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanına ait model özeti tablosu

Model Özeti ^b					
Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	0,916 ^a	0,839	0,834	1,391	1,365
a. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzlülük açısı, dolgunun içsel sürtünme açısı, normal gerilme, kalınlık/genlik oranı, TESD, dolgunun kohezyonu					
b. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı					

Modelin belirleme katsayısı 0,834 olarak hesaplanmıştır. Katsayı tablosuna bakıldığında ilk analiz sonuçlarına göre modelden çıkarılması söz konusu olan dolgunun kalınlığı/pürüzlülük genliği oranı ile pürüzlülük açısı parametresinin anlamlılık koşulunu sağlamadığı görülmektedir. Bu iki parametrenin modeli açıklamada bir katkısı olmadığı bilindiğinden modelden çıkartılarak çoklu doğrusal regresyon analizi yeniden yapılmıştır. Modele ait katsayı tablosu Çizelge 5.9’da verilmiştir. ANOVA tablosu Çizelge 5.10’da ve model özeti tablosu Çizelge 5.11’de sunulmuştur.

Çizelge 5.9 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanından t/a ve i parametresi çıkarıldıktan sonraki katsayılar tablosu

Katsayılar ^a									
Model	Standartsız Katsayılar		Standartlı Katsayılar	t	Anlamlılık (Sig.)	B için %95 Güven Aralığı		Çoklu Bağlantı İstatistikleri	
	B	Std Hata	Beta			Alt Sınır	Üst Sınır	Tolerans	VIF
(Sabit)	-5,980	0,418		-14,319	0,000	-6,803	-5,156		
Normal Gerilme	0,800	0,037	0,638	21,711	0,000	0,727	0,873	1,000	1,000
TESD	0,021	0,004	0,149	4,991	0,000	0,013	0,030	0,892	1,121
Dolgunun kohezyonu	-0,418	0,088	-0,267	-4,733	0,000	-0,593	-0,244	0,259	3,856
Dolgunun içsel sürtünme açısı	0,148	0,010	0,824	14,440	0,000	0,128	0,168	0,241	4,152
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı									

Çizelge 5.10 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanından t/a ve i parametresi çıkarıldıktan sonraki ANOVA tablosu

ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	Anlamlılık (Sig.)
1	Belirleme	1866,488	4	466,622	243,028	0,000 ^b
	Kalıntı	359,046	187	1,920		
	Toplam	2225,534	191			
a. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı						
b. Yordayıcılar: (Sabit), ϕ Dolgu, c dolgu, Normal gerilme, TESD						

Çizelge 5.11 AF-4, AF-5 ve AF-6 kayalarından alınan deney verileri ile genişletilmiş veri tabanından t/a ve i parametresi çıkarıldıktan sonraki model özeti tablosu

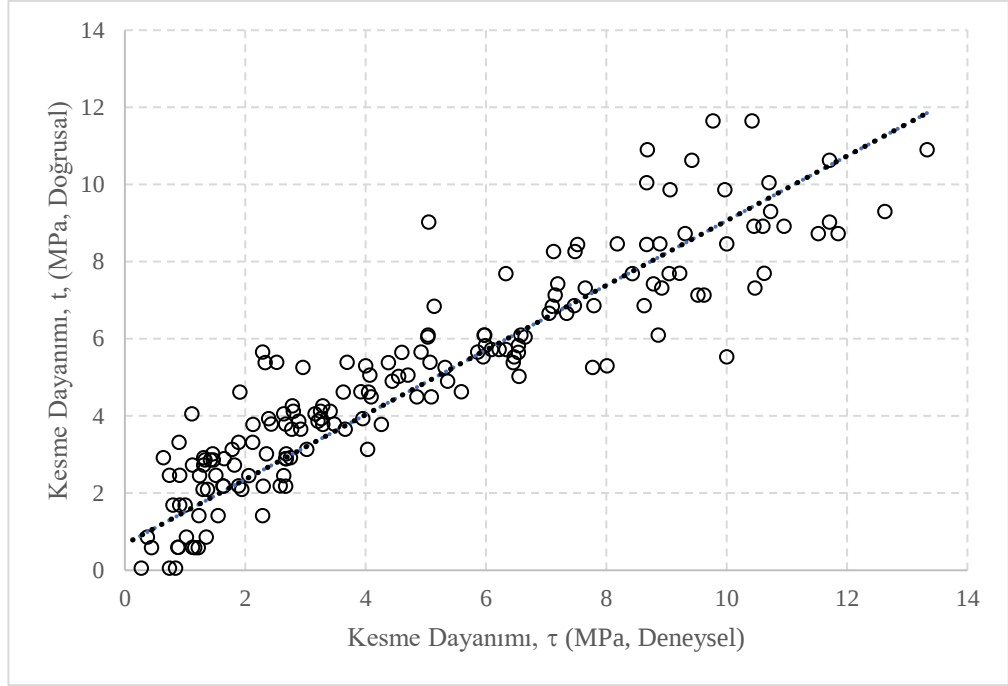
Model Özeti ^b					
Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	0,916 ^a	0,839	0,835	1,385	1,361
a. Yordayıcılar: (Sabit), pürüzlülük açısı, normal gerilme, TESD, pürüzsüz yüzeylerin temel sürtünme açısı					
b. Bağımlı Değişkenler: Kesme dayanımı					

ANOVA tablosunda (Çizelge 5.10), anlamlılık değeri 0,05'in altında olduğu için modelin anlamlı olduğu belirlenmiştir Model özeti tablosu (Çizelge 5.11) incelendiğinde düzenlenmiş belirleme katsayısı 0,835 olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla katsayı tablosunda (Çizelge 5.9) yer alan anlamlılık (sig.) değerleri incelenmiştir. Buna göre uygulanan normal gerilme ($p = 0,000$) tek eksenli sıkışma dayanımı ($p = 0,000$), dolgunun kohezyonu ($p = 0,000$) ve dolgunun içsel sürtünme açısının ($p = 0,000$) bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki ampirik ilişki ortaya konulmuştur. Eşitliğin RMSE (Kök ortalama karesel hata) değeri 5,30 olarak hesaplanmıştır.

$$\tau_D = 0,8 \sigma_n + 0,021 \sigma_c - 0,418 c_{\text{dolgu}} + 0,148 \phi_{\text{dolgu}} - 5,98 \quad (5.1)$$

Burada τ_D : Doğrusal analizde belirlenen kesme dayanımı, σ_n : Uygulanan normal gerilme değeri σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı, c_{dolgu} : dolgunun kohezyonu ve ϕ_{dolgu} : dolgunun içsel sürtünme açısıdır.

İlgili eşitlik ile hesaplanan kesme dayanımı sonuçları ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.1'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde elde edilen eşitlik ile hesaplanan kesme dayanımlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu ve sonuçların genellikle 1:1 çizgisi etrafında yer aldığı, saçılmaların bulunmadığı görülmektedir.



Şekil 5.1 Deneysel yöntem ile önerilen ampirik eşitlik sonucundan elde edilen sonuçların kıyaslanması

5.2 DATAFIT ile Yapılan Ek Analizler:

Çalışma kapsamında deneylerden elde edilen sonuçların SPSS yazılımı ile yapılan analizine bakıldığında başlangıçta kesme dayanımı üzerinde etkili olan altı farklı parametre (normal gerilme, tek eksenli sıkışma dayanımı, t/a oranı, dolgunun kohezyonu, dolgunun içsel sürtünme açısı ve pürüzlülük açısı) yerine dört parametrenin (normal gerilme, tek eksenli sıkışma dayanımı, dolgunun kohezyonu, dolgunun içsel sürtünme açısı) daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Çalışmada farklı nitelikte dolgular kullanıldığından yumuşak dolgu kendi içinde ve sert-1 ile sert-2 dolguları da birlikte değerlendirilerek DATAFIT yazılımı ile yeniden analizler yapılmış ve SPSS yazılımında kullanılan karma modelin anlamlı olup olmadığı araştırılmıştır.

5.2.1. Yumuşak dolgu için yapılan ek analizler:

Çalışma kapsamında başlangıçta kullanılan 3 farklı kaya numunesine uygulanan toplam 54 adet yumuşak dolgulu deney verilerinin DATAFIT yazılımı ile analizi yapılmış ve

elde edilen eşitlik aşağıda verilmiştir. Bu analiz için belirleme katsayısı 0,647 olarak hesaplanmıştır.

$$\tau_D = 0,46 \sigma_n + 2,36 \times 10^{-2} \sigma_c - 1,21 t/a + 1,75 \times 10^{15} C_{dolgu} + 0,22 \phi_{dolgu} - 0,22i \quad (5.2)$$

Veri tabanına ek deneyler de eklendiğinde toplam 72 adet yumuşak dolgulu deney verisi ile yeni eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır. Yeni belirleme katsayısı 0,83 olarak hesaplanmıştır.

$$\tau_D = 0,45 \sigma_n + 7,67 \cdot 10^{-3} \sigma_c - 0,75 t/a + 63 \times 10^{13} C_{dolgu} - 6,47 \times 10^{-3} \phi_{dolgu} - 0,59 \times 10^{-2}i \quad (5.3)$$

Ek deney verisi eklendikten sonra elde edilen eşitlik için RMSE değeri 0,572 olmaktadır. Bu düşük değer modelin veriler ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Yumuşak dolgu için veri sayısı arttıkça belirleme katsayısı yükselmektedir. Ancak SPSS analizinde etkisi olmadığı görülen t/a oranı ve pürüzlülük açısının sadece yumuşak dolgu kullanılarak DATAFIT yazılımı ile yapılan analizinde eşitlikte bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Yumuşak dolgu kendi içinde değerlendirildiğinde ek deneylerle birlikte dolgunun kohezyonunun etkisi artmaktadır. Benzer şekilde t/a oranı da eşitlikte belirleyici parametre olmaktadır.

5.2.2. Sert dolgular için yapılan ek analizler:

Çalışma kapsamında başlangıçta kullanılan 3 farklı kaya numunesine uygulanan sert-1 ve sert-2 dolgu verilerinin DATAFIT yazılımı ile analizi yapılmış ve 90 adet deney verisi ile elde edilen eşitlik aşağıda verilmiştir. Belirleme katsayısı 0,845 olarak hesaplanmıştır.

$$\tau_D = 0,99 \sigma_n + 4,99 \times 10^{-2} \sigma_c - 0,38 t/a + 1,30 C_{dolgu} - 8,85 \times 10^{-3} \phi_{dolgu} + 0,32i \quad (5.4)$$

Veri tabanına ek deneyler de eklendiğinde toplam 120 adet deney verisi ile elde edilen yeni eşitlik aşağıdaki gibi olmaktadır. Yeni belirleme katsayısı 0,84 olarak hesaplanmıştır.

$$\tau_D = 1,0 \sigma_n + 2,72 \times 10^{-2} \sigma_c - 0,46 t/a - 0,74 C_{dolgu} - 9,48 \times 10^{-2} \phi_{dolgu} - 0,194i \quad (5.5)$$

Ek deney verisi eklendikten sonra elde edilen eşitlik için RMSE değeri 1,29 olmaktadır. Düşük RMSE değeri modelin veriler ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Sert dolgular için veri sayısı arttıkça belirleme katsayısında önemli bir değişim olmasa da yumuşak dolguda olduğu gibi t/a oranı ve pürüzlülük açısının kesme dayanımını belirlemede etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Benzer şekilde dolgunun içsel sürtünme açısı ve kayanın TESD değeri dolgunun kohezyonu ile belirleyici parametre olmaktadır.

5.3 İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

DATAFIT yazılımı ile toplam 192 adet deney verisi ile elde edilen eşitlikte yumuşak ve sert dolgular birlikte değerlendirilmiş, kesme dayanımına etki eden; uygulanan normal gerilme, TESD, dolgu kalınlığı/pürüzlülük genliği oranı, dolgunun kohezyonu, dolgunun içsel sürtünme açısı ve pürüzlülük açısı olmak üzere 6 farklı parametrenin olduğu belirlenmiştir. SPSS yazılımı ile gerçekleştirilen ileri analizlerde yumuşak ve sert dolgular için bu 6 parametrenin kesme dayanımını belirlemede ne ölçüde katkı sunduğu belirlenmiş, analiz sonuçlarına göre de dolgu kalınlığı/pürüzlülük genliği oranı ile pürüzlülük açısı parametrelerinin modelden çıkartılması gerektiği anlaşılmıştır. Her ne kadar bu iki parametrenin dolgulu kesme dayanımı üzerinde etkisi olduğu düşünülse de, analizler sonucunda uygulanan normal gerilme, TESD, dolgunun kohezyonu ve dolgunun içsel sürtünme açısının belirleyici olduğu anlaşılmıştır.

3 kaya türü üzerinde gerçekleştirilen toplam 108 deney verisi ile yapılan analizlerde belirleme katsayısı 0,826 iken, ilaveten 3 kaya türüne ait toplam 36 deney verisi analizlere eklendiğinde belirlenme katsayısı 0,834'e yükselmiştir. Sınırlı sayıda numune ile deneyler gerçekleştirilmiş olsa da veri tabanında kaya türü arttığında belirleme katsayısının yükselmesi, önerilen eşitliğin kaya türü sayısı arttırıldığında daha yüksek belirleme katsayıları sunacağını göstermektedir.

Elde edilen eşitlik incelendiğinde en yüksek belirleme katsayısı 0,8 ile uygulanan normal gerilmedir. Normal gerilmeyi 0,418 ile dolgunun kohezyonu, 0,148 ile dolgunun içsel sürtünme açısı ve 0,021 ile TESD parametresi takip etmektedir. Bu 4 parametrenin bilinmesi durumunda yüksek tutarlılıkta dolgulu süreksizliklerin kesme dayanımını tahmininin yapılması mümkün görünmektedir.

DATAFIT yazılımı ile sadece yumuşak dolgu ve sert dolguların ayrı ayrı değerlendirildiği sonuçlar incelendiğinde tüm dolguların karma olarak veri tabanına eklendiği durumdan farklı olarak tüm parametrelerin kesme dayanımında etkili olduğu görülmektedir. Tüm dolgular değerlendirildiğinde belirleyici parametre uygulanan normal gerilme iken, yumuşak dolgu için t/a oranının uygulanan normal gerilmeden daha etkili olduğu görünmektedir. Yine yumuşak dolgu için dolgunun kohezyonu en yüksek katsayıya sahip olmakta ve belirleyici parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sert dolgular için veri sayısının artmasıyla dolgunun kohezyonu ve içsel sürtünme değeri önem kazanırken t/a oranının da katsayısı negatif etki yönünde artmaktadır. Sert dolgular için belirleyici parametre dolgunun içsel sürtünme açısı olmakta, kayanın TESD değeri ikinci parametre olarak görülmektedir. İleri istatistiksel analizlerde etkisiz görünen parametrelerin kendi içinde değerlendirildiğinde aslında kayanın kesme dayanımı üzerinde etkisi olduğu anlaşılmıştır.

6. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Dayanımları farklı kayalarda yapay olarak oluşturulan süreksizliklere dayanımları ve kalınlıkları farklı dolgu malzemeleri uygulamak suretiyle yapılan bir dizi makaslama deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Araştırmada kullanılan kayalar için en düşük TESD 30,0 MPa en yüksek TESD ise 115,0 MPa olarak belirlenmiştir. Pürüzlülük açıları en düşük 14° , en yüksek 16° arasında değişmektedir. Pürüzlülük genlikleri en düşük 1,84 mm, en yüksek 2,94 mm olarak ölçülmüştür.
2. Çalışmada yumuşak dolguyu temsilen plastikliği orta derecede bir dolgu malzemesi kullanılmış olup $LL = 50,5$ $PL = 32,2$ olan kil için $c = 0$ kPa ve $\phi = 24,1^\circ$ olarak belirlenmiştir.
3. Sert-1 dolgu olarak kalsit dolguyu temsilen kullanılan alçı malzemesine ait $c = 5$ kPa ve $\phi = 59^\circ$ olarak belirlenmiş olup, UCS değeri 25 MPa olarak ölçülmüştür.
4. Sert-2 dolgu olarak kuvars/amorf silis dolguyu temsilen kullanılan reçine malzemesi için $c = 3$ kPa ve $\phi = 68^\circ$ olarak belirlenmiş olup, UCS değeri 55 MPa olarak ölçülmüştür.
5. Yumuşak dolguları temsilen kullanılan kil malzeme ile yapılan dolgulu statik kesme deneyi sonuçları aynı kayalar ile yapılan dolgusuz kesme deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 1 mm dolgu kalınlığı uygulanmış 4 farklı kaya için t/a oranı 0,38-0,54 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama %10 ile %49 arasında değişen oranda azalma görülmüştür. Aynı dolgu 3 mm kalınlığında uygulandığında t/a oranı 1,15-1,62 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama %42 ile % 61 arasında değişen oranlarda azalma gözlenmiştir. Kil dolgu 5 mm olarak uygulandığında t/a oranı 1,91-2,70 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama %50 ile %82 arasında değişen oranlarda azalma izlenmektedir. Yumuşak dolgu uygulaması, test edilen 4 farklı kaya için kesme dayanımını azaltıcı yönde etkide bulunmaktadır.

Dolgu kalınlığına bağlı olarak doğru orantılı şekilde kalınlık arttıka kaya-kaya kontağı azaldığı için dayanımdaki dūřuř de yūysek oranda olmaktadır.

6. Kalsit dolguyu temsilen kullanılan sert-1 dolgu malzemesi ile yapılan dolgulu statik kesme deney sonuçları dolgusuz durum ile karşılaştırıldığında; 1 mm dolgu kalınlığı uygulanmış 4 farklı kaya için t/a oranı 0,37-0,54 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama % 2 ile % 33 arasında değişen oranda artış gōrūlmūřtır. Aynı dolgu 3 mm kalınlığında uygulandığında t/a oranı 1,11-1,62 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama %10 ile %51 arasında değişen oranlarda artış gōrūlmūřtır. Dolgu kalınlığı 5 mm olduğunda t/a 1,85-2,70 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama % 8 ile %91 arasında değişen oranlarda kesme dayanımını arttırıcı yōnde etkide bulunmaktadır. Dolgu kalınlığına bağlı olarak kaya-kaya kontağı azalsa bile dolgu tūrüne gōre kayaların kesme dayanımında artışlar gōrūlmektedir.
7. Kuvars/amorf silis dolguyu temsilen kullanılan sert-2 dolgu malzemesi ile yapılan dolgulu statik kesme deney sonuçları dolgusuz durum ile karşılaştırıldığında; 1 mm dolgu kalınlığı uygulanmış 4 farklı kaya için t/a 0,34-0,54 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama %114 ile %250 arasında değişen oranda artış gōrūlmūřtır. Aynı dolgu 3 mm kalınlığında uygulandığında t/a oranı 1,02-1,62 arasında değişirken kesme dayanımında ortalama % 111 ile %208 arasında değişen oranlarda kesme dayanımını arttırıcı yōnde etkide bulunmaktadır. Sert-1 dolguda olduğu gibi dolgu tūrüne bağlı olarak kayaların kesme dayanımında artışlar gōzlenmektedir.
8. Yumuřak dolgu uygulanmış sūreksizliklerde yenilme mekanizması incelendiğinde yenilmelerin dolgu malzemesi içinde gerçekleřtiėi ve dolgu kalınlığına da baėlı olarak bazı pūrüzlerin tırařlandığı gōrūlmūřtır. Dolayısıyla kesme gerilmesi-yer deėiřtirme grafiklerinde pik ve rezidūel dayanım belirgin olarak gōrūlememektedir. Ancak sert-1 ve sert-2 dolgu dayanımı yūysek dolgu malzemesi olduėundan, ۆzellikle sert-1 dolgu uygulanmış numunelerde yenilmeler dolgu malzemesi ile bitiřiėindeki kaya arasındaki ara yūzeyde kesme kırılması olarak gerçekleřmiştir. Kesme gerilmesi-yer deėiřtirme grafiklerine bakıldığında pik ve rezidūel dayanımlar

belirgin şekilde görülmektedir. Sert-2 dolgunun dayanımı daha yüksek olduğundan, yenilmeler uygulanan normal gerilmeye de bağlı olarak kaya numunelerinin gövdelerinde meydana gelmiş, dramatik kırılmalar gözlenmiş ve bu durum kesme gerilmesi-yer değiştirme grafiklerinde pik ve rezidüel dayanımın net bir şekilde görülmesine olanak sunmuştur.

9. Bu değerlendirmelere göre kil dolgu gibi yumuşak dolgular makaslama dayanımını %82'ye varan oranlarda düşürürken, kalsit veya amorf silis gibi dolguların süreksizlik dayanımlarına %250'ye varan oranlarda pozitif katkıları söz konusudur. Son zikredilen iki çeşit dolgunun süreksizlikleri iyileştirici bir oynadığı anlaşılmaktadır.
10. Dolgulu süreksizliklerin makaslama dayanımının nicelleştirilmesine yönelik bu araştırmanın başlangıcında dolgulu süreksizliklerin makaslama dayanımının kaya malzemesinin dayanımı, normal gerilme, dolgunun dayanımı, dolgu kalınlığı veya t/a oranı, pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliğinin bir fonksiyonu olduğu düşünülmüş olmakla birlikte, dolgu türü ayrımı yapılmaksızın, uygun yazılımlar kullanılarak yapılan kapsamlı istatistiksel analizler pürüzlülük açısı, pürüzlülük genliği ve t/a oranının dolgulu makaslama dayanımına etkisinin marjinal olduğunu göstermiştir.
11. Kapsamlı istatistiksel değerlendirmelere göre, çalışmada kullanılan tüm dolgular birlikte değerlendirildiğinde dolgulu süreksizliklerin makaslama dayanımını etkileyen temel faktörlerin süreksizliğe uygulanan normal gerilme, kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı, dolgunun kohezyonu ile içsel sürtünme açısı olduğu anlaşılmıştır.
12. Bahsedilen bu dört parametrenin bağımsız değişken, dolgulu süreksizlik dayanımının da bağımlı değişken olarak kullanıldığı çoklu regresyon analizlerinden belirleme katsayısı 0,835 olan aşağıdaki ilişki elde edilmiştir.

$$\tau_D = 0,8 \sigma_n + 0,021 \sigma_c - 0,418 c_{\text{dolgu}} + 0,148 \phi_{\text{dolgu}} - 5,98$$

Bu sonuç dolgulu taze süreksizlik yüzeylerine sahip kayalar için geçerlidir.

13. Çalışmada kullanılan dolgular yumuşak ve sert dolgu olarak ayrı ayrı değerlendirildiğinde dolgulu süreksizliklerin makaslama dayanımının kaya malzemesinin dayanımı, normal gerilme, dolgunun dayanımı, dolgu kalınlığı veya t/a oranı, pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliğinin bir fonksiyonu olduğu ortaya çıkmaktadır.

14. Yumuşak dolgu için başlangıçta yapılan 54 adet kesme deneyi ve ek olarak yapılan 18 adet deney verisi ile birlikte toplam 72 adet kesme deneyinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucu belirleme katsayısı 0,83 olan aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir.

$$\tau_D = 0,45 \sigma_n + 7,67 \cdot 10^{-3} \sigma_c - 0,75 t/a + 63 \cdot 10^{13} C_{\text{dolgu}} - 6,47 \cdot 10^{-3} \phi_{\text{dolgu}} - 0,59 \cdot 10^{-2} i$$

Bu sonuç yumuşak dolgulu taze süreksizlik yüzeylerine sahip kayalar için geçerlidir.

15. SPSS analizinde etkisi olmadığı görülen t/a oranı ve pürüzlülük açısının sadece yumuşak dolgu kullanılarak DATAFIT yazılımı ile yapılan analizinde eşitlikte etkili olduğu, yumuşak dolgu kendi içinde değerlendirildiğinde ek deneylerle birlikte dolgunun kohezyonunun etkisinin arttığı anlaşılmaktadır.

16. Tüm dolguların kullanıldığı eşitlikte belirleyici parametre 0,8 katsayısı ile uygulanan normal gerilme olurken, sadece yumuşak dolgu ile elde edilen eşitlikte belirleyici parametre dolgunun kohezyonu olmaktadır. Ayrıca t/a oranı 0,75 değeri ile kesme dayanımını üzerinde etki göstermektedir. Dolayısıyla yumuşak dolgu söz konusu olduğunda t/a oranı kesme dayanımının belirlenmesinde etkili olmaktadır.

17. Sert dolgular için başlangıçta yapılan 90 adet kesme deneyi ve ek olarak yapılan 30 adet deney verisi ile birlikte toplam 120 adet kesme deneyinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucu belirleme katsayısı 0,84 olan aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir.

$$\tau_D = 1,0 \sigma_n + 2,72 \cdot 10^{-2} \sigma_c - 0,46 t/a - 0,74 C_{\text{dolgu}} - 9,48 \cdot 10^{-2} \phi_{\text{dolgu}} - 0,194 i$$

Bu sonuç sert dolgulu taze süreksizlik yüzeylerine sahip kayalar için geçerlidir.

18. Tüm dolguların kullanıldığı eşitlikte belirleyici parametre 0,8 katsayısı ile uygulanan normal gerilme olurken, sadece sert dolgular kullanılarak elde edilen eşitlikte normal gerilme 1,0 değeri ile yine belirleyicidir. Ancak t/a oranı 0,46 ve i 0,194 değeri ile eşitlikte etki göstermektedir. Dolayısıyla sert dolgu söz konusu olduğunda t/a oranı ve i kesme dayanımının belirlenmesinde etkili olmaktadır.

Bu araştırma konusuyla ilgili olarak aşağıdaki konuların irdelenmesi önerilir:

1. Çalışma sonucunda tüm dolgular için elde edilen ampirik eşitlikte t/a oranı ile i 'nin kesme dayanımı üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür. Benzer şekilde yumuşak ve sert dolgular ayrı ayrı değerlendirildiğinde bu parametrelerin etkili olduğu görülmektedir. Sınırlı kaya türü ve dolgu çeşidi ile gerçekleştirilen çalışma, kaya türü ve dolgu çeşidi arttırılarak daha ayrıntılı incelenmelidir. Özellikle yumuşak dolgu türleri için t/a parametresinin kesme dayanımının kestiriminde belirleyici olabileceği düşünülmektedir.
2. Tüm dolguların kullanıldığı önerilen eşitlikte pürüzlülük açısının (i) kesme dayanımı üzerinde etkisi olmadığı görülmüş olmasına rağmen, farklı yumuşak dolgular üzerinde daha fazla deneylerin yapılması önerilir. Sert dolgular için i parametresinin kesme dayanımı üzerinde etkisi olduğu, farklı yumuşak dolgular için de belirleyici parametre olabileceği öngörülmektedir.
3. Araştırma sonunda önerilen ampirik eşitlikteki parametreler laboratuvar koşullarında elde edilen verilere dayanmaktadır. Eşitliğin yaygın kullanımı için arazi koşullarında ilgili parametrelerin tespit edilmesine yönelik çalışmalar yapılarak eşitliğin sahada uygulanabilirliği araştırılmalıdır.
4. Çalışmada sert-2 (reçine) dolgu uygulanan süreksizliklerde kesme dayanımının %250'ye varan oranlarda artış gösterdiği, dolgu malzemesinin iyileştirici özellikte olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonucun ortaya çıkmasında kayanın gözenekliliğinin rol oynadığı, bir miktar reçinenin gözeneklere sızarak dayanımı yükselttiği

düşünülmektedir. Bu etkinin daha iyi anlaşılabilmesi için farklı tür kayalarda reçine dolgulu deneylerin tekrarlanması önerilir.

5. Çalışma sonucunda farklı tür ve kalınlıkta dolguların kayanın kesme dayanımına arttırıcı ya da azaltıcı yönde etkisi net olarak anlaşılmaktadır. Buradan hareketle farklı tür kayalarda farklı dolgularda deneyler uygulandıktan sonra RMR ya da Q sınıflama sistemi gibi kaya kütle sınıflama sistemlerinde dolgu etkisinin daha net anlaşılabilmesi için puanlama aralıklarının yeniden değerlendirilmesi amacıyla bir yaklaşımda bulunulabilir.

KAYNAKLAR

- 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.
- 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. 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.
- Beyhan, M., 2024. Süreksizliklerin Makaslama Dayanımını Belirlemede Kullanılan Patton Ölçütünün Farklı Bir Yaklaşımla Değerlendirilmesi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 220 sayfa
- Coulomb, C.A. 1776. Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques problemes de statique, relatifs a l'architecture. Memoires de Mathematique & de Physique 7, 343- 382.
- Coulson, J.H. 1972 Shear Strength Of Flat Surfaces İn Rock Stability Of Rock Slopes. In: Cording EJ (ed) Proc 13th symposium on rock mechanics, 1972. ASCE, New York, pp 77–105
- Çoşkunlu ,E. vd.: Heyelan Afetinin Yapılar ve Topografya Üzerinde Bıraktığı Etkiler: Yukarı Ağcagüney Örneği- VII. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2018), 18-21 Eylül 2018, Eskişehir
- Demirezen, K.C. 2019 Statik koşullarda kaya süreksizlik dolgu malzemesi (kil mineralleri) özelliklerinin süreksizlik kesme dayanımı parametreleri üzerine etkisi, Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği, Yüksek lisans tezi, 82 sayfa
- De Toledo, P. E. C., De Freitas, M. H., (1993). “Laboratory testing and parameters controlling the shear strength of filled rock joints”, Geotechnique, 43(1), 1-19.
- De Vallejo, L. G., & Ferrer, M., (2011). Geological engineering. CRC Press.
- Ehrle, H., (1990). “Model material for shear tests of filled joints”, Mechanics of Jointed and Faulted Rock (ed. Rossmanith), Balkema (Rotterdam), 371-374.

- Gillette, D.R., Sture, S., Ko, H.Y., Gould, M.C. and Scott, G.A., (1983). Dynamic behavior of rock joints. Proceedings of the 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 163–179.
- Goodman, R. E., (1970). The deformability of joints. In Determination of the in situ Modulus of Deformation of Rock. Am. Soc. Testing and Materials, Spec. Tech. Publication, No. 477, 174-96.
- Goodman, R. 1976. Methods of Geological Engineering, West Publishing Company, St. Paul.
- 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.
- 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.
- Hardenberg, Wilko Graf von. “Expecting Disaster: The 1963 Landslide of the Vajont Dam.” Environment & Society Portal, Arcadia (2011), no. 8. Rachel Carson Center for Environment and Society. <https://doi.org/10.5282/rcc/3401>.
- 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. and Richards. L.R. 1989. Laboratory Direct Shear Testing Of Rock Discontinuities. Ground Eng 22(2):24–31
- Heyman, J. 1972. Coulomb's Memoir on Statics . Cambridge: at the University Press
- 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.
- Hutson, R.W. and Dowding, C.H., (1990). Joint asperity degradation during cyclic shear. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 27, No. 2, pp. 109–119.

- İmre, N., 2011. Gürpınar Bölgesindeki Heyelanların Jeoteknik İncelenmesi. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. 153 sayfa
- Indraratna, B., Welideniya, S. and Brown, T. (2005) New shear strength model for idealised infilled joints under constant normal stiffness. *Geotechnique*, institution of Civil Engineers 55 (3), 2005, 215-226.
- Indraratna, B., Jayanathan, M. and Brown, E. T. (2008) *Geotechnique* 58, No. 1 55-65.
- Indraratna, B., Premadasa, W.N. and Brown, E. (2013) Shear behaviour of rock joints with unsaturated infill. *Geotechnique*, 63 (15), 1356-1360.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. Rock Characterization Testing And Monitoring- Suggested Methods. ET BROWN Pergamon Press. Oxford, UK
- 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.
- Jahanian, H., Sadaghiani, M.H., (2015). Experimental Study on the Shear Strength of Sandy Clay Infilled Regular Rough Rock Joints, *Rock Mech Rock Eng* 48:907–922
- Kanji, M.A., 1974. Unconventional laboratory tests for the determination of the shear strength of soil–rock contacts. In: *Proceedings of the 3rd International Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Denver, Colorado, September 1974, vol 2, pp 241–247
- Karakus vd. 2016. A new shear strength model incorporating influence of infill materials for rock joints, *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* (2016) 2:183–193 DOI 10.1007/s40948-016-0032-4
- Kayabalı, K., Pınarcı, E., Habibzadeh, F., Beyhan, M., Üzgün, A.F., Yakut, M. 2024. Süreksizliklerde ikinci derece düzensizlik açılarının karşılaştırmalı değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 48(1), 43-58. <https://doi.org/10.24232/jmd.1479534>.
- Kutter, H. K., Rautenberg, A., (1979). “The residual shear strength of filled joints in rock”, *Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech.*, Montreux, 1, 221-227.
- 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.
- Ladanyi, B., and Archambault, G., (1977). Effect of block size on the shear behaviour of jointed rock. In Proceedings of the 23th US symposium on rock mechanics. Berkeley, CA (pp. 739-760).
- Lama, R. D., (1978). “Influence of clay fillings on shear behavior of joints”, Proc. 3rd Congr. Int. Assoc. Eng. Geol., Madrid, Vol. 2, pp. 27-34.
- Maksimovic, M. 1996. The Shear Strength Components of a Rough Rock Joint. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 33(8): 769-783.
- Mokhtarian, H., Moomivand, H., & Moomivand, H. (2020). Effect of infill material of discontinuities on the failure criterion of rock under triaxial compressive stresses. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 108, 102652.
- Mokhtarian, H., Noorian-Bigdoli, M., Moomivand, H. (2025). Impact of Infill Materials of Discontinuities with Different Orientations on Triaxial Compressive Strength of Jointed Rock . Journal of Geomine (2024), 2(1), 36-42
- Müller, L., 1964, The rock slide in the Vaiont valley. Felsmechanik und Ingenieur-geologie, 2, 148-212.
- Naghadehi, M. Z., 2015. “Laboratory Study of the Shear Behaviour of Natural Rough Rock Joints Infilled by Different Soils”, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59(3), pp. 413–421.
- Özvan, B., 2010. Süreksizlik Düzlemlerinde Ayrışmanın Pürüzlülük Üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. 74 sf. Adana.
- 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., & Manolopoulou, S. (1993). The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 30, No. 2, 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.
- Peacock,D.C.P. Sanderson,D.J. Magán, M., Geological Magazine , Volume 160 , Issue 9 , September 2023 , pp. 1817 - 1831
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0016756823000730>

- Phien-wej, N., Shrestha, U. B., Rantucci, G., (1990). "Effect of infill thickness on shear behavior of rock joints", Rock Joints, Proc. Int. Conf. on Rock Joints, Loen (eds. N. R. Barton & O. Stephansson), Balkema (Rotterdam), 289-294.
- Sadaghiani, M.H., Nafisi, A., 2014. The Effects of Water Moisture Content of Filling Material, Infill Thickness, and Normal Stress on Shear Behavior of Filled Joints. EJGE 2014, Vol. 19, 7011-7019
- Saptono, S., Wiyono, B., Dewt, A., 2013. The Effect of Filled Discontinuity to Shear Strength Parameter of Tuff. 8th Asian Rock Mechanics Symposium
- Sinha, U.N., Singh, B., 2000. Testing of rock joints filled with gouge using a triaxial apparatus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37, 963-981.
- Strong A.B., Fundamentals of Composite Manufacturing Materials, Methods, and Applications, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA, (2008).
- Tartoussi, N., Lataste, J.F., Rivard, P., Barbosa, N., 2023. Effects of a filled discontinuity in a rock mass on transmission losses of compressional and shear wave of full-waveform sonic log data. Journal of Applied Geophysics, Volume 217.
- Tulinov, R. and Molokov, L. 1971. Role of joint filling material in shear strength of rocks. ISRM Symp., Nancy, Paper II-1 – II-24.
- Tursun, H., —Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanmak Üzere Malzeme Modellerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2019).
- Ulusay, R., 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 38.
- Ulusay ve Sönmez 2007. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014: Cham, Switzerland. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74(4), 1499-1500.
- Wang, Y., and Nguyen, H.T., 2022, The effects of rock-infill interfacial properties on the compressive damage behaviour of flawed rocks: Results from a DEM study, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 117, February 2022, 103166
- Wyllie D.C., and Mah C.W., 2004, Rock Slope Engineering: Civil and Mining, 4th ed.

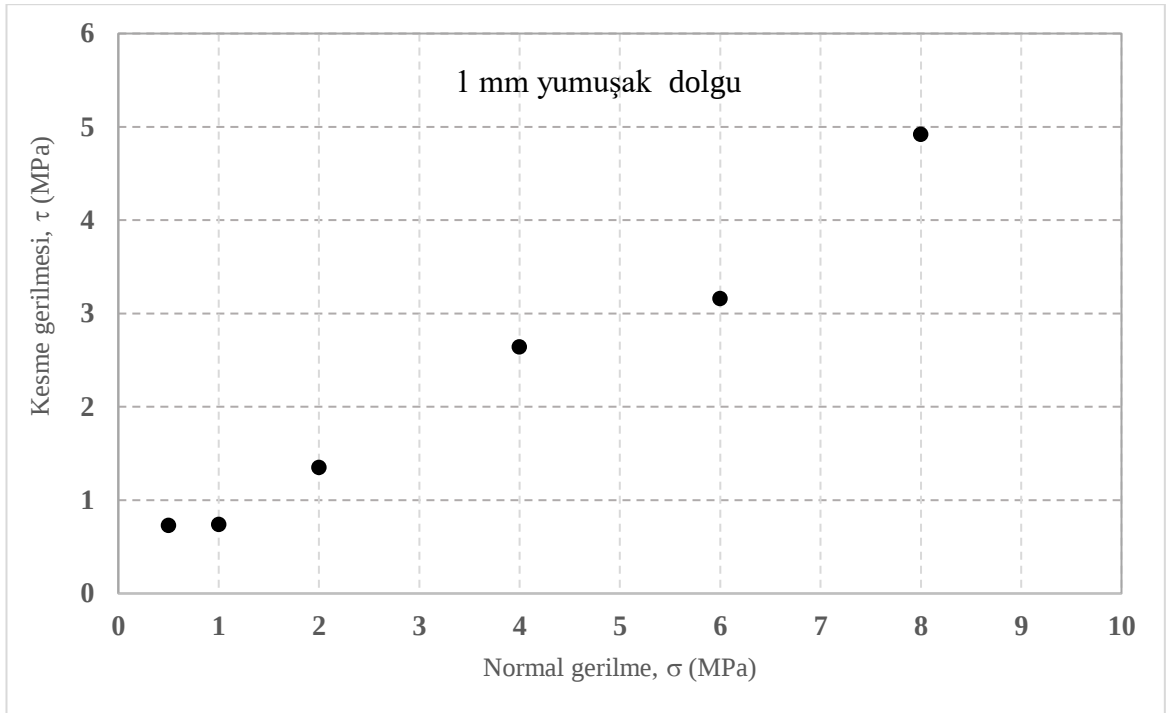
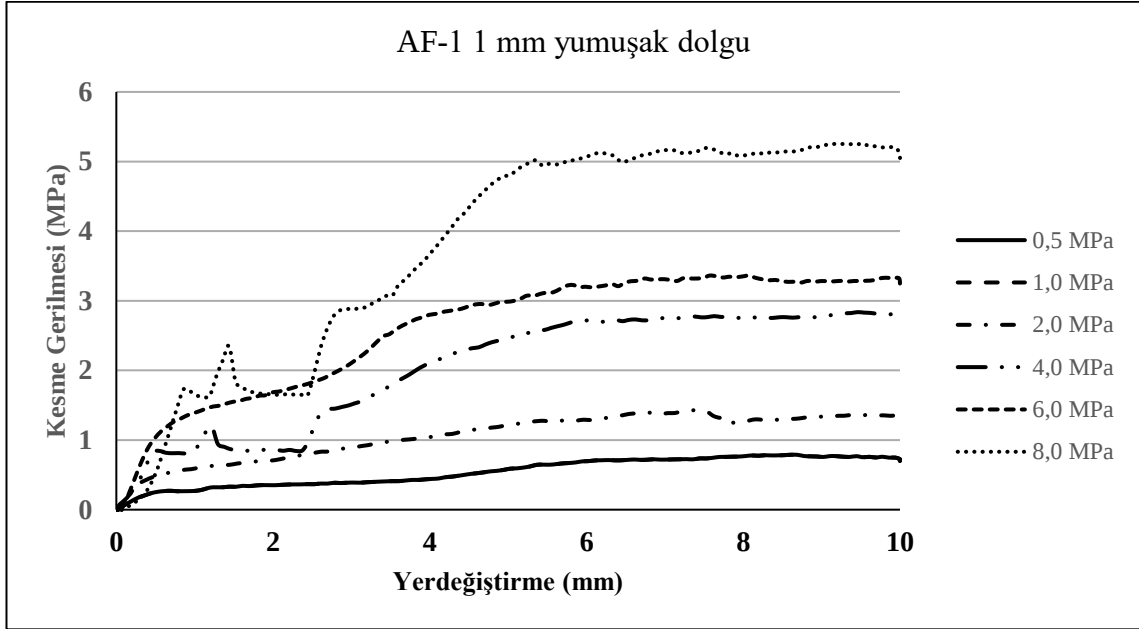
Yılmaz M.G., Cam Elyaf Katkılı Doymamış Polyester Malzemelerde Mineral Katkıların Mekanik ve Tribolojik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi ABD, Sakarya, (2006)

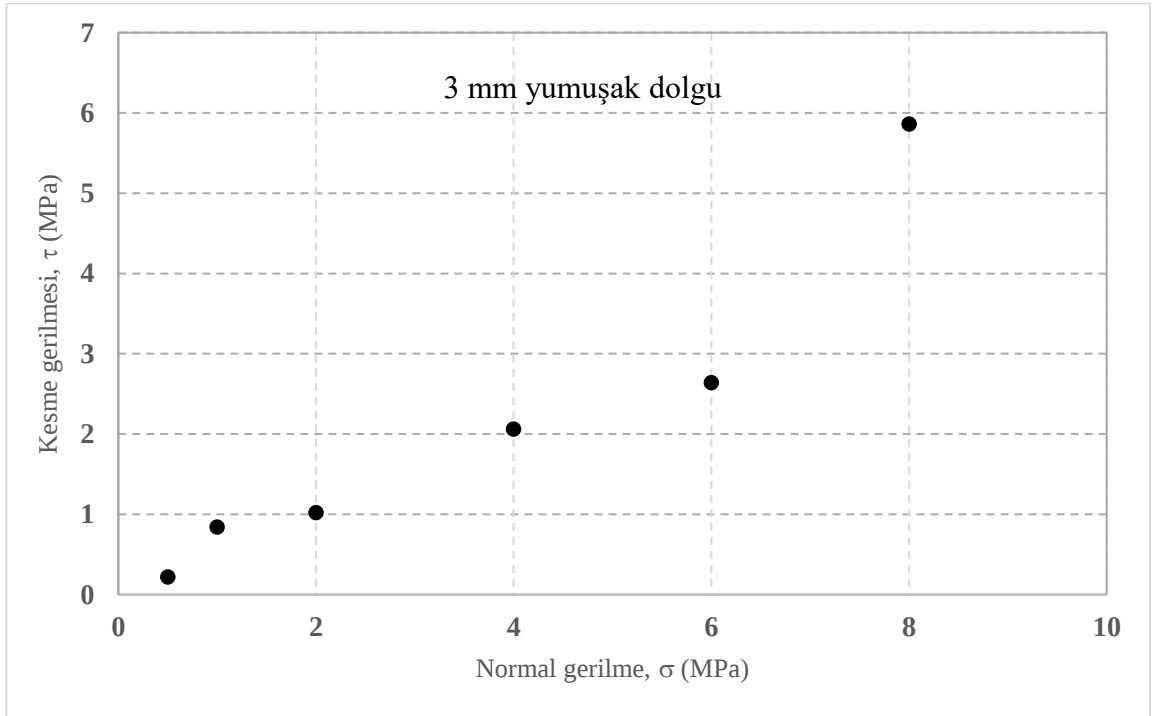
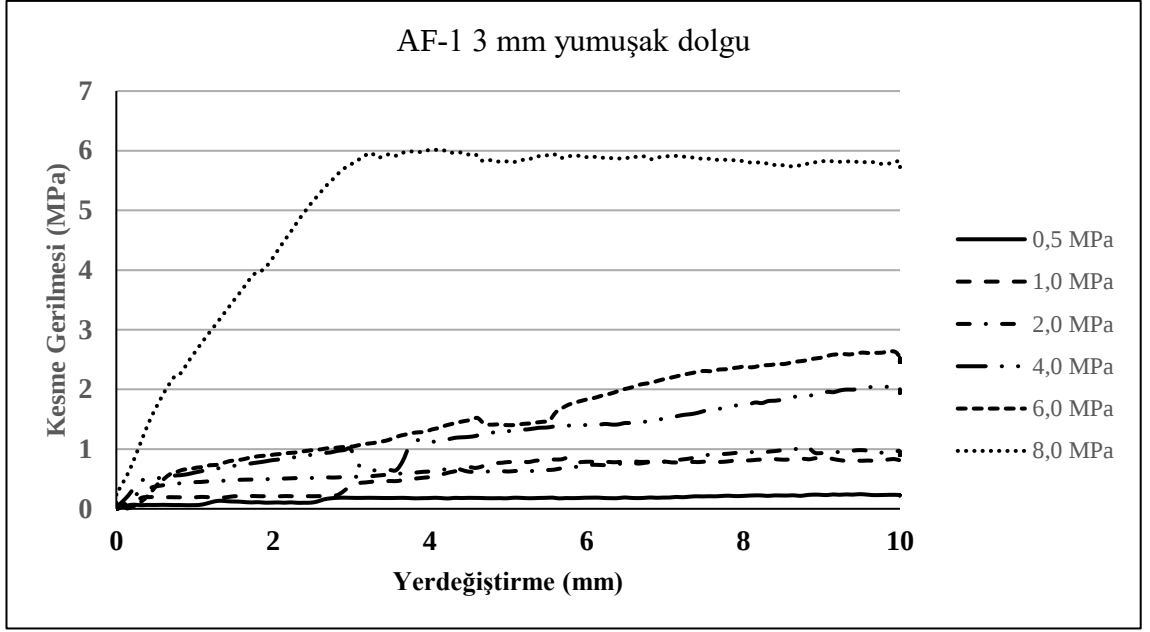
Zhong, Z., Deng, R., Zhang, J., Hu, X., (2020) Fracture properties of jointed rock infilled with mortar under uniaxial compression. Engineering fracture mechanics, volume 228

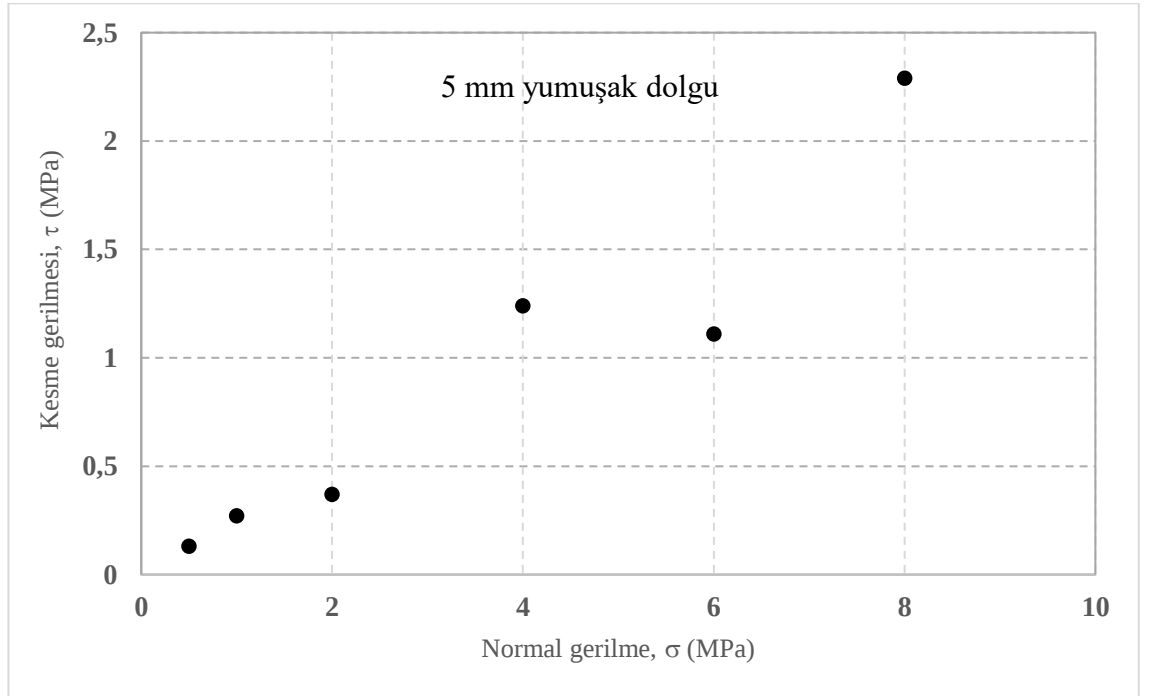
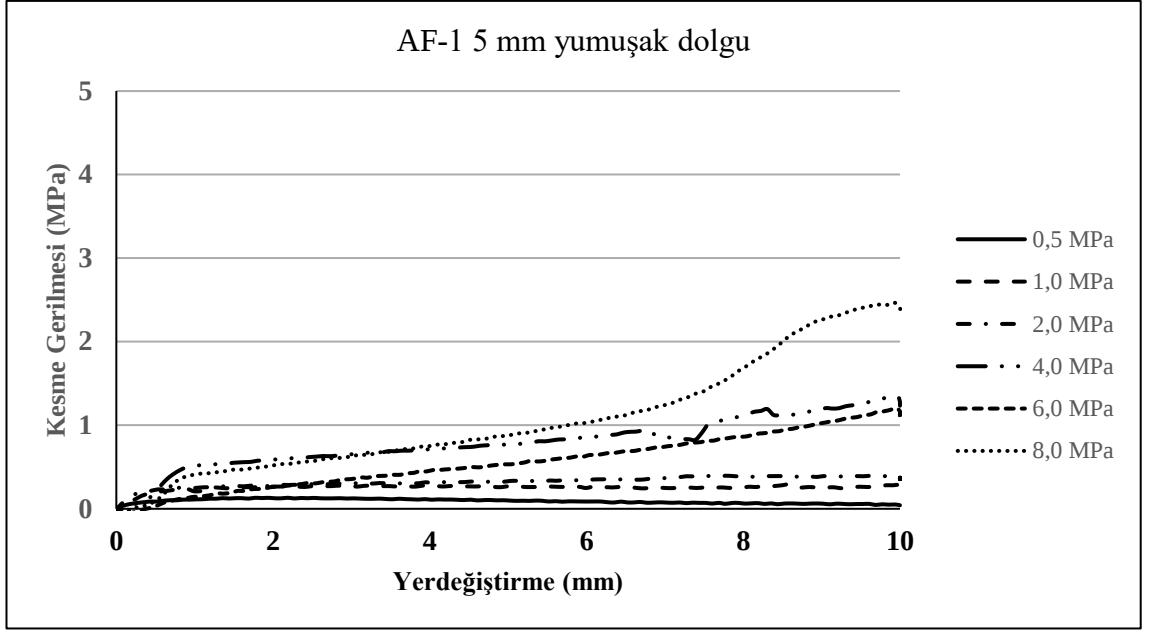
EKLER

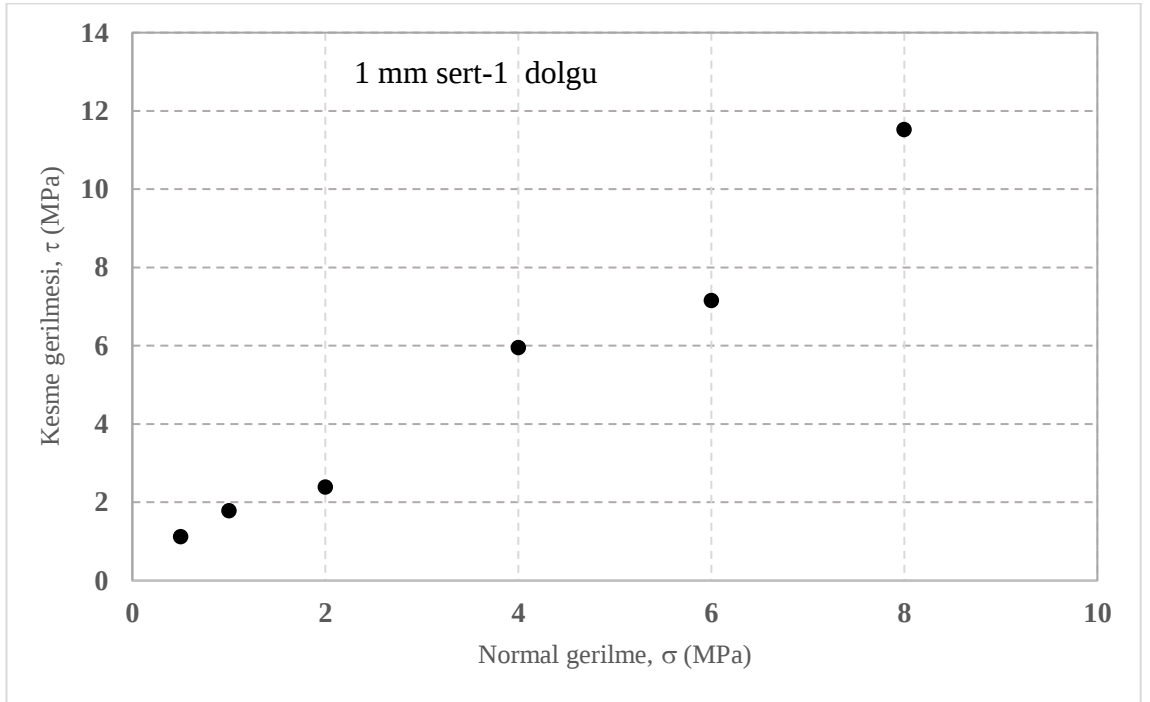
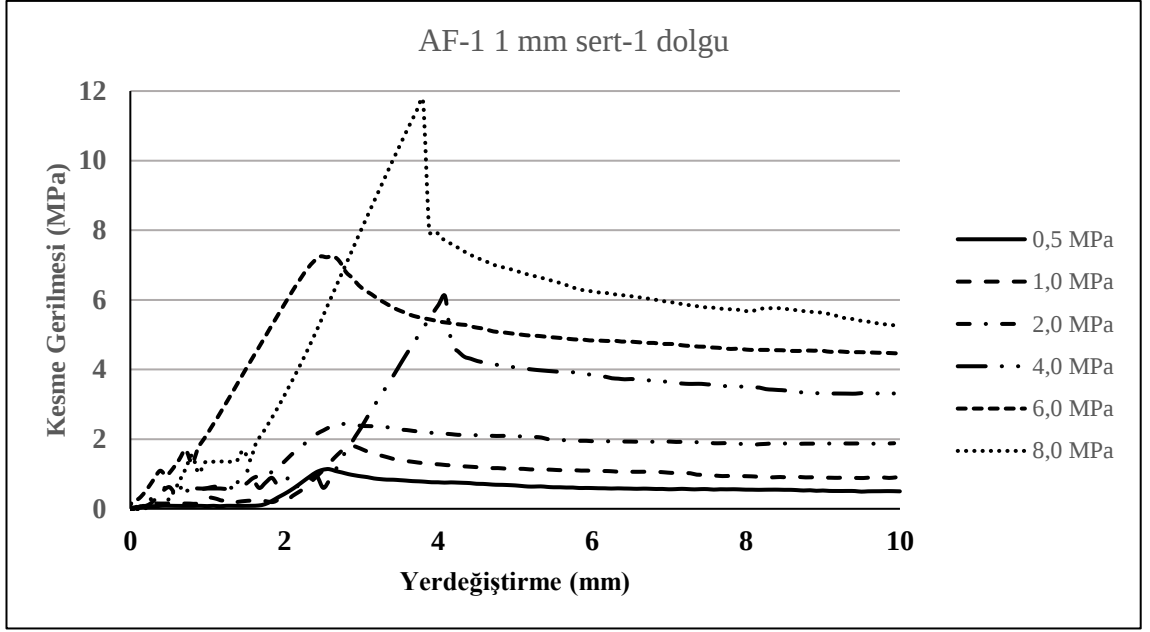
EK 1 KESME GERİLMESİ-YER DEĞİŞTİRME ve KESME GERİLMESİ NORMAL GERİLME GRAFİKLERİ

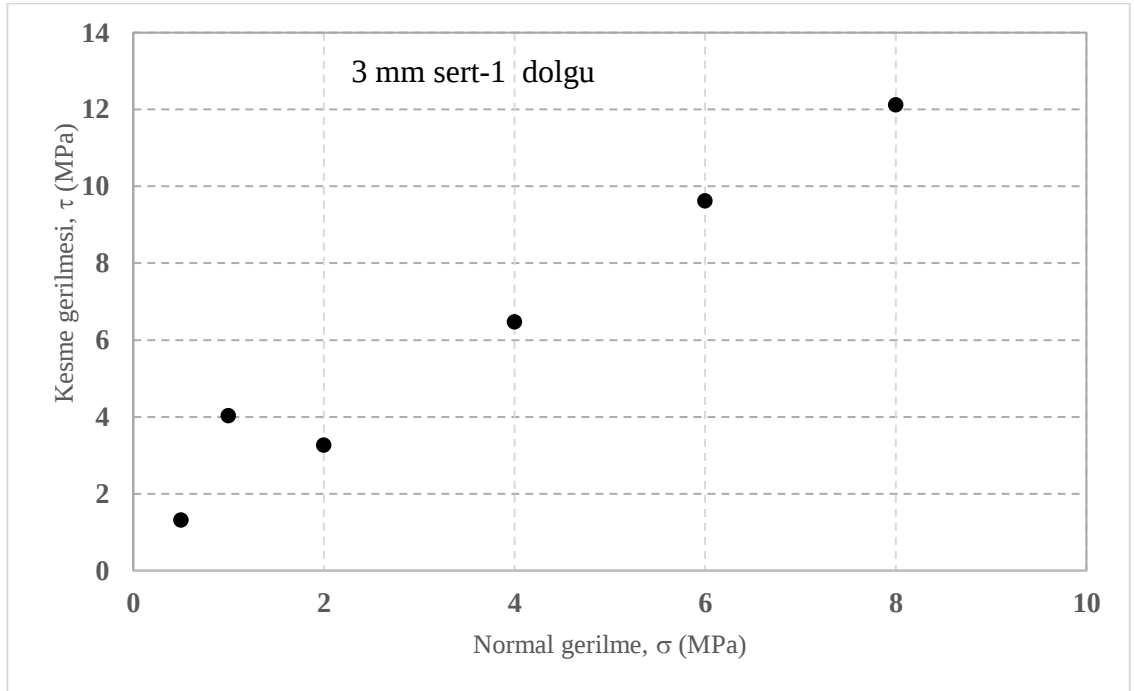
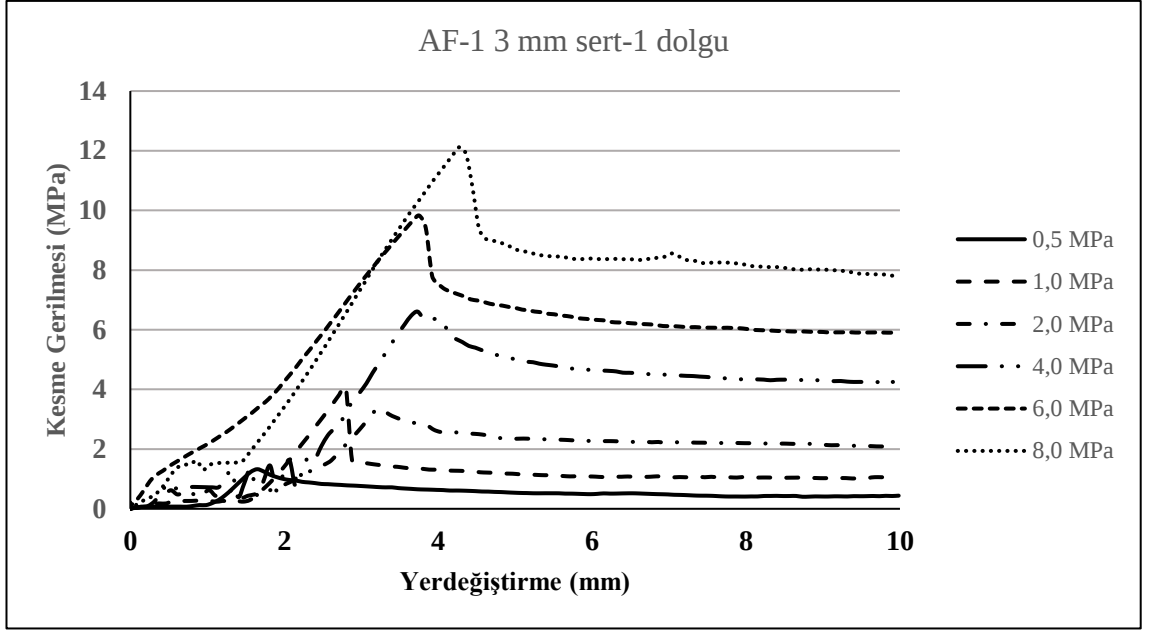
**EK 1 KESME GERİLMESİ-YER DEĞİŞTİRME ve KESME GERİLMESİ
NORMAL GERİLME GRAFİKLERİ**

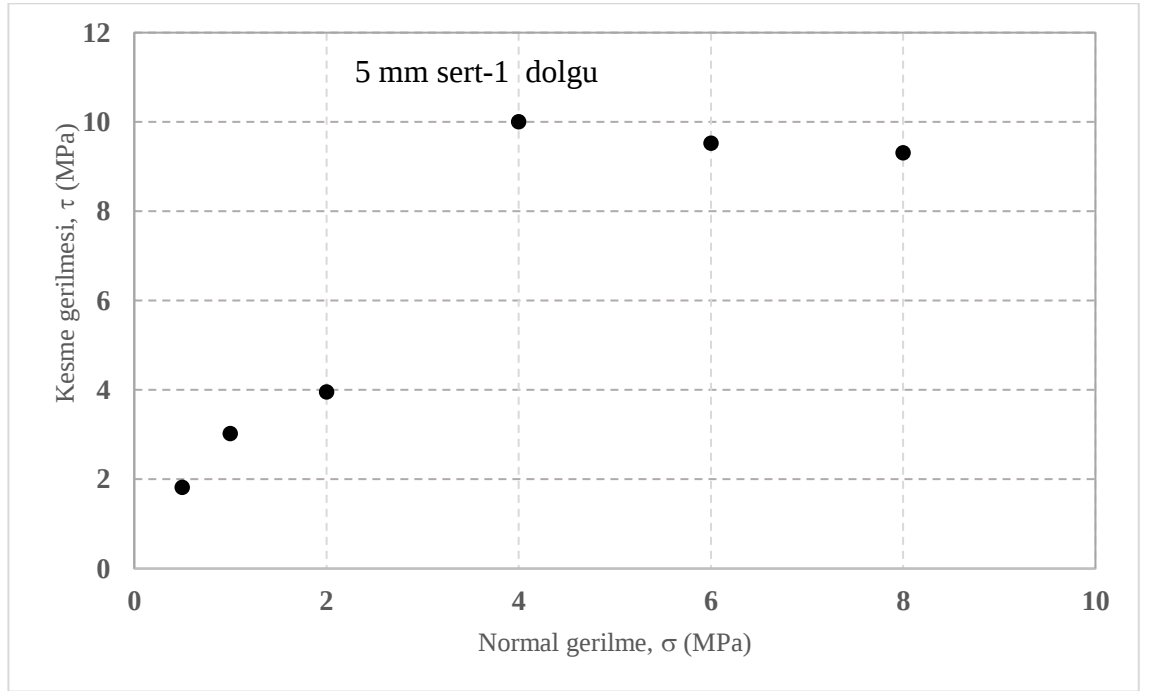
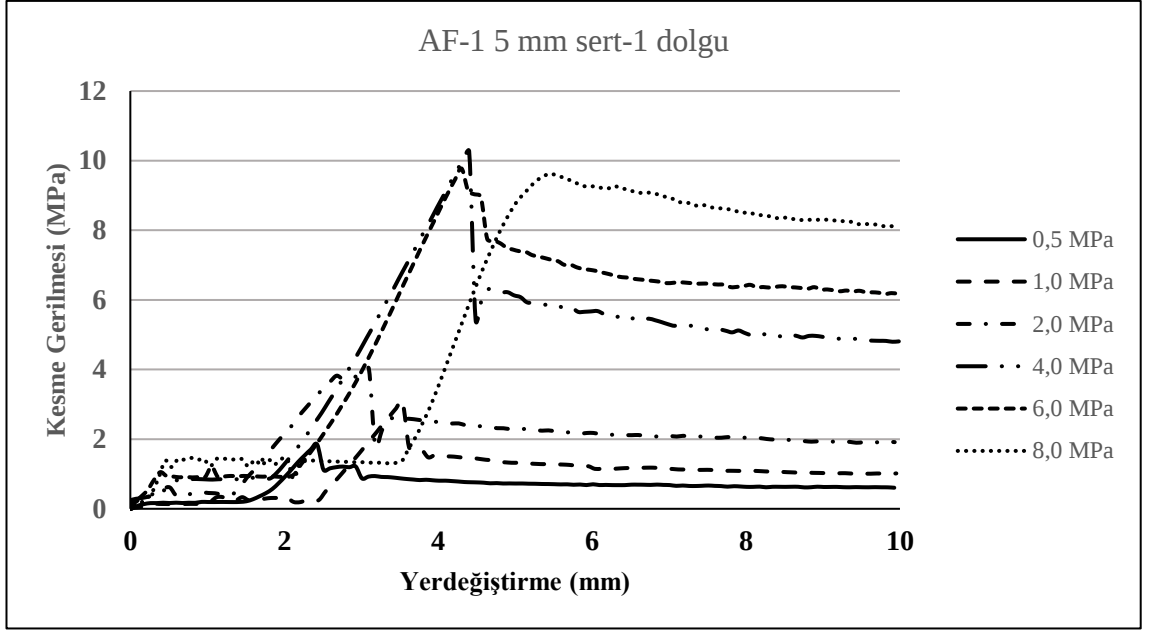


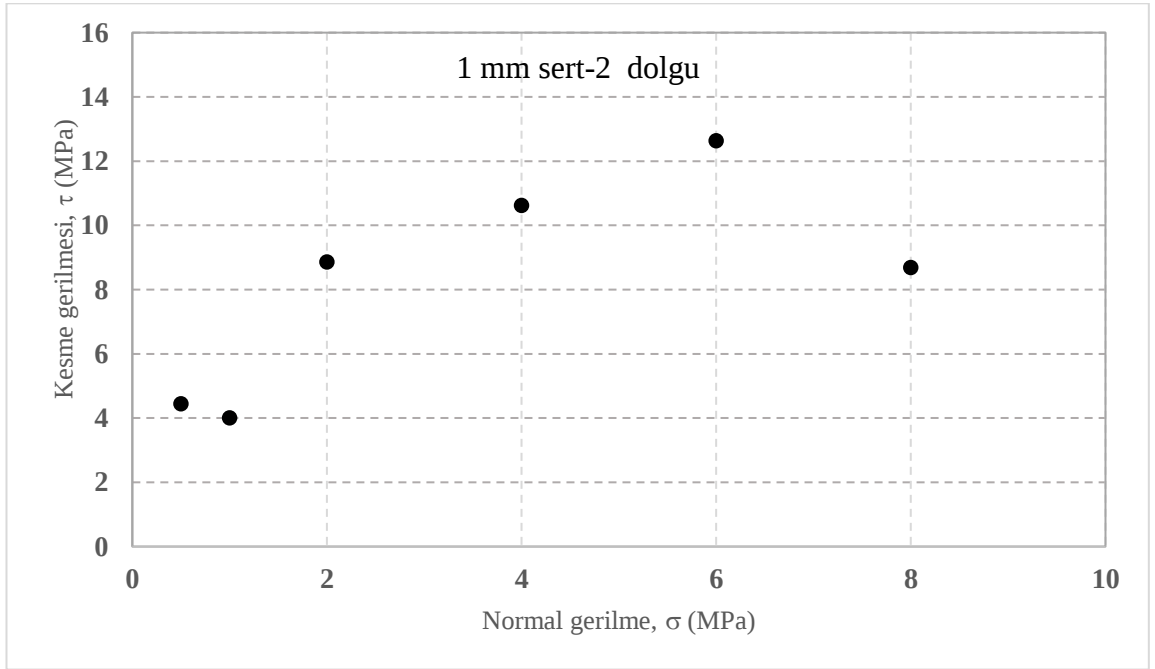
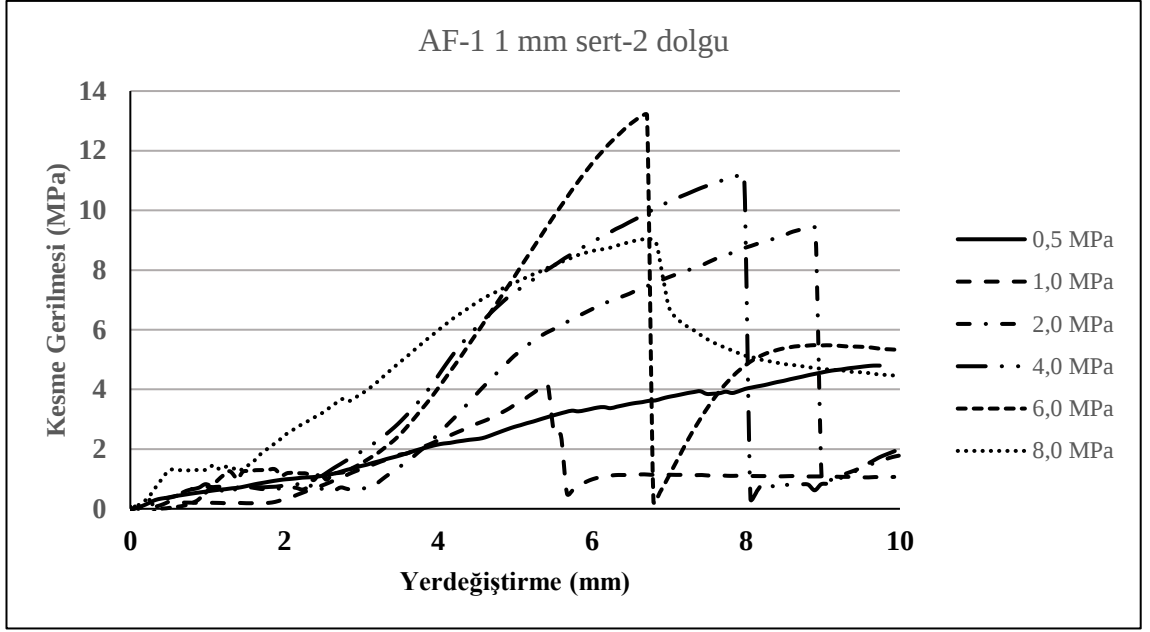


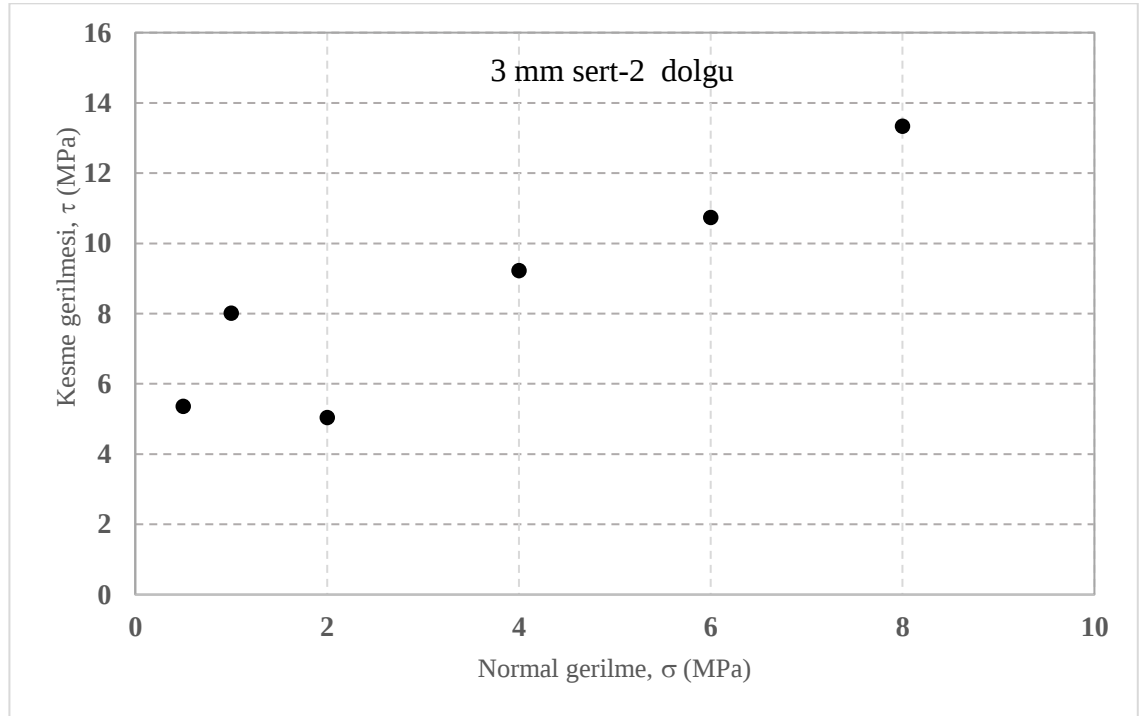
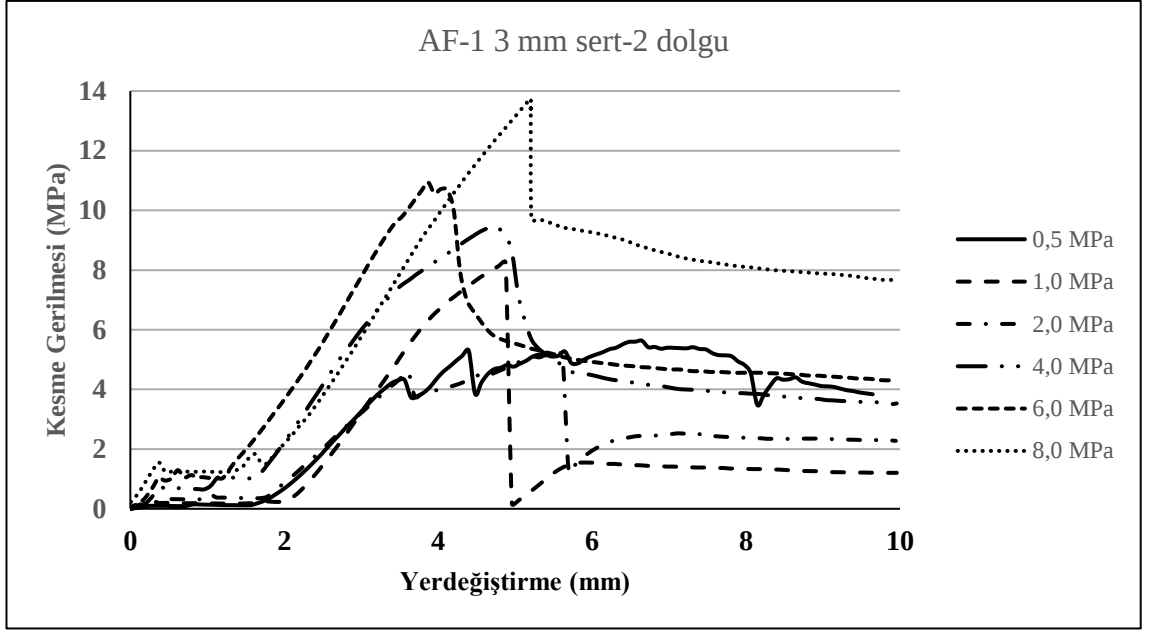


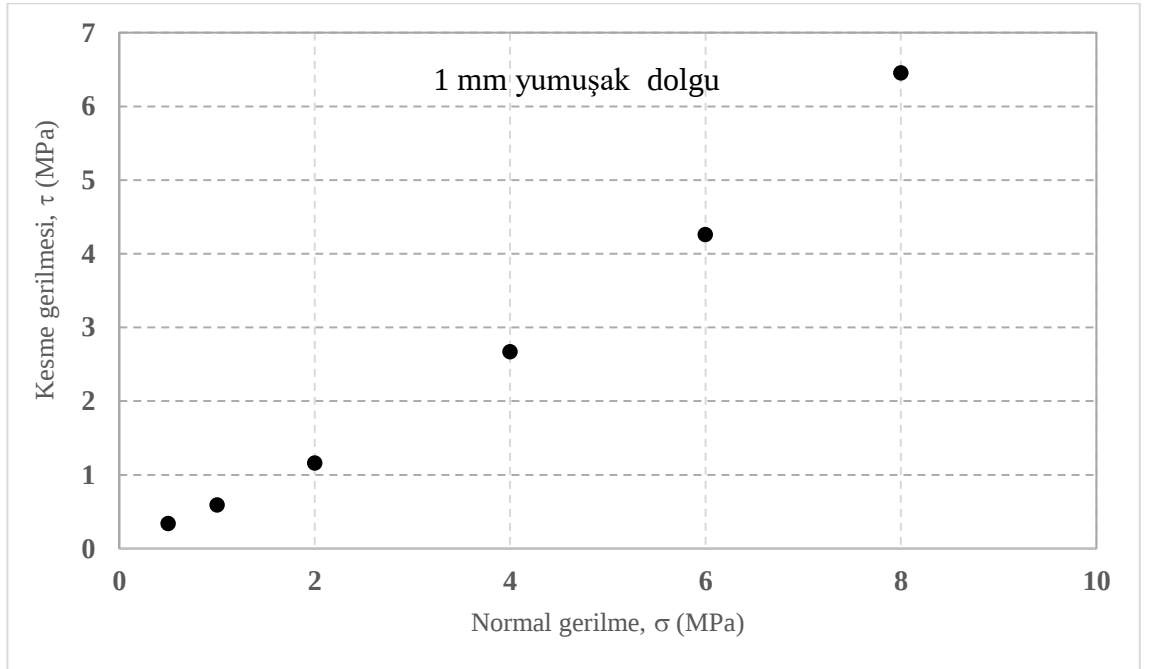
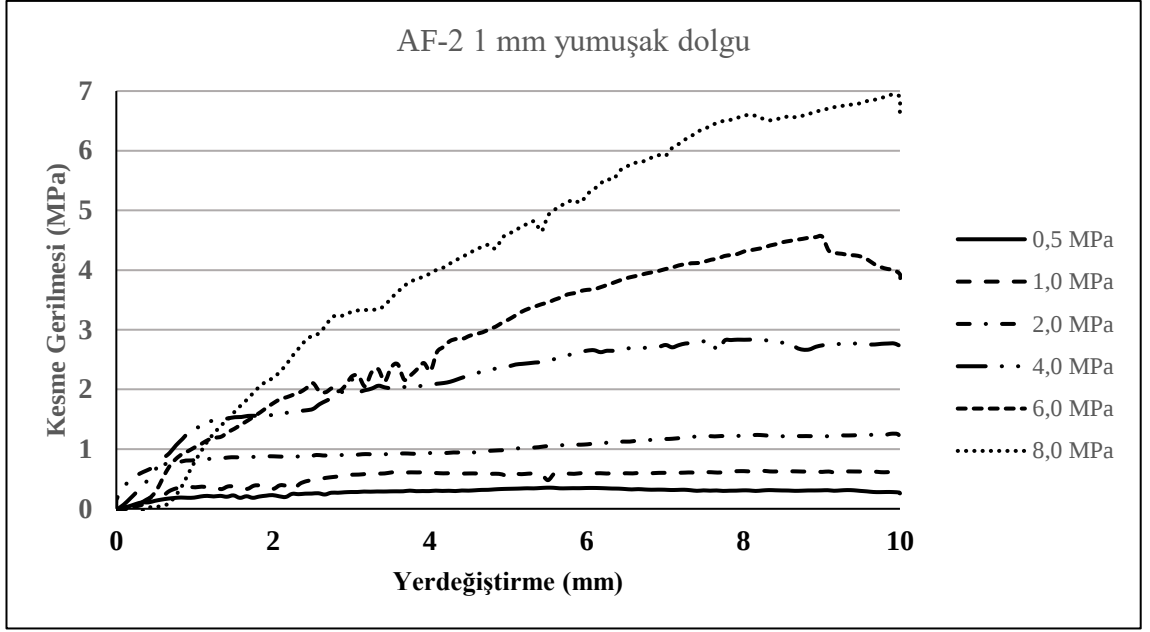


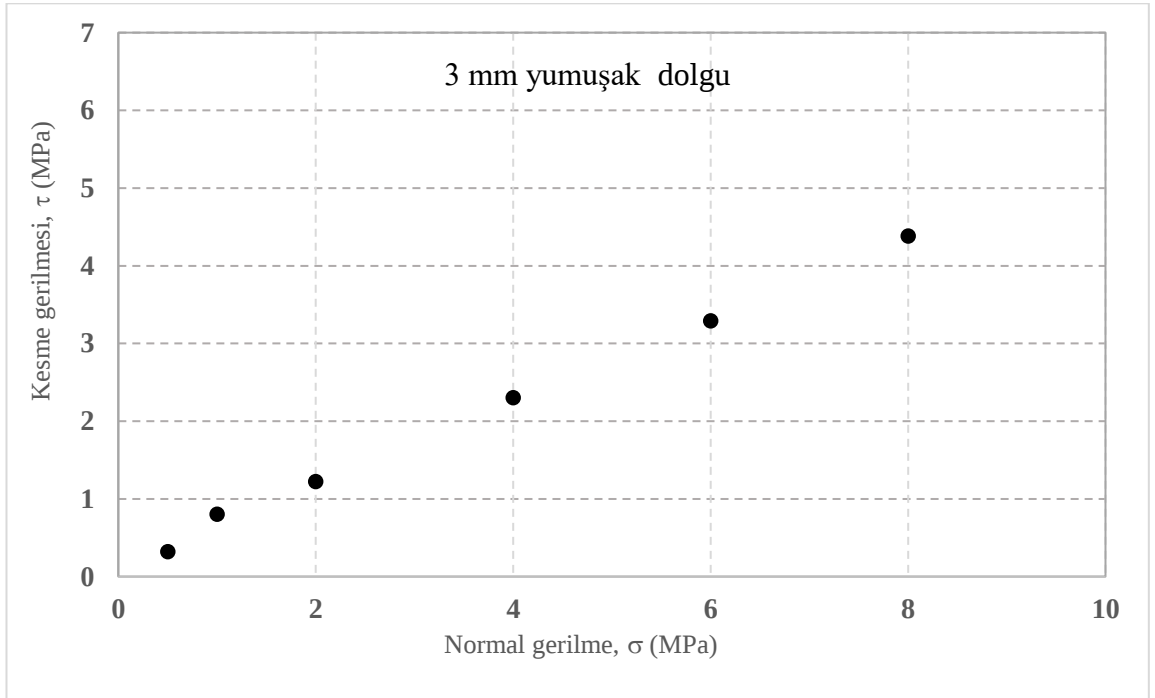
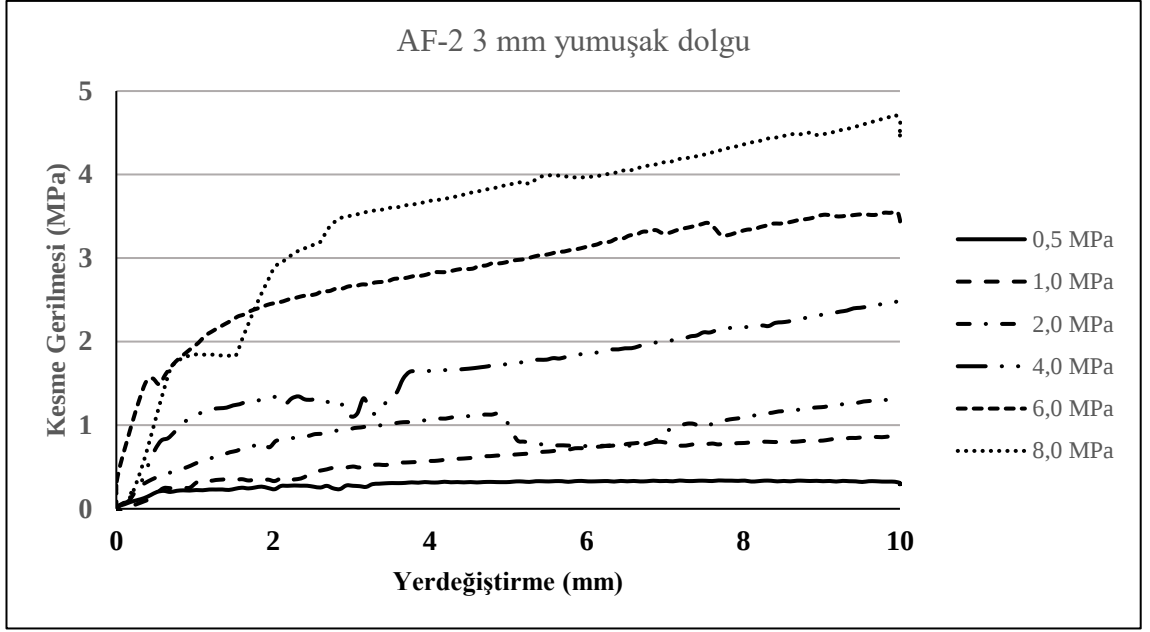


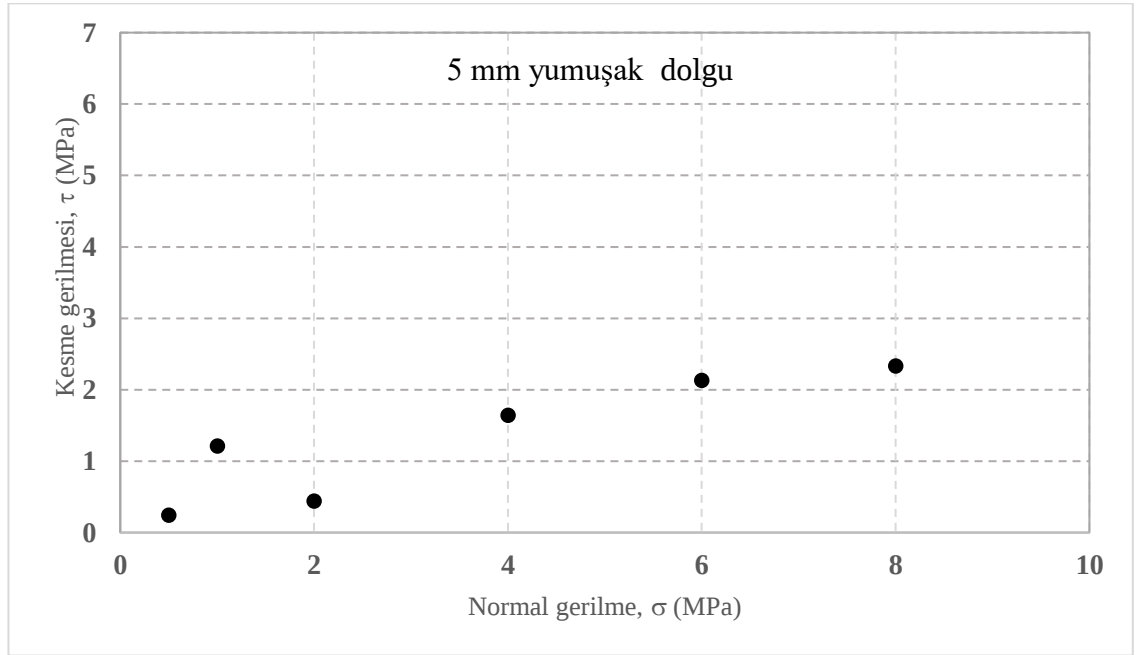
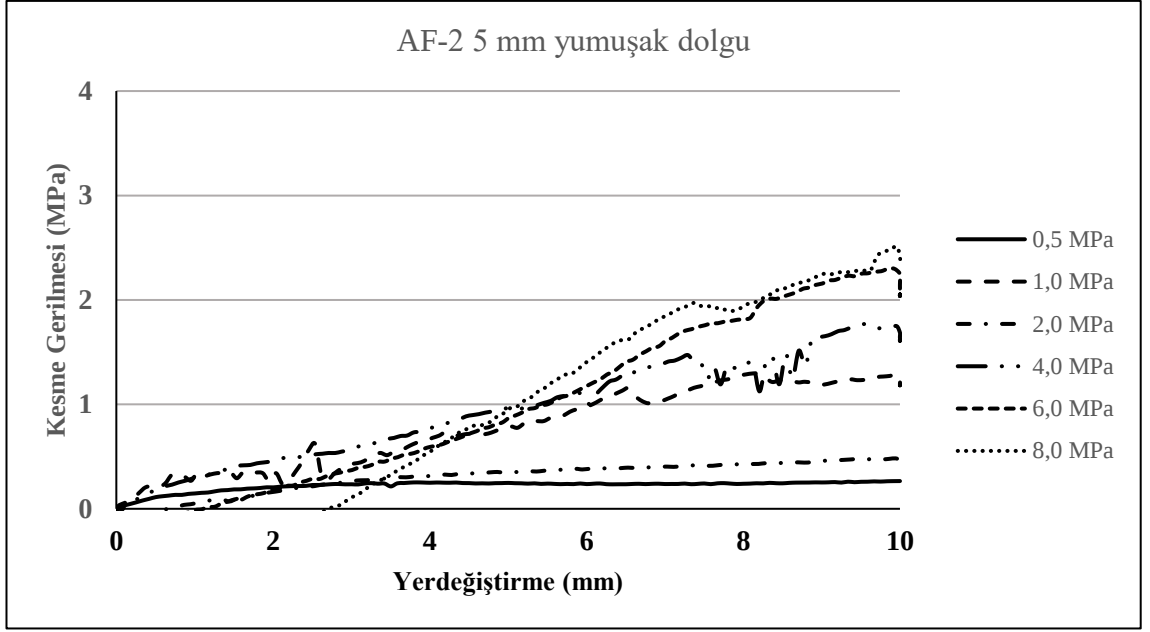


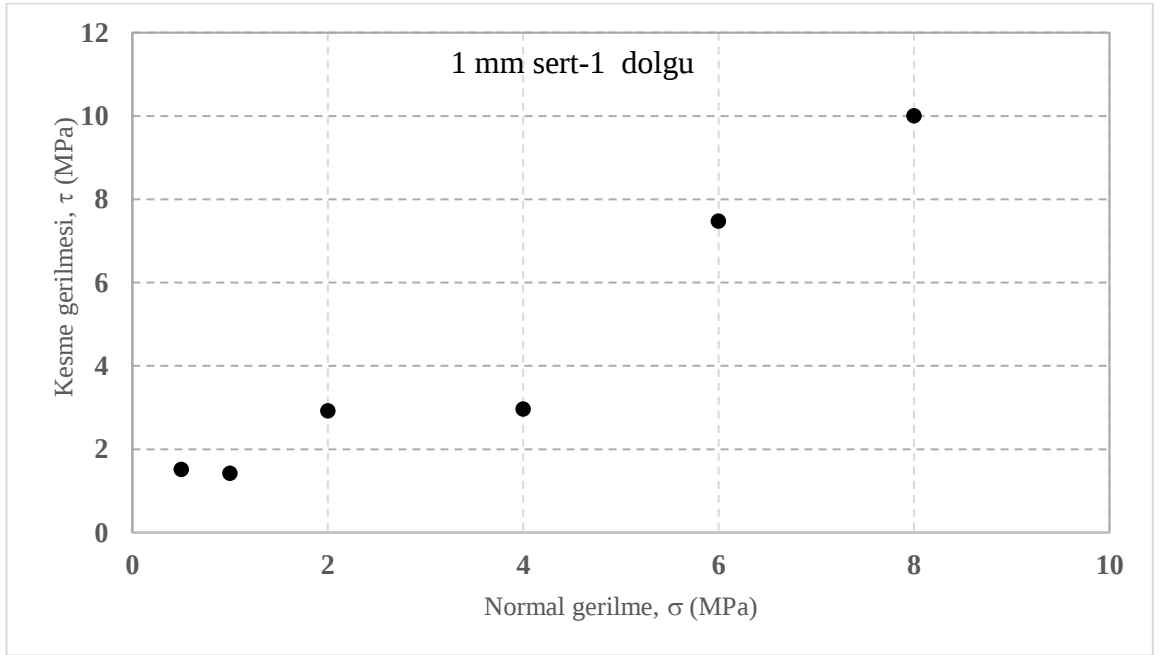
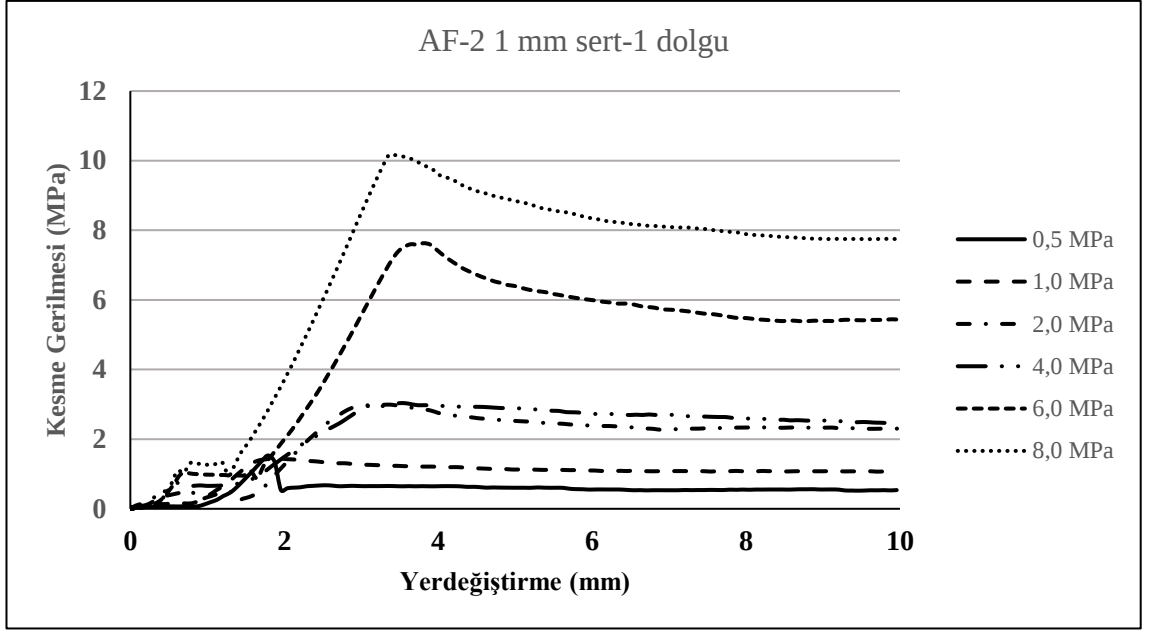


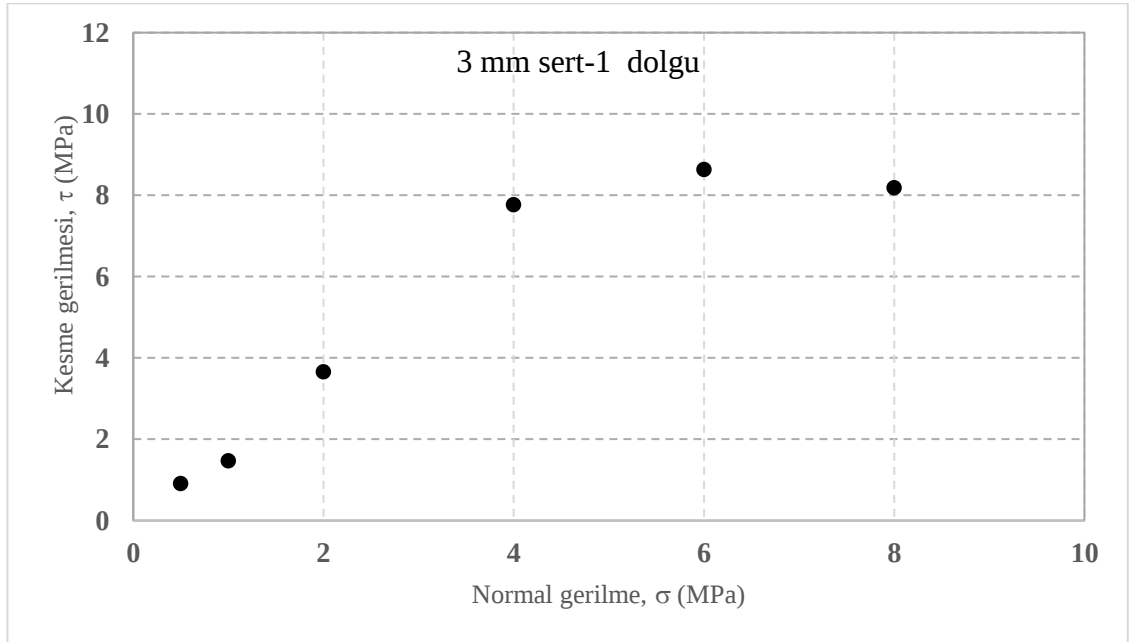
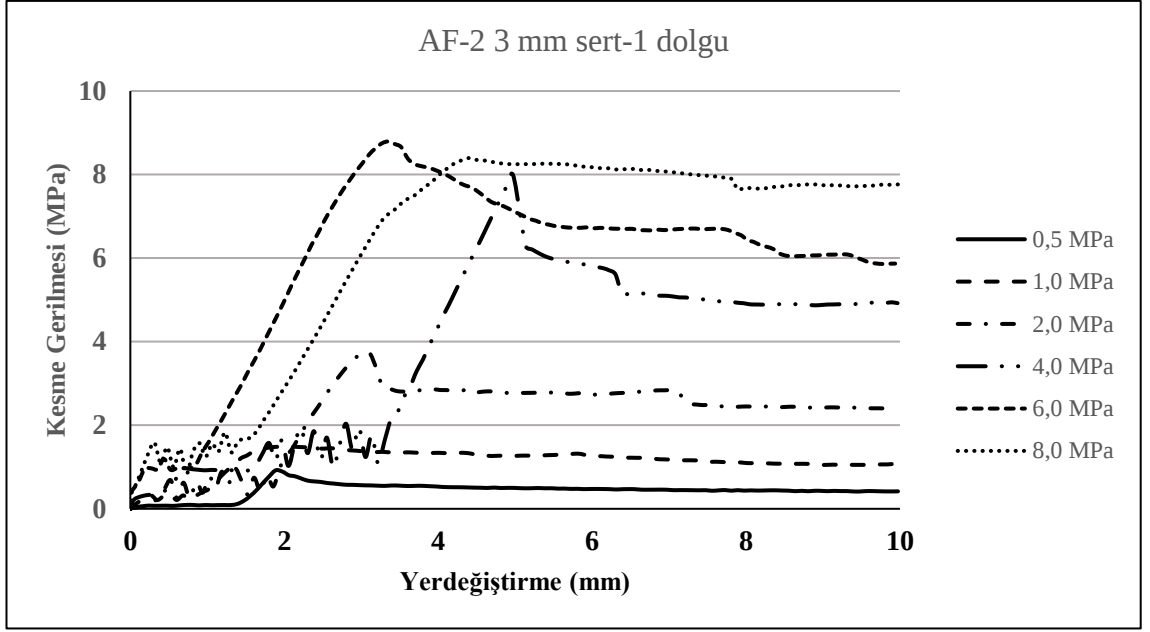


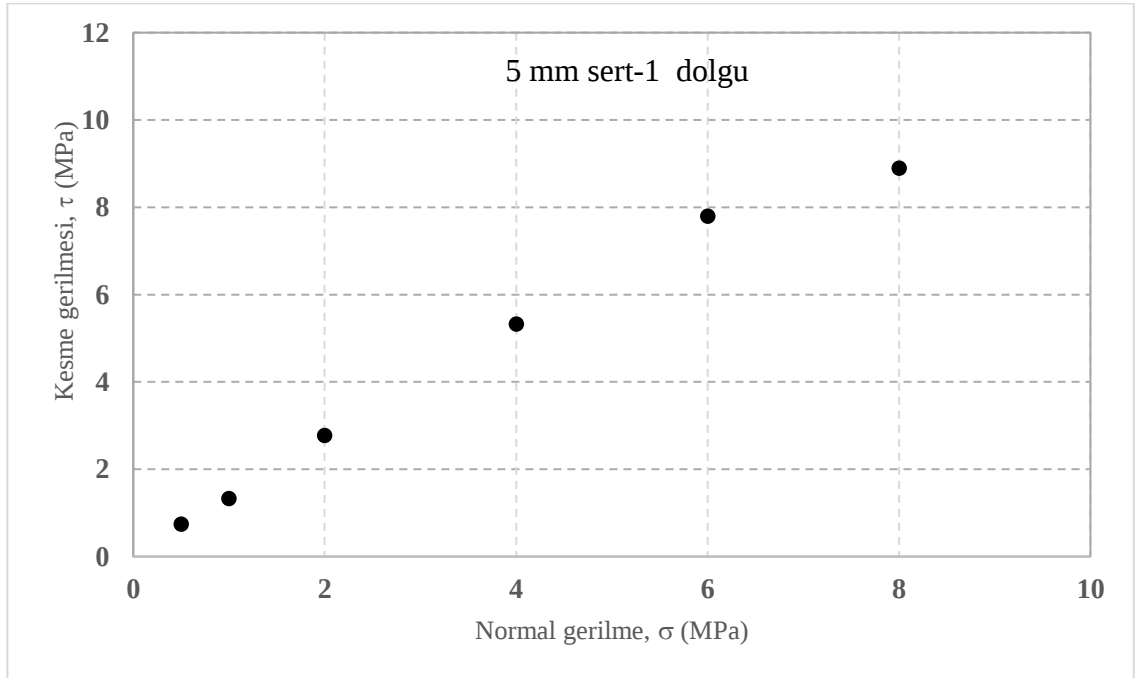
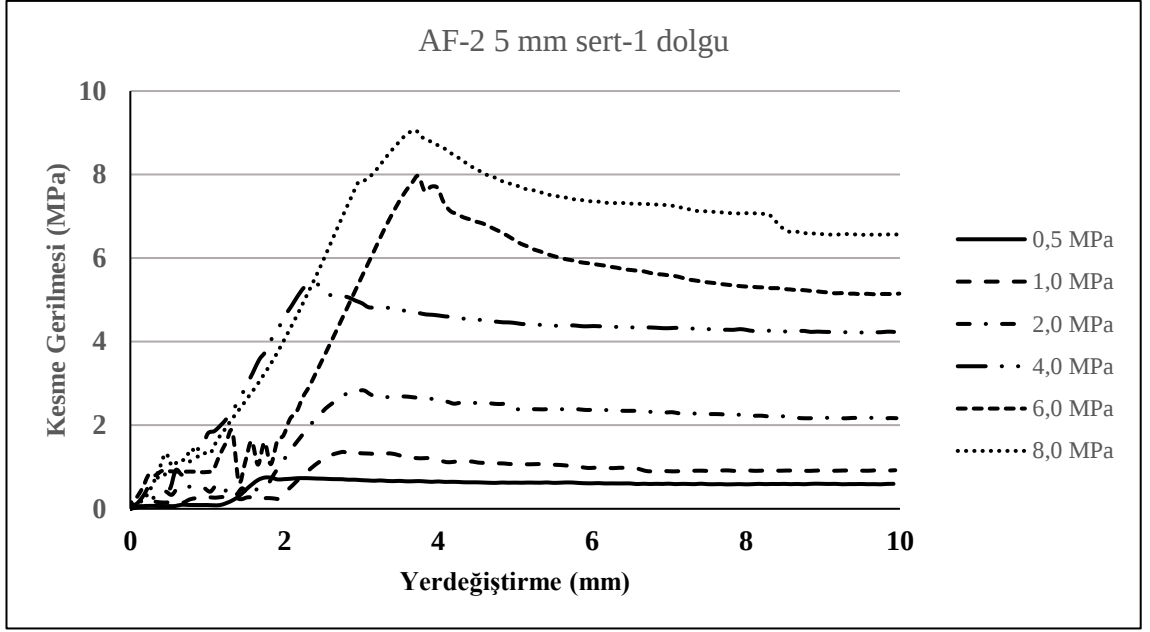


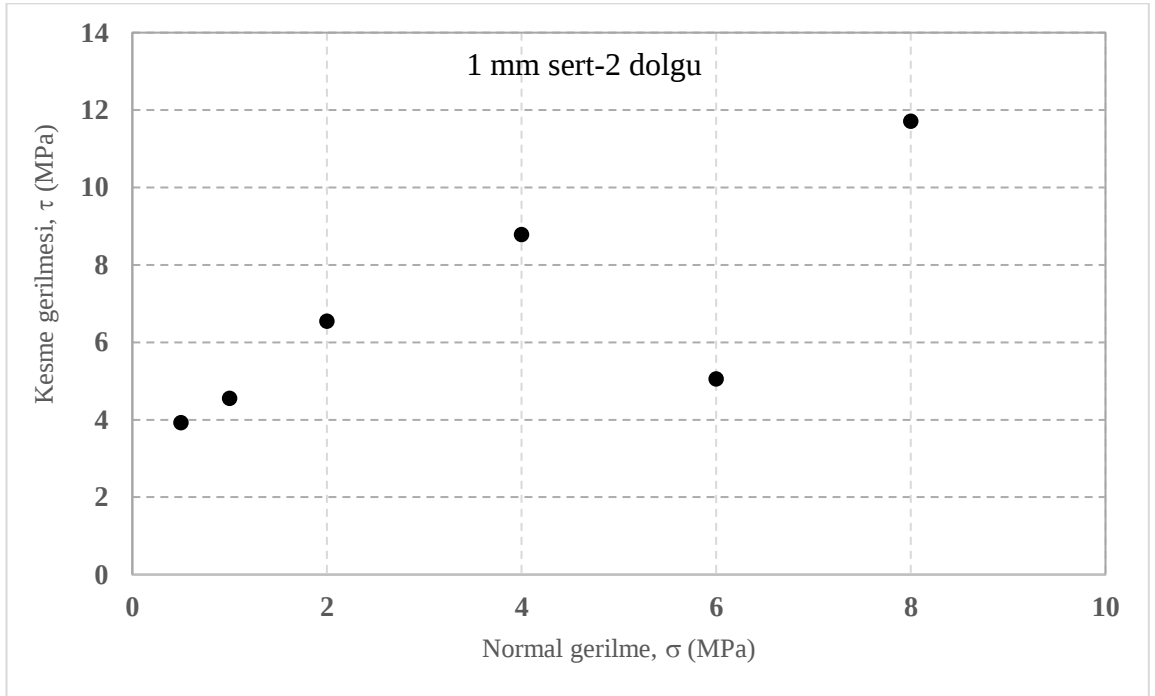
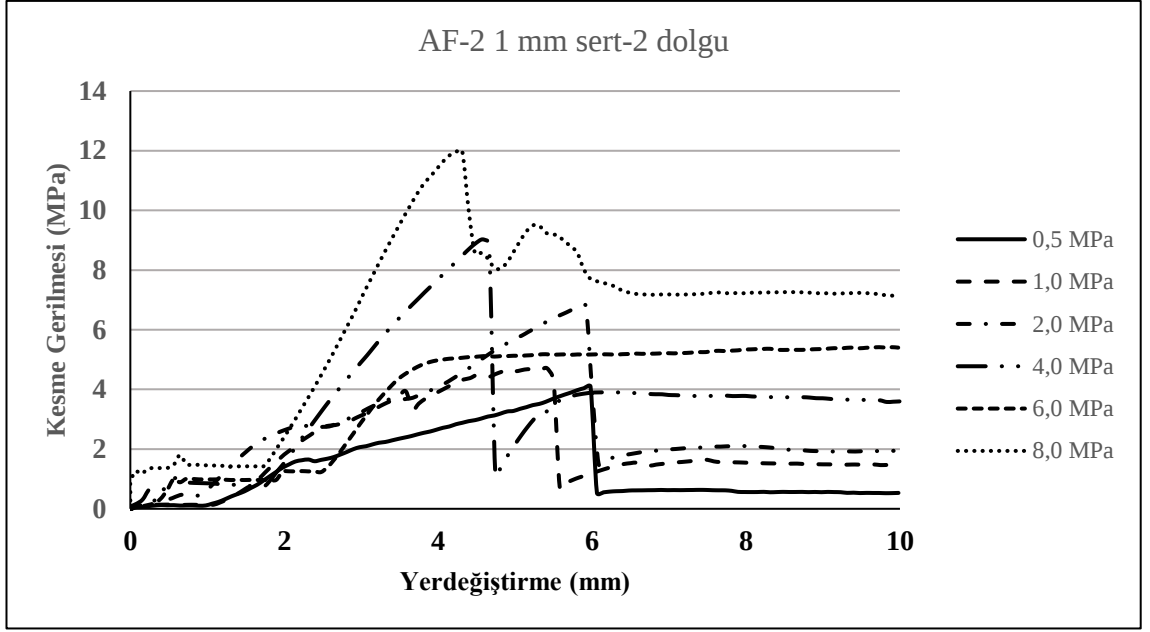


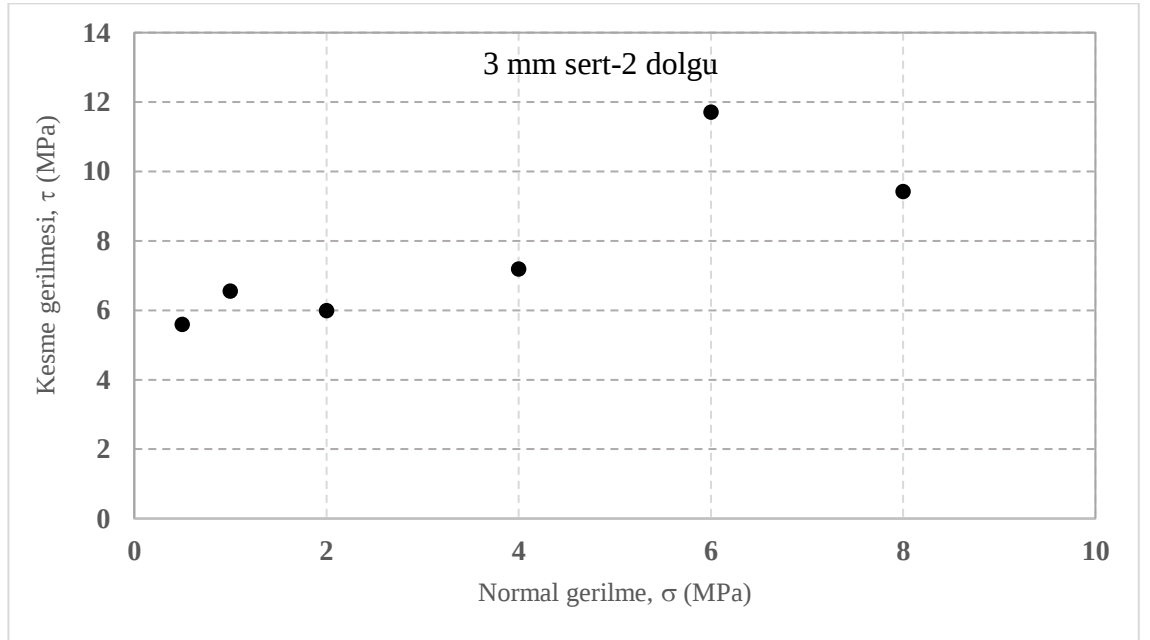
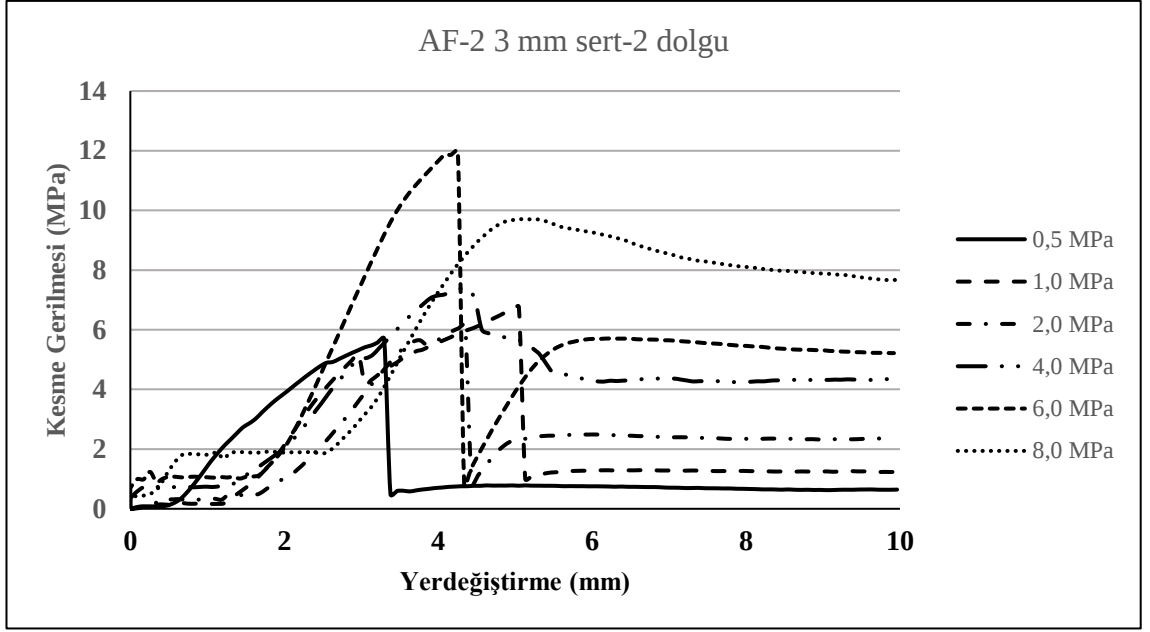


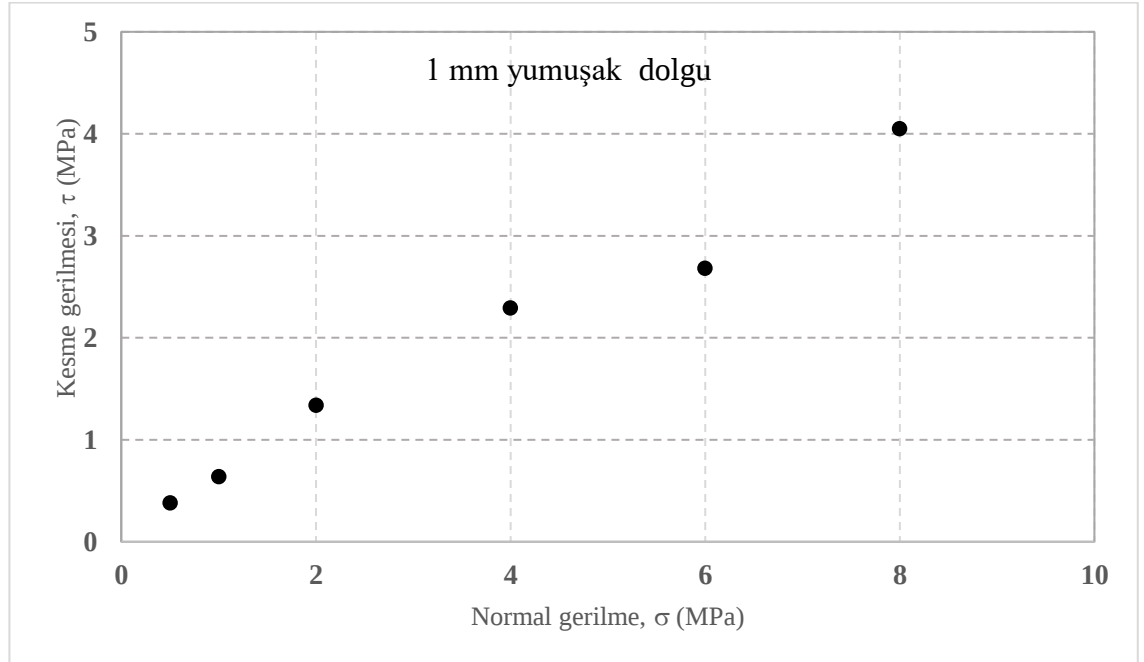
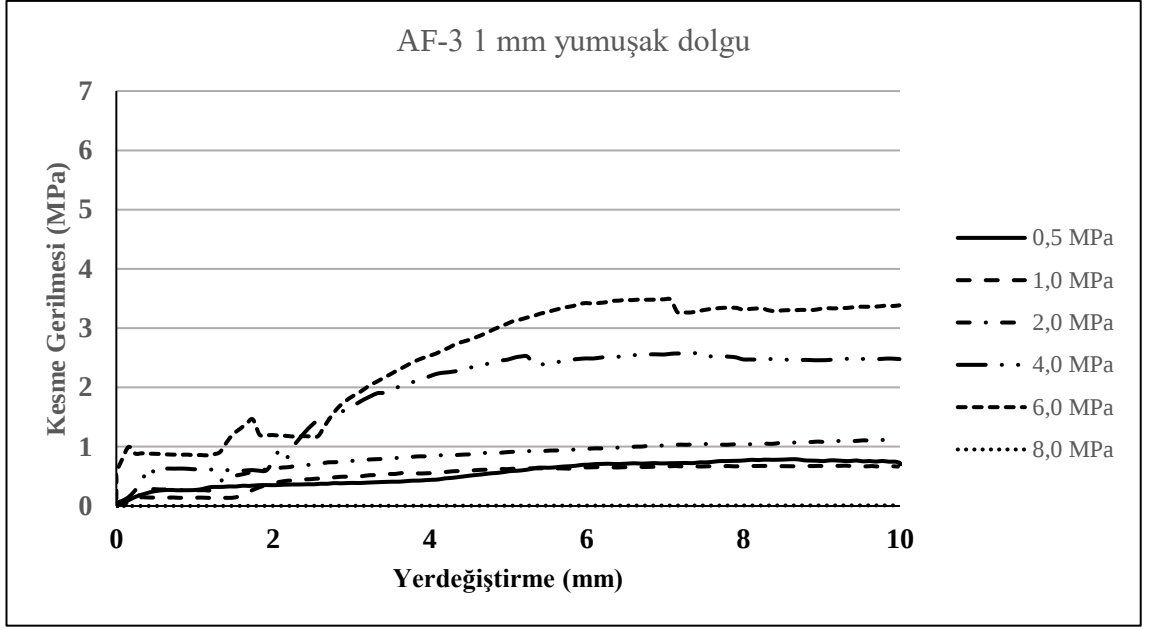


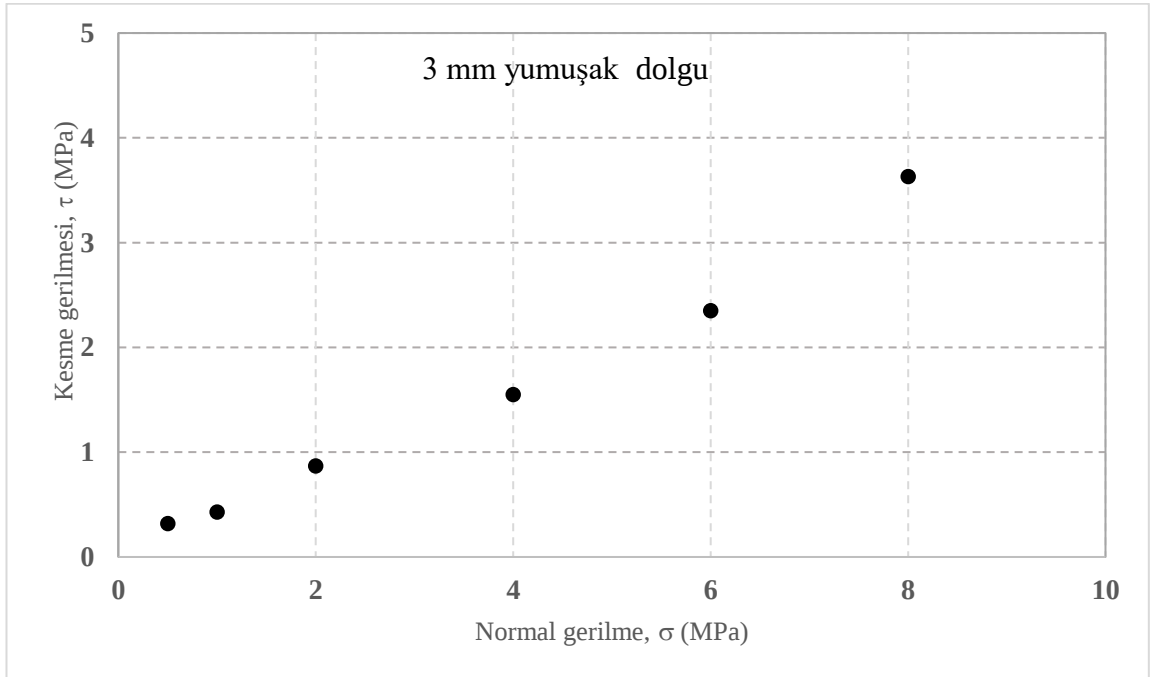
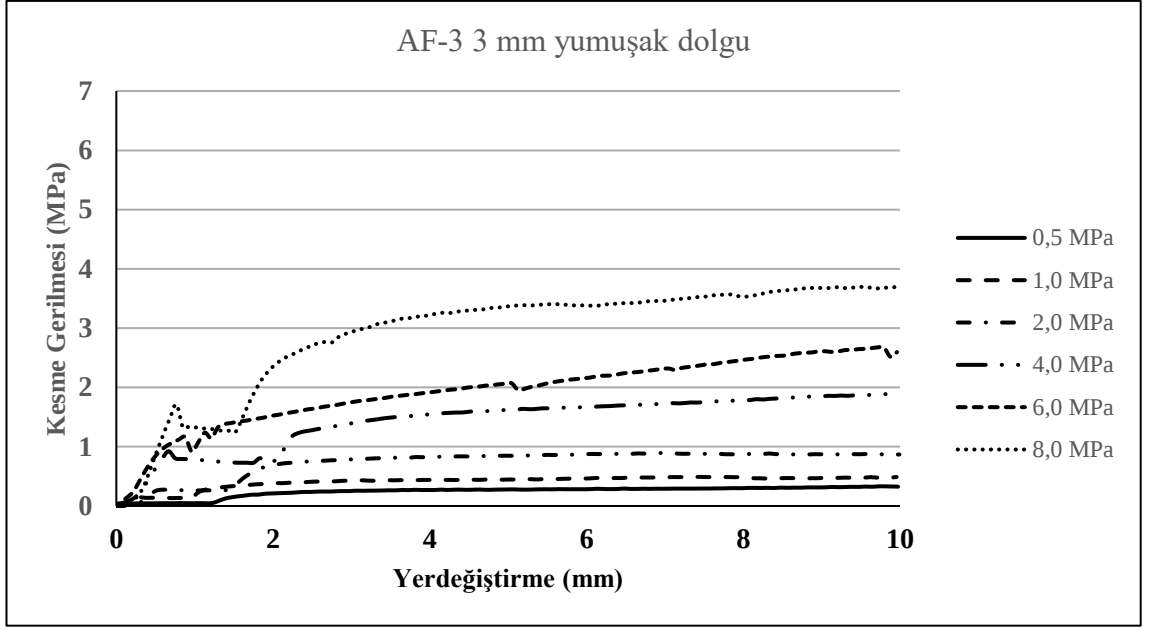


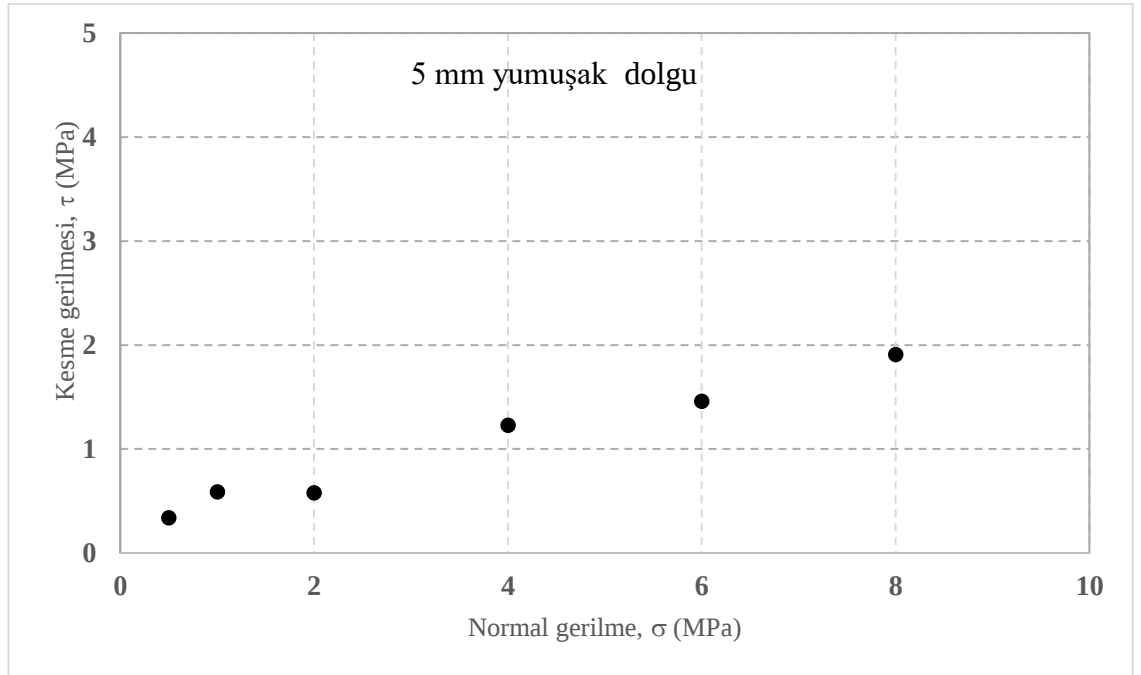
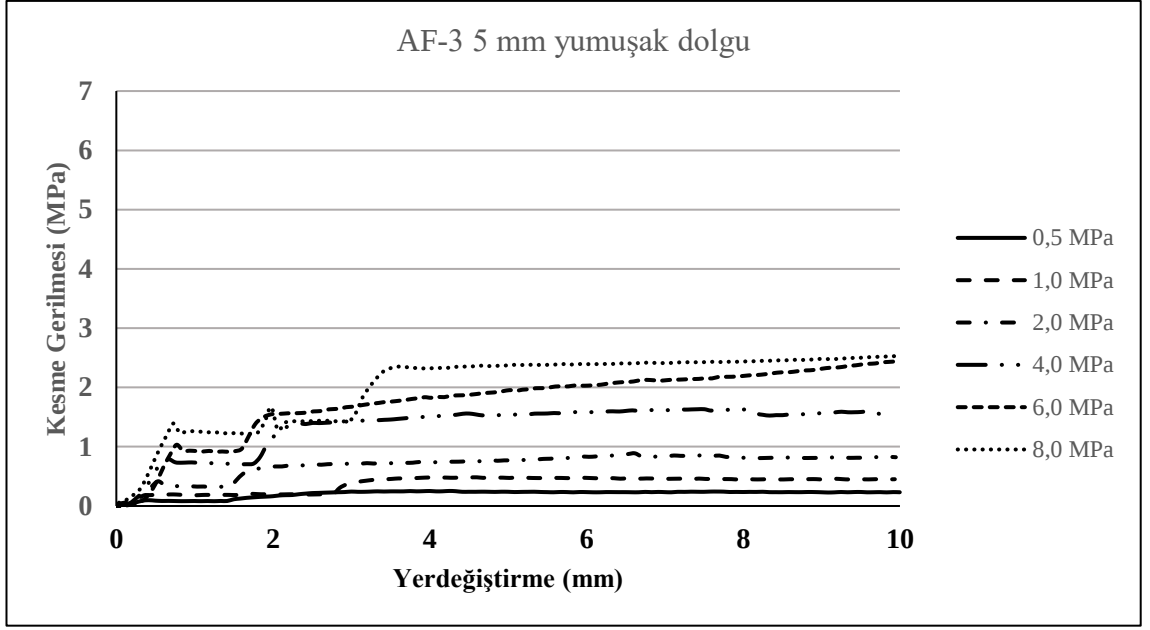


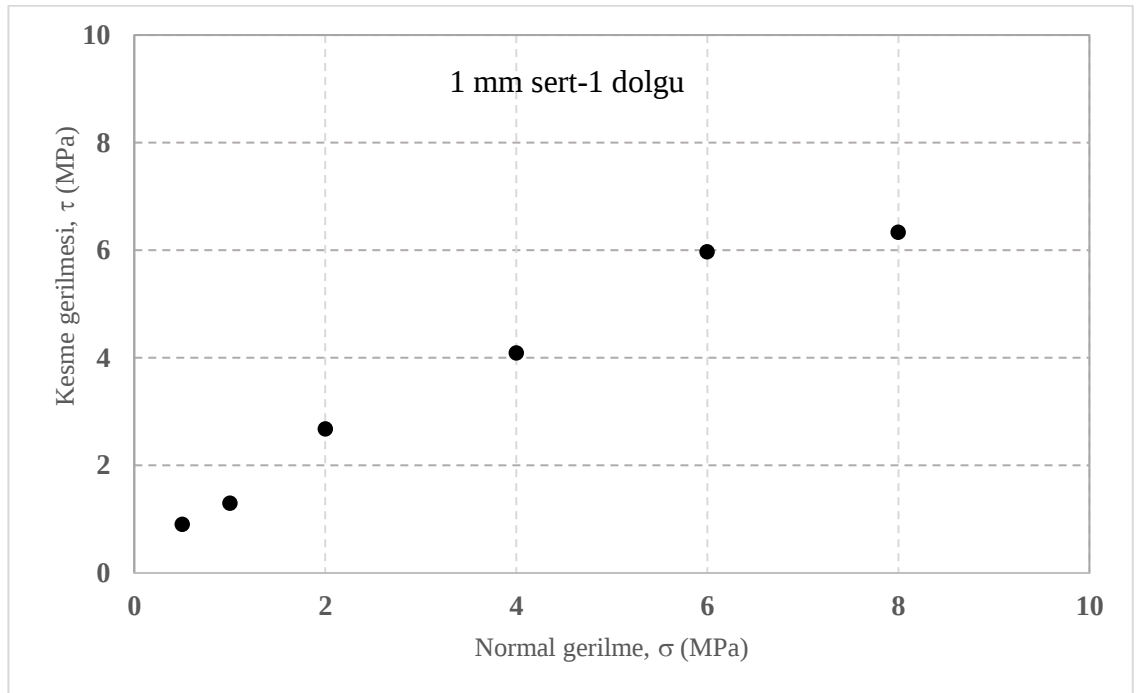
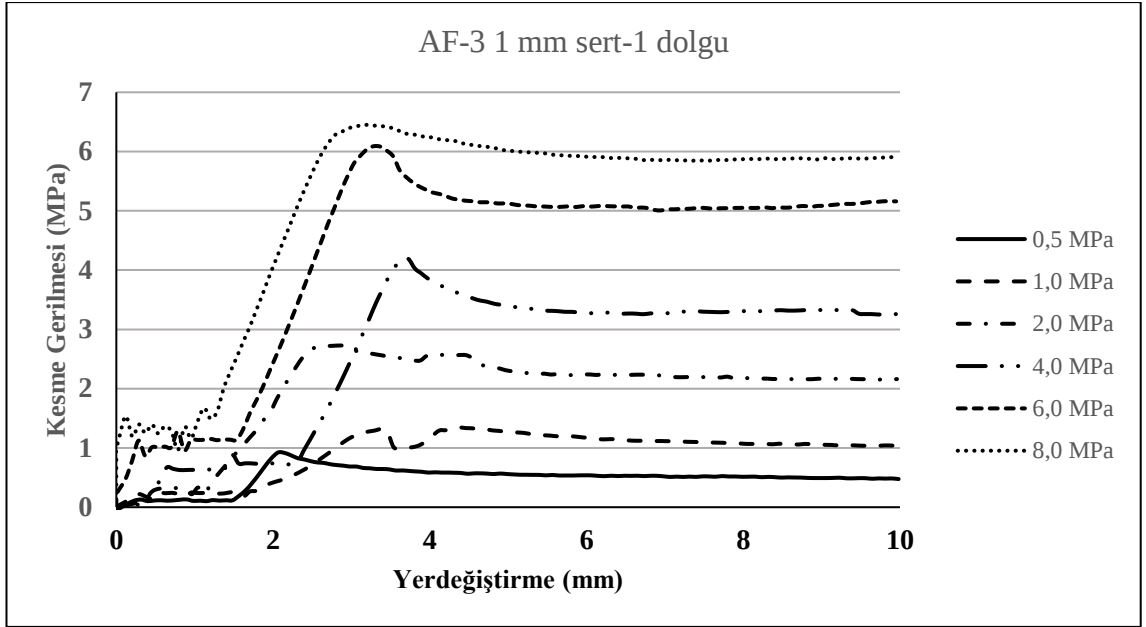


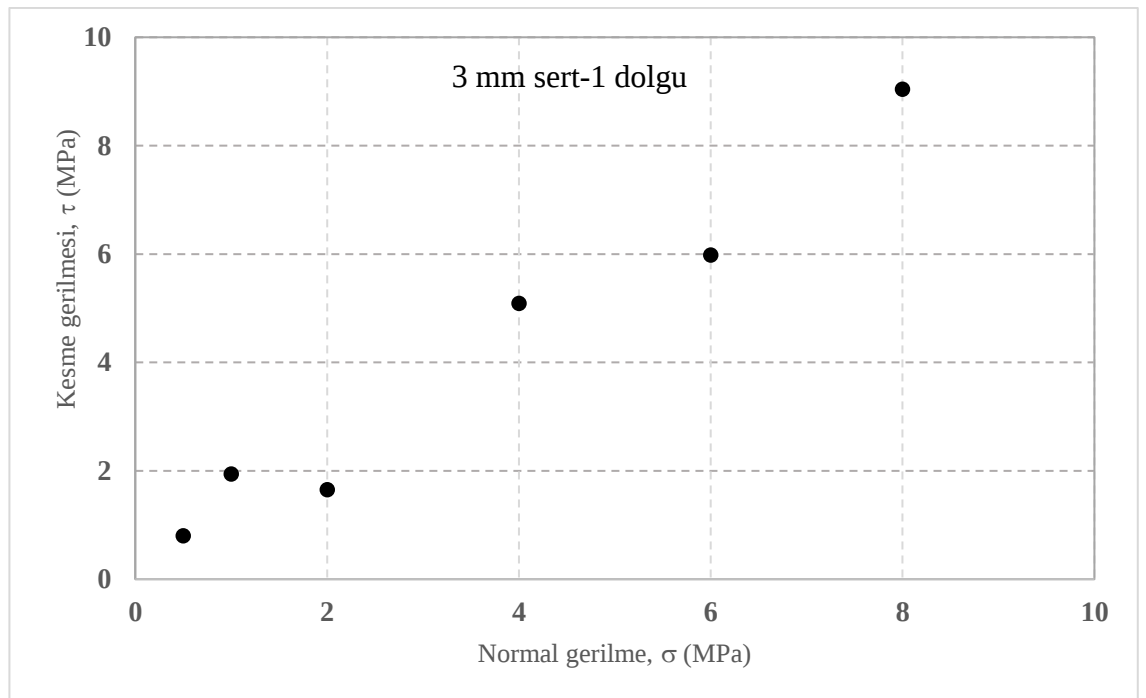
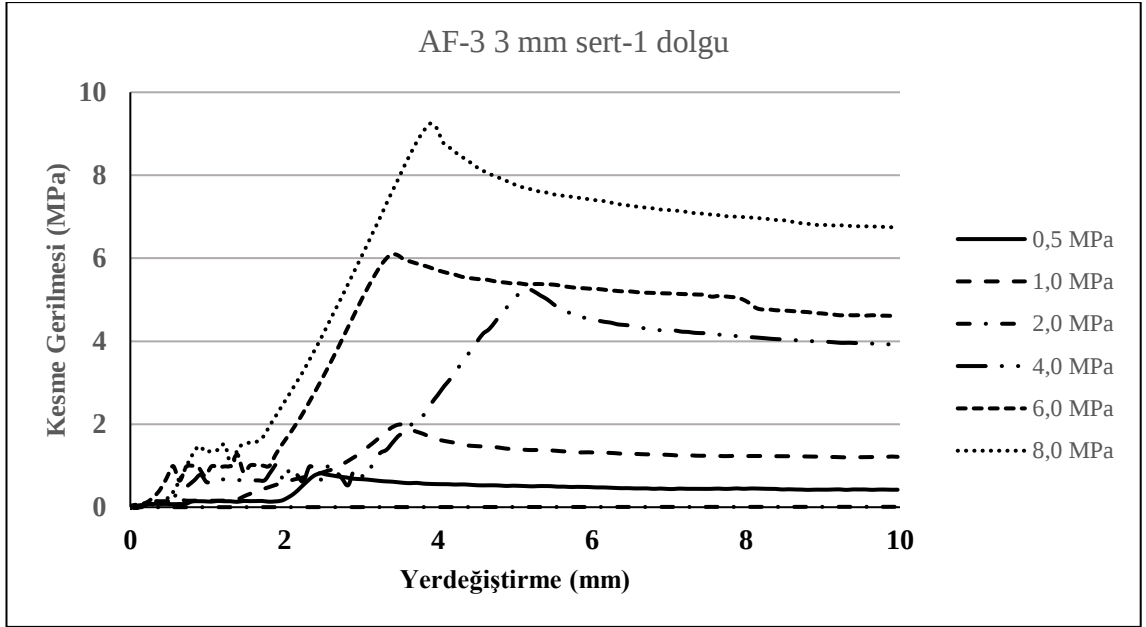


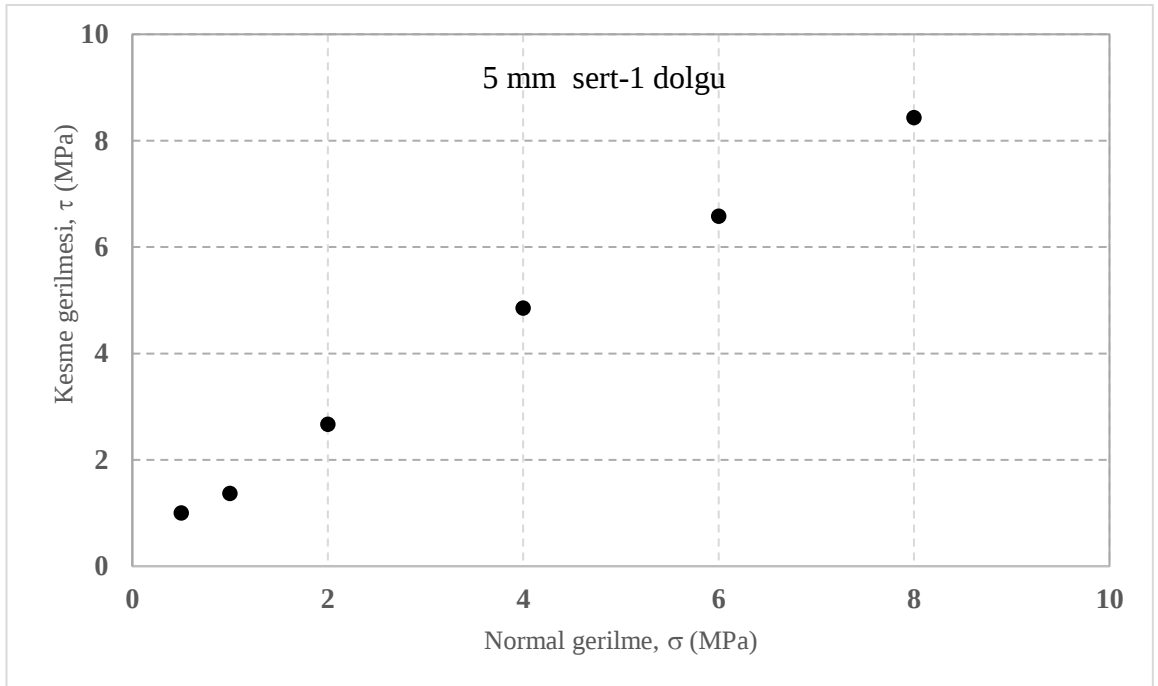
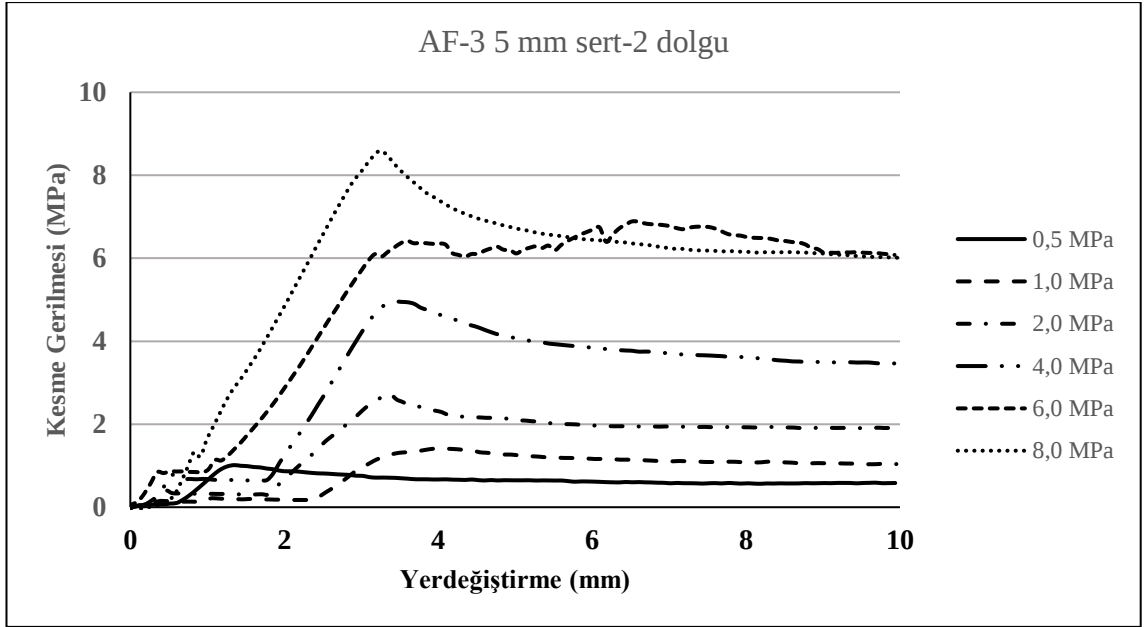


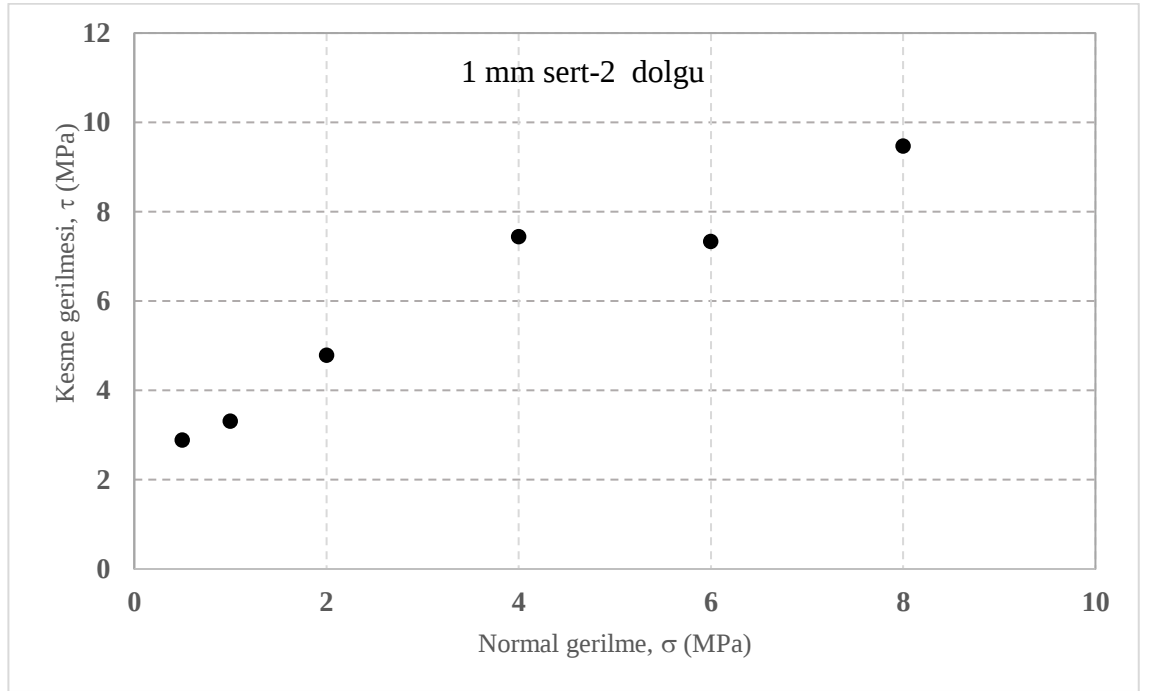
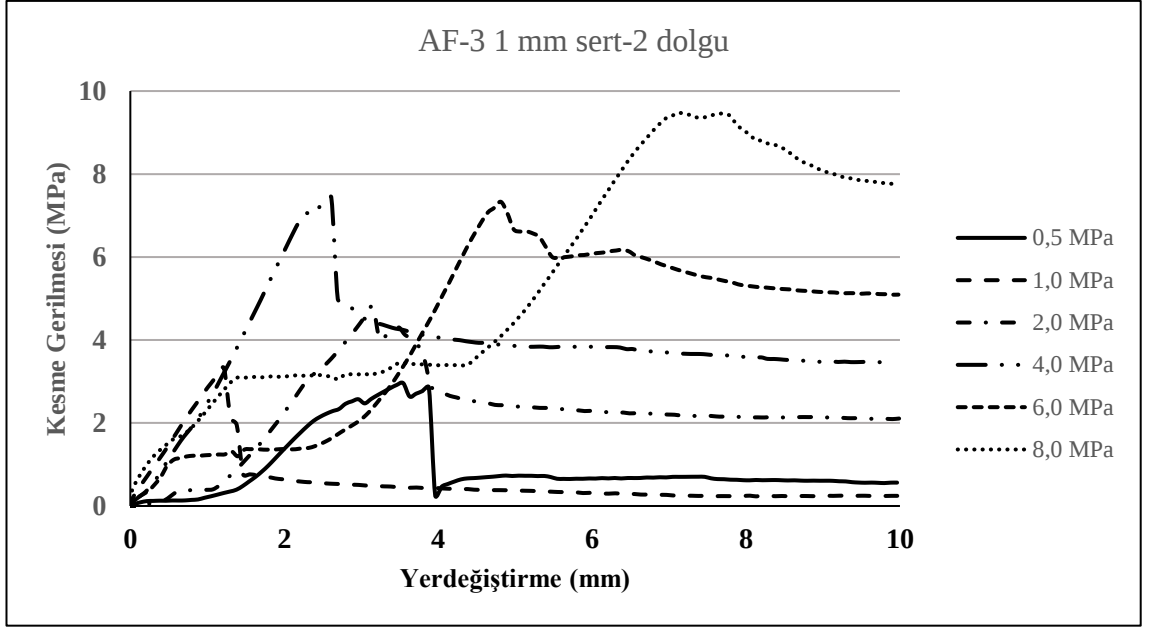


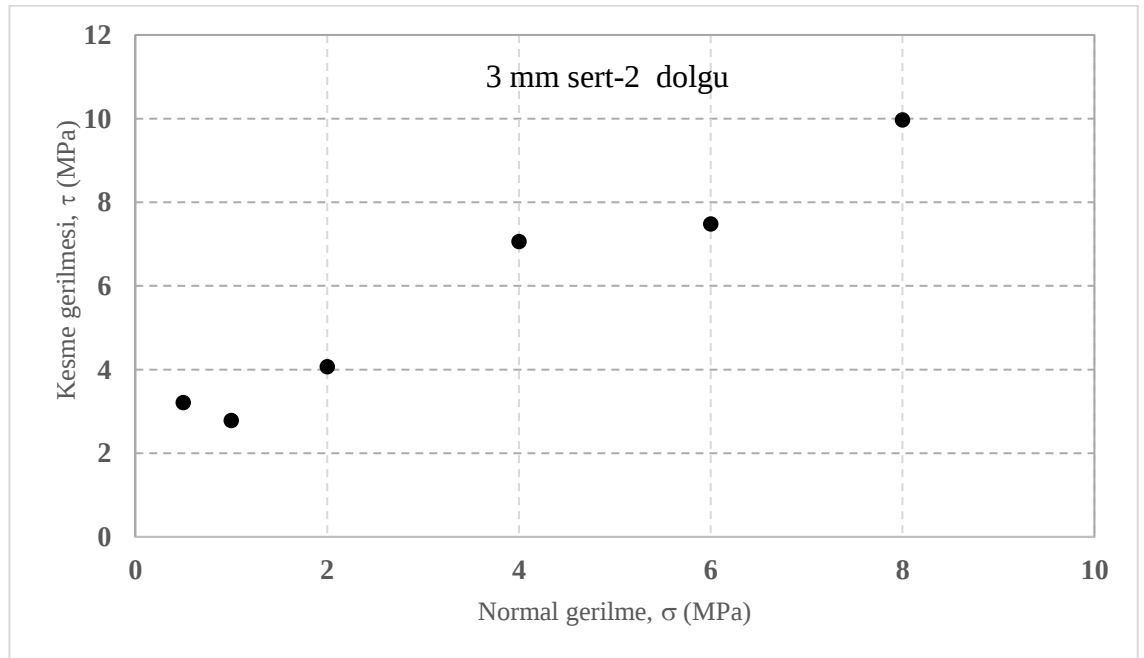
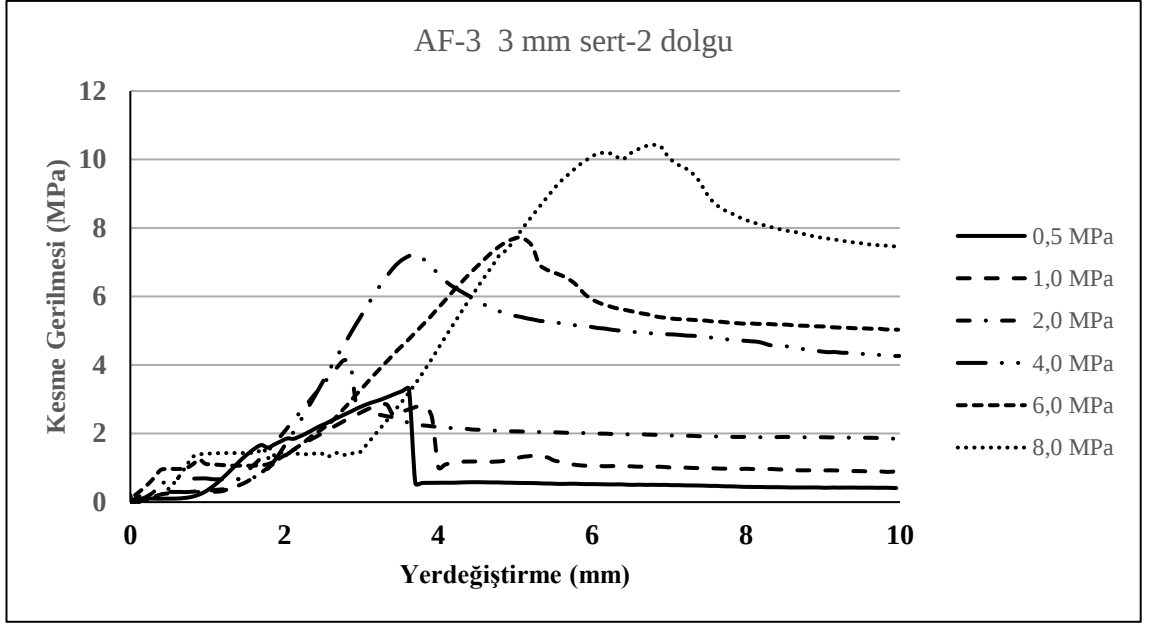


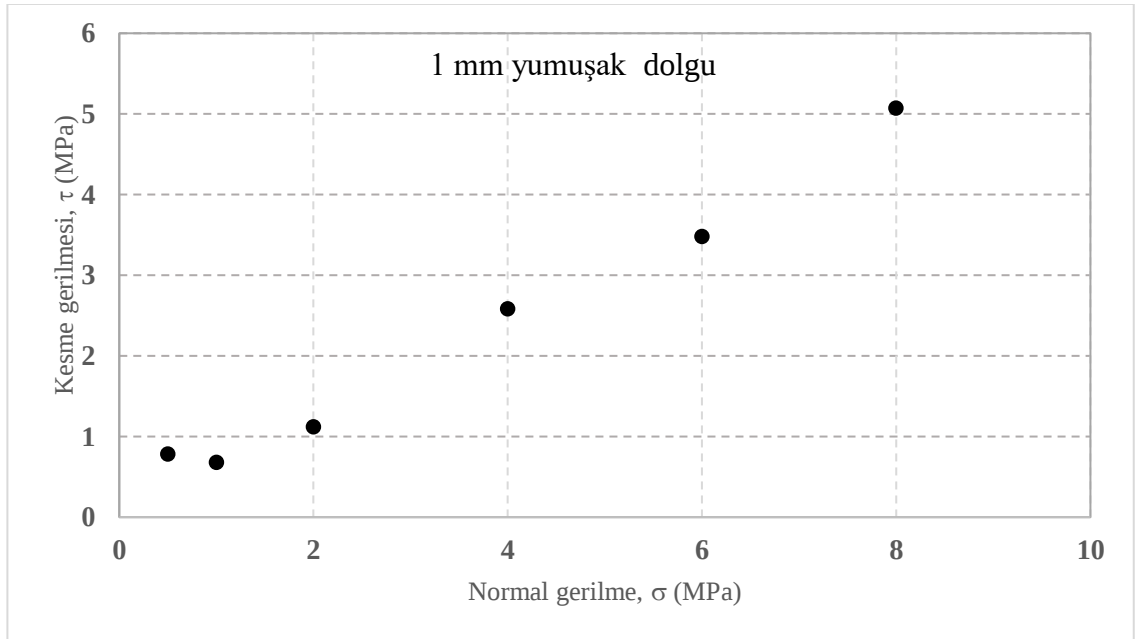
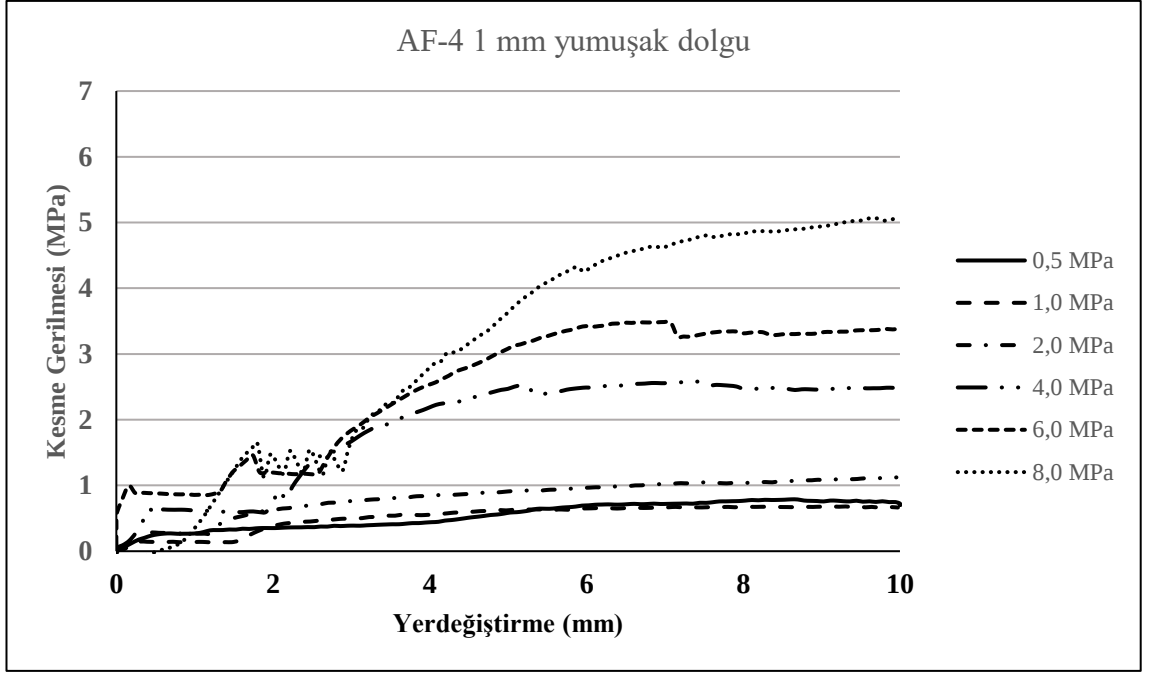


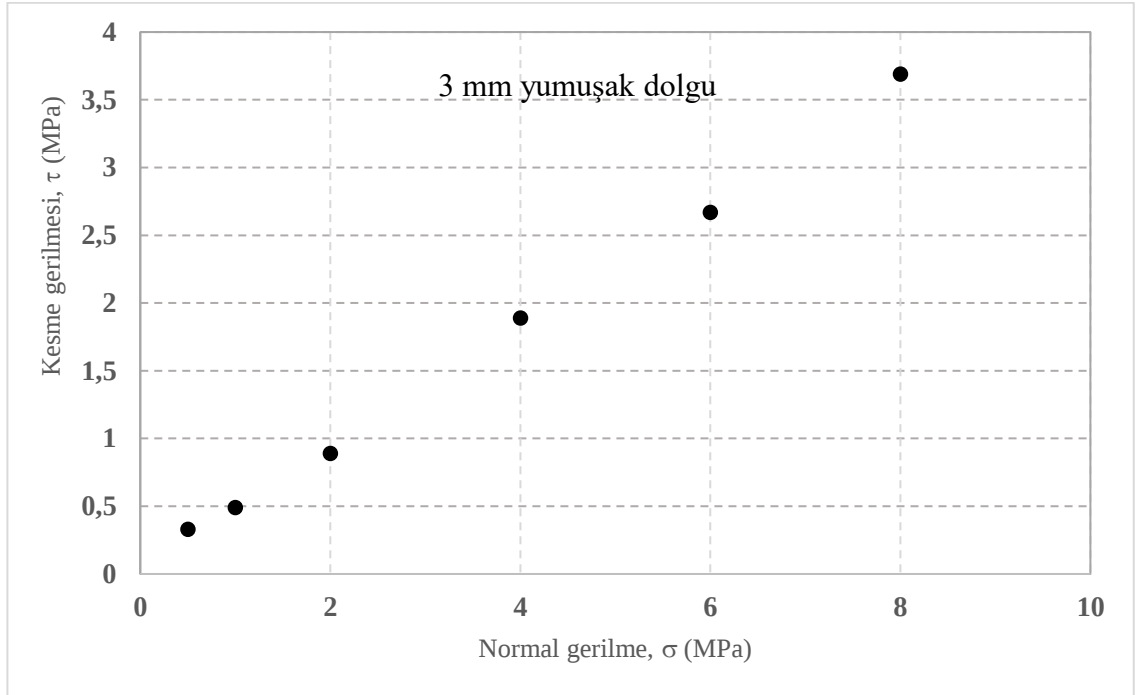
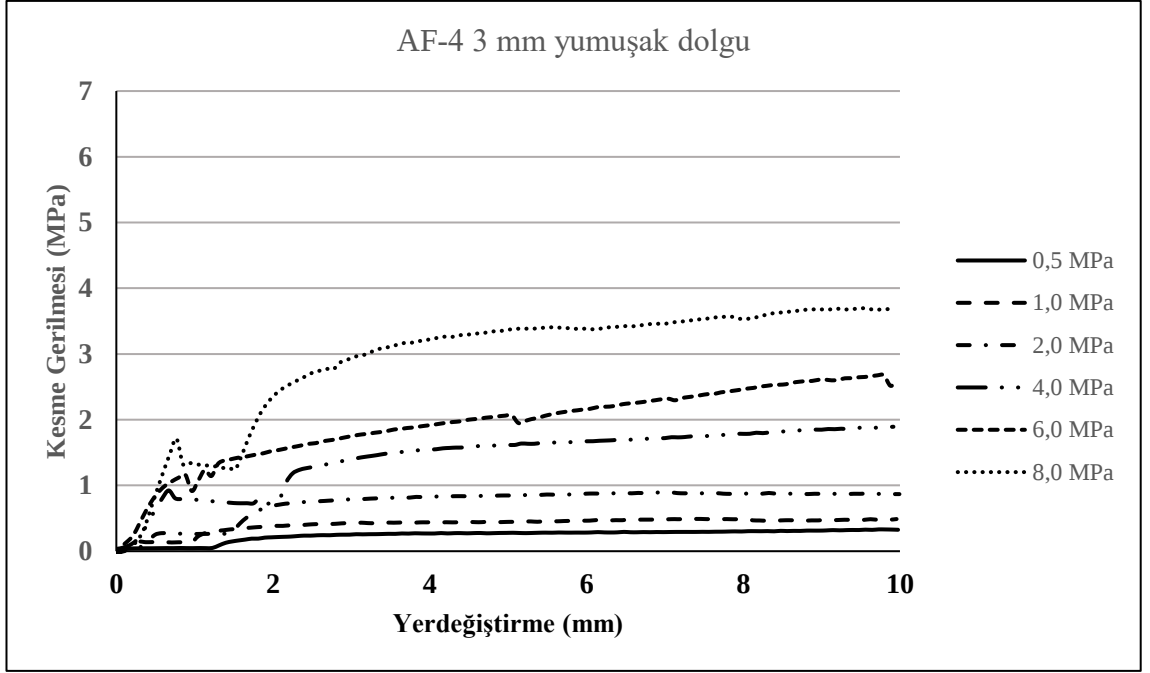


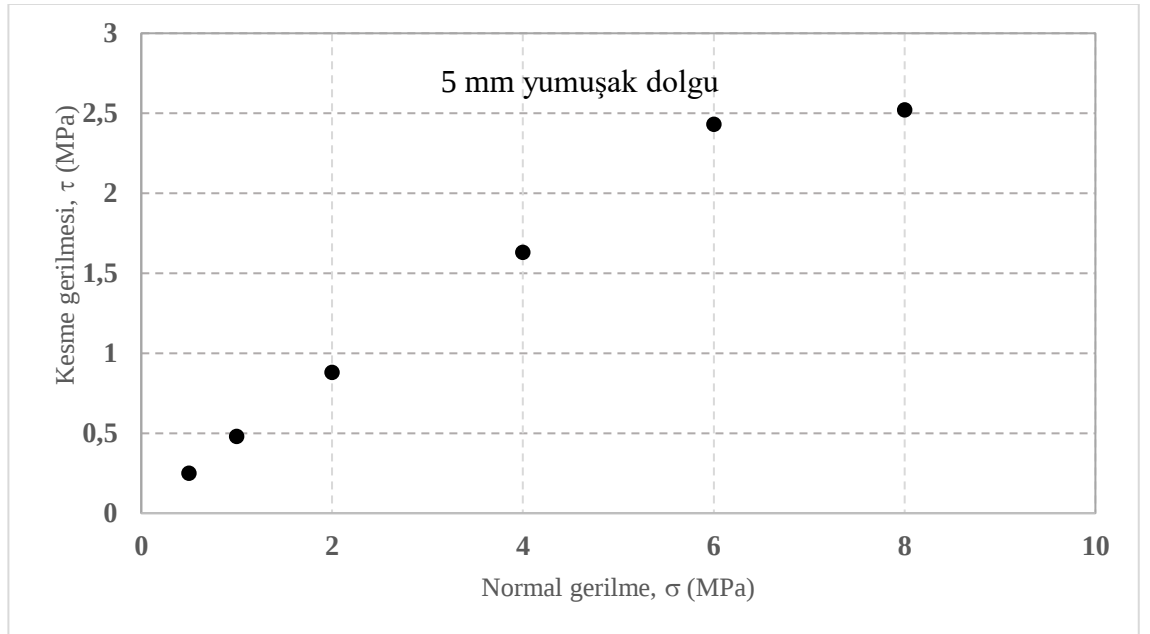
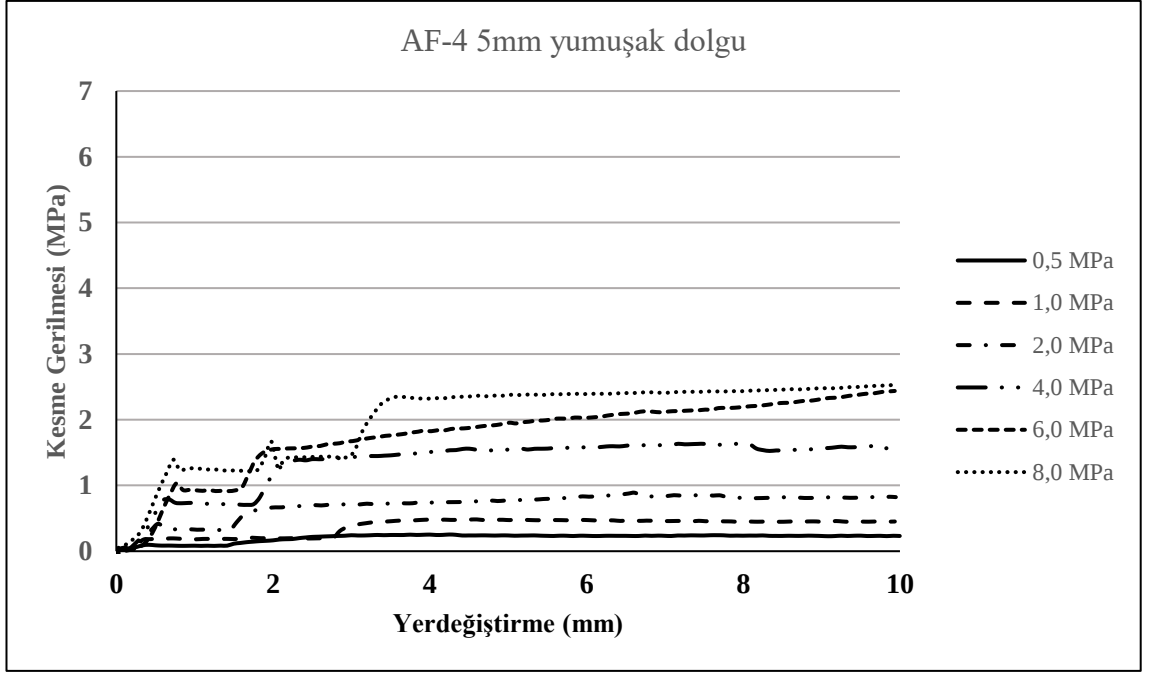


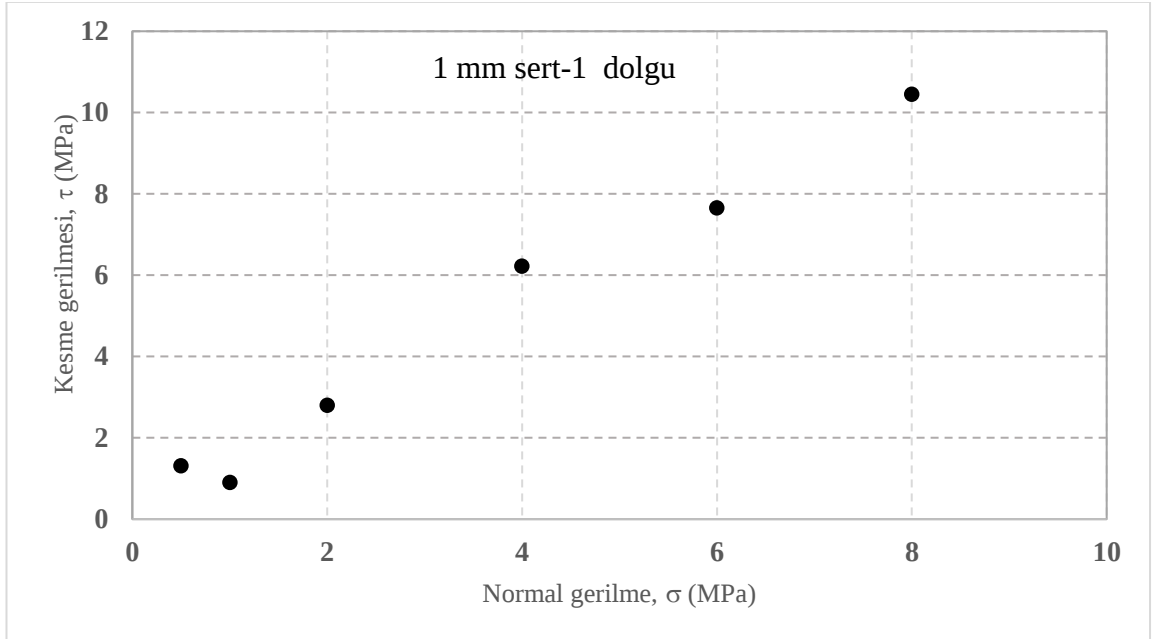
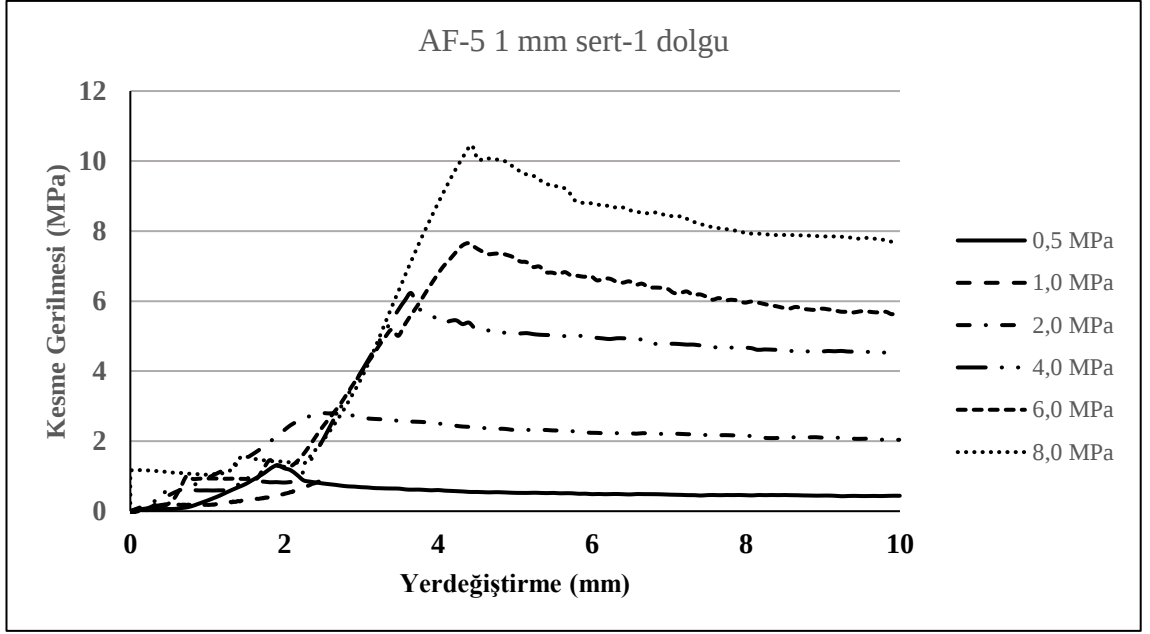


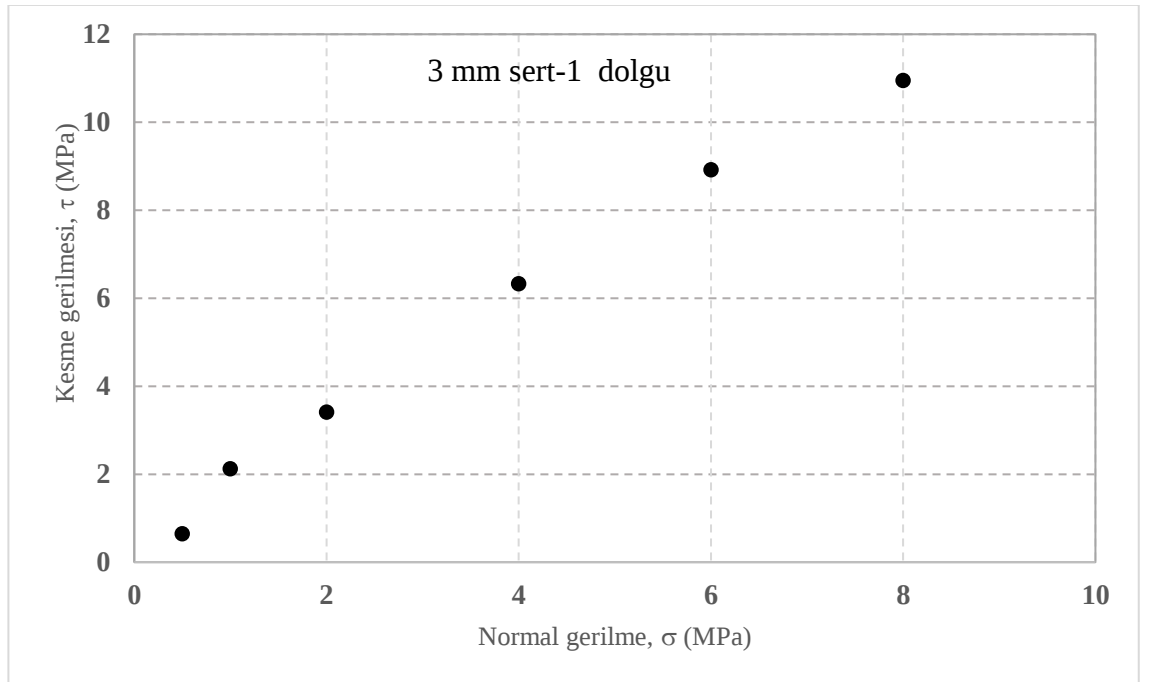
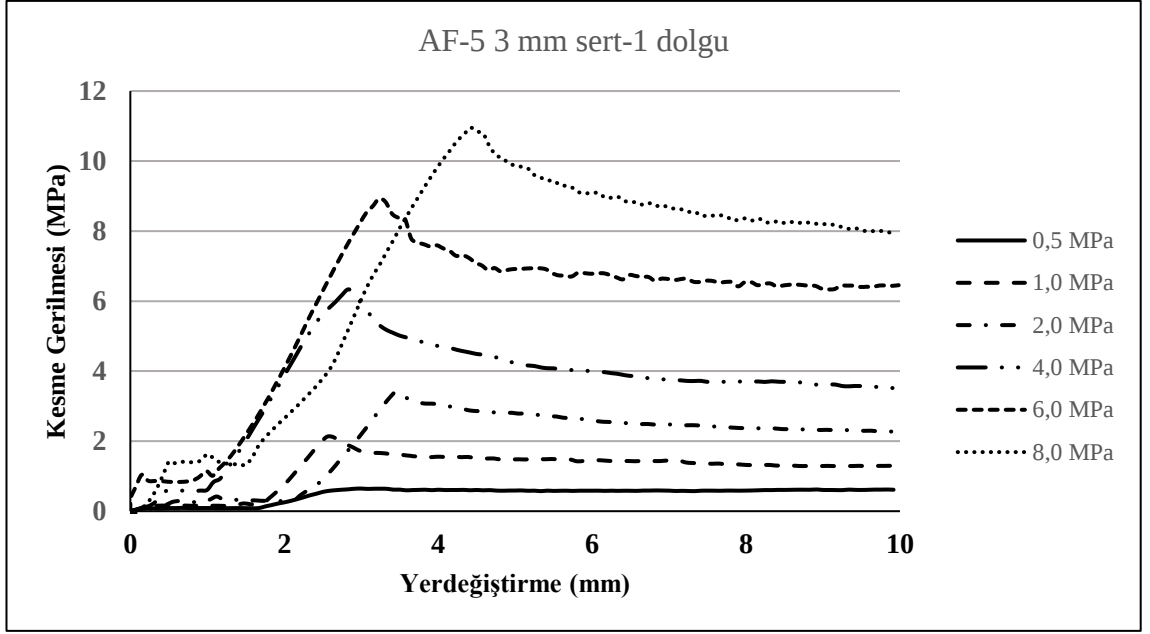


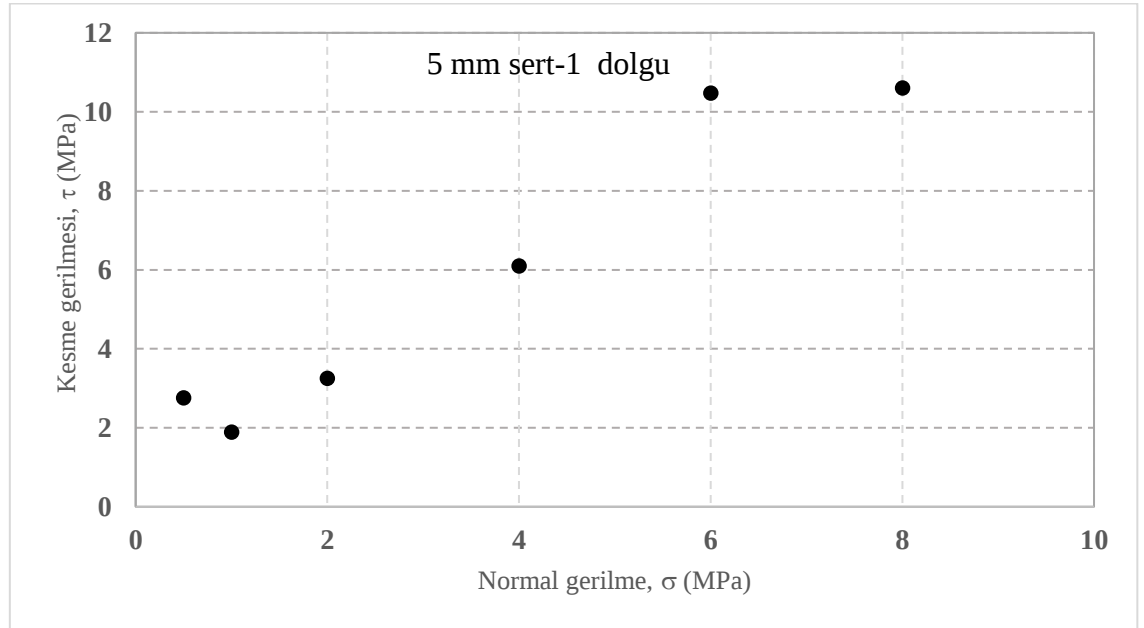
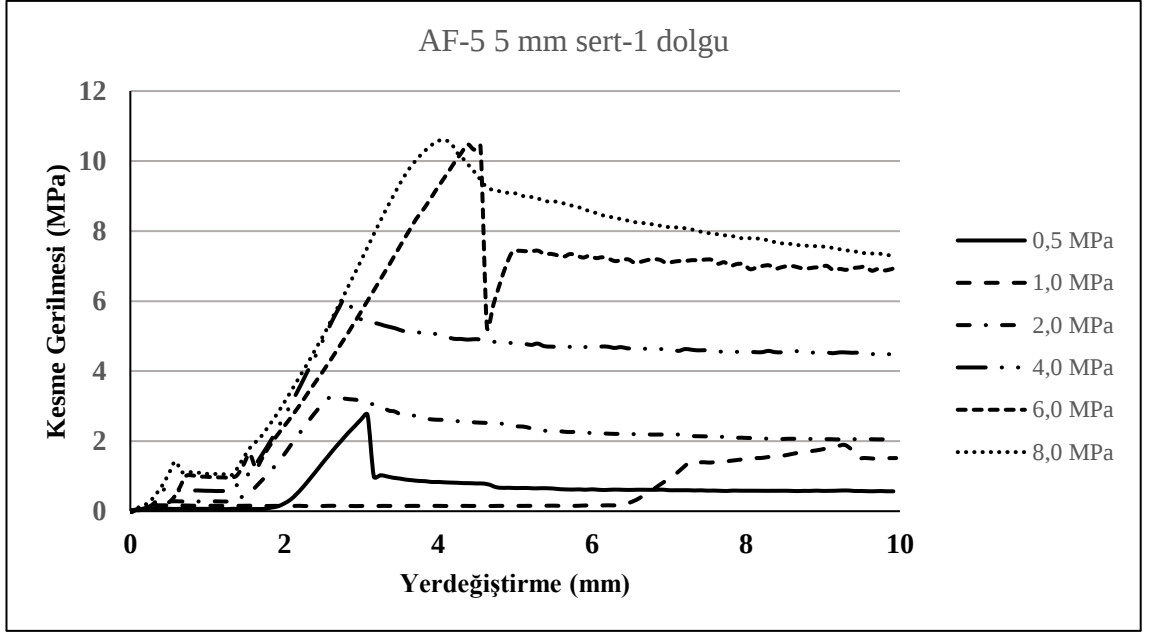


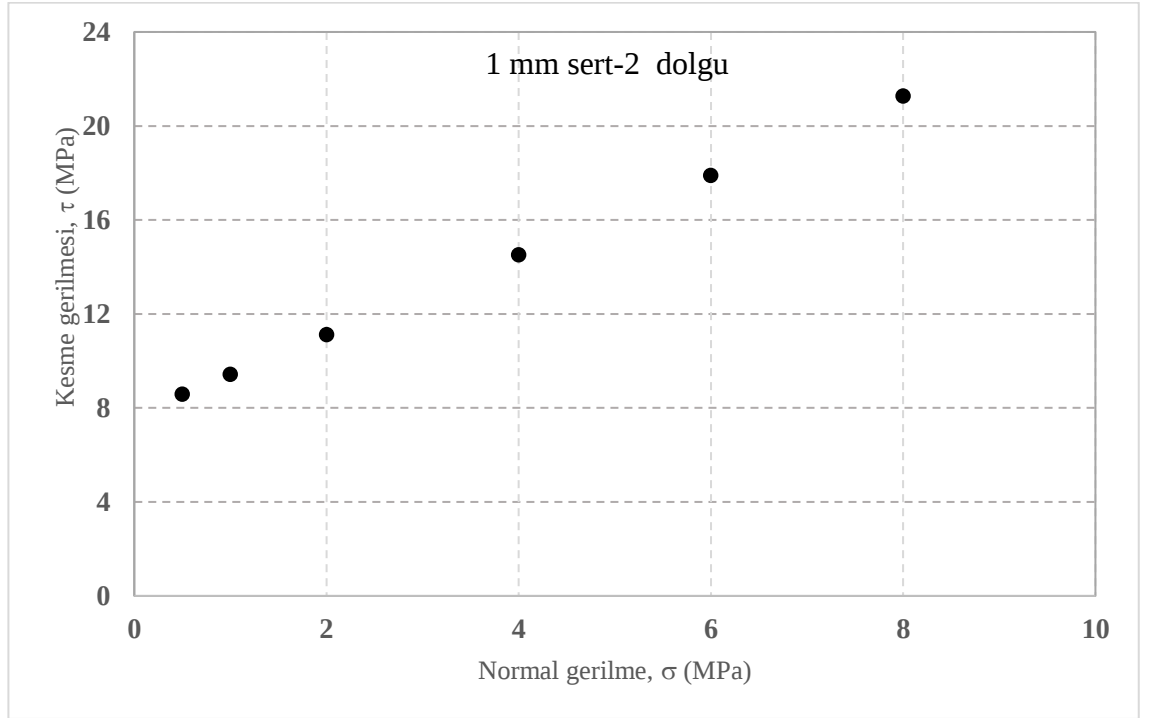
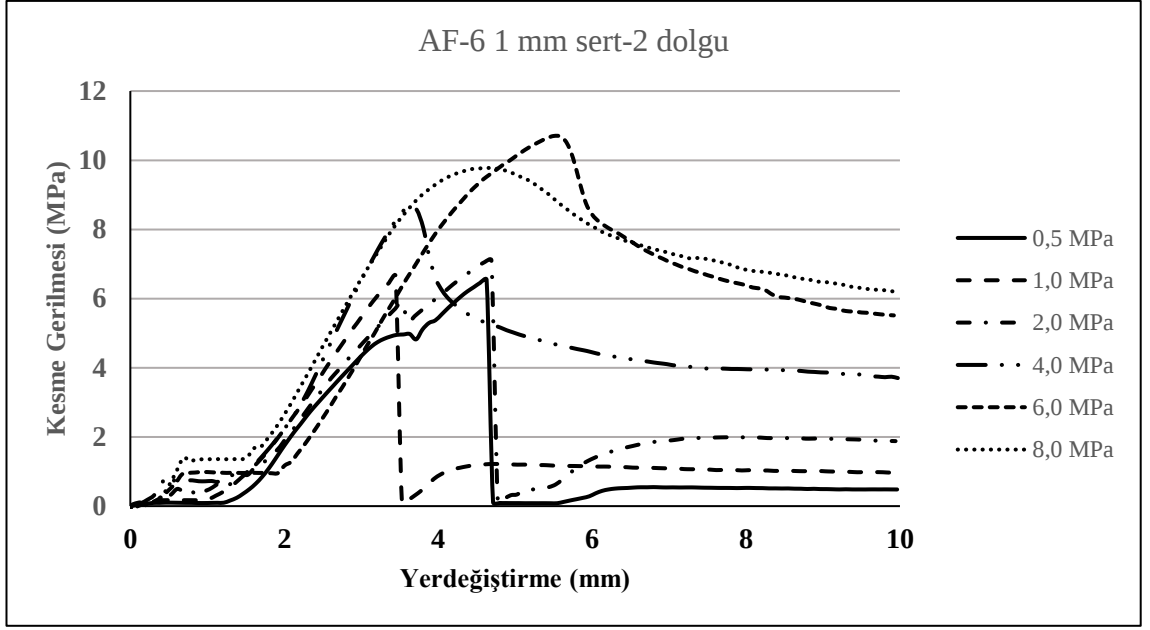


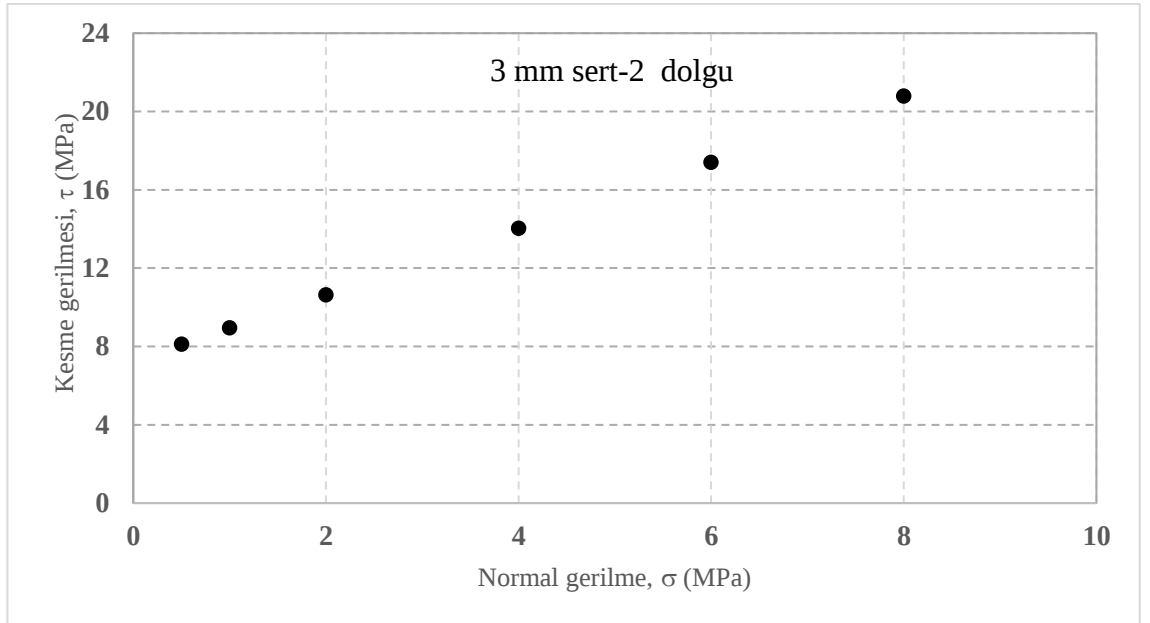
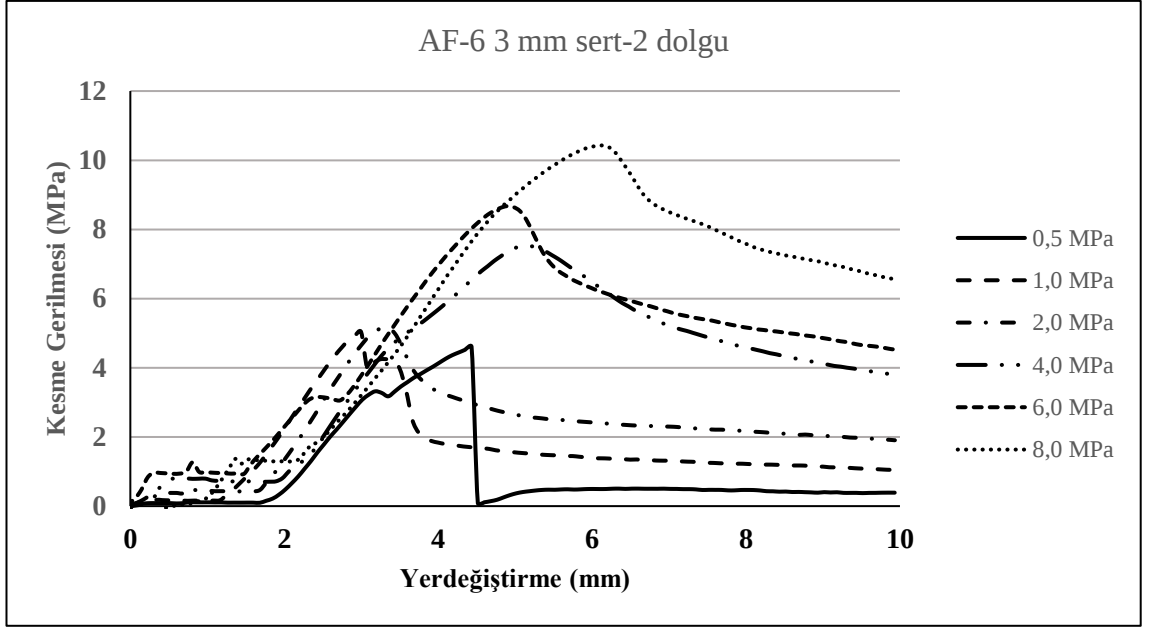












ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Aylin FİDAN ÜZGÜN

Doğum yeri/Tarihi: Edirne/1988

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Kırklareli Atatürk Lisesi (YDA)(2006)

Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2012)

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı (2017)

Doktora: Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı (2025)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Yenimahalle Belediye Başkanlığı 2012-halen

Yayınlar

Kayabalı, K., Pınarcı, E., Habibzadeh, F., Beyhan, M., Üzgün, A.F., Yakut, M. 2024. Süreksizliklerde ikinci derece düzensizlik açılarının karşılaştırmalı değerlendirilmesi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 48(1), 43-58. <https://doi.org/10.24232/jmd.1479534>.

Ulusal Kongre Sunum

Fidan Üzgün, A., Kayabalı, K., 2024. Süreksizliklerde Dolgunun Kesme Dayanımına Etkisinin Yeni Bir Yaklaşımla Değerlendirilmesi. 76. Türkiye jeoloji kurultayı (76. TJK) 15-19 Nisan, MTA Genel Müdürlüğü, Kültür Sitesi. Bildiri Özetleri Kitabı, sf 433. Ankara

Fidan Üzgün, A., Tuncay, E., 2019. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Farklı Boy/Çap Oranlarındaki Örneklerden Belirlenmesi Yaklaşımının Değerlendirilmesi. MÜHJEO2019, Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, H. Kumsar, S.B. Çelik, T. Çan, M. Mutlutürk (eds), Bildiriler Kitabı, 3-5 Ekim, Denizli, 39-46.