

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

DOLGULU SÜREKSİZLİKLERİN DİNAMİK KESME DAYANIMININ
NİCEL ANALİZİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM

Mehmet YAKUT

ANKARA
2025

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

DOLGULU SÜREKSİZLİKLERİN DİNAMİK KESME DAYANIMININ NİCEL ANALİZİ

Mehmet YAKUT

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kamil KAYABALI

Kaya kütlelerinin farklı yükler altındaki davranışları, süreksizlikler ve dolgularının özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmekte ve mühendislik yapılarının güvenliğinin değerlendirilmesini karmaşıktırmaktadır. Mevcut literatür, dolgulu süreksizliklerin dinamik yükler altındaki mekanik davranışı ve dayanımı üzerine önemli boşluklar barındırmaktadır. Bu çalışmada, geniş bir dayanım aralığındaki kayaçlardan oluşturulan yapay süreksizliklere farklı dolgu malzemeleri uygulanmış ve gerçek bir deprem kaydından türetilen dinamik yük altında doğrudan kesme deneyine tabi tutularak kesme davranışları ve dayanımları incelenmiş; dinamik kesme dayanım değerleri statik yük koşullarındaki değerlerle karşılaştırılmıştır. Veriler, dinamik kesme dayanımı ile süreksizlik ve dolgu parametreleri arasındaki ilişkilerin nicel olarak tanımlanması için regresyon analizlerinde kullanılmış ve 0,866'ya varan belirlenme katsayılarıyla ampirik eşitlikler geliştirilmiştir. Dolgu türüne bağlı olarak süreksizlik ve kesme davranışını belirleyen parametreler değişmiş; yumuşak dolgularda t/a (dolgu kalınlığının pürüzlülük genliğine oranı), sert dolgularda dolgu-yüzey aderansı öne çıkmıştır. Yumuşak dolgularda kalınlık artışı dinamik kesme dayanımını bir noktaya kadar azaltıp sonrasında etkisizleşirken, sert dolgularda belirleyici olmamıştır. Yumuşak dolgularda dinamik kesme dayanımı kaya dayanımıyla paralel seyrederken, sert dolgularda bu ilişki kaybolmuş ve kaya dayanımını aşan yüksek dolgu dayanımlarında yenilmenin kayada gelişebilmesine yol açmıştır. Yumuşak dolgularda; düşük normal gerilmelerde dinamik kesme dayanımları statik değerleri aşarken, yüksek gerilmelerde statik dayanımlar daha yüksek çıkmıştır. Sert dolgularda ise dinamik kesme dayanımları genellikle daha yüksektir. Bu çalışma, dolgulu yapay süreksizliklerin dinamik kesme davranışlarını sistematik olarak ortaya koymuş, statik koşullara ve dolgu malzemelerine bağlı olarak farklılıklar sergilendiğini göstermiştir. Regresyon modelleri, dinamik kesme dayanımını deney koşulları ile kaya, süreksizlik ve dolgu özellikleri üzerinden nicel olarak ilişkilendirmiştir. Doğal süreksizlikler, farklı dolgu türleri ve sayısal modellemele kullanılacak ileri çalışmalarla bulguların saha ölçeğine aktarılabilirliği artırılabilir.

Kasım 2025, 184 sayfa

Anahtar Kelimeler: Dolgulu süreksizlik, dinamik kesme dayanımı, kaya mekaniği, yumuşak dolgu, sert dolgu, pürüzlülük, dolgu kalınlığı

ABSTRACT

PhD Thesis

QUANTITATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC SHEAR STRENGTH OF FILLED DISCONTINUITIES

Mehmet YAKUT

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

Supervisor: Prof. Dr. Kamil KAYABALI

Rock mass behavior under varying loads is strongly influenced by discontinuities and their infill materials, complicating stability assessments of engineering structures. Current literature exhibits notable gaps regarding the dynamic mechanical behavior and strength of filled discontinuities. In this study, artificial discontinuities were produced in rocks using a specialized press and filled with various materials. The specimens were subjected to direct shear testing under dynamic loading derived from a real earthquake record, and resulting dynamic shear strengths were compared with static values. Regression analysis was performed to quantify relationships between dynamic shear strength and discontinuity/infill parameters, yielding empirical equations with determination coefficients up to 0.866. Parameters controlling shear behavior varied according to infill type: the t/a (fill thickness to roughness amplitude ratio) was critical for soft infills, whereas adhesion dominated in hard infills. In soft infills, increasing thickness reduced dynamic shear strength to a critical threshold, beyond which its effect plateaued; in hard infills, thickness had negligible influence. Dynamic shear strength correlated with rock compressive strength only in soft infills, while in hard infills, high-strength infills exceeding rock compressive strength induced failure within the rock. At low normal stresses, dynamic shear strengths in soft infills exceeded static values but were lower at high stresses; in hard infills, dynamic shear strengths were generally higher. This study systematically elucidates the dynamic shear behavior of filled discontinuities, linking it to experimental conditions, rock properties, discontinuity geometry, and infill characteristics. These findings can be extended to field-scale applications through testing of natural discontinuities, employing various infill types, and implementing numerical modeling approaches.

November 2025, 184 pages

Key Words: Filled discontinuity, dynamic shear strength, rock mechanics, soft infill, hard infill, roughness, infill thickness

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle her zaman yanımda olan, akademik yolculuğumda bana ışık tutan değerli danışmanım Prof. Dr. Kamil KAYABALI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında gösterdiği sabır, cesaret verici yaklaşımı ve bilimsel bakış açısı için kendisine minnettarım.

Çalışmanın her aşamasında değerli görüş ve eleştirileriyle bana yol gösteren tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Ergün TUNCAY (Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü) ve Prof. Dr. Alaaddin VURAL'a (Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü) şükran borçluyum. Çalışmanın ilk dönemlerinde komitede yer alarak sağladığı katkılar için Dr. Koray ULAMIŞ'a (Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü) da teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca bilgi birikimi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Turgay BEYAZ'a (Pamukkale Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü); yardımları ve güzel fikirleriyle çalışmayı kolaylaştıran değerli meslektaşlarım Dr. Aylin FİDAN ÜZGÜN (Yenimahalle Belediye Başkanlığı) ve eşi Çağdaş ÜZGÜN'e; doktora sürecimizde karşılaştığımız zorluklar karşısında, dayanışmamızla süreci daha katlanılabilir kıldığımız kıymetli dostum Dr. Muhammet BEYHAN'a (Öksüt Mining/Centerra Gold Inc.) içtenlikle teşekkür ederim.

Bu çalışmada kullanılan dinamik kesme deney cihazını Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne bağışlayan Eren Holding Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Ahmet EREN'e ve bazı deneysel çalışmaların yürütülmesinde laboratuvar imkânlarını kullanmama olanak sağlayan Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı'na da şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini yanımda hissettiğim, özverileri ve sevgileriyle beni her koşulda yüreklendiren sevgili aileme, kelimelerle ifade edemeyeceğim bir minnet ve şükran borçluyum.

Mehmet YAKUT
Ankara, Kasım 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	9
2.1 Giriş	9
2.2 Dolgusuz Süreksizliklerin Statik Yüklerde Kesme Dayanımı	9
2.3 Dolgulu Süreksizliklerin Statik Yüklerde Kesme Dayanımı	15
2.4 Dolgusuz Süreksizliklerin Dinamik Yüklerde Kesme Dayanımı	19
2.5 Süreksizliklerin Kesme Dayanımı İçin Önerilen Modeller	24
2.5.1 Mohr-Coulomb modeli	24
2.5.2 Patton modeli	25
2.5.3 Barton modeli	26
3. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER	29
3.1 Çalışmada Kullanılan Doğal Kayalar	29
3.2 Çalışmada Kullanılan Yapay Dolgu Malzemeleri	30
3.2.1 Yumuşak dolgu malzemesi (kil) seçimi	31
3.2.2 Sert dolgu malzemesi-1 (porselen alçısı) seçimi	31
3.2.3 Sert dolgu malzemesi-2 (reçine ve tuz karışımı) seçimi	33
3.3 Mineralojik-Petrografik Özelliklerin Belirlenmesi	33
3.4 Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Belirlenmesi	34
3.5 Dolgu Malzemelerinin Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açılarının Belirlenmesi	35
3.6 Yapay Süreksizlik Yüzeylerinin Oluşturulması	36
3.7 Yapay Süreksizlik Yüzey Profillerinin Taranması ve Süreksizlik Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi	37
3.7.1 Yapay süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının belirlenmesi	39
3.7.2 Yapay süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük genliklerinin belirlenmesi	39
3.8 Dolgulu Yapay Süreksizlik Numunelerinin Hazırlanması	40

3.8.1 Dolgu malzemesinin yapay süreksizlik yüzeylerine uygulanması	41
3.8.2 Dolgu kalınlığının ayarlanması.....	43
3.9 Dolgulu Süreksizliklerde Doğrudan Dinamik Kesme Deneyleri	48
3.9.1 Dolgulu süreksizliklerde doğrudan dinamik kesme deney cihazı.....	48
3.9.2 Doğrudan dinamik kesme deney numune kalıpları.....	50
3.9.3 Doğrudan dinamik kesme deney yöntemi ve kullanılan deprem kaydı	52
3.10 İstatistiksel Yöntemler	55
4. DeneySEL BULGULAR.....	56
4.1 Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri	56
4.2 Kayaların ve Dolgu Malzemelerinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımları	57
4.3 Dolgu Malzemelerinin Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açıları	60
4.4 Yapay Süreksizliklerin Pürüzlülük Açıları	62
4.5 Yapay Süreksizliklerin Pürüzlülük Genlikleri	62
4.6 Dolgu Malzemelerinin Yük Altında Dolgu Kalınlıkları ve t/a Oranları	63
4.7 Dinamik Doğrudan Kesme Dayanımları	68
4.8 Dolgulu Süreksizliklerin Statik ve Dinamik Kesme Dayanımlarının Karşılaştırılması	78
4.9 İstatistiksel Analizler ve Süreksizliklerin Dinamik Kesme Dayanımının Belirlenmesine Yönelik Ampirik Bir İlişkinin Geliştirilmesi	88
4.9.1 Tüm veri seti ile çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri.....	88
4.9.2 Yumuşak dolguda çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri	104
4.9.3 Sert dolgularda çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri.....	108
5. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	112
KAYNAKLAR	120
EKLER	126
EK 1 Kesme Gerilmesi-Yer Değiştirme ve Kesme Gerilmesi-Normal Gerilme Grafikleri	127
EK 2 Doğrudan Dinamik Kesme Deney Numunelerinin Deneyler Öncesi ve Sonrası Fotoğrafları	167
ÖZGEÇMİŞ.....	184

SİMGELER DİZİNİ

σ_n	Normal gerilme
σ_t	Çekme gerilmesi
c	Kohezyon
ϕ	Temel sürtünme açısı
ϕ_r	Artık (kalıntı) sürtünme açısı
τ	Doruk süreksizlik kesme dayanımı
i	Pürüzlülük açısı
a	Genlik
t	Dolgu kalınlığı
t/a	Dolgu kalınlığının süreksizlik pürüzlülük genliğine oranı

Kısaltmalar

ASTM	American Society For Testing And Materials
cm	Santimetre
CNL	Sabit normal yük (Constant normal load)
CNS	Sabit normal rijitlik (Constant normal stiffness)
dk	Dakika
GSI	Jeolojik dayanım indeksi (Geological strength index)
ICOLD	International Commission on Large Dams
ISRM	International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering
JCS	Süreksizlik yüzeyinin basınç dayanımı (Joint compressive strength)
JRC	Süreksizlik pürüzlülük katsayısı (Joint roughness coefficient)
kN	Kilonewton
kPa	Kilopaskal
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
Q	Kaya kütlesi kalite indeksi (Rock Mass Quality)
RMR	Kaya kütle indeksi (Rock mass rating)
SHPB	Ayrık hopkinson basınç barı (Split hopkinson pressure bar)
s	Saniye
UCS	Tek eksenli sıkışma dayanımı (Uniaxial compressive strength)
USGS	United States Geological Survey

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Malpasset Barajı kalıntıları ve beton kemer gövdenin taban kısmından yukarı doğru daralarak kapanan yarık açıklık (Fotoğraflar: Yakut, 2019)	1
Şekil 1.2 Tepehan heyelan bölgesinin görünümü (Sümer, 2024)	2
Şekil 2.1 Süreksizlik pürüzlülüğünde ölçek etkisi (ISRM, 1978'den değiştirilerek).....	25
Şekil 2.2 Patton tarafından önerilen çift eğrili yenilme modeli (Patton, 1966)	26
Şekil 2.3 Süreksizlik pürüzlülük profilleri ve karşılık genel JRC değer aralıkları (Barton ve Choubey, 1977'den değiştirilerek).....	27
Şekil 3.1 15 cm kenar uzunluklarında kestirilerek temin edilen küp blok kaya numuneleri	30
Şekil 3.2 Sert dolgu malzemelerinden silindirik numune üretimi için kullanılan kalıplar (solda), kalıplardan çıkarılan mavi Hera/Moldano ve kahverengi Hera/Moldastone CN porselen alçısı tek eksenli sıkışma dayanımı numuneleri	32
Şekil 3.3 Sert dolgu karışımlarının kalıplardan çıkarılmasında kullanılan hidrolik pres	32
Şekil 3.4 Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde kullanılan hidrolik pres	34
Şekil 3.5 Yumuşak dolgu malzemesinde kesme kutusu deneyi için kullanılan cihaz	35
Şekil 3.6 Sert dolgu malzemelerinde üç eksenli basınç dayanımı için deney düzeneği	35
Şekil 3.7 Yapay süreksizliklerin hazırlanmasında kullanılan hidrolik pres ve balta ağzına benzer başlık.....	36
Şekil 3.8 Uygun şekilde yarılmayan ve deneylerde kullanılmayacak numune (solda), uygun şekilde ayrılan numune (sağda) örnekleri	37
Şekil 3.9 Yapay süreksizliklerin yüzey profillerinin taranmasında kullanılan elektromekanik profilometre cihazı	37
Şekil 3.10 Yüzey profillerinin taranmasında takip edilen profil hatları (Üzgün, 2025)	39
Şekil 3.11 Bilgisayar ortamına aktarılmış süreksizlik yüzey profili ve pürüzlülük açısı ölçümleri (Üzgün, 2025)	39
Şekil 3.12 ISRM tarafından önerilen ortalama pürüzlülük genliği hesabı (ISRM, 1981).....	40
Şekil 3.13 Bu çalışmada kullanılan ortalama süreksizlik pürüzlülük genliği hesabı (Üzgün, 2025)	40
Şekil 3.14 Normal gerilme altında, plastik limit su içeriğindeki yumuşak dolgunun süreksizlik yüzeyinden taşması	41
Şekil 3.15 Spreyleme ile hazırlanan dolgulu süreksizlik numunesi ve kesme kutusu deneyi sonrası görünümü (Solda: iki plaka arasına sandviçlenmiş kil, sağda: taş plakaların birbirinden ayrılmış hali. Taş plaka boyutları 6x6x1 cm'dir).....	42
Şekil 3.16 Sert dolgu malzemelerinin uygulanması ve tamir bandıyla sızmaların önlenmesi.....	43
Şekil 3.17 Kesme kutusu denemelerinde çelik bilyelerde oluşan deformasyonların görünümü..	44
Şekil 3.18 Testere ağzı dişli yayma tarakları (solda), 4 mm dişli tarakla kalınlığı ayarlanan ve spreylene numune (sağda).....	45
Şekil 3.19 4 mm dişli tarakla kalınlığı ayarlanan ve spreylene numunenin yük uygulandıktan sonraki görünümü	45
Şekil 3.20 Yeniden tasarlanan taraklar (solda), kalınlık azalmasının tespitinde kullanılan elastisite modülü deney cihazı ve aparatları (sağda).....	46

Şekil 3.21 Dolgunun uygulandığı silindirik beton numunesi ve aşındırılmış yüzeyleri (solda), 3 mm kalınlıkta ve büzülme limiti su içeriğinde spreylene dolguya 2 MPa gerilme uygulandıktan sonra dolgunun görünümü (sağda).....	46
Şekil 3.22 Beton silindirik bloklar arasına uygulanan yumuşak dolgu ve LVDT cihazlarının yerleşimi.....	47
Şekil 3.23 Sert dolgu malzemesi-1 için yayma tarakları ile kalınlık ayarlaması (sol üstte), kumpas ile kalınlık ölçümleri (sağ üstte), 1 mm kalınlıkta hazırlanan 1 set numune (altta)...	48
Şekil 3.24 Doğrudan dinamik kesme deney cihazının genel görünümü	49
Şekil 3.25 Alçı vb. bir bağlayıcı ile sabitlenen eski numune kalıpları (solda) (Habibzadeh, 2020), ayar vidaları ve çelik destekler yardımıyla istenilen boyutta numune sabitleyebilen yeni numune kalıpları (sağda).....	50
Şekil 3.26 Yeni numune kalıbının şematik gösterimi (solda), kaya üst bloğunun yerleştirilmesi ve sabitleme aparatlarının dizilimi (sağda)	51
Şekil 3.27 Deneye hazır hâldeki numune kalıbının deney cihazı numune hücreğine yerleştirilmesi	52
Şekil 3.28 Saguenay deprem kaydına ait ivme–yer değiştirme (solda) ve zaman–yer değiştirme (sağda) grafikleri (Habibzadeh, 2020)	54
Şekil 4.1 Dolgu malzemesi dayanımının kaya dayanımına eşit veya büyük olduğu dolgulu süreksizliklerde, kesme yenilmesinin kayada gerçekleşmesi (solda) ve kayanın kısmen veya tamamen parçalanması (sağda).....	59
Şekil 4.2 Dolgu malzemesi dayanımının kaya dayanımını büyük oranda geçtiği dolgulu süreksizliklerde kesme yenilmesinin kayanın kendisinde gerçekleşmesinin görünümü	60
Şekil 4.3 Diyabaz kayasında polyester reçine ve tuz karışımı dolgu malzemesi ile gerçekleştirilen kesme deneyleri sonrası görünümlere bir örnek	60
Şekil 4.4 Yumuşak dolgu malzemesi (kil) üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deneylerinden elde edilen kesme gerilmesi-normal gerilme grafiği.....	61
Şekil 4.5 Sert dolgu malzemelerinde üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen τ ve σ gerilme grafikleri	61
Şekil 4.6 Yumuşak dolgu kalınlığında normal gerilmeye bağlı gelişen kısalma miktarları	66
Şekil 4.7 Normal gerilme uygulandıktan sonra yumuşak dolguların nihai kalınlıkları	66
Şekil 4.8 MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerine ait kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi grafikleri.....	69
Şekil 4.9 MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerine ait kesme gerilmesi-normal gerilme grafiği	69
Şekil 4.10 MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri.....	70
Şekil 4.11 Dinamik kesme deneylerinde kayadan büyük parça kopması (a), kayanın aşırı şekilde parçalanarak hasar görmesi (b) ve kayadan parça kopması ancak dolgulu kısmın yenilmemesi (c) örnekleri	72
Şekil 4.12 Yumuşak dolgu malzemesi ile farklı kayalarda gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri.....	73
Şekil 4.13 Sert dolgu malzemesi-1 ile farklı kayalarda gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri.....	74

Şekil 4.14 Sert dolgu malzemesi-2 ile farklı kayalarda gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri.....	75
Şekil 4.15 Yumuşak dolgu malzemesi ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme çiftlerinin bir arada görünümü.....	75
Şekil 4.16 Sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme çiftlerinin bir arada görünümü	76
Şekil 4.17 Sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme çiftlerinin bir arada görünümü	77
Şekil 4.18 Yumuşak dolgu malzemesinde statik ve dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri karşılaştırması (içi boş simgeler statik, dolgulu simgeler dinamik yüklerdir)	79
Şekil 4.19 Sert dolgu malzemesi-1’de statik ve dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri karşılaştırması (içi boş simgeler statik, dolgulu simgeler dinamik yüklerdir)	80
Şekil 4.20 Sert dolgu malzemesi-2’de statik ve dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri karşılaştırması (içi boş simgeler statik, dolgulu simgeler dinamik yüklerdir)	81
Şekil 4.21 Doğrusallık testi için oluşturulan grafik örneği	91
Şekil 4.22 Çoklu doğrusal regresyon analizinde tahminlere ait hataların histogram grafiği	95
Şekil 4.23 Regresyon standartlaştırılmış artıklarının Normal P-P grafiği	95
Şekil 4.24 Regresyon modeline ait standartlaştırılmış artıkların tahmin edilen değerlere karşı dağılımı	96
Şekil 4.25 Bağımlı değerler ile regresyon düzeltimi (PRESS) tahmin değerlerinin karşılaştırma grafiği.....	97
Şekil 4.26 Çoklu doğrusal regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği	103
Şekil 4.27 Güç modeli çoklu doğrusal olmayan regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği	103
Şekil 4.28 Yumuşak dolguda çoklu doğrusal regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği	106
Şekil 4.29 Yumuşak dolguda çoklu doğrusal olmayan regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği	107
Şekil 4.30 Sert dolgularda çoklu doğrusal regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği	109
Şekil 4.31 Sert dolgularda çoklu doğrusal olmayan regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği	111

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılan kaya numuneleri ve alındıkları yerler	30
Çizelge 3.2 Yumuşak dolgu malzemesini temsilen kullanılan kilin özellikleri ve temin edildiği koordinat	31
Çizelge 4.1 Kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri (Beyhan, 2024).....	56
Çizelge 4.2 Kayaların tek eksenli sıkışma dayanımları (Beyhan, 2024)	57
Çizelge 4.3 Dolgu malzeme karışımlarının tek eksenli sıkışma dayanımları	58
Çizelge 4.4 Dolgu malzemelerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri.....	62
Çizelge 4.5 Oluşturulan yapay süreksizliklere ait ortalama pürüzlülük açısı değerleri	62
Çizelge 4.6 Oluşturulan yapay süreksizliklere ait ortalama pürüzlülük genliği değerleri	63
Çizelge 4.7 Yumuşak dolgu malzemesi kalınlıklarının normal gerilmeler altındaki değişimi	65
Çizelge 4.8 Uygulanan dolgu kalınlıklarının, kayaların pürüzlülük genliklerine oranı (t/a)	67
Çizelge 4.9 Tez kapsamında dinamik kesme deneylerinin uygulandığı kaya türü ve dolgu türü eşleşmeleri ile uygulanan dolgu kalınlıkları	68
Çizelge 4.10 Dinamik kesme deneylerinde deney tekrarı yapılan numuneler ve gerekçeleri.....	71
Çizelge 4.11 Dinamik kesme dayanımlarının, statik kesme dayanımları ile değişimi.....	84
Çizelge 4.12 Normallik testi sonuçları.....	89
Çizelge 4.13 Değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler ile çarpıklık ve basıklık katsayıları.....	90
Çizelge 4.14 Tüm veriler dâhil Pearson korelasyon analizlerine ait sonuçlar	92
Çizelge 4.15 Tüm veriler dâhil çoklu doğrusal regresyon model özeti	93
Çizelge 4.16 Tüm veriler dâhil çoklu doğrusal regresyon ANOVA tablosu	94
Çizelge 4.17 Tüm veriler dâhil çoklu doğrusal regresyon katsayılar tablosu	94
Çizelge 4.18 Tüm veriler dâhil Spearman korelasyon analizlerine ait sonuçlar	98
Çizelge 4.19 Doğrusal olmayan regresyonlarda kullanılan model türleri ve denklemleri.....	99
Çizelge 4.20 Doğrusal olmayan regresyon analizinde parametre katsayıları arasındaki korelasyonlar	100
Çizelge 4.21 Doğrusal olmayan regresyon analizine ait ANOVA tablosu	101
Çizelge 4.22 Güç modeli doğrusal olmayan regresyon parametre tahminleri ve güven aralıkları.....	101

1. GİRİŞ

Kaya malzemesi (kırıksız kaya) gözle görülebilir herhangi bir çatlak veya ayrıklık içermeyen, sürekli hâldeki bireysel kaya birimi olarak nitelendirilmektedir. İhmal edilebilecek kadar küçük miktarlarda çekme dayanımına sahip, farklı yönlerde gelişebilen süreksizlikler ve bunların ayırdığı sağlam kaya malzemesinin bir arada bulunduğu sistemler ise kaya kütlesi olarak tanımlanmaktadır (Ulusay, 2001).

Kaya kütleleri, çok ender durumlarda homojen ve izotrop yapıda olup süreklilik gösterebilseler de; genellikle fay, eklem, tabakalanma düzlemi, foliasyon gibi jeolojik anlamda zayıflık düzlemleri tarafından kesintiye uğramış hâlde bulunurlar (Hoek vd., 2000). Bu zayıflıkların varlığı, kaya kütlelerinin farklı davranış ve özellikler sergilemesine neden olmaktadır. Söz konusu değişkenliklerin mühendislik çalışmalarının tasarımı, inşa güvenliği ve kullanım ömrü üzerinde önemli etkiler yarattığı ise hem literatürdeki araştırmalar hem de mevcut ya da inşa hâlinde olan yapılarda karşılaşılan sorunlar aracılığıyla ortaya çıkmaktadır.

Fransa'nın güneydoğusunda, beton kemer tipinde inşa edilen Malpasset Barajı, 2 Aralık 1959 tarihinde yıkılmış ve çok sayıda can kaybına neden olmuştur (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Malpasset Barajı kalıntıları ve beton kemer gövdenin taban kısmından yukarı doğru daralarak kapanan yarık açıklık (Fotoğraflar: Yakut, 2019)

Sol abatmanda yer alan kaya kütlesinin, varlığı tespit edilememiş bir fayın etkisiyle hareket etmiş olma ihtimali, felaketin en olası nedeni olarak görülmektedir. Temelin zaten yüksek olan deforme olabilirliğinin, bu kayma düzleminin varlığıyla yerel olarak arttığı düşünülmektedir (Thomas, 1979). Membra yüzeyinde bulunan süreksizlik düzlemleri kemerin teğetine neredeyse paralel olduğundan, baraj kuvvetleri temelde yayılmak yerine yoğunlaşarak yüksek basınçlar üretmiştir (ICOLD, 1974). Ayrıca, temel alanında bulunan oldukça eklemlili şist türü kayaçların geçirgenlikleri baraj yükleri altında düşmüş ve gelişen hidrostatik kuvvetler baraj stabilitesine karşı çalışmıştır (Thomas, 1979).

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sırasında açığa çıkan yüksek sismik enerji, Hatay ilinin Altınözü ilçesine bağlı Tepehan köyünde deprem öncesinde de aktif olduğu bilinen bir alanın yeniden harekete geçmesine neden olmuş ve bunun sonucunda büyük ölçekli bir heyelan meydana gelmiştir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Tepehan heyelan bölgesinin görünümü (Sümer, 2024)

Kumtaşı, killi kireçtaşı, kilitaşı ve marnlardan oluşan 12000 metrekairelik bir alanda meydana gelen heyelan, 180000 metreküpten fazla malzemenin yer değiştirmesine neden olmuştur (Dölek vd., 2023). Tepehan heyelanı, ortalama topoğrafik eğimi yaklaşık %19 ($\approx 10^\circ$) olan ve normal şartlarda bu büyüklükteki bir kütle hareketinin beklenmeyeceği, nispeten düşük eğimli bir yamaçta gelişmiştir. Kumsar vd. (2025), kaya kütlelerinin önceden var olan fay ve kırık düzlemleriyle zayıflatıldığını; deprem kaynaklı sismik titreşimlerin ise bu süreksizlikler boyunca kesme direncini azaltarak yamaç duraylılığını bozduğunu ve heyelanın oluşumunu tetiklediğini belirtmiştir.

Mühendislik tarihinde yaşanan bu olaylar, kökeni ne olursa olsun süreksizliklerin kaya kütlelerinin davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Süreksizliklerin azalttığı kesme mukavemetleri ve belirli yönlerde etki edecek gerilmeler sonucunda, bütünlüklü bir kaya kütlelerinin dahi parçalı bir blok sistemine dönüşebileceği anlaşılmıştır. Bu durum, kaya ortamlarının fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin değerlendirilmesinde, kaya malzemesi ile süreksizliklerin bütüncül bir sistem olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bütüncül bir değerlendirme yapabilmek için kaya malzemesine ait sıkışma ve çekme dayanımı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı, elastisite modülü, yoğunluk, gözeneklilik, mineralojik ve dokusal yapı vb. parametrelerin yanı sıra kaya kütlelerinin içerdii süreksizliklerin türü, yönelim durumu, set sayısı, aralığı, açıklığı, devamlılığı, pürüzlülük ve dalgalılığı, bozunma durumu, dolgu malzemesinin varlığı gibi parametrelerin de değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Kaya kütlelerinin içermiş olduğu süreksizliklerin kesme dayanımları için çeşitli yenilme ölçütleri geliştirilmiştir. Bu kapsamda en eski ölçütlerden biri Patton (1966) tarafından testere ile kesilen yüzeyler üzerinde gerçekteştirilen kesme deneylerine bağlı temel sürtünme açısı (ϕ_b) ve süreksizlik pürüzlülük açısı (i) parametreleri ile geliştirilen çift eğrili yenilme modelidir. Patton modeli çok basit olmasıyla ön plana çıksa da; kesme dayanımındaki değişimlerin normal gerilmenin artmasıyla birlikte kademeli bir hal aldığı gerçegini yansıtmamaktadır. Barton (1973, 1976) bu gerçekten yola çıkarak doğal kaya süreksizliklerinin davranışı üzerinde çalışmış ve yöntemi geliştirmiştir. Pürüzlü süreksizlik yüzeylerinde doruk kesme dayanımının bulunmasında en yaygın kullanılan ölçütlerden biri de Barton ve Choubey (1977) tarafından çeşitli bozuşmuş kaya

eklemlerinden oluşan 130 numune ile yapılan doğrudan kesme deneylerine bağlı olarak önerilmiştir. Bu ölçüt süreksizlik eklem pürüzlülük katsayısı (JRC), süreksizlik duvarı sıkışma dayanımı (JCS) ve kalıntı sürtünme açısı (ϕ_r) bileşenlerine bağlı olarak geliştirilmiştir. Bu ve sonrasında devam eden çalışmalar kaya süreksizlik dayanımı ve deforme edilebilirliği için kullanılmakta olan Barton ve Bandis, (1990) ölçütüne temel oluşturmıştır.

Günümüzde kaya kütlelerinde yaygın olarak kullanılan değerlendirme yöntemleri çeşitli kaya kütle sınıflama sistemlerine (GSI, Geological Strength Index; RMR, Rock Mass Rating; Q, Rock Mass Quality vb.) dayanmaktadır. Bu yöntemler hızlı ve ekonomik bir çözüm sunmasına rağmen, karmaşık davranış özelliklerini tek bir derecelendirmede birleştirerek gerçek davranışın anlaşılmasında kayba yol açabilmektedir.

Kaya kütlelerinin fay, kalın dolgulu, damarlı veya ayrılmış bantlı eklem, tabakalanma veya ara katman vb. içeren belirli ara yüzlerinin ya da beton-kaya kontaklarının değerlendirilmesine yönelik yerinde arazi deney yöntemleri ve tekniklerinin geliştirilmesi, kaya kütlelerinin genel davranışını laboratuvar ölçeğindeki numunelerle temsil etmenin güçlüğünden ve çoğu durumda yeterli temsil kabiliyetinin sağlanamamasından kaynaklanmıştır. Süreksizliklerin kesme dayanımı için arazide yapılan yerinde doğrudan kesme deneyleri araştırmacılar tarafından kullanılmış olsa da (Rocha 1964; Laginha ve Guerrero 1968; Wallace vd. 1969; Gravel vd. 2015); deneylerin süresi, zorluğu ve yüksek maliyeti yalnızca özel durumlarda uygulanmalarına olanak tanımaktadır.

Geçmiş dönemlerde, kaya süreksizliklerinin kesme dayanımları üzerine farklı deneysel yöntemlerle ve çeşitli koşullar altında yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. En basit yöntemlerden biri geniş yüzeyler üzerinde küçük kaydırıcı aparatların kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir ve genellikle düşük normal yüklerde uygulanmıştır (Byerlee 1967; Horn ve Deere 1962). Daha sonra Jaeger ve Cook (1970) aynı yöntemi değiştirerek daha yüksek normal yüklerde çalışmıştır. Sondaj karotlarından elde edilen süreksizlik içeren veya testere ile uygun açıda kesilerek süreksizlik oluşturulan numuneler üzerinde konvansiyonel üç eksenli deney aparatı kullanılarak yapılan deneyler de oldukça

yaygındır (Indraratna vd. 2008; Indraratna vd. 2014; Indraratna ve Jayanathan 2005; Mokhtarian vd. 2020; Sinha ve Singh 2000). Zemin mekaniğinde kullanılan geleneksel kesme kutusu veya bunların geliştirilmiş örnekleri de süreksizlikler üzerinde yapılan çalışmalarda sıkça kullanılmıştır (Krsmanovic 1967; Locher 1968).

Yakın dönemde ise farklı araştırmacılar ve üreticiler tarafından geliştirilen, hassas ölçüm sistemleri ve yüksek yükleme kapasitelerine sahip doğrudan kesme deney cihazları (Aydan vd. 2016; Barla vd. 2010; Konietzky vd. 2012; Qi vd. 2020) ile birlikte kaya süreksizliklerin kesme dayanımlarının laboratuvar ortamında belirlenmesi yaygınlaşmıştır. Bu cihazlar, özellikle dolgusuz doğal ya da yapay süreksizliklerin doruk (pik) ve artık (rezidüel) kesme dayanımlarını, süreksizlik düzlemine uygulanan sabit normal yük (CNL) veya sabit normal rijitlik (CNS) koşulları altında değerlendirildiği çok sayıda çalışmaya olanak sağlamıştır (Barbero vd. 1996; Barla vd. 1990; Dang vd. 2016; Hencher ve Richards 2014; Indraratna vd. 2005; Jafari vd. 2003; Jahanian ve Sadaghiani 2014; Ladanyi ve Archambault 1977; Lee vd. 2001; Li vd. 2006; Meng vd. 2018; Mirzaghorbanali vd. 2013; Niktabar vd. 2017; Sanei vd. 2014; Singh ve Basu 2017; Tang vd. 2020; Wang vd. 2020; Wu vd. 2020).

Süreksizliklerin çeşitli dolgu malzemeleri ile dolu olması durumunda, kesme dayanımı üzerinde dolgusuz duruma göre daha fazla sayıda parametre etkili olmakta ve kesme davranışı belirgin biçimde karmaşılaşmaktadır. Dolgunun temel etkisi, kalınlığına bağlı olarak süreksizliğin karşılıklı yüzeylerini ayırmak ve kaya-kaya temasını kesmek suretiyle ortaya çıkmaktadır (Papaliangas vd., 1990). Dolgu malzemelerinin varlığı süreksizlikler üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği gibi, bazı durumlarda çimento benzeri bir davranış göstererek iyileştirici etki de oluşturabilmektedir (Lama, 1978). Doğal koşullarda bulunan kaya süreksizlikleri genellikle kesme deformasyonlarının gelişimini kolaylaştıran killi, siltli ve kumlu granüler malzemelerle dolu halde bulunmaktadır. Ancak bazı durumlarda süreksizlikler arasındaki boşluklar, bağlayıcı özellikteki kalsit, kuvars vb. maddeler tarafından da doldurulabilmektedir. Bu tür dolgulu süreksizliklerin kesme davranışı, dolgusuz süreksizliklere kıyasla sağlam kaya malzemesinin kesme davranışına daha fazla benzerlik gösterebilmektedir.

Mühendislik çalışmalarında ve çeşitli mühendislik yapılarının inşasında statik yüklerin yanı sıra dinamik yükler de etkili olmaktadır. Genellikle değişmeden sabit kaldığı kabul edilen statik yüklerin aksine, dinamik yükler titreşim veya dalga formunda olup kısa sürede etkimekte ve zaman içerisinde değişkenlik gösterebilmektedir. Darbe, patlatma, sismik aktivite gibi yüksek hızlı/ani dinamik yüklemeler ile rüzgâr, gelgit ve dalga etkisi gibi periyodik/döngüsel yüklemeler bu bağlamda değerlendirilmektedir. Bu tür dinamik süreçler, malzemelerde ve yapılarda statik yüklerde genellikle görülmeyen yorgunluk, rijitlik kaybı ve hasar mekanizmalarını tetikleyerek yapıların uzun dönem performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Dinamik gerilmeler altında, kaya malzemesi ve kaya kütlelerinde parçacık ölçeğinde yer değiştirme, kırılma, yenilme ve süreksizliklerde büyük boyutlu kayma hareketleri gibi tepkiler gelişmektedir (Zhou ve Zhao ed., 2011). Bu durum, özellikle dolgu malzemesinin dinamik tepkisinin ek bir değişken olarak devreye girdiği dolgulu süreksizliklerde davranışın öngörülmesini daha da güçleştirmekte ve bu konuda özelleşmiş deneysel araştırmaları gerekli kılmaktadır.

Özetle, süreksizliklerin kaya mühendisliğindeki belirleyici rolü ve geçmiş vakalardaki etkisi, bu alanda kapsamlı araştırmalar yapılmasını teşvik etmiştir. Bununla birlikte, süreksizliklerin kesme davranışına yönelik çalışmalar hâlen önemli boşluklar içermektedir. Doğal ve dolgulu süreksizliklerin orijinal özelliklerini bozmadan, istatistiksel açıdan anlamlı bir örneklem büyüklüğüne ulaşacak sayıda numunenin temin edilip laboratuvar ortamında test edilmesi pratikte oldukça güç olduğundan, yapılan çalışmaların kapsamı sınırlı kalmıştır. Laboratuvar cihazlarının dinamik yükleme altında yüksek hassasiyet gerektiren doğrudan kesme deneylerini gerçekleştirecek teknolojik olgunluğa görece yakın dönemde ulaşmış olması da bilimsel çalışmaların kapsamını daraltan bir diğer etken olmuştur. Bu sebeplerle mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu dolgusuz süreksizliklerde gerçekleştirilmiş ve statik yükler altındaki davranışa odaklanmıştır. Dolgulu süreksizliklerin dinamik yükler altındaki kesme davranışı ise, özellikle doğrudan kesme deneylerini içeren deneysel araştırmalar bağlamında, ciddi bir literatür boşluğu olarak kalmış ve konunun teorik altyapısı henüz tam olarak olgunlaşmamıştır.

Bu çalışmada, tek eksenli sıkışma dayanımları farklılık gösteren altı farklı doğal kaya türünde, 15 cm kenar uzunluklarına sahip küp şekilli bloklardan yapay süreksizlik yüzeyleri oluşturulmuş ve bu yüzeylere doğal ortamlarda karşılaşılan kil, kalsit, kuvars vb. dolgularla benzeşecek yapay dolgu maddeleri uygulanmıştır. Hazırlanan dolgulu süreksizlik numunelerinde, gerçek bir deprem kaydından türetilen dinamik yükleme koşulları altında bir dizi doğrudan dinamik kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler çoklu regresyon analizlerinde kullanılarak, dinamik kesme dayanımındaki değişimin süreksizlik ve dolgu malzemesi özelliklerinin bir fonksiyonu olarak nicelleştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada elde edilen dolgulu süreksizliklerin dinamik kesme dayanımları, Üzgün (2025) tarafından eş zamanlı olarak yürütülen çalışmada aynı koşullarda hazırlanan numunelerden elde edilen statik kesme dayanımları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Dolgulu süreksizliklerin dinamik kesme davranışı literatüründeki belirgin boşluğun doldurulmasına katkı sağlamak amacıyla tasarlanan bu çalışma, özgün yönleriyle literatürde yer alan mevcut çalışmalardan ayrılmaktadır. Kullanılan doğrudan kesme deney cihazı servo kontrollü olup, 300 kN'a kadar dinamik yük uygulayabilme kapasitesine sahiptir. Ayrıca 1 μ m yatay deformasyon ölçüm hassasiyetiyle, yüksek gerilme düzeylerinde ve gerçek deprem kayıtlarına dayalı yükleme koşulları altında güvenilir deneysel veri üretme olanağı sağlamaktadır. Altı farklı kaya türü üzerinde oluşturulan yapay süreksizlik yüzeylerine, mekanik özellikleri belirgin biçimde farklı olan yumuşak (kil), sert (seramik alçısı) ve çok sert (polyester reçine-tuz karışımı) karakterdeki üç dolgu malzemesi, her biri üç ayrı dolgu kalınlığında olacak şekilde uygulanmış; böylece doğal koşullardaki geniş davranış aralığının laboratuvar ortamında temsiliyeti amaçlanmıştır. Oluşturulan her kaya–dolgu malzemesi–dolgu kalınlığı kombinasyonunun altı farklı normal gerilme düzeyinde test edilmesiyle, parametrik çeşitliliği istatistiksel açıdan anlamlı biçimde temsil edebilecek toplam 204 dinamik kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizlerde kaya tek eksenli sıkışma dayanımı, normal gerilme, dolgu malzemelerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı, süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük açısı ve genliği ile dolgu kalınlığı gibi çeşitli kaya, dolgu ve süreksizlik geometrisi özelliklerini içeren temel parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, dinamik kesme dayanımının çok boyutlu bir mühendislik problemi

olarak bütüncül şekilde ele alınmasına katkı sunmuştur. Bu bütüncül yaklaşım, dinamik kesme dayanımlarının statik kesme dayanımları ile karşılaştırılması suretiyle daha da pekiştirilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda çalışma, deneysel veri tabanını genişleten ve dolgulu süreksizliklerde dinamik kesme davranışının anlaşılmasına yönelik teorik altyapının gelişimine katkı sağlayan sistematik bir araştırma olarak değerlendirilebilir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Giriş

Kaya kütlelerinin dayanım ve şekil değiştirme gibi temel özellikleri, genellikle içerdikleri süreksizlik düzlemleri tarafından kontrol edilir. Süreksizliklerin varlığı, kaya kütlelerinin dayanımını olumsuz yönde etkilemekte ve kaya kütlelerini daha kolay şekil değiştirebilir hale getirerek mühendislik çalışmaları açısından mekanik davranışın değerlendirilmesini oldukça zorlaştırmaktadır (de Vallejo ve Ferrer, 2011).

Bu bölümde süreksizliklerin kesme dayanımları üzerine yapılan bu çalışmalar; statik yüklerde dolgulu veya dolgusuz koşullarda kesme dayanımı, dinamik yüklerde dolgusuz koşullarda kesme dayanımı gibi başlıklar altında özetlenmiştir.

2.2 Dolgusuz Süreksizliklerin Statik Yüklerde Kesme Dayanımı

Süreksizliklerin kesme dayanımı konusunda literatürde yer alan çalışmaların büyük bir bölümünün dolgusuz, temiz süreksizlik yüzeylerinde ve statik yükler altında yapıldığı görülmektedir.

Homand vd. (2001) süreksizlik yüzeylerinin hafifçe çekiçlendiği granitte oluşturulmuş birbirlerine kenetlenmemiş ve birleşmemiş yapay süreksizlikler, düzenli dalgalılığa sahip olarak harç malzemeyle hazırlanan yapay süreksizlikler ve pürüzlü dalgalı yüzeylere sahip doğal şist süreksizlikler üzerinde farklı normal gerilmeler altında ve değişen çevrim sayılarında hem döngüsel hem de monotonik kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Süreksizlik yüzeylerindeki morfolojik değişimler bir lazer profilometre cihazı ile incelenmiştir. Yazarlar süreksizlik yüzeylerinin doruk kesme dayanımını, kesme esnasında gelişen yüzey bozulmalarına göre modelleyerek dilatasyonun geliştiği ve gelişmediği durumlar için iki tepe dayanım ölçütü önermiştir.

Asadi vd. (2013) yapay olarak ürettikleri testere ağzı dişli süreksizlikler ve gerçek bir kaya benzeri hazırlanan yapay kırıklar üzerinde doğrudan kesme testleri altındaki

mekanik davranışları bir modifiye kesme hücresi ve nümerik analizler yardımıyla incelemiştir. Farklı süreksizlik yüzey geometrileri ile hazırlanan yapay harç numunelerinde yapılan doğrudan kesme deneylerinde yenilme mekanizması ve pürüz bozulması gibi özellikler incelenmiş, parçacık akış koduna sahip PFC2D simülasyonlarıyla elde edilen paralel sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Yazarlar laboratuvar deney sonuçlarının, sayısal simülasyonlardan elde edilen sonuçlarla genel olarak tatmin edici bir şekilde uyuştuğunu bildirmiştir.

Sanei vd. (2014) Bakhtiary Baraj sahasında hem tabaka düzlemlerinin hem de kaya eklem yüzeylerinin kesme dayanımlarını CNL koşullarında yaptığı 106 laboratuvar deneyi ile araştırmıştır. 50 tabaka düzlemi ve 56 kaya eklemine her biri için yüzey parametreleri (JRC ve JCS) belirlenmiş ve kaya süreksizliklerinin kesme dayanımı farklı ampirik kırılma ölçütleri (Mohr-Coulomb, Jaeger, Barton) ile tahmin edilmiştir. Jaeger kriterinin düşük pürüzlülüğe sahip ($JRC \leq 6$) eklem yüzeylerinin ve Barton kriterinin ise yüksek pürüzlülüğe sahip ($JRC > 6$) eklem yüzeylerinin kayma dayanımını tahmin etmek için uygun olacağı çıkarımı yapılmıştır. Nihai olarak, çalışmada farklı istatistiksel yaklaşımlar yardımıyla kaya süreksizliklerinin kayma dayanımının tahmini için yenilme ölçütleri önerilmiştir.

Bahaaddini vd. (2016) sayısal ve deneysel yaklaşımlar kullanarak kaya süreksizliklerinin kesme davranışı ve pürüzlük bozulma mekanizmalarını incelemiştir. Deneysel doğrudan kesme testleri testere dişli yüzeylere sahip yapay süreksizlikler üzerinde gerçekleştirilmiş, farklı normal gerilmeler altında yapılan bu deneylerde kayma, pürüz kopması ve yüzey aşınması mekanikleri incelenmiştir. Sayısal simülasyonların gerçekleştirilmesinde PFC2D kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal simülasyonlarla elde edilen kesme davranışı ve pürüzlük bozulma mekanizmalarının karşılaştırılması sonucu iyi bir uyumun yakalandığı ve farklı yükleme koşullarında kaya süreksizliklerinin kesme davranışının yeniden üretilmesinde bu sayısal yaklaşımın kullanılabileceği bildirilmiştir.

Zhang vd. (2016) yaptıkları çalışmada kaya süreksizliklerinin kesme davranışını araştırmak için farklı pürüzlülüklere sahip üç yapay süreksizlik grubu oluşturmuş ve CNL koşullarında kesme deneyleri yapmıştır. Deneyler sonrası yapılan gözlemlerde pürüz

hasarının esas olarak kesme yönüne bakan dik bölgelerde geliştiği belirlenmiştir. Çalışmada bazı gözlemsel çıkarımların yanı sıra tepe genleşme (dilatancy) açısını modellemek için negatif bir üstel fonksiyon belirlenmiştir.

Asadizadeh vd. (2017) eş düzlemli ve basamaklı iki paralel ekleme sahip bir dizi yapay kaya numunesinde doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirmiş ve köprü uzunluğu, köprü açısı, eklem pürüzlülük katsayısı (JRC), normal gerilme parametrelerinin, devamlı olmayan bu süreksizliklerdeki kesme dayanımı ve kırılma süreci üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar kesme dayanımı üzerinde en yüksek etkinin normal gerilmeden, en ufak etkinin ise köprü açısından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Normal gerilmenin statik kesme dayanımı üzerindeki belirleyici etkisine yönelik bu bulgu, aynı parametrenin bu çalışma kapsamında elde edilen dinamik kesme dayanımlarının analizlerine dâhil edilmesine dayanak oluşturmaktadır.

Singh ve Basu (2017) doğrudan kesme deneyleri ile granit, kuvarsit ve kumtaşı kayalarından doğal süreksizliklerin kesme davranışını çimento-kum ile oluşturduğu, aynı yüzey morfolojisine sahip yapay kopyalarıyla karşılaştırmıştır. Çalışmadan granit ve kuvarsit numunelerinde pürüzlülük bileşeninin doruk sürtünme açısına katkısının, aynı kayaların replikalarına göre daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kumtaşı numuneleri için değerlendirildiğinde ise bu katkının genel olarak replika numunelerle neredeyse eşit düzeyde kaldığı gözlenmiştir. Doğal ve yapay yüzeyler arasında böyle bir performans farkının gelişebilecek olması, bu çalışmada yapay süreksizliklerin doğal kaya numuneleri üzerinden oluşturulmasını gerekli kılmıştır.

Meng vd. (2019) granit kayalarında yapay olarak oluşturulmuş süreksizliklerde, farklı normal gerilmeler (3-40 MPa) altında ve çeşitli kayma hızlarında (0,001-0,1 mm/s) doğrudan kesme deneyleri yapmıştır. Kesme hızındaki değişimin kesme dayanımı, zirve sonrası kesme davranışı ve akustik emisyon özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular hem doruk hem de artık kesme dayanımlarının, artan kayma hızıyla azalma eğiliminde olduğunu göstermiştir.

Tan vd. (2019) aynı yüzeylere sahip yapay süreksizliklerde kesme sırasında kesme mukavemetinde gelişen değişiklikleri anlamaya çalıştıkları bir araştırma yapmıştır. Yapay kayalar oldukça sağlam jips malzemeden üretilmiş silindirik numunelerdir. Numuneler pürüzsüz yüzeyli ve testere ağzı dişli olarak iki grupta hazırlanmış, doğrudan kesme testleri 5 farklı normal gerilme altında yürütülmüştür. Yazarlar tarafından kesme esnasında kırılma yüzeyinin alanının, eklem düzlemleri arasındaki sürtünmenin ve kesme direncinin arttığı belirtilmiştir. Eklem düzlemlerinin kırılmasından sonra normal gerilme uygulanmaya devam etmekte ve deney yumuşama aşaması ile artık kesme sürecine girmektedir. Kesme stresinin ana kaynağı olarak, ufalanma döküntülerinin ürettiği direnç ile iki eklem yüzeyi arasındaki sürtünme, eklem yüzeyleri ile döküntü dolguları arasındaki sürtünme ve döküntü dolgularının kendi içindeki sürtünme gösterilmiştir. Bu direnç ve sürtünme değerlerinin büyüklüklerinin, döküntü dolgularının hacmine, dağılımına ve birikim şekline bağlı olduğu belirtilmiştir.

Habibzadeh (2020) 10 cm x 10 cm, 15 cm x 15 cm ve 20 cm x 20 cm boyutlarındaki farklı türlerde doğal kaya küp numunelerden oluşturduğu yapay süreksizliklerde statik ve dinamik yüklerde doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde 0,25 MPa - 10 MPa arasında değişen farklı normal gerilmeler uygulanmıştır. Çalışmada düşük normal gerilmelerde ($\leq 2,0$ MPa) statik ve dinamik deneylerden elde edilen toplam sürtünme açıları birbirlerine çok yakın değerler vermiştir. Yüksek normal gerilmelerde ($> 2,0$ MPa) ve dinamik koşullarda elde edilen temel sürtünme açıları statik koşullara göre genellikle %50'yi aşan düşüşler göstermiştir. Genel olarak tüm normal gerilme düzeylerinde yenilme anındaki kesme deformasyonları, dinamik koşullarda statik koşullara göre çok daha düşük değerlerde kalmıştır. Statik yüklerde yapılan deneylerde numune boyutunun küçülmesiyle birlikte toplam sürtünme açısında azalma olduğu belirlenmiştir. Benzer koşullarda numune boyutunun temel sürtünme açısı üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Dinamik yüklerde elde edilen deney sonuçları değerlendirildiğinde ise toplam sürtünme açısının numune boyutundan pek etkilenmediği, temel sürtünme açısı hakkında ise iyi bir değerlendirme yapacak kadar sağlıklı bir veri setinin oluşturulamadığı bildirilmiştir. Bu kapsamlı çalışma, literatürde dolgusuz süreksizliklerin statik ve dinamik koşullar altındaki davranışını inceleyen önemli araştırmalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, dolgulu

süreksizliklerin dinamik yükleme altındaki davranışını benzer kapsamda ele alan bir deneysel çalışmanın literatürde bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle, farklı dolgu türlerine sahip süreksizliklerin dinamik koşullar altında kesme dayanımını incelemeye yönelik tasarlanan bu tez çalışmasının, literatürdeki bu belirgin boşluğun giderilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Wu vd. (2020) farklı kayaç türlerindeki 3 farklı tabaka katmanlarından numuneler alıp kesme deneyleri için uygun boyutlara getirmiş ve kesme davranışının evrimi ile hasarı üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmada yüzey hasarları, hasar bölgesi dağılımı, hasar alanı yüzdesi ve eklem pürüzlülük katsayısındaki (JRC) değişim değerlendirilerek analiz edilmiştir. Eş zamanlı olarak PFC3D yardımıyla sayısal doğrudan kesme simülasyonları yürütülmüştür. Numunelerin iki yarısı arasındaki yüzey kesme hasarı farkları, doğal numunelerin iki süreksizlik duvarının mukavemetindeki farkla yakından ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Zheng vd. (2020) süreksizliklerin uzunluğu ve dalgalılık genliği tarafından oluşturulan boyut etkisi ile kesme hızını aynı anda hesaba katan bir kaya süreksizlik doruk kesme dayanımı ölçütü önermiştir. Sonrasında 200-1000 mm arasında uzunluklara ve 3-23 mm arasında dalgalılık genliklerine sahip düzenli testere dişi şekilli granit süreksizlikler üzerinde 0-1 mm/s arasındaki düşük kesme hızlarında bir dizi doğrudan kesme testi gerçekleştirerek yeni kesme dayanımı ölçütünün bu deneysel sonuçları doğru bir şekilde tahmin edebildiğini bildirmişlerdir.

Gao vd. (2023) bir açık ocak maden işletmesinde yaptıkları şev stabilite çalışmalarında kaya eklem pürüzlülüğünün etkisini araştırmışlardır. İlk olarak doğal kaya numunelerinde yapay olarak hazırlanan testere ağzı dişli süreksizlik yüzeyleri üzerinde fiziksel doğrudan kesme deneyleri yapılmış, elde edilen veriler daha sonra kullanılacak PFC2D modelini doğrulamak ve kalibre etmek için kullanılmıştır. Çeşitli diş yüksekliklerinde kesme dayanımı parametrelerinin analizi diş yüksekliğinin artmasıyla içsel sürtünme açısının arttığını, kohezyonun ise azaldığını göstermiştir. Bu içsel parametreler ile pürüzlülük katsayısı (JRC) arasındaki ilişkinin nicel olarak ortaya konulmasıyla oluşturulan yeni modelin doğruluğu PFC2D simülasyonlarıyla karşılaştırılarak sorgulanmıştır.

Tai vd. (2023) yapay kaya numuneleri üzerinde doğrudan kesme testleri ve PFC3D sayısal simülasyonu ile kesme dayanımı, kesme deformasyonu, kırılma özellikleri ve enerji evrimi gibi kaya kesme davranışları üzerinde süreksizlik sayısı ve eğiminin etkilerini incelemiştir. Bu etkiler mikro çatlak büyümesi ve enerji evrimi perspektifinden incelenmiştir. Çalışmada ortaya konulan bulgulara göre kesme sürecine enerji dönüşümü eşlik etmekte, kinetik enerji toplam enerji girişinin %1'inden daha azını oluşturmakta ve enerjinin çoğu sürtünme tarafından tüketilmektedir. Yatay çoklu sıralı süreksizliklere sahip modellerde, daha fazla süreksizlik sırası tepe noktasından sonra enerji dağılımını hızlandırmakta, ancak bu artış süreksizlik sırası sayısının artmasıyla monotonluk göstermemektedir. Doruk kesme dayanımını doğrudan kayanın tepe elastik enerji depolama kapasitesi belirlemektedir. Kayanın içinde depolanan gerinim enerjisi, doruk gerinim enerjisi depolama kapasitesini aştığında kayanın kesme dayanımı hızla azalmakta ve hasar meydana gelmektedir. Mikro çatlakların gelişimi ve birikimi enerji dağılımını doğrudan etkilemekte, doruk noktasında biriken mikro çatlakların artmasıyla dağılan enerjinin oranı da bir o kadar büyük olmaktadır. Farklı eğimlere sahip modeller ile ilgili olarak süreksizliğin eğim yönünün kesme yönüne zıt olması durumunda, pik anında daha fazla mikro çatlak birikeceği ve bu durumun daha fazla enerji kaybına neden olacağı savunulmuştur.

Yue vd. (2023) kaya malzemelerinde bulunan kesintilerin kaya kesme davranışına etkisini incelemek için, eşdüzlemsel olmayan ve farklı yönelimlerde pozisyonlanan kesintiler içeren yapay kaya numuneleri hazırlamış ve doğrudan kesme deneyleri yapmıştır. Yapay numuneler çimento kullanılarak hazırlanan harç malzemesinin uygun kalıplara dökülmesinden sonra, ilk priz süresinde numuneye ince bir metal levha yerleştirip prizin bitiminden önce çıkarılmasıyla hazırlanmıştır. Araştırmacılar normal gerilme ve çatlak eğimlerine bağlı olarak gözlenen farklılıkları çalışma sonuçlarında yorumlamış ve çatlak özelliklerinin kırılma formu ve mukavemet özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

2.3 Dolgulu Süreksizliklerin Statik Yüklerde Kesme Dayanımı

Doğada karşılaşılan süreksizliklerin birçoğu, boşluklarında çeşitli dolgu malzemeleri ile dolu hâlde bulunmaktadır. Dolgu malzemelerinin varlığı ve bu malzemelere ait farklı özelliklerin etkisiyle süreksizliklere ait mekanik özellikler büyük oranda değişkenlik göstermekte, dolayısıyla mühendislik değerlendirmeleri büyük oranda zorlaşmaktadır.

Indraratna ve Haque (1997) jips alçı ile hazırladığı (yaklaşık 11-13 MPa dayanıma sahip) testere dişi yüzeyli numunelerde hem dolgusuz hem de bentonit dolgu malzemesi uygulayarak CNS koşullarında doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyler 9,5° ve 18,5° eğimli dişlere sahip dolgusuz yüzeyler ile %8,5 nem içeriğine sahip bentonit dolgulu ara yüzlerde gerçekleştirilmiştir. Dolgu malzemesi sadece 9,5° eğimli dişe sahip numunelerde ve 0 ile 1,6 arasında değişen t/a (dolgu kalınlığının süreksizlik pürüzlülük genliğine oranı) değerlerinde uygulanmıştır. Çalışmada pürüzlülük açısındaki yükselme ile birlikte, kesme gerilmesi-normal gerilme eğrisinin hem eğim açısının yükseldiği hem de doğrulsalıktan çift eğrili doğrusal bir yapıya geçtiği gözlenmiştir. Dolgulu süreksizliklerde 0,40 t/a oranında doruk kesme gerilmesinin neredeyse %50 oranında azaldığı ve t/a oranının 1,6'ya çıkmasıyla neredeyse saf dolgu ile eşit hale geldiği belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında da 1, 3 ve 5 mm dolgu kalınlıkları uygulanarak, literatürde statik koşullarda genel olarak kabul gören kritik t/a değeri olgusunun, farklı dolgu türleri ve dinamik yükleme koşulları altında geçerliliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

Sinha ve Singh (2000) dalgalı ve düzlemsel süreksizliklere sahip olacak şekilde pleksiden ürettikleri silindirik numunelere 425 mikron elekten geçecek şekilde ufalanmış bir zemin malzemesini farklı kalınlıklarda yerleştirerek yapay dolgulu süreksizlik numuneleri hazırlamışlardır. Pleksi blokların ortasına açılan 2 mm çaplı delikler vasıtasıyla dolgu malzemesini bir geri basınç uygulayarak doyurma ve kesme esnasında gözenek suyu basıncını ölçme imkânı sağlanmıştır. Hazırlanan numuneler üç eksenli bir test sisteminde kesme deneylerine tabi tutulmuş ve deneyler sonucunda dolgulu kaya süreksizliklerinin kesme deneylerinde gözenek suyu basıncının ölçümünün mümkün olduğu görülmüştür.

Indraratna vd. (2005) süreksizlik yüzeyinin ve dolgu malzemesinin özelliklerini hesaba katarak, dolgu süreksizliklerin kesme dayanımının tahmini için yarı ampirik bir yöntem geliştirmeyi amaçlamıştır. Yapay numuneler üzerinde CNS koşullarında yapılan deneysel çalışmalarda iki farklı pürüzlülük açısına sahip süreksizliklere grafit ve bentonit dolgu malzemesi uygulanmıştır. Çalışmada önerilen kesme dayanımı modeli, t/a oranının artmasıyla kesme dayanımındaki azalmayı açıklamakta ve kesme dayanımındaki azalmanın durduğu kritik t/a oranının rolünü vurgulamaktadır.

Barla vd. (2010) tarafından servo kontrollü bir yüksek basınçlı, geri basınç uygulayabilen, doğrudan kesme cihazı tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Geliştirilen cihaz örselenmemiş veya remolde numuneleri kesme kutusunda ya da süreksizlikler arasında barındırılabilmekte, böylece geri basıncı doğrudan numuneye veya süreksizliği oluşturan bloklar arasındaki ara yüze uygulayarak gözenek basıncındaki değişikliklerin de dikkate alındığı efektif gerilme koşulları altında doğrudan kesme deneyi yapabilmeye avantajı sağlamaktadır. Kaya süreksizlik yüzeylerinin test edilmesi esnasında numune bir membranın içine yerleştirilmekte, numunenin alt yarısına açılan küçük bir delik yardımıyla su basıncı doğrudan süreksizlik yüzeyine uygulanmaktadır. Bu sistem sayesinde basınç odası boş kalırken, geri basınç yalnızca süreksizlik ara yüzeyine uygulanabilmektedir.

Indraratna vd. (2010) t/a oranı, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı, süreksizlik pürüzlülüğü, süreksizlik yüzeyinin sertliği ve dolgu türü gibi parametrelerin kesme davranışı üzerindeki etkisini irdeledikleri çalışmada aynı zamanda daha önce sunmuş oldukları bir kesme dayanımı modelinin doğrulanması için laboratuvar verileriyle destekleme yapmıştır. Deneysel çalışmalar için düzenli testere dışı yüzeylere sahip yapay kaya süreksizlik numuneleri hazırlanmıştır. Yazarlar özellikle maksimum kesme gerilmesinden sonraki yer değiştirmelerde geleneksel Mohr-Coulomb modelinin, dilatasyon açısının sürtünme açısını etkilememesi nedeniyle, eklemlili kaya şevlerinin güvenlik katsayısını önemli ölçüde fazla tahmin ettiğini öne sürmüştür. Bu makaledeki modelin ise, geleneksel yöntemlerle belirlenen güvenlik katsayısının gerekenden büyük olmasına rağmen, yenilme gelişen bazı kaya şevlerindeki (örneğin Kangaroo Valley) gerçek yenilme davranışını açıklayabileceği ileri sürülmüştür.

Jahanian ve Sadaghiani (2014) yaptıkları çalışmada farklı pürüzlülük ve dolgu özelliklerine sahip testere ağzı dişli yapay numunelerde kesme dayanımını araştırmak için CNL koşullarında ileri ve geri makaslama ile doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirmiş ve kesme dayanımını etkileyen faktörlere odaklanmıştır. Sonuçlar düşük pürüzlülük açılarına sahip süreksizliklerin ileri kesme esnasında ters kesmeye göre daha yüksek kesme mukavemeti sergilediğini, ancak daha dik pürüzlülük açılarına sahip ara yüzlerde ters kesmenin daha büyük kesme mukavemeti sergilediğini göstermiştir.

Naghadehi (2015) doğal kumtaşı süreksizlik numunelerine dolgu malzemesi olarak kil, kum ve kumlu kil uygulayarak CNL koşullarında gerçekleştirdiği kesme deneyleri ile doldurulmuş derzlerin kesme dayanımını tahmin etmek için yeni bir model sunmuş ve literatürdeki deneysel verilerle modeli doğrulamaya çalışmıştır.

Karakus vd. (2016) PFC3D simülasyonlarına dayalı olarak yaptıkları çalışmada süreksizlik dolgu kalınlığının JCS ve kesme mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmacılar modellemelerde pürüzlülük profillerini kullanmak üzere doğal kaya süreksizlik numuneleri temin etmiş ve JRC değerlerini laboratuvarında deneysel çalışmalarla belirlemiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar kesme mukavemetinin, süreksizlik yüzeylerinin taze olması ve dolgu kalınlığıyla mukavemetin azalması koşuluyla Barton formülasyonu ile modellenilebileceğini göstermiştir. 2 mm'lik bir eşik değere kadar yüksek dolgu kalınlığında JCS'nin önemli bir değişim göstermediği, ancak daha düşük dolgu kalınlıklarında JCS'nin önemli oranda arttığı belirtilmiştir.

She ve Sun (2017) kesme direnci açısı kavramına dayalı olarak ve istatistiksel yöntem ile fraktal teoriyi birleştirerek, çimento dolgulu sert kaya eklemlerinde eklem morfolojisini karakterize etmek için ortalama pürüzlülüğün, çok ölçekli pürüzlülüklerin ve pürüzlülük dağılımının dağılma derecesinin etkilerini yansıtan üç yeni parametre önermiştir. Çalışmada 100x100x200 mm boyutlarında granit numuneler Brezilyan Ayırma Yöntemi (Brazilian Splitting Method) ile bölünerek doğal kayalarda yapay süreksizlikler oluşturulmuş ve dolgu malzemesi olarak çimento harcı kullanılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numunelerde ve çimentosuz numunelerde laboratuvar kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çimento dolgulu süreksizliklerin mekanik davranışı ve yenilme

mekanizmaları, çimentosuz süreksizliklerle karşılaştırılmıştır. Her iki koşuldaki sert kaya süreksizliklerinin doruk kesme dayanımını tahmin eden bir dizi formül önerilmiş ve formüllerin doğruluğu test edilmiştir. Çimento dolgulu süreksizliklerde yenilmeler öncelikle granit-çimento ara yüzü boyunca gelişmiş, çimento harcının doldurma miktarının azalmasıyla süreksizliğin kohezyonu azalmış, ancak ara yüzün genleşme (dilatancy) açısı ve temel sürtünme açısı artmıştır. Bu gözlemlerden çimento harcının doldurulma derecesinin, süreksizlikteki yenilme modunu kontrol ettiği ve mekanik davranışı etkilediği anlaşılmıştır.

Mokhtarian vd. (2020) silindirik kireçtaşı numunelerini 0, 30, 45, 60 ve 90 derecelik yönelim açılarında keserek hazırladıkları süreksizliklere, farklı oranlarda alçı, kum, kil ve su karıştırarak hazırladıkları 3 farklı orandaki dolgu malzemesini uygulamış ve 0, 5, 14, 20 MPa çevre basınçlarında 180 adet üç eksenli sıkışma deneyi gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda 30, 45 ve 60 derecelik yönelim açılarıyla hazırlanan numunelerde yenilmenin süreksizlikler yönünde ve dolgu malzemesinde geliştiği (F1 dolgu malzemesi hariç), 0 ve 90 derecelik yönelim açlarına sahip tüm dolgulu süreksizliklerde ise yenilmenin kaya numunelerinin gövdesinde meydana geldiği görülmüştür. 3 farklı dayanıma sahip dolgu malzemesi arasında göreceli olarak en yüksek dayanıma sahip olan F1 malzemesi içeren kesme deneylerinde ise yenilmelerin dolgu malzemesi ile kaya ara yüzünde geliştiği gözlenmiştir. Nispeten düşük mukavemetli ve yüksek kum yüzdesi içeren dolgu malzemesinde yüksek sürtünme açısı ve üç eksenli basınç dayanımı elde eden araştırmacılar dolgu malzemesinin dayanımının yanı sıra bileşiminin de göz önünde bulundurulması gerektiğini öne sürmüştür. Eksenel dayanım açısından 0 ve 90 derecelik yönelim açlarına sahip süreksizlikler benzer değerler verirken, 0, 30, 45 ve 60 derecelik artan yönelim açılarıyla eksenel dayanım azalmıştır. Bu azalmanın miktarı ise artan çevre basınçlarında azalmış hatta daha yüksek çevre basınçlarında ihmal edilebilir seviyelere gelmiştir.

Tang vd. (2020) temiz ve dolgulu süreksizliklerin doğrudan kesme testleri altındaki davranış ve mekanizmalarını hem deneysel hem de sayısal yaklaşımlar kullanarak karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada farklı pürüzlülüklere sahip süreksizlik yüzeyleri içeren beton blok numuneler hazırlanmış ve dolgu malzemesi olarak kil

kullanılmıştır. Temiz süreksizliklerde kesme esnasında gelişen çatlaklar ağırlıklı olarak bir çıkıntı üzerinde oluşan paralel bağlı kesme çatlakları ve paralel bağlı çekme çatlaklarından kaynaklanmakta, dolgulu koşullarda ise çatlaklar esas olarak blok ile dolgu arasındaki düz eklemli kesme çatlakları ve dolgu parçacıkları arasındaki paralel bağlı çekme çatlaklarından kaynaklanmıştır. Bu tez çalışmasında, literatürde yaygın olarak incelenen kil dolgulara ek olarak, iki farklı dayanıma sahip sert dolgu malzemesi de kullanılarak dolgu türü ve dayanımı ile kesme davranışı ve dayanımı arasındaki ilişkinin ortaya konulması hedeflenmiş; ayrıca dinamik yükleme koşulları altında bu davranıştaki değişimin incelenmesine odaklanılmıştır.

Wang vd. (2020) çimento kullanarak yapay olarak hazırladığı ve Barton (1973) tarafından önerilen standart JRC eğrilerini temel aldığı süreksizlik içeren numunelerde farklı kalınlıklarda alçı dolgular uygulayarak sabit normal yük ve kesme hızında laboratuvar deneyleri, sayısal simülasyonlar ve teorik analizlerin bir kombinasyonu ile dolgulu süreksizliklerin kesme yenilmesi karakteristiklerini araştırmıştır. Araştırmacılar deneysel bulgulara dayanarak süreksizlik kesme dayanımı için yeni bir teorik model oluşturmuşlardır. Dolgu varlığının, kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi grafiği üzerinde temel olarak elastik fazda daha yüksek bir eğim ve plastik fazda daha düşük bir eğim ile etki ettiği belirtilmiştir. Dolgulu süreksizliğin kesme yenilmesi dolgunun küçük yerel hasarları ile başlamış ve bağlayıcı yüzeyin ya da dolgunun kendisinin hasarına doğru ilerlemiştir.

2.4 Dolgusuz Süreksizliklerin Dinamik Yüklerde Kesme Dayanımı

Kaya kütleleri statik yüklerin yanı sıra deprem, patlatma ve titreşim gibi etkenlerden kaynaklanan dinamik yüklere de maruz kalmaktadır. Hızla değişen bu stres koşulları altında kaya kütlelerinin mekanik davranışının anlaşılması, mühendislik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilecek olan etüt, planlama ve tasarım çalışmaları açısından büyük önem taşımaktadır.

Bakhtar ve Barton (1984) yarı statik ve dinamik yükleme koşullarında kumtaşı, granit, tuf, alçı ve beton bloklarından elde edilmiş olan süreksizlikler üzerinde kesme deneyleri

gerçekleştirmiştir. Bloklarda süreksizliklerin oluşturulabilmesi için düşey gerilim destekli kırılma tekniği uygulanmış ve oluşturulan yüzeylerin Barton modeline uygun olarak JRC ve JCS sınıfları belirlenmiştir. Araştırmacılar gerilme zarfını modellemek için, teorik bir düzlem, elastik izotropik özellikler ve dolayısıyla kayma olmadığını varsayan klasik dönüşüm denklemlerini kullanarak denemeler yapmıştır. Deneysel araştırmaların sonuçları gerçek stres zarfının, kırılma pürüzlülüğünden kaynaklanan dilatasyon ve sınır koşullarının geliştirdiği yanal sürtünmeden etkilendiğini göstermiştir. Bu nedenle yazarlar genişleme ve sınır koşullarından kaynaklanan düzeltmeleri stres dönüşüm denklemine dâhil ederek, kırık blokların mukavemetini tahmini için düzeltilmiş zarflar oluşturmuştur.

Ahola vd. (1996) hem laboratuvar ortamında tek eklemlili kaya örneklerinin hem de laboratuvar ve arazi ortamında birden fazla eklemlili kaya kütlelerinin dinamik davranışını araştırmak için deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Tek eklemlili laboratuvar deneyleri tuf türü doğal kaya eklemleri üzerinde, yer değiştirme kontrollü olarak ve çeşitli frekanslarda hem harmonik hem de deprem yükünde yapılmıştır. Bu deneylerden kesme direncinin, eklem pürüzlülüğüne bağılı olarak ileri ve geri yönlerde belirgin şekilde farklı değerler verebileceğini göstermiş ve ters yöndeki kesme direncinin daha küçük olduğunu görmüştür. Çok eklemlili laboratuvar deneyleri için, ölçeklendirilmiş bir kaya kütleindeki dairesel bir açıklık etrafındaki birbirine bağılı (yapay) eklem sisteminin tabanda deprem kesme dalgası hareketine maruz kaldığı laboratuvar ölçekli bir model deneyi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar tünel etrafındaki kaya kütlelerinin birincil deformasyon modunun eklemler boyunca gelişen yapışma-kayma davranışından kaynaklandığını göstermiş ve nispeten düşük büyüklükteki, tekrarlayan sismik hareketlerin maden kazılarının davranışı üzerindeki etkisini incelemek üzere tasarlanmış gerçek bir 3 yıllık yeraltı sismik saha deneysel programı sırasında doğrulanmıştır. Araştırmacılar eklem yapışma-kayma davranışının, eklem kalıcı deformasyonunun kademeli birikimini ve dolayısıyla da kaya kütlesi yorgunluğunun temelini oluşturduğunu öne sürmüşlerdir.

Barbero vd. (1996) farklı tek eksenli sıkışma dayanımı ve temel sürtünme açlarına sahip granit ve kumtaşı numunelerinden testere ile keserek pürüzsüz kaya süreksizlik

numuneleri elde etmiştir. Numuneler üzerinde sabit normal gerilme ve tek yönlü yükleme altında, darbe yüklemesi ile kaya süreksizliklerinin mekanik davranışına ilişkin bir laboratuvar araştırması yapılmıştır. Düşük normal gerilme ve başlangıçta mobilize edilmiş makaslama dayanımının olmadığı durumda, düz ve pürüzsüz bir kaya süreksizliğinin dinamik makaslama dayanımı karşılık gelen statik dayanımdan daha yüksek bir değer sergilemiş ve bu dayanım, uygulanan makaslama gerilmesi hızının artışıyla orantılı olarak daha da artmıştır. Ayrıca dinamik kesme dayanımı, kesme yükü darbesinin uygulanmasından önce, statik koşullarda mobilize edilmiş makaslama dayanımının artışıyla azalma eğilimi göstermiştir.

Lee vd. (2001) granit ve mermer türü kaya bloklarının testere ile kesilmesi sonrası kesilmiş yüzeylerin taşlanması suretiyle pürüzsüz ve yapay ayırma ile pürüzlü yüzeylere sahip numuneler oluşturmuştur. 0,2 - 5 MPa aralığında sabit normal gerilme ve psödo-statik kesme yükleme koşullarını korumak için 0,05-0,08 mm/s aralığında kesme yer değiştirme oranlarında, 2 ile 16 arasında çevrim sayısına sahip döngüsel kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Testere ile kesilmiş pürüzsüz eklemlerin kesme davranışı, farklı kaya türlerinde, kayaları oluşturan minerallerin eşit olmayan sertlikleri nedeniyle yüzey sürtünme özelliklerinden büyük ölçüde etkilenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlardan, döngüsel kesme yüklemesi altında pürüzlerin bozulmasının pürüz açısı için üstel bozulma yasalarını da izlediği ve pürüzlerin bozulma mekanizmasının kesme yönüne ile pürüzlerin türüne bağlı olarak farklı olacağı gözlemlenmiştir. Yazarlar makalede bundan yola çıkarak ikinci dereceden pürüzlerin bozulmasını dikkate alan bir elasto-plastik kurucu model önermiştir.

Jafari vd. (2003) kalıplama yöntemi kullanarak harçla aynı yüzeylere sahip süreksizlikler hazırlamış ve CNL koşullarında hem statik hem de döngüsel yüklemeyle kesme deneyleri gerçekleştirerek kesme dayanımı değişimlerini incelemiştir. Çalışmada süreksizliklerin kesme dayanımının yer değiştirme oranı (kesme hızı), yükleme döngü sayısı ve gerilme genliğiyle ilişkili olduğu belirtilmiş ve deneysel sonuçlara dayanarak, döngüsel yükleme koşullarında kesme dayanımının değerlendirilmesi için matematiksel modeller geliştirilmiştir.

Li vd. (2006) yaptıkları çalışmada farklı kesme hızları, normal gerilmeler ve dalgalılık açıları altında süreksizliklerin dinamik mukavemet ve deformasyon özelliklerini incelemek için, betondan üretilen yapay örneklerle seri deneyler yürütmüştür. Çalışmanın deneysel sonuçları dinamik süreksizlik dayanımlarının, kesme deformasyon hızının artışıyla açıkça azaldığını, normal gerilme ve dalgalılık açılarının artışıyla arttığını göstermektedir.

Indraratna vd. (2012) farklı normal gerilmelerde ve CNS koşulları altında, üçgen testere dişi şeklinde hazırlanan yapay süreksizliklerde yaptıkları döngüsel kesme deneylerine ait sonuçları Jafari vd. (2003) tarafından CNL koşullarında yapılan deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışmada süreksizliklerin döngüsel yükleme altındaki mekanik davranışının, artan normal gerilmeyle birlikte, pürüz kaymasından pürüz kesmesine doğru değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca uygulanan normal gerilme ve kesme çevrimi sayısının artmasıyla, genleşme davranışı yerine büzülme (oturma) gelişebileceği öne sürülmüştür. CNL ve CNS koşullarının karşılaştırılmasıyla; CNS koşullarında doruk kesme dayanımının CNL koşullarına göre daha büyük döngüsel kesme yer değiştirmelerinde elde edildiği ve CNS koşullarında pürüzlerde gelişen daha yüksek hasarlar nedeniyle, CNL koşulları altında yapılan deneylerin süreksizliğin döngüsel genleşmesini olduğundan fazla tahmin edebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Mirzaghorbanali vd. (2013) yüksek dayanımlı alçı ile üçgen pürüzlere sahip (testere ağzı şeklinde) yapay süreksizlikler oluşturmuş ve CNS koşulları altında döngüsel yüklemeyle kesme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyler 0,5 mm/dk, 5 mm/s ve 20 mm/s kesme hızlarında 0,56, 1,64 ve 2,4 MPa başlangıç normal gerilmelerinde gerçekleştirilirken, düşük kesme hızı altındaki testler dört kesme döngüsü boyunca, diğer testler ise 100 ardışık yükleme döngüsü boyunca devam ettirilmiştir. Genel olarak kesme dayanımı, yükleme çevrimleri ve kesme hızındaki artışla birlikte azalmış ve normal gerilme arttıkça, kesme hızının etkileri daha az belirgin hale gelmiştir. Yükleme çevrimlerinin sayısı arttıkça daha yüksek kesme hızlarındaki kesme dayanımları, daha düşük kesme hızlarındakilere yaklaşmıştır.

Dang vd. (2016) beton ve cam karışımından imal edilen ve 1 mm'den çok daha küçük pürüzlere sahip yapay düzlemsel süreksizlik numuneleri üzerinde, normal yönde farklı frekanslardaki döngüsel yüklemeli dinamik bir uyarım altında ve yatayda 3000 µm/dk sabit kesme hızında deneyler gerçekleştirmiştir. Bu koşullarda yapılan deneylerin sonuçlarına göre pürüzsüz eklemlerin kesme davranışı, normal ve kesme gerilmesi geçmişi arasında önemli bir zaman kayması göstermiştir. Döngüsel yükleme frekansının, bu zaman kayması üzerinde yalnızca küçük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Yazarlar dinamik kesme dayanımının, yalnızca statik ve dinamik yüklemenin basit bir şekilde üst üste gelmesiyle tahmin edilemeyeceğini, normal ve kesme gerilimi arasındaki faz kaymasının da dikkate alınmasının gerektiğini belirterek sabit kesme hızı ve sinüzoidal normal yükleme altındaki eklemler için yeni bir kesme dayanımı ölçütü önermişlerdir.

Niktabar vd. (2017) 5 mm sabit genliğe sahip, 15°-15° ve 30°-30° pürüzlülük açılarında düzenli pürüzlü, 15°-30° ve 15°-45° pürüzlülük açılarında düzensiz pürüzlü ve testere ağzı şeklinde yapay süreksizlikler üretmiştir. Bu süreksizliklerde, farklı normal gerilme değerlerinde ve sabit döngüsel koşullar altında, kesme yükünün frekansı ile genliği korunarak büyük ölçekli doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre kesme döngüsü sayısının artmasıyla, tüm pürüzlülük açılarında kesme dayanımı azalmış ancak yüksek pürüzlülük açılarında azalma oranı daha fazla olmuştur. Düzenli pürüzlü süreksizliklerdeki pürüzlerin kesilmesi ve bozulmasının, yükleme ve boşaltma döngüleri esnasında benzer nitelikte olduğu gözlenirken, düzensiz pürüzlü süreksizliklerde farklılık sergilemiştir.

Meng vd. (2018) granit türündeki iki farklı kayada yapay ayırma ile 12,7 ve 15,7 ortalama JRC değerlerine sahip yapay süreksizlikler oluşturmuştur. Çeşitli normal gerilmeler altında doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmiş, kesme esnasında akustik emisyon özellikleri izlenerek kaydedilmiştir. Dinamik tehlikelerin ani ve büyük miktarlarda enerji serbest kaldığı durumlarda meydana gelmesi eğiliminden yola çıkılarak akustik emisyon sensörleri ile kaydedilen enerji oranları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca iki kaya arasındaki farklı tepe sonrası deformasyon davranışları, pürüzlülük ölçümleri, XRD analizleri ve petrografik gözlemlerden elde edilen sonuçlara göre irdelenmiştir.

Zhang vd. (2023) granitik bir kayaçtan elde ettiği testere ile kesilmiş kuru düzlemsel yüzeylerde, iki sarsma tablası cihazını kullanarak, depremle ilişkili çeşitli frekansları kapsayan bir dizi döngüsel sürtünme testi gerçekleştirmiştir. Çalışmada yükleme frekansının, sürtünme dayanımındaki zayıflama ve enerji dağılımı üzerindeki etkisinin niceliksel olarak değerlendirilmesiyle döngüsel yükleme altında sürtünme dayanımının dinamik evrimi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak, süreksizlik sürtünme dayanımının evrimini dinamik yükleme döngülerinin sayısı ile ilişkilendiren bir ampirik formül önerilmiştir.

2.5 Süreksizliklerin Kesme Dayanımı İçin Önerilen Modeller

Kaya süreksizliklerin kayma davranışını tanımlamak için çeşitli araştırmacılar tarafından bazı yenilme modelleri geliştirilmiştir. Bu bölümde enerji, mekanik, matematik, grafik gibi farklı tabanlarda geliştirilmiş ölçütlerden bilimsel kaynaklarda sıklıkla karşılaşılanlarına kısaca değinilecektir.

2.5.1 Mohr-Coulomb modeli

En yaygın olarak kabul gören ölçütlerin başında, yenilmenin maksimum kesme gerilmesi tarafından kontrol edildiğini ve yenilmeye sebep olan kesme gerilmesinin de normal gerilmeye bağlı olduğunu varsayan Mohr-Coulomb (1776) modeli gelmektedir. Ölçüt yenilme anındaki normal ve kesme gerilmeleri (maksimum ve minimum asal gerilmeler) arasındaki doğrusal ilişkiyi tanımlar:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

burada; τ kesme dayanımı, σ normal gerilme, c görünür kohezyon ve ϕ içsel sürtünme açısıdır.

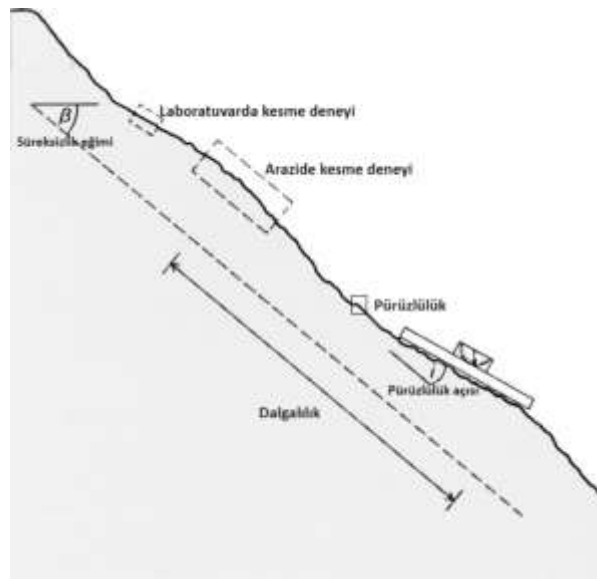
2.5.2 Patton modeli

Doğada bir süreksizliğin pürüzlülüğü tanımlanırken ölçek etkisi hesaba katılmaktadır. Genellikle küçük ölçekli düzensizlikler pürüzlülük, büyük ölçekli düzensizlikler ise dalgalılık olarak nitelendirilmektedir (Şekil 2.1).

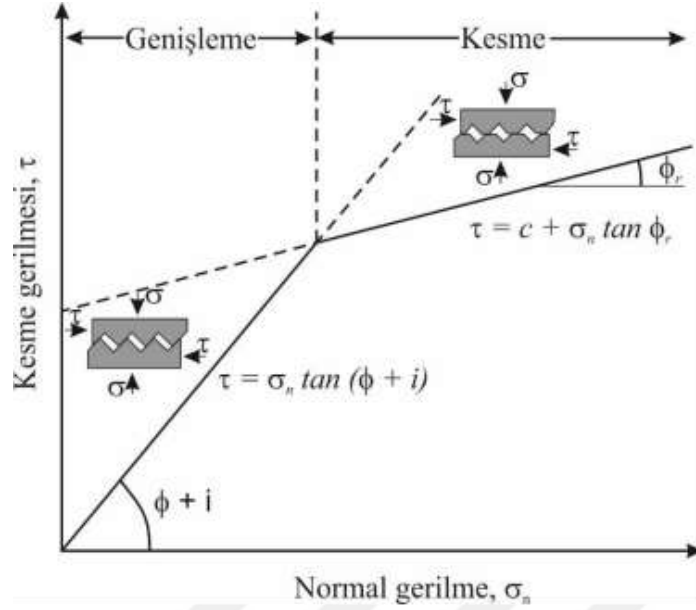
Patton (1966) süreksizlik pürüzlülüğünü birincil ve ikincil pürüzler olmak üzere iki sınıfa ayırmış ve süreksizlik pürüzlülüğünü karakterize etmek için pürüzlülük açısını (i) kullanarak ilk deneysel doruk kesme dayanımı modellerinden birini önermiştir:

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi + i) \quad (2.2)$$

burada; τ doruk süreksizlik kesme dayanımı, σ_n süreksizliğe uygulanan normal gerilme, ϕ süreksizlik yüzeyinin temel sürtünme açısı ve i pürüzlülük açısıdır. Patton'ın bu modeli hiçbir pürüzlülük yüzeyinin traşlanmadığı durumda ve sadece düşük normal gerilme değerlerinde geçerlidir. Yüksek normal gerilmelerde kesme yer değiştirmesinin gerçekleşebilmesi için pürüzlerin traşlanacağı kadar kuvvete ulaşılması gerekmektedir. Patton bu tür durumlarda pürüzlü yüzeylerde ve yüksek normal gerilmelerde geçerli olacak çift eğrili bir model önermiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.1 Süreksizlik pürüzlülüğünde ölçek etkisi (ISRM, 1978'den değiştirilerek)



Şekil 2.2 Patton tarafından önerilen çift eğrili yenilme modeli (Patton, 1966)

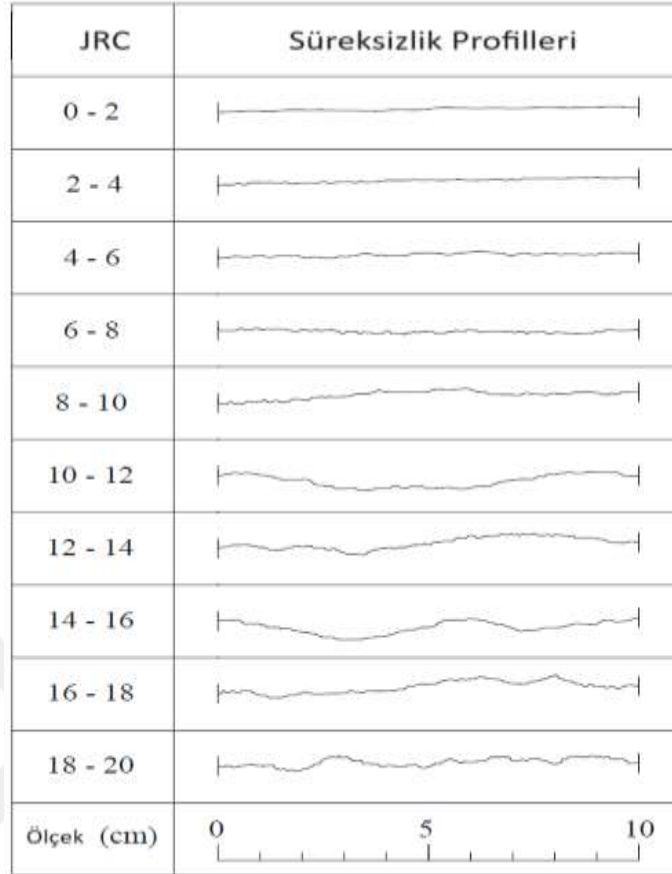
Bu modelde yüksek normal gerilme değerlerinde doruk kesme dayanımı (τ) aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi_r \quad (2.3)$$

burada; c görünür kohezyonu ve ϕ_r artık sürtünme açısını ifade etmektedir.

2.5.3 Barton modeli

Barton (1973) kaya süreksizliklerinin kesme dayanımını araştırmak ve süreksizlik pürüzlülüğünü ölçmek için, Eklem Pürüzlülük Katsayısı (JRC) parametresini geliştirmiştir. JRC yöntemiyle süreksizlik profilinin pürüzlülüğü, en az pürüzlüden en çok pürüzlüye doğru 0 - 20 aralığında ölçeklendirilerek temsil edilir (Şekil 2.3). Yöntemin basit oluşu, kolay bir tahmin sunması ve ölçek etkilerini dikkate alması yaygın şekilde kullanılmasını sağlamıştır.



Şekil 2.3 Süreksizlik pürüzlülük profilleri ve karşılık genel JRC değer aralıkları (Barton ve Choubey, 1977'den değiştirilerek)

Barton pürüzlü süreksizliklerin kesme dayanımı için JRC ve JCS parametrelerini de kullanarak doğrusal olmayan bir model geliştirmiş ve bu model Barton ve Choubey (1977) tarafından yapılan ufak bir değişiklik ile nihai şeklini almıştır:

$$\tau_p = \sigma_n \tan [\phi_b + JRC \text{Log}(\frac{JCS}{\sigma_n})] \quad (2.4)$$

burada; JRC süreksizlik pürüzlülük katsayısını, JCS süreksizlik yüzeyindeki basınç dayanımını ifade etmektedir. JCS Schmidt çekici kullanılarak belirlenebilir ve taze yüzeyli, bozunmamış süreksizlik yüzeyleri için kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı değerinde olduğu kabul edilir.

Barton ve Bandis (1982) süreksizlik yüzeylerinin göreceli olarak büyüdükçe daha fazla zayıflığa neden olabilecek kusurlar barındırabileceğini, dolayısıyla artan ölçek etkisiyle beraber süreksizlik yüzeylerinin sıkışma dayanımında azalma gözlenebileceğini savunmuştur. Aynı çalışmada JCS için ölçek düzeltmesi de içeren bir denklem önermiştir:

$$JCS_n = JCS_o \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0,03 JRC_o} \quad (2.5)$$

burada; JRC_o ve L_o 100 mm ölçekli laboratuvar numunelerini, JCS_n ve L_n ise yerinde numune boyutlarını temsil etmektedir.



3. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Bu tez laboratuvar çalışmaları ve istatistiksel değerlendirmeler olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmaları kapsamında, kullanılan malzemeler üzerinde petrografik inceleme, tek eksenli sıkışma, üç eksenli basınç, kesme kutusu, dinamik doğrudan kesme gibi deneyler ile pürüzlülük açısı ve genlik ölçümleri yapılarak malzemelerin özellikleri belirlenmiş, sonrasında dolgulu yapay süreksizliklerin oluşturulması için farklı yöntemlerle denemeler gerçekleştirilmiştir. Son aşamada, elde edilen malzeme özellikleri ile doğrudan dinamik kesme dayanımı değerlerinin istatistiksel analizlerinden gelen çıktılar değerlendirilmiştir.

Dinamik kesme dayanımı deneylerine başlanana kadar geçen malzeme seçimi, dolgu malzemesinin üretilmesi ve süreksizlik yüzeylerine uygulanma yöntemlerinin belirlenmesi, dinamik yük kaynağı olarak kullanılacak deprem kaydının seçimi gibi deneysel tasarım aşamalarında; bu çalışma öncesinde tamamlanan Habibzadeh (2020) ve Beyhan (2024) çalışmaları ile bu tez çalışmasıyla eş zamanlı olarak yürütülen Üzgün (2025) çalışmalarında elde edilen deneyim ve bulgulardan yararlanılmıştır. Bu yaklaşım, kullanılan malzeme ve yöntemlerin önceki çalışmalarla yöntemsel açıdan tutarlı olmasını sağlamak, deneysel sürecin bilimsel izlenebilirliğini artırmak ve tez kapsamında elde edilen sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla sağlıklı biçimde ilişkilendirilebilmesine olanak tanımak amacıyla benimsenmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde, bu çalışmalardan doğrudan yararlanılan veya eş zamanlı olarak ortak yürütülen deneysel süreçler açıkça belirtilmiş ve ilgili çalışmalara uygun şekilde atıf yapılmıştır.

3.1 Çalışmada Kullanılan Doğal Kayalar

Dinamik doğrudan kesme deneylerinde kullanılmak üzere çok sayıda ve özdeş özelliklere sahip doğal süreksizlik numunelerinin elde edilmesinin pratikte zor olması nedeniyle, doğal kayalardan yapay süreksizlik oluşturulması tercih edilmiştir. Bu kapsamda, ihtiyaç duyulan doğal kaya numuneleri farklı lokasyonlardan (Çizelge 3.1) ve altı farklı kaya türünden, küp bloklar halinde temin edilmiştir. Dinamik doğrudan kesme cihazının

numune hücresine uygun olması açısından küp numune kenar uzunlukları 15 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1). Numunelerin mümkün olduğunca homojen olmasına ve deney sonuçlarını etkileyebilecek belirgin bir süreksizlik yüzeyi içermemesine dikkat edilmiştir.

Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılan kaya numuneleri ve alındıkları yerler

Numune Kodu	Temin Edildiği Lokasyon	Renk	Adı
MY-1	Kayseri	Koyu Gri	Diyabaz
MY-2	Afyon	Beyaz	Mermer
MY-3	Beypazarı	Sarı	Litik Tüf
MY-4	Kayseri	Açık Gri	Vitrik Tüf
MY-5	Gölbaşı	Pembe	Trakit
MY-6	Kaman	Gri-Pembe	Granodiyorit



Şekil 3.1 15 cm kenar uzunluklarında kestirilerek temin edilen küp blok kaya numuneleri

3.2 Çalışmada Kullanılan Yapay Dolgu Malzemeleri

Doğada süreksizlik yüzeyleri arasındaki boşluklar, genellikle bu süreksizlikleri oluşturan kayaktan daha düşük dayanım özellikleri gösteren farklı malzemelerle dolu hâlde bulunmaktadır. Bu koşullardaki dolgu süreksizliklerin özelliklerinin güvenilir bir şekilde belirleyebilmek için numunede herhangi bir bozulmaya neden olmadan, doğal koşullarını muhafaza ederek, uygun boyutlarda ve yeterli miktarda (çoğunlukla 3 veya daha fazla) temsil edici numune alınması ve laboratuvar koşullarında deneylere tabi tutulması gerekir. Ancak, söz konusu numunelerin temin sürecinin hem teknik zorluklar

içermesi hem de yüksek maliyetli olması, bu yöntemin çoğu durumda pratik açıdan uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Belirtilen zorluklardan ötürü bu tez çalışmasında yapay dolgu kullanılması tercih edilmiş, doğada karşılaşılan yumuşak dolguları temsilen kil, sert dolguları temsilen ise porselen alçısı ve reçine-tuz karışımından elde edilen iki farklı malzeme kullanılmıştır.

3.2.1 Yumuşak dolgu malzemesi (kil) seçimi

Doğada en sık karşılaşılan süreksizlik dolgu malzemesinin kil olmasından dolayı bu çalışmada yumuşak dolgu malzemesi olarak kil kullanılması uygun görülmüştür. Kil dolgu malzemesini temsilen plastikliği orta derecede, likit limit değeri yaklaşık 50 olan, tek çeşit kil kullanılması planlanmıştır. İstenilen özellikteki kil malzemesinin temininde, Üzgün (2025) tarafından 8 farklı lokasyondan temin edilerek kıvam limitleri belirlenen kil numunelerinden faydalanılmıştır. Bahsi geçen çalışmada likit limitin belirlenmesinde koni düşürme deneyi, plastik limitin belirlenmesinde ters ekstrüzyon deney düzeneği, büzülme limitinin belirlenmesinde Casagrande tarafından önerilen ve plastisite diyagramına dayanan teorik yöntem ve kohezyon ile içsel sürtünme açısının belirlenmesinde zeminlerde doğrudan kesme deney düzeneği kullanılmıştır (Çizelge 3.2). En uygun kıvam limitleri değerlerine sahip olduğu düşünülen zemin numunesi, 40 numaralı elekten (0,425 mm) elenerek bu çalışmadaki tüm deneysel süreçlere dâhil edilmiştir.

Çizelge 3.2 Yumuşak dolgu malzemesini temsilen kullanılan kilin özellikleri ve temin edildiği koordinat

Numune No	Koordinat	Renk	Likit Limit	Plastik Limit	Büzülme Limiti
5	39.772882 / 32.825546	Koyu yeşil	%50,5	%32,2	%23,5

3.2.2 Sert dolgu malzemesi-1 (porselen alçısı) seçimi

Sert dolgu malzemesini temsil edecek iki farklı malzemeden, göreceli olarak daha düşük dayanımlı olacak sert dolgu malzemesi için alçı veya türevi bir malzeme kullanılması

planlanmış ve bu amaçla piyasadan temin edilen farklı ürünlerle bazı denemeler gerçekleştirilmiştir. Ürünlerin seçimi ve gerçekleştirilen denemeler esnasında Üzgün (2025) ile birlikte çalışılmış ve süreç eş zamanlı yürütülmüştür.

Standart kartonpiyer alçısı, seramik alçısı, porselen alçısı gibi ürünler tek başlarına ya da farklı oranlarda karıştırılarak, pvc boruların uygun boyutlarda kesilmesiyle hazırlanan ve iç yüzeyleri makine yağıyla hafifçe yağlanan kalıplara dökülerek kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Sert dolgu malzemelerinden silindirik numune üretimi için kullanılan kalıplar (solda), kalıplardan çıkarılan mavi Hera/Moldano ve kahverengi Hera/Moldastone CN porselen alçısı tek eksenli sıkışma dayanımı numuneleri

Kurutma süreçlerinde oda sıcaklığında, oda sıcaklığında bekletmeye ek etüv içerisinde 105 °C’de kurutmak gibi farklı seçeneklerde denemeler yapılarak kuruma süreçleri ve dayanım özellikleri detaylıca değerlendirilmiştir. Kuruyan numuneler hidrolik pres kullanılarak (Şekil 3.3) kalıplardan çıkarılmıştır.



Şekil 3.3 Sert dolgu karışımlarının kalıplardan çıkarılmasında kullanılan hidrolik pres

Tek eksenli sıkışma dayanımı, kohezyon, içsel sürtünme açısı, kuruma süresi, kıvam, süreksizlik yüzeylerine sürülebilirlik, kalınlık ayarlaması gibi parametreler değerlendirilerek birinci sert dolgu malzemesi için diş hekimliği alanında yaygın olarak kullanılan ve piyasadan rahatlıkla temin edilebilen kalsiyum sülfat hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) formunda, tip 4 porselen alçısının kullanılması uygun görülmüştür.

3.2.3 Sert dolgu malzemesi-2 (reçine ve tuz karışımı) seçimi

Göreceli olarak yüksek dayanımlı sert dolgu malzemesi için polyester reçine ile çeşitli malzemeler karıştırılarak geniş bir dayanım aralığının elde edilmesi amaçlanmıştır. Karışım denemelerinde mikronize kalsit, silis tozu, uçucu kül, bentonit, tuz, sentetik tiner ve aseton ayrı ayrı ve farklı oranlarda polyester reçineye eklenmiştir. Birinci sert dolgu malzemesinde faydalanan numune kalıpları, yöntemler ve değerlendirme parametreleri aynı şekilde kullanılmış ve bu süreçte Üzgün (2025) ile birlikte tasarlanmış ve yürütülmüştür. Hazırlanan karışımlardan elde edilen tek eksenli sıkışma dayanım aralıklarının üst sınırlarının, çalışmada kullanılacak kayaların dayanımlarını büyük oranda aşması, deneme çalışmalarına doğrudan dinamik kesme deneylerinin de eklenmesini zorunlu kılmıştır. Bu süreçte, oldukça geniş bir aralıkta tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri sunan farklı dolgu malzemeleri elde edilebilmiştir. Ancak deneysel bulgular bölümünde detayları verilecek olan değerlendirmeler neticesinde, ikinci sert dolgu malzemesi olarak, ulaşılan çok yüksek sıkışma dayanımlarına kıyasla daha düşük; buna karşılık birinci sert dolgu malzemesine göre göreceli olarak daha yüksek dayanım sunan polyester reçine ve tuz karışımının kullanılmasına karar verilmiştir.

3.3 Mineralojik-Petrografik Özelliklerin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan kayalara ait mineralojik ve petrografik özellikler, Beyhan (2024) tarafından gerçekleştirilen doktora çalışmasından alınmıştır. Söz konusu çalışmada, bu araştırmada kullanılan kayaların da dâhil olduğu tüm örneklerden ince kesitler hazırlanmış ve polarizan mikroskop altında mineralojik bileşimleri, dokusal özellikleri ve varsa bozuşma türleri belirlenmiştir. Bu bilgiler kayaların jeolojik karakterizasyon

amacıyla kullanılmış olup, nicel analizlerde veya çalışma bulgularının değerlendirilmesinde doğrudan bir girdi olarak kullanılmamıştır.

3.4 Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Belirlenmesi

Beyhan (2024), bu çalışmada kullanılan 6 çeşit kayayı da içeren bir grup küp kayaların her birinden 54 mm çapında, 5'er adet karot numune olarak ASTM D2938 standardına göre tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Beyhan (2024) tarafından elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri bu çalışmada aynen kullanılmış ve aynı kayalar için tekrar deney yapılmamıştır.

Sert dolgu malzemelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde, kayalar için izlenen deneysel süreç aynı şekilde uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler şekil ve boyut uygunluğu açısından kontrol edilmiş ve gerekli durumlarda düzeltmeler yapılmıştır. Deneyler, hareketli küresel yükleme başlığına sahip ve sabit hızda, sürekli düşey yükleme uygulayabilen 1000 kN kapasiteli bir hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Dolgu malzemelerine ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri yalnızca dolgu malzemesinin belirlenmesi sürecinde kullanılmış; nicel analizlerde ise yumuşak dolgular ile ortak dayanım parametrelerinin kullanılabilmesini sağlamak amacıyla üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar esas alınmıştır.



Şekil 3.4 Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde kullanılan hidrolik pres

3.5 Dolgu Malzemelerinin Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açılarının Belirlenmesi

Çalışmada kullanılacak tüm dolgu malzemelerinde, istatistiksel analizlerde ortak parametre olarak kullanılabilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin belirlenebilmesi için yumuşak dolgu malzemelerinde kayma direncinin kesme kutusu ile tayini (Şekil 3.5) ve sert dolgu malzemelerinde TS 699 standardına göre üç eksenli sıkışma deneyleri (Şekil 3.6) yapılmıştır. Üç eksenli sıkışma deneylerinde hücre basınçları 0,5 MPa, 1,0 MPa ve 2,0 MPa olacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 3.5 Yumuşak dolgu malzemesinde kesme kutusu deneyi için kullanılan cihaz



Şekil 3.6 Sert dolgu malzemelerinde üç eksenli basınç dayanımı için deney düzeneği

3.6 Yapay Süreksizlik Yüzeylerinin Oluşturulması

Dinamik kesme deneylerinin uygulanacağı yapay süreksizlik yüzeylerini oluşturmak için daha önce Habibzadeh (2020) tarafından kullanılan ve özdeş özelliklerde süreksizliklerin elde edilebildiğinin belirtildiği yöntem kullanılmıştır. Bu amaçla yassı ve uzun balta ağzına benzer başlıklarla donatılmış bir hidrolik pres kullanılmıştır. Küp kaya numuneler tam orta noktalarından işaretlenmiş ve işaretli noktalara balta ağzı başlıklar denk gelecek şekilde yerleştirilerek numuneler yarmak suretile ayrılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Yapay süreksizliklerin hazırlanmasında kullanılan hidrolik pres ve balta ağzına benzer başlık

Oluşturulan yapay süreksizlik numuneleri, dinamik kesme deney sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilecek ayrılma biçimleri açısından değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, numune alt ve üst yüzeylerinin yaklaşık paralel şekilde ayrılmadığı; konkav veya konveks geometri gösteren, parça kaybı nedeniyle süreksizlik yüzey bütünlüğü bozulan ya da pürüzlü yüzeylerde anormal çıkıntı oluşturacak şekilde iri taneli çakıllar içeren numuneler deney setinden ayıklanmış ve deneysel çalışmalarda kullanılmamıştır. Bu eleme işlemi, deney sonuçlarının tekrarlanabilirliğini artırmak ve süreksizlik geometrisinden kaynaklanabilecek belirsizlikleri en aza indirmek amacıyla uygulanmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Uygun şekilde yarılmayan ve deneylerde kullanılmayacak numune (solda), uygun şekilde ayrılan numune (sağda) örnekleri

3.7 Yapay Süreksizlik Yüzey Profillerinin Taranması ve Süreksizlik Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi

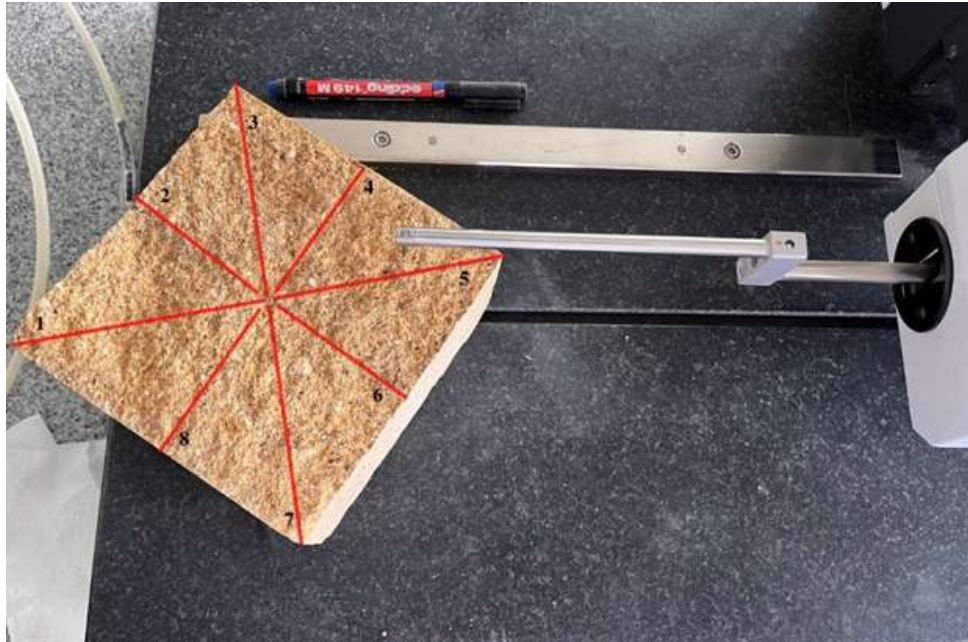
Doğal kayalardan oluşturulan yapay süreksizlik yüzeylerinin profilleri elektromekanik profilometre cihazı yardımıyla 2 boyutlu olarak dijitalleştirilmiştir. Profillerin taranmasında Mitutoyo marka, CV-2100 model cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.9). Tarama işlemi ve sayısal profiller üzerinden pürüzlülük açısı ve genlik değerlerinin belirlenmesi Üzgün (2025) tarafından gerçekleştirilmiş ve sonuçlar bu tezde doğrudan kullanılmıştır.



Şekil 3.9 Yapay süreksizliklerin yüzey profillerinin taranmasında kullanılan elektromekanik profilometre cihazı

Cihaz yüzey taramasında sivri bir uç kullanmakta olup, tarayıcı sivri uç belirli bir eğrilik yarıçapındaki bir destek ile desteklenerek tutucu kol vasıtasıyla sürücü ünitesine bağlanır. Sivri uç yüzey üzerindeki girinti ve çıkıntılardan geçerken düşey eksen boyunca hareket etme kabiliyetine sahiptir. Yatay yönde 100 mm, düşey yönde 50 mm ölçüm kapasitesine sahip cihaz, 0,02-5 mm/s aralığındaki ölçüm hızlarını desteklemektedir.

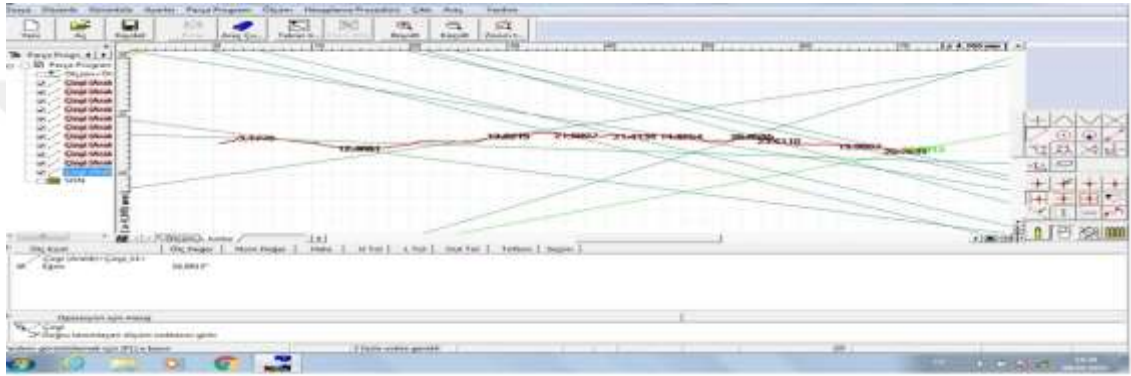
Çalışma kapsamında her kaya türünde temsil edici 3'er adet numune seçilerek bu numunelerin süreksizlik yüzey profilleri taranmıştır. Deney numunelerinin 15x15 cm yüzey alanına sahip olmasından ve cihazın bu boyutta manevra kabiliyetinin yetersizliğinden dolayı profil taraması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Küp numunelerin kenar ortalarından ve köşegenlerden yapılan taramalar sonucunda (Şekil 3.10), her bir küp numune için 8 adet yüzey profili alınmış ve 3 farklı küp numune üzerinde ölçümlerin tekrarlanmasıyla birlikte her bir kaya türü için toplamda 24 profil elde edilmiştir. Ölçümler kesme yönüne dik ve kesme yönünde gerçekleştirilmiştir. Profil taramaları esnasında kaya numunesinin cihaz tablası üzerinde sabit kalmasına özen gösterilmiş ve tarama hızı 1 mm/s olarak uygulanmıştır.



Şekil 3.10 Yüzey profillerinin taranmasında takip edilen profil hatları (Üzgün, 2025)

3.7.1 Yapay süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük açılarının belirlenmesi

Süreksizlik yüzeylerinin taranmasından sonra yüzey pürüzlülük profilleri iki boyutlu düzlemde bilgisayar programına aktarılmış ve cihaz yazılımının ölçüm araçları kullanılarak her profilde en az 10 adet pürüzlülük açısı ölçümü yapılmıştır (Şekil 3.11). Ölçüm yönünün değiştirilmesinin sonucu etkilemediği görülmüş ve her bir kaya çeşidi için taranan tüm profillerden alınan ölçümlerin aritmetik ortalamaları süreksizlik pürüzlülük açısı (i) olarak değerlendirilmiştir.



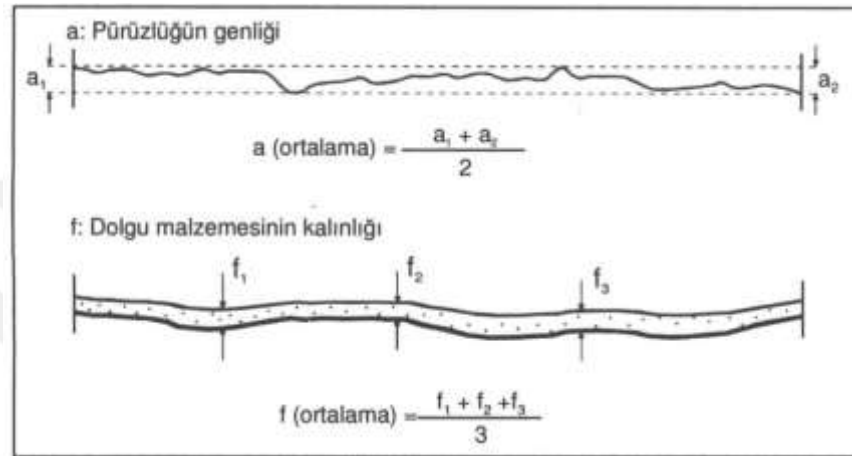
Şekil 3.11 Bilgisayar ortamına aktarılmış süreksizlik yüzey profili ve pürüzlülük açısı ölçümleri (Üzgün, 2025)

3.7.2 Yapay süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük genliklerinin belirlenmesi

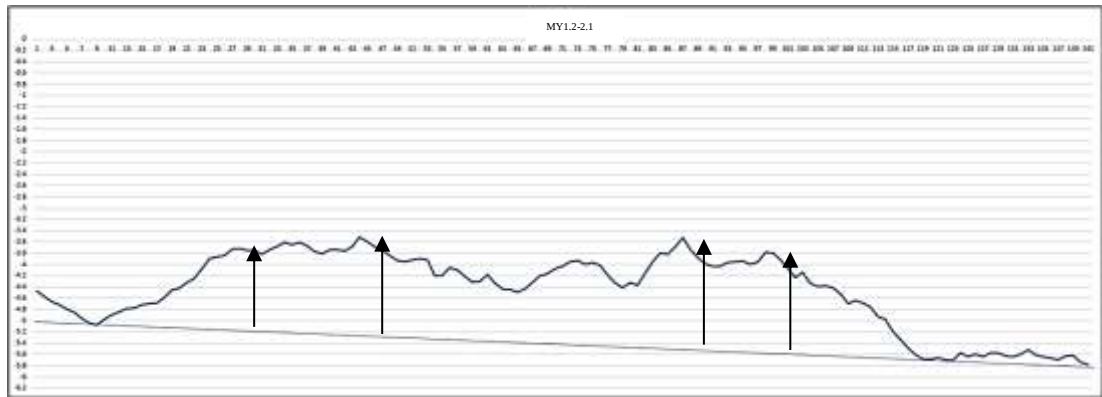
Dolgulu süreksizliklerde dolgu kalınlığının süreksizlik yüzeyi pürüzlülük genliğine oranı (t/a), kesme dayanımı etkileyen en önemli parametrelerden biri olarak görülmektedir. Birçok araştırmacı çeşitli t/a oranları önererek, bu oranların üzerinde kaya-kaya kontağının kısmen veya tamamen koptuğunu, dolayısıyla da süreksizlik dayanımının kontrolünün kısmen veya tamamen dolgu kontrolüne geçtiğini belirtmiştir (Goodman 1970; Hoek ve Bray 1981; Lama 1978; Wyllie ve Mah 2004).

Bu çalışmada uygulanacak farklı dolgu kalınlıkları altında pürüzlülük genliklerinin etkisinin daha net anlaşılabilmesi için 6 farklı kayaya ait ortalama pürüzlülük genlik değerleri belirlenmiştir. ISRM (1981) süreksizlik yüzey profilinin başlangıç ve bitiş noktalarından teğetler çizilmesini ve her iki uçtaki kalınlıkların ortalamasının pürüzlülük genliği olarak alınmasını önermektedir (Şekil 3.12). Ancak, gerçekleştirilecek dinamik

kesme deneyleri esnasında kaya yüzeyleri başlangıç ve bitiş pürüzlerinin yanı sıra çok farklı yüksekliklere sahip pürüzlere de temas edeceğinden, sadece sınır pürüz değerlerinin kullanılmasının gerçekçi bir yaklaşım olmayacağı düşünülmüştür. Buna bağlı olarak pürüzlülük genliği, sayısallaştırılan süreksizlik yüzeyinin en dip noktasına bir teğet çizilmesi ve bu teğet üzerinde kalan pürüz yükseklik değerlerin ortalaması alınmak suretiyle hesaplanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.12 ISRM tarafından önerilen ortalama pürüzlülük genliği hesabı (ISRM, 1981)



Şekil 3.13 Bu çalışmada kullanılan ortalama süreksizlik pürüzlülük genliği hesabı (Üzgün, 2025)

3.8 Dolgulu Yapay Süreksizlik Numunelerinin Hazırlanması

Belirlenen dolgu malzemelerinin süreksizlik yüzeylerine uygulanması ve uygulanan dolgu malzemesinin kalınlığının ayarlanması için kapsamlı çalışmalar ve çok sayıda denemeler gerçekleştirilmiştir. Sert dolguların kalınlık ayarlaması sürecinin nispeten

daha kolay uygulanabilir bir işlem olduğu deneyimlenmiş, yumuşak dolguda ise sũreksizliđi oluşturan bloğun ũst yarısı ve numune kalıplarından kaynaklanan yũklerle beraber başlangıçta ayarlanan dolgu kalınlığının sabit tutulamadığı gũzlenmiřtir. Bu nedenle, yumuşak dolgularda sabit bir t/a oranını ayarlamak yerine, dolgu ũstũne gelen yũkle beraber dolgu kalınlığında gelişecek değişimlerin belirlenmesi ve bu değişimlerin hesaba katılarak farklı t/a oranlarının hesaplanması yoluna gidilmiştir.

3.8.1 Dolgu malzemesinin yapay sũreksizlik yũzeylerine uygulanması

Başlangıç aşamasında yumuşak dolgu malzemesi olarak kullanılması kararlaştırılan kil malzemesi 40 numaralı elekten elenmiş ve likit limit su iãeriđinde su eklenerek yoğurulmuştur. Likit limit su iãeriđinde yoğrulan malzeme spatula yardımıyla sũreksizlik yũzeyine sũrũlmeye çalışılmış ancak olduķa cıvık olduğundan űtũrũ pratikte kalınlık ayarlamasına imkân verecek bir uygulama yapılamamıştır. Plastik limit su iãeriđine dũřũlerek hazırlanan karışım spatula yardımıyla sũreksizlik yũzeylerine uygulanabilmiş; ancak, numune ũst bloğunun ve numune kalıplarının yerleştirilmesiyle beraber ciddi oranda ezilerek numune kenarlarından taştığı gũzlemlenmiřtir. Őzellikle dinamik kesme deneyleri esnasında uygulanacak olan normal gerilmelerin de eklenmesiyle beraber malzemenin bũyũk miktarının sũreksizlik yũzeylerinden uzaklaşacağı, dolayısıyla kalınlık ayarlaması yapmanın mũmkũn olamayacağı tespit edilmiştir (şekil 3.14).



şekil 3.14 Normal gerilme altında, plastik limit su iãeriđindeki yumuşak dolgunun sũreksizlik yũzeyinden taşması

Bulgular neticesinde yumuşak dolgu malzemesi büzülme limiti su içeriğinde yo rulmu ; ancak, bu su içeriğinde de numunenin spatula yardımıyla süreksizlik yüzeyine sürülmesinin oldukça zorla tı ı, özellikle kalınlık ayarlaması için yapılan işlemlerde sıyrılarak süreksizlik yüzeyinden ayrıldığı gözlemlenmiştir.

Daha pratik bir yaklaşım olması açısından kil dolgu malzemesinin süreksizlik yüzeyine kuru hâlde yayılıp kalınlık ayarlamasının yapılması, sonrasında ise uygulanan miktardaki kil malzemeyi büzülme limiti su içeriğine getirecek miktardaki suyun yaklaşık 10-15 cm mesafeden spreyleme yoluyla numuneye püskürtülmesi denenmiştir. Spreyleme yöntemi oldukça pratik bir süreç sağlamış, büzülme limitinde su içeriğinin uygulanması da yük altında gelişebilen numune ta malarını büyük oranda durdurmu tur. Yine de dolgu malzemesinin süreksizlik yüzeyine uygulanmadan önce su ile yo urulması ile kuru hâlde uygulanıp suyun sonradan y zerine püskürtülmesi yöntemlerinin kesme deneyleri y zerinde belirgin bir etkisinin olup olmayacağı k  k boyutlu kesme kutusu deneyleri ile irdelenmiştir. Ta  kesme cihazı kullanılarak kesme kutusu deney hücresine uygun boyutlarda (6x6x1 cm) kaya numuneleri hazırlanmış ve numuneler arasına aynı kalınlıklarda yo urularak ve spreylenecek kil dolgular uygulanmıştır ( ekil 3.15). Her iki yöntemle hazırlanan numunelerde, aynı koşullarda gerçekleştirilen deneyler oldukça benzer sonuçlar sunmuş ve numunenin çok yüksek dolgu kalınlıklarına  ıkılmadı ı sürece homojen bir şekilde ıslandı ı g r lm  tur. Bulgular neticesinde yumuşak dolgu malzemesinin kuru olarak serilip, kalınlığının ayarlanmasından sonra spreyleme yoluyla büzülme limiti su içeriğine getirilmesi kararla tırılmı tır.



Şekil 3.15 Spreyleme ile hazırlanan dolgulu süreksizlik numunesi ve kesme kutusu deneyi sonrası görünümü (Solda: iki plaka arasına sandvi lenmi  kil, sağda: ta  plakaların birbirinden ayrılmış hali. Ta  plaka boyutları 6x6x1 cm'dir)

Sert dolgu malzemelerinde karışımlar hazırlanmış ve spatula yardımıyla süreksizlik yüzeylerine uygulanmıştır. Malzemenin kuruma sürecine bağlı olarak yeterli süre beklenip, malzeme kıvam kazanmaya başladığı anda kalınlık ayarlaması yapılmış ve numune üst bloğu yerleştirilmiştir. Kenar kısımlarda kalan boşluklar dolgu malzemesi ile sıvandıktan sonra dolgu malzemesinin sızmamaları için tamir bandı yapıştırılmış ve 24 saat süreyle kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Sert dolgu malzemelerinin uygulanması ve tamir bandıyla sızmaların önlenmesi

3.8.2 Dolgu kalınlığının ayarlanması

Dolgu kalınlığının ayarlanması çalışmalarına yumuşak dolgu malzemesi ile başlanılmış ve daha önce Demirezen (2019) tarafından uygulanan ve istenilen dolgu kalınlığındaki çaplara sahip çelik bilyelerin, dolgu içerisine yerleştirilmesiyle dolgu kalınlığının ayarlandığı yöntem denenmiştir. Küp şekilli numunelerin orta noktasına ve köşe noktalarına birer adet çelik bilye yerleştirilerek dolgu kalınlık ayarlamasında başarılı sonuçlar alınsa da; daha sonra deneme amaçlı gerçekleştirilen küçük boyutlu kesme kutusu deneylerinde bilyelerde deformasyonların geliştiği gözlenmiştir (Şekil 3.17). Daha büyük boyutlu dinamik kesme deneylerinde 8 MPa'ya kadar yüksek normal gerilmelere çıkılacağı da göz önünde bulundurularak kalınlık ayarlaması için alternatif yöntem arayışlarına geçilmiştir.



Şekil 3.17 Kesme kutusu denemelerinde çelik bilyelerde oluşan deformasyonların görünümü

Alternatif yöntemde 1-6 mm aralığında farklı diş derinliklerine sahip yayma tarakları üretilmiştir (Şekil 3.18). Metal plakalar üzerine serilen kuru hâldeki kil malzemenin kalınlığının, yayma tıraşının 90° açıyla tutulup çekilmesi suretiyle, tıraşın diş derinliğinin yarısına eşit kalınlığa getirilmesi hedeflenmiştir. Tarakla çekilen numune üzerine üst blok yerleştirilerek kaya test presi yardımıyla kesme deneylerinde uygulanması planlanan normal gerilme değerlerinde yüklenmiş, bu yükler altında gelişen kısalmalar pres alt başlığına temas ettirilen bir komparatör saati yardımıyla ölçülmeye çalışılmıştır (Şekil 3.14). Farklı diş derinliğine sahip taraklarla, farklı su içerikleri ve farklı yükler altında çok sayıda deneme gerçekleştirilmiştir. Denemeler sonucunda, ardışık tepe ve çukurlar oluşturarak serilen ve büzülme limitine kadar su spreylene kil dolgunun, nispeten düşük su içeriğine bağlı olarak, yük altında yeterince yayılamadığı ve dolayısıyla da hedeflenen dolgu kalınlığına gerçekte ulaşamadığı gözlenmiştir (Şekil 3.19). Yumuşak dolguda yüke bağlı incelme değerleri incelendiğinde ise tutarlı ve mantıklı sonuçların elde edilemediği görülmüş, bu duruma numunenin pres üst başlığına teması ile pres gösterge ekranında yük değerinin okunması arasında bir gecikme ya da hassasiyet kaybı olmasının neden olabileceği öngörülmüştür.



Şekil 3.18 Testere ağzı dişli yayma tarakları (solda), 4 mm dişli tarakla kalınlığı ayarlanan ve spreylene numune (sağda)



Şekil 3.19 4 mm dişli tarakla kalınlığı ayarlanan ve spreylene numunenin yük uygulandıktan sonraki görünümü

Kalınlık ayarlama sorununu çözebilmek için testere ağzı şekilli dişli taraklar yerine, eşit ve sabit kalınlıkta ve doğrudan hedeflenen diş derinliklerinde dolgu serebilmeye olanak sağlayacak türde alternatif yayma tarakları tasarlanmıştır (Şekil 3.20). Dolgu kalınlığındaki değişiminin takibi için ise daha hassas ve tutarlı olduğu düşünülen, beton veya kaya gibi malzemelerde elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılan deney sistemi ve cihazlarının kullanılması yoluna gidilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Yeniden tasarlanan taraklar (solda), kalınlık azalmasının tespitinde kullanılan elastisite modülü deney cihazı ve aparatları (sağda)

Bu denemeler DSİ Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Beton Laboratuvarı Şube Müdürlüğünde gerçekleştirilmiştir. Denemelerde kullanılan cihaz aparatlarının boyutlarına uygun olan, minimum deformasyonu göstereceği düşünülen metal silindir bloklar mevcut olmasına rağmen, bu sert ve pürüzsüz yüzeylere aparatların sıkı bir şekilde tutturulamaması nedeniyle denemelerde 35 MPa tek eksenli sıkışma dayanımına, 100 mm çap ve 300 mm boya sahip silindir beton numunesi kullanılmıştır. Numune tam orta kısmından taş kesme testeresi ile kesilerek 2 parçaya ayrılmış, yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi için aşındırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.21). Daha sonra bu yüzeylere farklı kalınlıklarda dolgu uygulanarak, yük altında kısılma miktarları belirlenmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Dolgunun uygulandığı silindir beton numunesi ve aşındırılmış yüzeyleri (solda), 3 mm kalınlıkta ve büzülme limiti su içeriğinde spreylenen dolguya 2 MPa gerilme uygulandıktan sonra dolgunun görünümü (sağda)

Önceki yöntemde uygulanan dolgu kalınlıkları ve normal gerilmeler aynı şekilde uygulanarak büzülme limitine kadar spreylene dolgudaki kısılma miktarları düşey yönde okuma yapan 2 LVDT (doğrusal değişken diferansiyel transdüser) yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 Beton silindir bloklar arasına uygulanan yumuşak dolgu ve LVDT cihazlarının yerleşimi

Aynı işlem betondan kaynaklı kısılmayı tespit etmek açısından dolgu uygulanmamış koşulda da gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme aşamasında betonda oluşan kısılma miktarı nihai dolgu kalınlıklarına eklenerek düzeltilmiş nihai dolgu kalınlıkları elde edilmiştir.

Sert dolgu malzemelerinde aynı taraklar kullanılarak hazırlanan dolgular, numune üst bloğunun yerleşmesi sonrasında kuruyarak nispeten sağlam ve kalınlığı değişmeyen bir yapı kazanması nedeniyle, yumuşak dolguda uygulanan çalışmaya benzer bir uygulamaya ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak, dolgu kalınlık ayarlamasının doğru yapıldığından emin olabilmek için, konumları işaretlenerek belirlenen 4 farklı noktadan, dolgu uygulanmadan önce ve dolgu uygulandıktan sonra küp numunenin yükseklik ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 Sert dolgu malzemesi-1 için yayma tarakları ile kalınlık ayarlaması (sol üstte), kumpas ile kalınlık ölçümleri (sağ üstte), 1 mm kalınlıkta hazırlanan 1 set numune (altta)

3.9 Dolgulu Süreksizliklerde Doğrudan Dinamik Kesme Deneyleri

Süreksizliklerin kesme dayanımının belirlenmesine yönelik son yıllarda çok sayıda deney cihazı kullanıma sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen toplam 204 adet dinamik kesme deneyi Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarında yer alan kesme deney cihazında yapılmıştır.

3.9.1 Dolgulu süreksizliklerde doğrudan dinamik kesme deney cihazı

Dolgulu süreksizliklerde doğrudan dinamik kesme deneyleri, Wille Geotechnik marka, servo kontrollü doğrudan kesme deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.24). Cihaz, düşey (normal) ve yatay (kesme) yönlerde 300 kN kapasiteye sahip hidrolik yükleme sistemleri ile donatılmış olup, hem statik hem de dinamik kesme yüklerinin uygulanmasına olanak sağlayan yüksek rijitlikte bir çerçeve yapısına sahiptir. Bu özel tasarım, sürtünme ve burulma (tork) gibi istenmeyen etkileri minimize ederek yüksek

doğrulukta ve tekrarlanabilir ölçümlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Hidrolik sistem; bir güç ünitesi, iki ayrı valf sistemi, iki bağımsız kontrol ünitesi ve düşük sürtünmeli hidrolik silindirlere oluşmaktadır. Sistem, monotonik, harmonik ve kullanıcı tanımlı deprem yüklerinin (yer değiştirme-zaman verisi şeklinde) uygulanmasına imkân tanımaktadır. Uygulanan normal ve kesme kuvvetleri, $\pm 0,5$ tam skala (F.S.) kuvvet ölçüm doğruluğuna sahip sistem üzerinden takip edilmektedir. Normal ve kesme yönündeki yer değiştirmeler, 25 mm ölçüm kapasitesine ve 0,001 mm çözünürlüğe sahip HBM marka ve 1-WA/10MM-T model deformasyon ölçerler (LVDT) ile izlenmektedir. Numune hücresi, lineer rulmanlar ile yönlendirilen serbest hareketli alt ve üst kesme çerçeveleri ile sabit üst kesme çerçevesinden oluşmakta olup, yükleme kılavuzlu bir piston aracılığıyla uygulanmaktadır.

Ölçüm ve kontrol işlemleri, 24 bit çözünürlüğe sahip, gerçek zamanlı çalışan statik ve dinamik bir veri toplama ve kontrol ünitesi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem, 10 kHz'e varan kontrol döngüsü frekanslarında yüksek hızlı ve yüksek çözünürlüklü veri toplama imkânı sunmaktadır.



Şekil 3.24 Doğrudan dinamik kesme deney cihazının genel görünümü

3.9.2 Doğrudan dinamik kesme deney numune kalıpları

Numunelerin cihazın deney hücresine yerleştirilmesi için daha önce kullanılan deney kalıpları numunelerin sabitlenmesinde alçı vb. bağlayıcı malzemeler gerektirmekte, hem numunenin birebir örtüşecek şekilde sabitlenmesi zorlaşmakta hem de bağlayıcı malzemenin kuruması için uzun süre beklenmesi gerekmektedir. Numune kalıplarında yapılan geliştirmeyle birlikte 10 ile 20 cm aralığındaki tüm boyutlarda kaya numuneleri için uygun olacak şekilde, ayar vidaları ve çelik plaka destekler yardımıyla numune sabitleyebilecek bir sistem tasarlanmıştır (Şekil 3.25). Geliştirilen kalıplar sayesinde numune hazırlama süreci kısalmış, işlem kolaylaşmış ve sabitleme amaçlı bir harç malzemesine ihtiyaç kalmamıştır.

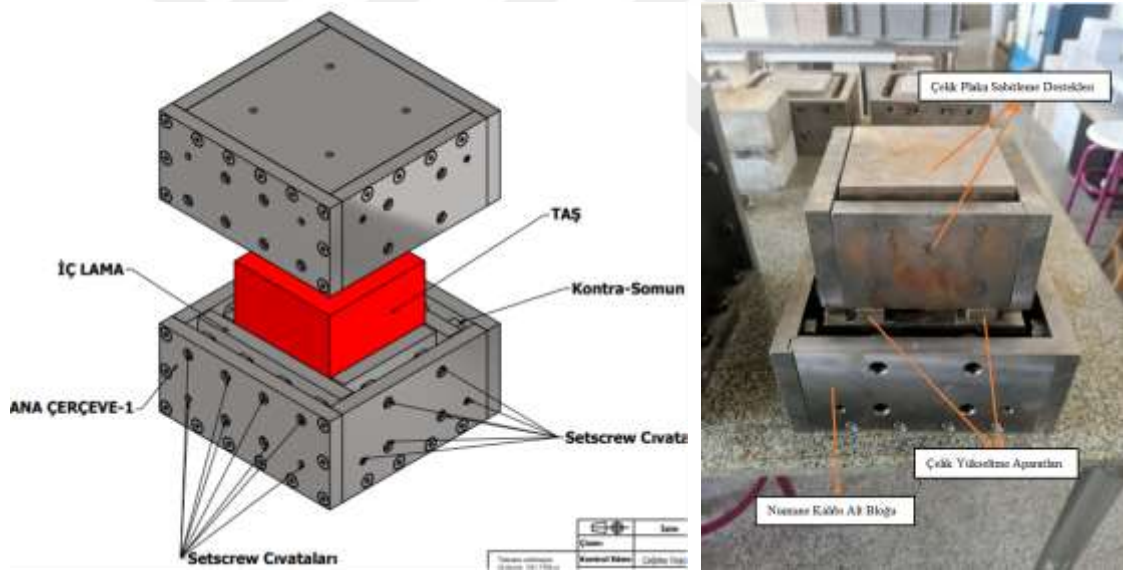


Şekil 3.25 Alçı vb. bir bağlayıcı ile sabitlenen eski numune kalıpları (solda) (Habibzadeh, 2020), ayar vidaları ve çelik destekler yardımıyla istenilen boyutta numune sabitleyebilen yeni numune kalıpları (sağda)

Kaya numunesinin alt bloğu, numune kalıbının alt bloğuna yerleştirilip ayar vidaları yardımıyla sabitlenmektedir. Sabitlenen kaya alt bloğunun üzerine süreksizlik yüzeyi tamamen örtüşecek şekilde kaya üst bloğu yerleştirilmektedir. Tamamen uyumlu şekilde yerleştirilen üst bloğun kenarlarına yükseltme amaçlı çelik aparatlar, onların da üzerine numune üst bloğunu saracak şekilde çelik plaka sabitleme destekleri yerleştirilir. Numune

kalıbının üst bloğu, alt blok ile kenarları denk gelecek şekilde hizalandıktan sonra ayar vidaları sıkılarak numune üst bloğu ile kalıbı da sabitlenmiş olmaktadır (Şekil 3.26).

Yumuşak dolguda çelik yükseltme aparatlarını çıkarmak ve dolgu numunesini sermek için iki blok ayrılarak, numune istenilen kalınlıkta yayma tıraşı ile numune alt bloğunda sabitlenmiş olan süreksizlik yüzeyine yayılmaktadır (Şekil 3.25). Yumuşak dolgu spreyleme yoluyla büzülme limiti su içeriğine getirildikten üst blok, alt blokla hizalı bir şekilde yerleştirilmektedir. Bu işlemin mümkün olduğunca serilen dolgu malzemesine müdahale etmeden, en az hamle ile tamamlanmasına dikkat edilir. Hazırlanan yumuşak dolgulu numune nem içeriğini kaybetmeden hızlı bir şekilde dinamik doğrudan kesme deneyi cihaz haznesine yerleştirilerek deneye alınır (Şekil 3.27).



Şekil 3.26 Yeni numune kalıbının şematik gösterimi (solda), kaya üst bloğunun yerleştirilmesi ve sabitleme aparatlarının dizilimi (sağda)

Sert dolgu malzemelerinde yumuşak dolgudaki durumun aksine, dolgu malzemesi numune süreksizlik yüzeyine uygulanıp 24 saat kurumaya bırakılmakta, kalıp içerisine yerleştirilirken herhangi bir dolgu hazırlama işlemi yapılmamaktadır. Hazır hâldeki dolgulu süreksizlik numunesi kalıp içerisine aynı sabitleme yöntemi takip edilerek yerleştirilmekte ve numune deneye alınmaktadır (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 Deneye hazır hâldeki numune kalıbının deney cihazı numune hücreesine yerleştirilmesi

3.9.3 Doğrudan dinamik kesme deney yöntemi ve kullanılan deprem kaydı

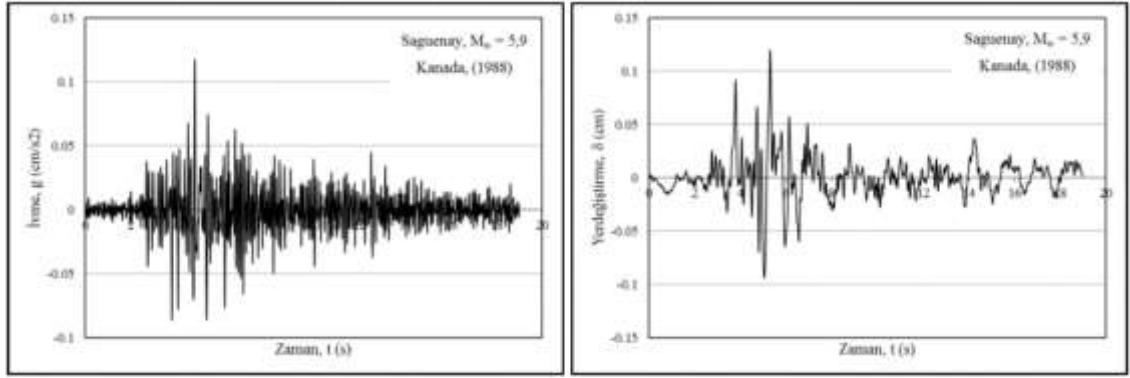
Dolgulu yapay süreksizlik numunelerinde dinamik doğrudan kesme deneyleri ASTM D5607 standardı takip edilerek gerçekleştirilmiş, farklılık sadece uygulanan dinamik yükte olmuştur. Normal gerilme değerleri deney cihazının kapasitesi ve literatür taramaları göz önünde bulundurularak 0,5 - 1 - 2 - 4 - 6 - 8 MPa olarak uygulanmıştır. Normal gerilmenin uygulanması aşamasında cihazın çelik muhafazasının ve kesme kutusu üst başlığının ağırlıkları dikkate alınarak yük ayarlaması yapılmıştır.

Dinamik koşullarda doğrudan kesme deneyleri, 5,9 Mw büyüklüğüne sahip 1988 Saguenay (Kanada) depremine ait bir deprem kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deprem kaydı, aynı kaya türleri ve deney düzeneği kullanılarak Habibzadeh (2020) tarafından daha önce gerçekleştirilen dolgusuz süreksizliklerdeki dinamik kesme deneylerinde de uygulanmış olup, farklı deprem kaydı alternatiflerinin değerlendirilmesi sonucunda cihazın dinamik yükleme kapasitesiyle uyumlu bulunmuştur. Bu tez çalışmasında da aynı deprem kaydının kullanılması, gelecekte yapılabilecek

değerlendirmeler için yöntemsel sürekliliğin korunması ve dolgusuz ve dolgulu süreksizliklerde elde edilen dinamik kesme davranışlarının karşılaştırılabilirliğinin sağlanması amacıyla tercih edilmiştir.

Orta büyüklükteki bir deprem senaryosunun seçilmiş olması, yerel ve bölgesel sismik tehlike değerlendirmelerinde sıklıkla ele alınan orta büyüklükteki depremleri temsil etmesi bakımından avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda, nadir görülen çok büyük depremlere özgü aşırı etkileri içermeyen, mühendislik uygulamaları açısından anlamlı dinamik yükleme koşullarının laboratuvar ortamında incelenmesine olanak tanımakta ve çalışmanın mühendislik temsil gücünü artırmaktadır. Deprem kaydının nispeten uzun süreli (19 saniye) olması, tek döngüde numune üzerinde kademeli bir hasar birikimi oluşturulmasına katkı sunmaktadır. Ayrıca, kaydın kaya temel (rock-site) üzerindeki S10 kodlu Riviere-Ouelle/Quebec (Kanada) istasyonunda kaydedilmiş olması; yerel zemin tabakalarının neden olabileceği amplifikasyon etkilerinden arınmış, kaya kütlesi içindeki dalga yayılımının temsili arttıran bir hareket girdisi sağlamaktadır.

Dinamik doğrudan kesme cihazı, servo-hidrolik sistemle çalışan ve zamana bağlı yer değiştirme girdileri aracılığıyla örneğe belirli bir kayma hareketi uygulayabilen bir düzeneğe sahiptir. Cihazın veri alma ve yükleme sistemine uyum sağlayabilmesi için, bu ivme kaydı Habibzadeh (2020) tarafından belirli ön işlemlere tabi tutulmuştur. İlk olarak, ivme verileri sayısal integrasyon yöntemiyle zamana bağlı hız verisine, ardından ikinci bir integrasyonla yer değiştirme verisine dönüştürülmüştür (Şekil 3.28). Bu dönüşüm, cihazın kontrol birimi tarafından kullanılan komut sinyallerinin yer değiştirme temelli olması nedeniyle gereklidir. Ön işlemler sonrasında elde edilen yer değiştirme-zaman sinyalinin tepe genliği, kullanılan dinamik kesme cihazının mekanik strok kapasitesi dahilindedir. Aynı düzeneğe daha önce yapılan deneylerde, bu sinyalin kararlı bir şekilde uygulanabildiği pratik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.28 Saguenay deprem kaydına ait ivme–yer değiştirme (solda) ve zaman–yer değiştirme (sağda) grafikleri (Habibzadeh, 2020)

Deney cihazı, kullanıcı tanımlı deprem yükü ile gerçekleştirilen deneylerde; yer değiştirme-zaman verisi türünde bir deprem kaydının yanı sıra, yükleme süresi, kesme düzlemi için tanımlanan maksimum yer değiştirme (genlik) değeri ve döngü sayısının girdi parametreleri olarak tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada kullanılan deprem kaydının süresi 19 saniye olduğundan, tüm dinamik kesme deneyleri 19 saniyelik süre girilerek tek döngü halinde gerçekleştirilmiştir. Genlik değerlerinin belirlenmesinde, aynı kaya ve dolgu malzemeleri kullanılarak eş zamanlı yürütülen Üzgün (2025) çalışmasında gerçekleştirilen statik kesme deneylerinden elde edilen ve yenilmenin yaklaşık olarak gerçekleştiği doruk kesme dayanımlarına karşılık gelen yer değiştirme değerleri esas alınmıştır. Kaya türünün yanı sıra dolgu türü ve dolgu kalınlığı gibi farklı değişkenlerin de bulunması nedeniyle, sadece kaya türüne bağlı bir ortalama genlik değeri ile çalışılmamıştır. Kullanılan genlik değerleri yaklaşık olarak 3–8 mm aralığında değişmektedir. Tipik deprem kaynaklı kayma genlikleri (<1 mm) açısından bu değerler gerçek saha koşullarından uzak olarak değerlendirilebilir. Ancak, düşük genlik değerlerinde (1-2 mm gibi) gerçekleştirilen deneme amaçlı dinamik kesme deneylerinde, özellikle yüksek dayanımlı sert dolgu malzemeleri içeren süreksizliklerde, ölçülebilir bir hasar veya anlamlı bir kesme dayanımı mobilizasyonunun gelişmediği gözlenmiştir. Dolayısıyla, çalışmada kullanılan genlik değerleri, saha ölçeğindeki mutlak yer değiştirme değerlerini birebir temsil etme amacıyla seçilmemiştir. Bunun yerine, laboratuvar ölçeğinde dolgulu süreksizliklerde hasar gelişimini ve kesme dayanımının mobilizasyonunu sağlayacak yeterli deformasyon seviyesinin oluşturulmasını hedefleyen ve deneysel açıdan anlamlı ve karşılaştırılabilir sonuçların elde edilmesine olanak tanıyan bir ölçekleme yaklaşımı olarak benimsenmiştir.

3.10 İstatistiksel Yöntemler

İstatistiksel değerlendirme aşamasında, deneylerle elde edilen dolgulu koşullardaki doğrudan dinamik kesme dayanımlarının, kullanılan çeşitli kaya ve dolgu malzemelerine ait özelliklerden ne derece etkilendiği araştırılmış, doğrusal ve doğrusal olmayan çoklu regresyon analizleri yapılarak dolgulu koşullarda doğrudan dinamik kesme dayanımının, kaya ve dolgu malzemesine ait parametrelerle tahminine yönelik bir denklem elde edilmesi amaçlanmıştır. Doğrusal olmayan çoklu regresyon analizlerinde üstel model, polinom modeli, logaritmik model, güç modeli gibi farklı modeller üzerinden tahmin işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dinamik kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar, Üzgün (2025) tarafından aynı örnek havuzunda statik yükleme koşullarında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Tüm istatistiksel analizler SPSS V15.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Regresyon analizlerinde dinamik kesme dayanımı (τ_{din}) bağımlı değişken olarak, kayaların tek eksenli sıkışma dayanımları (UCS), pürüzlülük açısı (i), pürüzlülük genliği (a), süreksizlik dolgusunun kalınlığı (t), süreksizlik dolgu malzemesinin kohezyonu (c), süreksizlik dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kesme deneylerinde uygulanan normal gerilme (σ_n) parametreleri bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Süreksizlik mukavemeti modellerinde yaygın olarak eklem sıkışma dayanımı (JCS) parametresinin kullanımı tercih edilmektedir ancak, bu çalışmada kullanılan tüm süreksizlik yüzeyleri mekanik kesme veya ayrışma süreçlerine maruz kalmamış, taze (bozuşmamış) kaya yüzeyleridir. Dolayısıyla bu çalışmada kaya tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerlerinin yaklaşık olarak süreksizlik duvar dayanımlarıyla eşit olacağı kabul edilmiş ve regresyon analizleri için UCS parametresi tercih edilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan kayaların ve dolgu malzemelerinin özelliklerini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar ve dinamik yükler altında gerçekleştirilen doğrudan kesme deneylerinin sonuçları verilecektir.

4.1 Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Çalışmada kullanılan kayaların mineralojik-petrografik analizleri aynı kayaçlar üzerinde Beyhan (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınmıştır. Kayaların petrografik özellikleri ile bozuşma dereceleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

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

Kaya Kodu	Kayaç Adı	Genel Doku	Özel Doku	Bozunma	Ana Mineralojik Bileşim
MY-1	Diyabaz	Holokristalen	Zonlu doku	Opasitleşme	Plajiyoklaz, Piroksen, Amfibol, eser miktarda Opak mineraller
MY-2	Mermer	Granoblastik	-	-	Kalsit, Ankerit ve az miktarda Aragonit
MY-3	Litik Tüf	Hiyaloklastik	Zonlu doku	Demir oksitleşme	Plajiyoklaz, Kalsit, Opak mineraller, Bazalt, Trakibazalt, Kuvarsit, Andezit kaya parçaları
MY-4	Vitrik Tüf	Hiyaloklastik	Zonlu doku	-	Kuvars, Plajiyoklaz, Amfibol, Volkan camı kıymığı, kaya parçaları
MY-5	Trakit	Hipohiyalin Porfiritik	Zonlu doku, Akma doku	Opaklaşma	Plajiyoklaz, Sanidin, Piroksen, Amfibol ve eser miktarda Opak mineraller
MY-6	Granodiyorit	Holokristalen	Zonlu doku, poiklitik doku	Serizitleşme, Kloritleşme	Ortoklaz, Plajiyoklaz, Mikroklin, Kuvars, Amfibol, Biyotit, Titanit, Opak mineraller

4.2 Kayaların ve Dolgu Malzemelerinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımları

Çalışma kapsamında kullanılan kaya türlerinin her birinde Beyhan (2024) tarafından 5'er adet tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi gerçekleştirilmiş ve sonuçların en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Kayaların tek eksenli sıkışma dayanımları (Beyhan, 2024)

Kaya Kodu	Kayaç Adı	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı, UCS (MPa)		
		σ_{min}	σ_{max}	σ_{ort}
MY-1	Diyabaz	56,4	130,7	79,4
MY-2	Mermer	64,0	75,3	66,4
MY-3	Litik Tüf	22,7	44,1	30,0
MY-4	Vitrik Tüf	61,8	77,9	66,8
MY-5	Trakit	69,2	156,8	88,4
MY-6	Granodiyorit	102,7	135,2	114,7

Sert dolgu malzemelerinin belirlenmesi aşamasında farklı ürünler ve farklı karışım oranları ile hazırlanıp, kalıplar içerisinde kurutulan 5'er adet silindirik karot şekilli numunelerden ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Porselen alçılardan hazırlanan numunelerin kurutulmasında 2 ayrı süreç takip edilerek karşılaştırılmıştır. Bir grup kalıplara yerleştirildikten sonra oda sıcaklığında 24 saat bekletilirken, diğer grup 1 hafta kalıp içerisinde oda sıcaklığında saklandıktan sonra 24 saat süreyle etüvde 105 °C'de kurutulmuş ve kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 hafta daha oda sıcaklığında bekletilmiştir. Porselen alçısı dışındaki karışımların kurutma koşulları için sadece oda sıcaklığında 24 saat süreyle bekletme uygulanmıştır. Kartonpiyer alçısı ve seramik yapıştırıcı karışımlarının, kalıptan çıkarıldıklarında yüzeylerinin hala nemli olması ve nispeten düşük dayanımlar vermesi nedeniyle kullanımından vazgeçilmiştir. Hera/Moldano türü porselen alçısının oda sıcaklığında kuruduğu koşul ile etüv ilaveli kurutma koşulları arasında oldukça farklı dayanım sonuçları verdiği ve nihai dayanımını kazanmasının uzun süre gerektirdiği belirlenmiştir. Sert dolgu malzemesi-1 için 24,9 MPa

ortalama tek eksenli sıkışma dayanımına sahip Hera/Moldastone CN porselen alçısının oda koşullarında 24 saat kurutularak kullanılmasına, hedeflenen dayanıma yakın değerlerde olması, nihai dayanımına kısa sürede ulaşması ve çabuk kuruma sağlamasından dolayı karar verilmiştir.

Çizelge 4.3 Dolgu malzeme karışımlarının tek eksenli sıkışma dayanımları

Karışım	Karışım Oranları (%)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı, UCS (MPa)
Kartonpiyer Alçısı	100	7,4
Kartonpiyer Alçısı+Seramik Alçısı	80 / 20	7,7
Kartonpiyer Alçısı+Seramik Alçısı	75 / 25	6,4
Hera/Moldano Porselen Alçısı (oda koşulları)	100	11,8
Hera Moldastone CN Porselen Alçısı (oda koşulları)	100	24,9
Hera/Moldano Porselen Alçısı (etüv ilaveli)	100	29,3
Hera Moldastone CN Porselen Alçısı (etüv ilaveli)	100	24,6
Polyester Reçine	100	68,7
Polyester Reçine+Sentetik Tiner	91/ 9	3,7
Polyester Reçine+Aseton	91 / 9	8,0
Polyester Reçine+Tuz	80 /20	58,4
Polyester Reçine+Bentonit	56 / 44	50,6
Polyester Reçine+Mikronize Kalsit	28 / 72	156,8
Polyester Reçine+Mikronize Kalsit+Uçucu Kül	33 / 50 / 17	121,3
Polyester Reçine+Mikronize Kalsit+Silis Tozu	28 / 36 / 36	126,1
Polyester Reçine+Uçucu Kül	30 / 70	96,7
Polyester Reçine+Silis Tozu	30 / 70	99,2

Polyester reçine kullanılarak hazırlanan karışımlardan 3,7 MPa ile 156,8 MPa gibi geniş bir dayanım aralığı elde edilmiştir. Başlangıçta bu yüksek dayanımlara sahip dolgu malzemeleri ile dinamik kesme deneyleri yapılması hedeflenmiş ancak yapılan deneme deneylerinde, kaya dayanımını büyük oranda aşan dolgu dayanımlarında kesme deneylerinin sağlıklı bir şekilde yapılamadığı gözlenmiştir. Örneğin, 30 MPa tek eksenli sıkışma dayanımına sahip litik tuf kayasında 68,7 MPa dayanımlı polyester reçine dolgu ile yapılan denemelerde kesme yenilmesinin dolgu süreksizlik yüzeyinde ya da dolgu

malzemesi ile kaya kontağında gerçekleşmediği; daha çok dolgu malzemesine yakın kısımlarda kayanın kendisinde geliştiği gözlenmiştir (Şekil 4.1). Aynı koşullarda yapılan denemelerin bazılarında ise yenilmenin bir kesme yenilmesi şeklinde gelişmeyip, kısmen veya tamamen kayanın parçalanması ile gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Dolgu malzemesi dayanımının kaya dayanımına eşit veya büyük olduğu dolgulu süreksizliklerde, kesme yenilmesinin kayada gerçekleşmesi (solda) ve kayanın kısmen veya tamamen parçalanması (sağda)

Benzer gözlemlerle diyabaz kayasında polyester reçine ile mikronize kalsit karışımı yüksek dayanımlı dolgunun uygulandığı kesme deneyi denemelerinde de karşılaşılmıştır (Şekil 4.2). Gözlemler neticesinde polyester reçine ile tuz veya bentonit karışımlarından elde edilen malzemenin dayanımlarının uygun olacağı düşünülmüş; ancak, bentonitli karışımın fazla akışkan olması ve geç kuruması nedeniyle 58,4 MPa ortalama tek eksenli sıkışma dayanımına sahip polyester reçine ile tuz karışımının sert dolgu malzemesi-2 olarak kullanılması kararlaştırılmıştır. Diyabaz kayasında bu dolgu malzemesi kullanılarak yapılan dinamik kesme deneyi denemeleri ile kesme yenilmesinin çoğunlukla süreksizlik üzerinde gerçekleştiği ve istisnai durumlar dışında kayanın kendisinde önemli bir hasar gelişmediği teyit edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2 Dolgu malzemesi dayanımının kaya dayanımını büyük oranda geçtiği dolgulu süreksizliklerde kesme yenilmesinin kayanın kendisinde gerçekleşmesinin görünümü

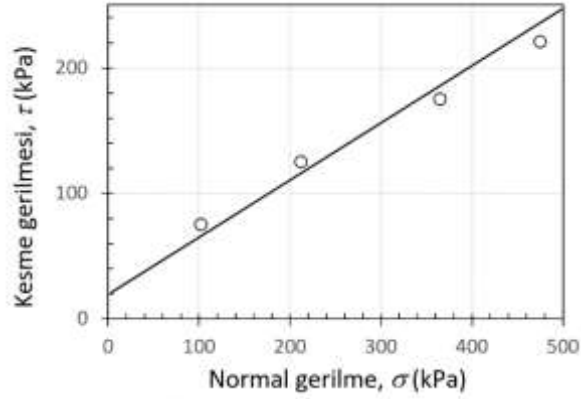


Şekil 4.3 Diyabaz kayasında polyester reçine ve tuz karışımı dolgu malzemesi ile gerçekleştirilen kesme deneyleri sonrası görünümlere bir örnek

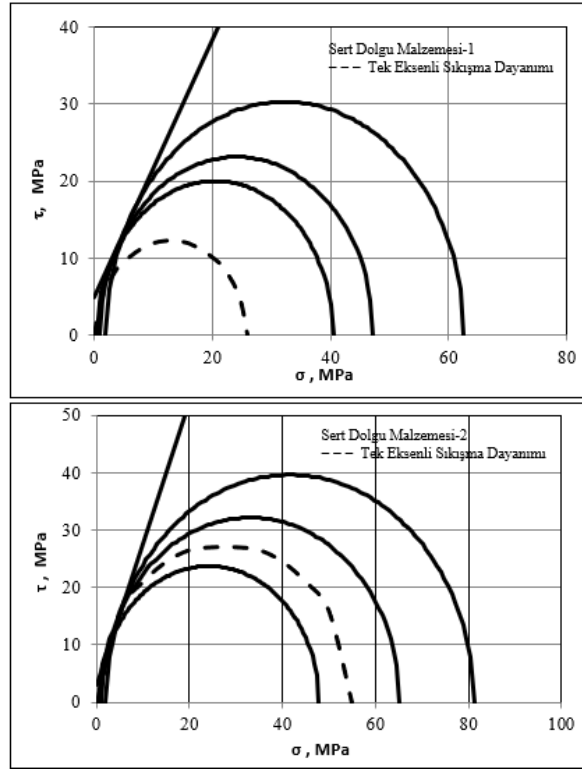
4.3 Dolgu Malzemelerinin Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açıları

Yumuşak dolgu malzemesine ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri zeminlerde kesme kutusu cihazı kullanılarak belirlenmiştir. 6x6x1 cm boyutlarında 2 kaya levha arasına 3 cm kalınlıkta yerleştirilerek konsolide edilen malzeme 0,5 mm/dk hızda makaslanarak, 4 farklı normal gerilme altında büzülme limiti su içeriğindeki dolgu malzemesinin kesme gerilme değerleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerle Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre kayma dayanımı parametreleri $c = 20$ kPa ve $\phi = 24,2^\circ$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.4).

Sert dolgu malzemeleri için kayaçlarda uygulanan üç eksenli sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiş ve normal gerilmelere karşılık belirlenen kesme gerilmeleri ile Mohr daireleri oluşturulmuştur (Şekil 4.5). Mohr dairelerinin olduğu grafiğe tek eksenli sıkışma dayanımı da eklenmiştir. Mohr dairelerine çizilen yenilme zarfından malzemelere ait c ve ϕ parametreleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.4).



Şekil 4.4 Yumuşak dolgu malzemesi (kil) üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deneylerinden elde edilen kesme gerilmesi-normal gerilme grafiği



Şekil 4.5 Sert dolgu malzemelerinde üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilen τ ve σ gerilme grafikleri

Çizelge 4.4 Dolgu malzemelerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri

Dolgu Malzemesi	Kohezyon, c (MPa)	İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)
Yumuşak Dolgu (Büzülme limiti su içeriğinde kil)	0,02	24,2
Sert Dolgu Malzemesi-1 (Porselen alçısı)	5	59,0
Sert Dolgu Malzemesi-2 (Polyester reçine/tuz karışımı)	3	68,0

4.4 Yapay Süreksizliklerin Pürüzlülük Açıları

Balta ağzı benzeri başlıklarla donatılmış pres yardımıyla küp şekilli blokların yarılmaları sonucu elde edilen yapay süreksizliklerde elektromekanik profilometre ile yüzey profilleri dijitalleştirilmiş ve yazılım yardımıyla pürüzlülük açısı (i) ölçümleri yapılmıştır. Her kaya türünde alınan ölçümlerin ortalama pürüzlülük açısı değerleri istatistiksel analizlerde kullanılmak üzere belirlenmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 Oluşturulan yapay süreksizliklere ait ortalama pürüzlülük açısı değerleri

Kaya Kodu	Kayaç Adı	Pürüzlülük Açısı, i (°)
MY-1	Diyabaz	15,9
MY-2	Mermer	14,0
MY-3	Litik Tüf	16,5
MY-4	Vitrik Tüf	14,2
MY-5	Trakit	16,6
MY-6	Granodiyorit	16,0

4.5 Yapay Süreksizliklerin Pürüzlülük Genlikleri

Yapay süreksizlik yüzeylerinin profillerinin dijitalleştirilmesi sonrası, kesme deneylerinde traşlanabileceği öngörülen tepe noktalarının genlikleri belirlenmiş ve her kaya için ayrı ayrı aritmetik ortalamaları alınarak pürüzlülük genliği (a) değerleri olarak kabul edilmiştir (Çizelge 4.6). Elde edilen pürüzlülük genliği değerleri, dolgu kalınlığının

pürüzlülük genliğine oranı (t/a) değerlendirilmelerinde kullanılarak çalışma kapsamında uygulanacak dolgu kalınlıklarının belirlenmesinde temel rolü üstlenmiştir.

Elde edilen pürüzlülük açıları ($14,0-16,6^\circ$) ve genlikleri ($1,85-2,94$ mm) dar bir aralıkta toplanmıştır. Bu nedenle, geliştirilen regresyon modellerinin geçerliliği öncelikle incelenen bu örneklem aralığı ile sınırlıdır; başka bir deyişle, modellerin genellenebilirliği çalışma kapsamındaki benzer kaya türleri ve pürüzlülük değerleri için geçerlidir. Bununla birlikte, çalışma kapsamında belirlenen t/a oranlarının, mevcut pürüzlülük aralığı içinde dolgu kalınlığı tasarımına yönelik güvenilir bir temel sağladığı değerlendirilmektedir. Gelecekteki çalışmalar için, daha geniş pürüzlülük aralıklarını kapsayan deneyler ile elde edilecek verilerin modele dahil edilmesi, regresyon modellerinin genellenebilirliğini artıracaktır.

Çizelge 4.6 Oluşturulan yapay süreksizliklere ait ortalama pürüzlülük genliği değerleri

Kaya Kodu	Kayaç Adı	Pürüzlülük Genliği, a
		(mm)
MY-1	Diyabaz	1,85
MY-2	Mermer	2,62
MY-3	Litik Tüf	1,97
MY-4	Vitrik Tüf	2,33
MY-5	Trakit	2,71
MY-6	Granodiyorit	2,94

4.6 Dolgu Malzemelerinin Yük Altında Dolgu Kalınlıkları ve t/a Oranları

Çalışma kapsamında hazırlanacak dolgulu yapay süreksizlik numunelerinin dolgu kalınlıkları t/a oranı gözetilerek belirlenmiş ve bu oranın 2-2,5 değerini çok fazla aşmayacak şekilde ayarlanması amaçlanmıştır. Bu kararda literatürde karşılaşılan çalışmalarda yapılan çıkarımlar etkili olmuştur. Goodman (1970) süreksizliklerde bulunan dolgu malzemesinin kalınlığının, pürüzlülük genliğinin yaklaşık %25-50'sini aşması hâlinde çok az kaya-kaya dokanağı sağlanacağını veya kontağın tamamen kopacağını, dolayısıyla da süreksizliğin kesme dayanımını dolgu malzemesinin

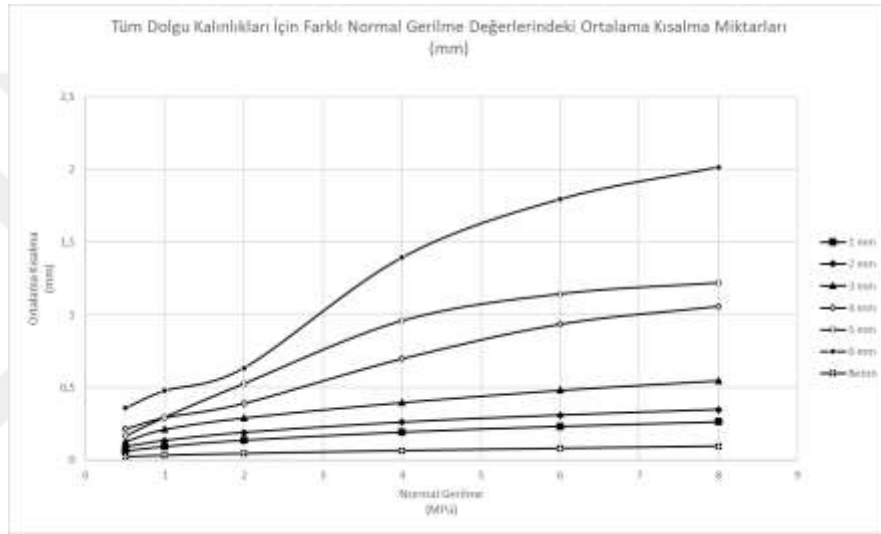
özelliklerinin kontrol edeceğini belirtmiştir. Papaliangas vd. (1990) dolgunun temel etkisinin, kalınlığına bağlı olarak süreksizliğin karşılıklı yüzeylerini ayırması ve kaya-kaya temasını kesmesiyle geliştiğini belirtmiştir. Barton ve Choubey (1977) dolgu kalınlığının pürüzlülük genliğinden küçük olması hâlinde süreksizlik kesme yenilmesinin iki aşamada gerçekleşeceğini öne sürmüştür. Birinci aşamada, kesme gerilmesi ve kesme yer değiştirmesinin yalnızca zemin dolgu malzemesinin mukavemeti tarafından kontrol edileceği ve kayanın tek rolünün süreksizlik geometrisi veya pürüzlülüğü ile dolgunun yenilmesinde sınırları belirlemek olacağı belirtilmiştir. İkinci aşama bir miktar yer değiştirme gerçekleştikten sonra, süreksizlik yüzeylerinin temas edeceği ve o andan itibaren dayanımın esas olarak pürüzlerin şekli ve kayanın mukavemeti tarafından belirleneceği ifade edilmiştir. Phien-Wej vd. (1990) bentonit ile doldurulmuş ve yapay olarak oluşturulan testere dişli alçı numunelerinde gerçekleştirdiği doğrudan kesme deney sonuçlarına göre, t/a oranının 2'ye yaklaşmasıyla kesme dayanımının dolgunun dayanımına eşit hale geldiğini belirtmiştir.

Yumuşak dolgu malzemesinde dolgu kalınlığını etkileyecek en önemli husus olarak, normal gerilmelere bağlı kil malzemede gerçekleşecek oturmalar ve bunun sonucunda dolgu kalınlığında oluşacak kısalmaların olacağı görülmüştür. Bu kısalma değerlerinin belirlenmesi için betonda elastisite modülü değerlerinin belirlenmesinde kullanılan ve deformasyonları mikron mertebesinde ölçebilen deney sisteminden faydalanılmıştır. Beton blok arasına 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlıklarda yerleştirilen dolgular, dinamik kesme deneylerinde uygulanacak 0,5, 1, 2, 4, 6 ve 8 MPa normal gerilmeler altında bırakılarak, dolgularda gerçekleşen kısalmalar 2 farklı LVDT cihaz tarafından ölçülmüştür. Aynı süreç dolgusuz durumda betonun kendisindeki deformasyonu belirlemek için tekrar edilmiştir. Betondaki deformasyon, dolgunun kendisinde olan kısalmalardan tolere edilmesiyle beraber başlangıçtaki dolgu kalınlıklarının normal gerilmeler sonrası kaç mm kalınlığa düşeceği belirlenmiştir (Çizelge 4.7).

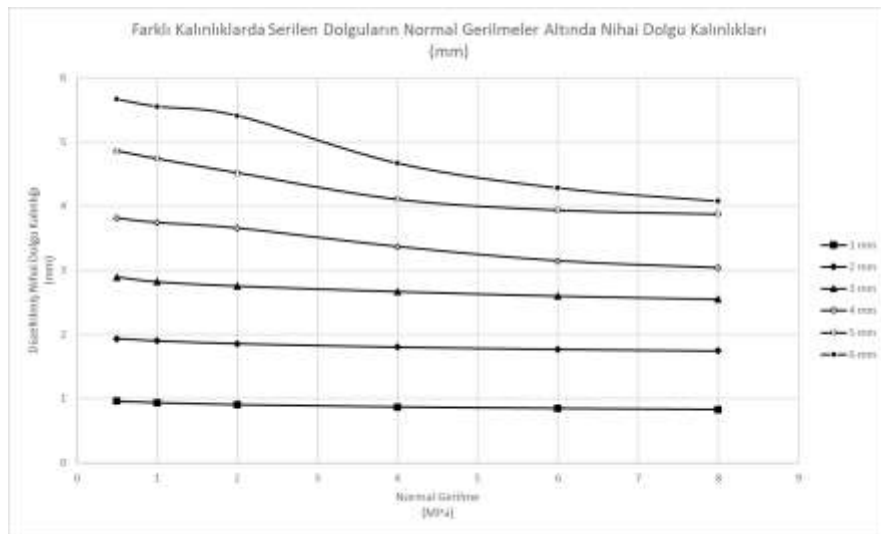
Çizelge 4.7 Yumuşak dolgu malzemesi kalınlıklarının normal gerilmeler altındaki değişimi

Başlangıç Dolgu Kalınlığı (mm)	Normal Gerilme (Mpa)	LVDT 1 Okunan Kısılma (mm)	LVDT 2 Okunan Kısılma (mm)	Ortalama Kısılma (mm)	Kısılan Dolgu Kalınlığı (mm)	Beton Deformasyonu Tolere Edildikten Sonra Nihai Dolgu Kalınlığı (mm)
Dolgosuz Durumda Beton	0,5	0,015	0,033	0,024	0,024	-
	1	0,020	0,047	0,033	0,033	-
	2	0,027	0,065	0,046	0,046	-
	4	0,039	0,092	0,065	0,065	-
	6	0,050	0,112	0,081	0,081	-
	8	0,061	0,130	0,096	0,096	-
1	0,5	0,067	0,057	0,062	0,938	0,962
	1	0,099	0,087	0,093	0,907	0,940
	2	0,146	0,127	0,136	0,864	0,910
	4	0,207	0,178	0,192	0,808	0,873
	6	0,249	0,214	0,232	0,769	0,850
	8	0,282	0,244	0,263	0,737	0,833
2	0,5	0,049	0,130	0,090	1,911	1,934
	1	0,085	0,181	0,133	1,867	1,901
	2	0,140	0,237	0,189	1,812	1,858
	4	0,214	0,305	0,259	1,741	1,806
	6	0,264	0,353	0,308	1,692	1,773
	8	0,304	0,389	0,346	1,654	1,749
3	0,5	0,145	0,111	0,128	2,872	2,896
	1	0,237	0,187	0,212	2,789	2,822
	2	0,326	0,255	0,290	2,710	2,756
	4	0,442	0,351	0,396	2,604	2,669
	6	0,531	0,431	0,481	2,519	2,600
	8	0,598	0,495	0,546	2,454	2,549
4	0,5	0,216	0,210	0,213	3,787	3,811
	1	0,294	0,291	0,292	3,708	3,741
	2	0,396	0,386	0,391	3,610	3,655
	4	0,710	0,684	0,697	3,303	3,369
	6	0,954	0,916	0,935	3,065	3,146
	8	1,081	1,034	1,058	2,943	3,038
5	0,5	0,160	0,170	0,165	4,835	4,859
	1	0,248	0,342	0,295	4,705	4,739
	2	0,239	0,812	0,525	4,475	4,521
	4	0,130	1,786	0,958	4,042	4,108
	6	0,172	2,112	1,142	3,858	3,939
	8	0,246	2,191	1,219	3,782	3,877
6	0,5	0,435	0,282	0,359	5,642	5,665
	1	0,547	0,410	0,478	5,522	5,555
	2	0,693	0,577	0,635	5,366	5,411
	4	1,426	1,362	1,394	4,607	4,672
	6	1,819	1,770	1,795	4,206	4,287
	8	2,034	1,995	2,014	3,986	4,081

Yük altındaki kısalmalar incelendiğinde sonuçların oldukça tutarlı olduğu ve farklı dolgu kalınlıkları için belirli oranlarda paralel olarak seyrettiği görülmektedir. Kısalmaların daha çok erken yük aşamalarında yaklaşık 4 MPa gerilmeye kadar büyük oranda gerçekleştiği, sonraki artan yüklerde kısalmanın göreceli olarak azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.6). Buna istisnayı 6 mm tarakla serilen dolgu numunesi oluşturmakta ve 8 MPa gerilme altında neredeyse 5 mm olarak serilen dolgu ile benzer kalınlık seviyesine düşmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6 Yumuşak dolgu kalınlığında normal gerilmeye bağlı gelişen kısalma miktarları



Şekil 4.7 Normal gerilme uygulandıktan sonra yumuşak dolguların nihai kalınlıkları

Sert dolgu malzemeleri normal gerilmelerin uygulandığı aşamada tamamen kurumuş ve katı hâlde olduklarından dolayı dikkate değer bir kalınlık kısılmasına uğramamaktadır. Bu nedenle sert dolgu malzemeleri için herhangi bir kalınlık kısılması ölçümü yapılmamıştır.

Yumuşak dolgu malzemelerinde normal gerilmeye bağlı kısılmaların dikkate alınmasıyla elde edilen dolgu kalınlıkları ve sert dolguların doğrudan uygulandıkları kalınlıklar, Çizelge 4.6’da verilen pürüzlülük genlikleri ile oranlanarak t/a oranları belirlenmiştir. Geçmiş dönemde gerçekleştirilen çalışmalarda yaygın olarak kullanılan t/a oranları ve yine geçmiş çalışmalarda dolgu kalınlığı ile süreksizlik pürüzlülüğünün kesme dayanımı üzerindeki kontrolünün değiştiğinin savunulduğu sınır t/a değerleri göz önünde bulundurularak, bu çalışmada kullanılacak dolgu kalınlıklarının 1, 3 ve 5 mm olarak uygulanması kararlaştırılmıştır. Seçilen dolgu kalınlıkları, yumuşak dolgularda normal gerilme ile beraber oluşacak kısılmalar da dikkate alınarak, belirlenen süreksizlik pürüzlülük genlikleri ile oranlanmış ve t/a değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8 Uygulanan dolgu kalınlıklarının, kayaların pürüzlülük genliklerine oranı (t/a)

Kaya Kodu	Ortalama Pürüzlülük Genliği (mm)	Dolgu Kalınlığı (mm)	t/a
MY-1	1,85	1	0,54
		3	1,62
		5	2,70
MY -2	2,62	1	0,38
		3	1,15
		5	1,91
MY -3	1,97	1	0,51
		3	1,52
		5	2,54
MY -4	2,33	1	0,43
		3	1,29
		5	2,15
MY -5	2,71	1	0,37
		3	1,11
		5	1,85
MY -6	2,94	1	0,34
		3	1,02
		5	1,70

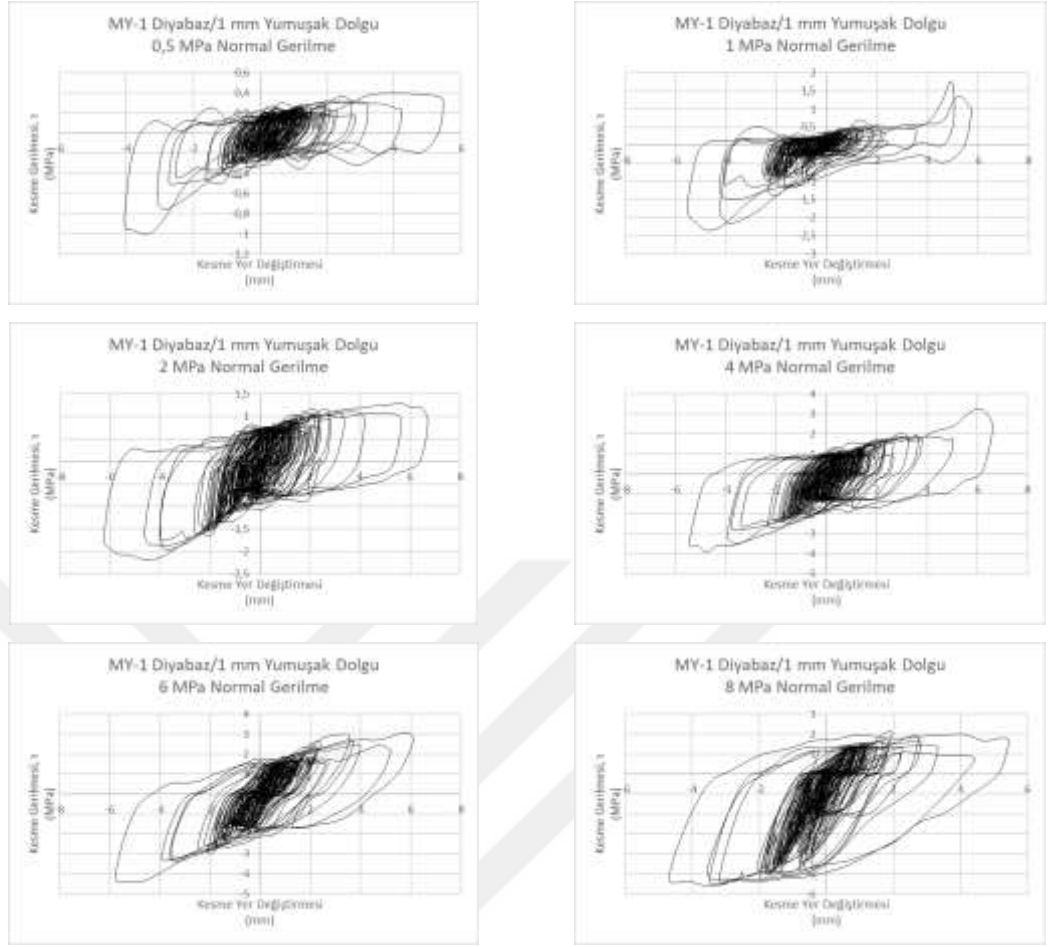
4.7 Dinamik Doğrudan Kesme Dayanımları

Çalışma kapsamında temin edilen 6 kaya türünden diyabaz, mermer ve litik tuf kayalarında 3 dolgu türü de uygulanarak dinamik doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mermer ve litik tufte, dolgunun kayalara göre çok sağlam olmasından dolayı, 5 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile deney yapılamamıştır. Daha sonra vitrik tufte yumuşak dolgu, trakitte sert dolgu-1 ve granodiyoritte sert dolgu-2 ile dinamik kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney uygulanan kaya türü ve dolgu türü eşleşmeleri ile uygulanan dolgu kalınlıkları Çizelge 4.9’da verilmiştir. Çizelgede işaretli her bir hücre, 6 farklı numune kullanılarak, 6 farklı normal gerilme altında gerçekleştirilmiş 1 set deneyi temsil etmektedir. Her bir deney numunesi, tek bir dinamik doğrudan kesme deneyinde kullanılmış olup, aynı numune üzerinde tekrar deney uygulanmamıştır. Yenilmenin olağan dışı bir şekilde gerçekleştiği veya kayacın ciddi hasar aldığı durumlarda kesme deneyleri yeni bir numune hazırlanarak tekrar edilmiştir.

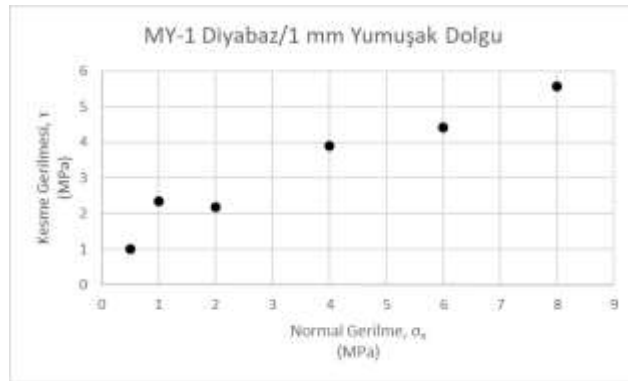
Çizelge 4.9 Tez kapsamında dinamik kesme deneylerinin uygulandığı kaya türü ve dolgu türü eşleşmeleri ile uygulanan dolgu kalınlıkları

Kaya Kodu	Kaya Türü	Dinamik Doğrudan Kesme Deneyi								
		Yumuşak Dolgu (Kil)			Sert Dolgu-1 (Porselen Alçısı)			Sert Dolgu-2 (Reçine ve Tuz)		
		1 mm	3 mm	5 mm	1 mm	3 mm	5 mm	1 mm	3 mm	5 mm
MY-1	Diyabaz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MY-2	Mermer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
MY-3	Litik Tuf	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
MY-4	Vitrik Tuf	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-
MY-5	Trakit	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
MY-6	Granodiyorit	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓

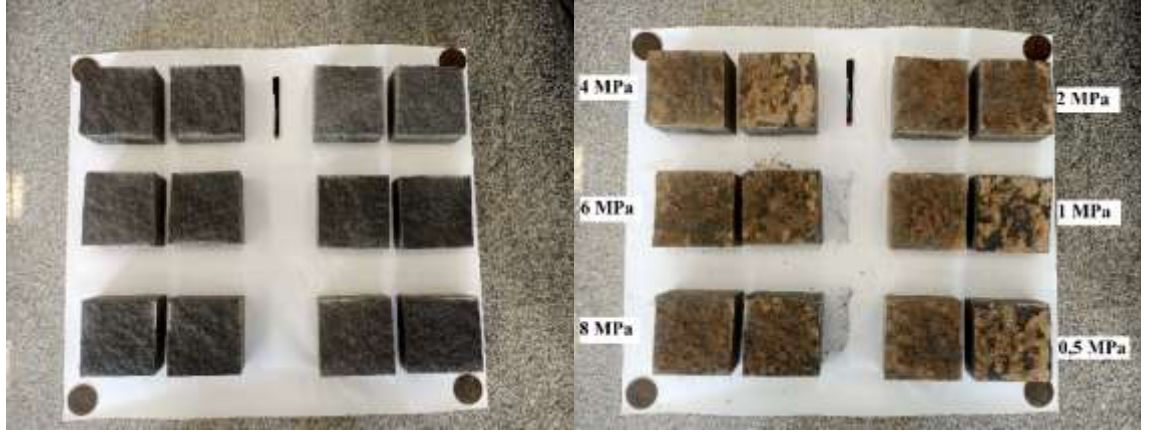
Deneyler sonucu elde edilen verilerden kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi grafikleri oluşturulmuş, grafiğin pik yaptığı noktalar doruk dinamik kesme dayanımı olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına ait efektif kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi (Şekil 4.8) ve kesme gerilmesi-normal gerilme (Şekil 4.9) grafikleri bu bölümde örnek olarak verilmiş, tüm deneylere ait grafikler Ek-1’de topluca sunulmuştur. Ayrıca numune setleri deneyler öncesi ve sonrasında fotoğraflanarak Ek-2’de topluca verilmiştir (Örn. Şekil 4.10).



Şekil 4.8 MY-1 Diyarbaz kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerine ait kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



Şekil 4.9 MY-1 Diyarbaz kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerine ait kesme gerilmesi-normal gerilme grafiğı



Şekil 4.10 MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünüşleri

Şekil 4.10’da her numunenin yanına dinamik kesme deneylerinde o numuneye uygulanan normal gerilme değerleri yazılmış ve aynı dizilim düzeni tüm fotoğraflamalarda uygulandığı için Ek-2’de verilen fotoğraflarda normal gerilme değerleri tekrar belirtilmemiştir.

Dinamik kesme deneylerinde, EK-2’de verilen deney sonrası resimlerden de görüleceği üzere, 18 adet numunede deney tekrarı yapılması zorunlu hale gelmiştir (Çizelge 4.10). Özellikle sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen deneylerde sıklıkla kayadan büyük boyutlu parça kopması, kayanın kısmen veya tamamen parçalanması, dolgulu kısımda bir hasar oluşmadan kayanın kenar kısımlarının kırılması ya da cihazın yükleme kapasitesini zorlayarak dolgu veya kayada herhangi bir hasar oluşturulamaması durumları ile karşılaşmıştır (Şekil 4.11). Bu durumda aynı koşullarda yeni bir numune hazırlanarak deney tekrarına gidilmiş ve beklenen şekilde gerçekleşmeyen deneylere ait sonuçlar kullanılmamıştır. Bu tarz yenilmelerin kayanın dayanımından yüksek dolgu dayanımları ile ilişkili olduğu açık olmakla birlikte, yapılan kesme deneyleri sonucunda dolgu malzemesi ile süreksizlik yüzeyi arasındaki bağlanma derecesinin de en az dayanım kadar önemli bir rol oynadığı çıkarımı yapılmıştır. Dinamik kesme deneyleri sırasında yapılan gözlemler, reçine bazlı dolgu malzemesinin, porselen alçısına kıyasla süreksizlik yüzeylerine daha iyi aderans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durumu destekler şekilde, sert dolgu malzemesi-2 ile yapılan deneylerde daha fazla sayıda deney tekrarının yapılması gerekmiştir. Ayrıca, sert dolgu malzemesi-1 ile yapılan deneylerde kesme yenilmeleri genellikle dolgu malzemesi ile süreksizlik yüzeyi arasındaki dokanakta

gelişirken, sert dolgu malzemesi-2 ile yapılan deneylerde yenilmelerin dolgu malzemesi ya da kayanın kendisinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum, Ek-2’de sunulan deney sonrası numune görselleri üzerinden yapılacak basit bir gözlemsel inceleme ile açıkça görülebilir. Yenilme mekanizmaları arasındaki bu farkın da büyük ölçüde aderans etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.10 Dinamik kesme deneylerinde deney tekrarı yapılan numuneler ve gerekçeleri

Kaya Kodu	Dolgu Malzemesi	Dolgu Kalınlığı	Normal Gerilme	Deney Tekrarının Nedeni
MY-1	Sert Dolgu-1	1 mm	6 MPa	Kayadan büyük parça kopması
MY-5	Sert Dolgu-1	3 mm	8 MPa	Kayadan büyük parça kopması
MY-1	Sert Dolgu-2	1 mm	1 MPa	Kayadan büyük parça kopması
MY-1	Sert Dolgu-2	1 mm	4 MPa	Kayadan büyük parça kopması
MY-1	Sert Dolgu-2	1 mm	6 MPa	Kaya veya dolguda yenilme gelişmemesi
MY-1	Sert Dolgu-2	3 mm	4 MPa	Kaya veya dolguda yenilme gelişmemesi
MY-1	Sert Dolgu-2	3 mm	8 MPa	Kaya veya dolguda yenilme gelişmemesi
MY-1	Sert Dolgu-2	5 mm	2 MPa	Kaya veya dolguda yenilme gelişmemesi
MY-1	Sert Dolgu-2	5 mm	6 MPa	Kayadan parça kopması, dolgunun yenilmemesi
MY-1	Sert Dolgu-2	5 mm	8 MPa	Kayadan parça kopması, dolgunun yenilmemesi
MY-2	Sert Dolgu-2	3 mm	4 MPa	Kayadan büyük parça kopması
MY-2	Sert Dolgu-2	3 mm	6 MPa	Kayadan parça kopması, dolgunun yenilmemesi
MY-6	Sert Dolgu-2	1 mm	2 MPa	Kaya veya dolguda yenilme gelişmemesi
MY-6	Sert Dolgu-2	1 mm	6 MPa	Kaya veya dolguda yenilme gelişmemesi
MY-6	Sert Dolgu-2	1 mm	8 MPa	Kayanın aşırı şekilde parçalanarak hasar görmesi
MY-6	Sert Dolgu-2	3 mm	8 MPa	Kayadan büyük parça kopması
MY-6	Sert Dolgu-2	5 mm	1 MPa	Kaya veya dolguda yenilme gelişmemesi
MY-6	Sert Dolgu-2	5 mm	8 MPa	Kayadan büyük parça kopması

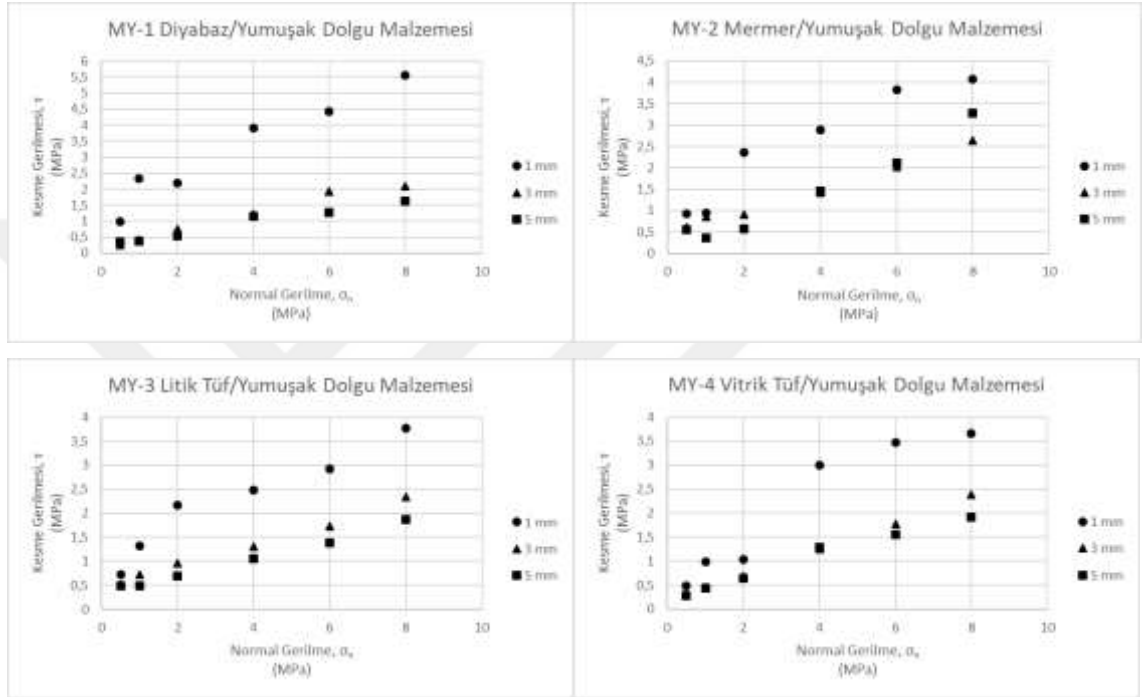


Şekil 4.11 Dinamik kesme deneylerinde kayadan büyük parça kopması (a), kayanın aşırı şekilde parçalanarak hasar görmesi (b) ve kayadan parça kopması ancak dolgu kısmının yenilmemesi (c) örnekleri

Ek-2’de ayrı ayrı verilen kesme gerilmesi-normal gerilme değer çiftleri, farklı dolgu kalınlıklarındaki deney sonuçları aynı grafikte olacak şekilde her kaya türü için ayrı olacak şekilde birleştirilerek, kesme dayanımlarının dolgu türü ve kalınlığına bağlı olarak nasıl bir değişim sergilediği görselleştirilmiştir (Şekil 4.12-14).

Yumuşak dolgu malzemesinin artan dolgu kalınlıklarında dinamik kesme dayanımının bariz bir şekilde azaldığı ve bu durumun dört farklı kaya türü için de geçerli olduğu tespit edilmiştir. Bu dayanım kaybı, birincil olarak, yumuşak dolgu malzemesinin kaya-kaya temas yüzeyini (dokanağını) fiziksel olarak kesmesi ve böylece pürüzlülüklerin mekanik kilitleme etkisini ortadan kaldırmasıyla açıklanmaktadır. Bu süreç, kesme direncinin kontrolünün büyük ölçüde pürüzlülüklerin geometrik özelliklerinden, dolgu malzemesinin düşük içsel kayma dayanımına (zayıf bir kaydırıcı tabaka veya lubrikasyon etkisi) geçmesine neden olmaktadır. 3 ve 5 mm dolgu kalınlıklarında gerçekleştirilen deney sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın, ancak 1 mm kalınlıktaki sonuçlardan belirgin şekilde farklı olması, dolgu malzemesinin yaklaşık 1-2 mm’yi aşan bir kritik

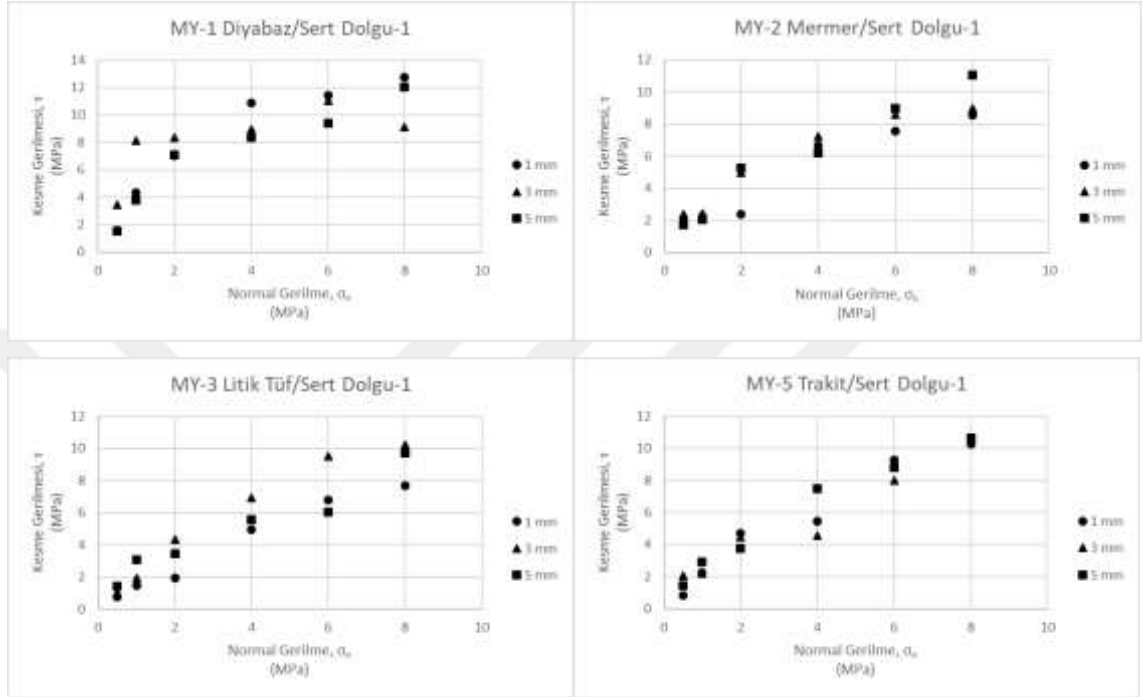
kalınlıktan sonra kesme davranışı ve dayanımı üzerindeki hâkim kontrol mekanizmasını tamamen ele aldığını doğrulamaktadır. Bu kritik geçiş kalınlığının daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi için, gelecekteki çalışmalarda dolgu kalınlığının özellikle 1-3 mm aralığında daha sık (örneğin, 0,5 mm'lik artışlarla) değiştirildiği bir deneysel programın tasarlanması gerekmektedir.



Şekil 4.12 Yumuşak dolgu malzemesi ile farklı kayalarda gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri

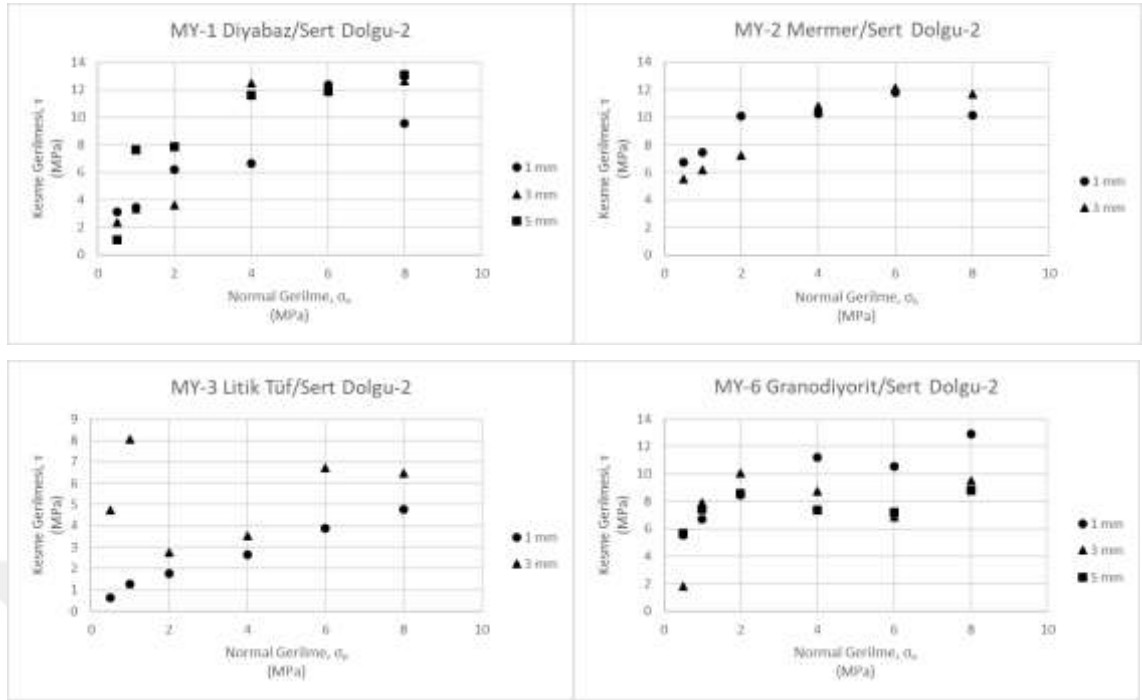
Sert dolgu malzemelerine ait grafikler incelendiğinde, farklı dolgu kalınlıklarında elde edilen kesme dayanımı değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca, sert dolgu malzemelerinde dolgu kalınlığındaki değişime bağlı olarak kesme dayanımında anlamlı bir artış ya da azalış eğilimi tespit edilememiş, hatta kesme dayanımı değerlerinin dolgu kalınlığına karşın neredeyse rastlantısal bir dağılım sergilediği gözlenmiştir. Bu iki gözlem, yumuşak dolgulardaki artan dolgu kalınlığının kaya-kaya kontağını azaltma etkisinin, sert dolgu malzemeleri varlığında önemini yitirdiğini düşündürmektedir. Her iki sert dolgu malzemesi kullanılarak MY-3 litik tüf kayasında gerçekleştirilen kesme deneylerinde, artan dolgu kalınlıklarıyla beraber kesme dayanımının sınırlı da olsa artış göstermesi, istisnai bir durum olarak nitelendirilebilir.

Yine de; litik t f n çalışma kapsamındaki kaya türleri arasında göreceli olarak en düşük tek eksenli sıkışma dayanımına sahip olması dışında, bu durumu açıklayabilecek başka bir parametreye ilişkin yeterli veri bulunmamaktadır.



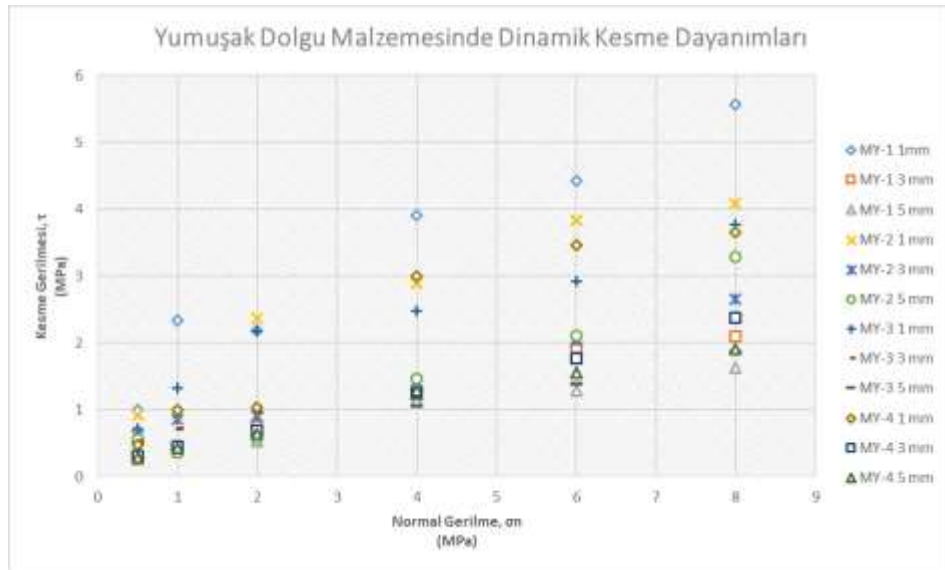
şekil 4.13 Sert dolgu malzemesi-1 ile farklı kayalarda gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri

Özetle, yumuşak dolgu malzemeleriyle elde edilen bulgular literatürde daha çok karşılaşılan statik koşullardaki çalışmalarla büyük ölçüde örtüşmüş, sert dolgu malzemelerinde ise kesin yargılara ulaşılamamıştır. Ancak, sert dolgularda günümüze kadar yapılmış sınırlı sayıda ki çalışmalar dikkate alındığında, elde edilen bulguların gelecekte yapılacak araştırmalar için değerli bir başlangıç noktası oluşturacağı düşünülmektedir.



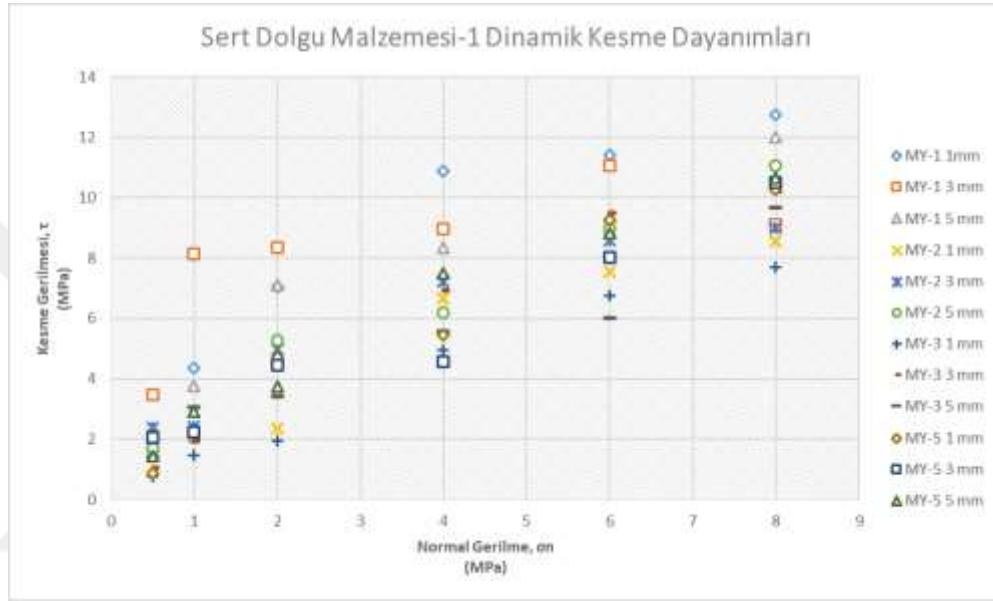
Şekil 4.14 Sert dolgu malzemesi-2 ile farklı kayalarda gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri

Her bir dolgu malzemesi için ayrı ayrı olacak şekilde, yapılan tüm deneylere ait kesme gerilmesi-normal gerilme çiftleri tek bir grafik üzerinde birleştirilerek farklı kayaçların kesme dayanımı üzerindeki etkisi de ayrıntılı olarak sunulmuştur (Şekil 4.15-17).



Şekil 4.15 Yumuşak dolgu malzemesi ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme çiftlerinin bir arada görünümü

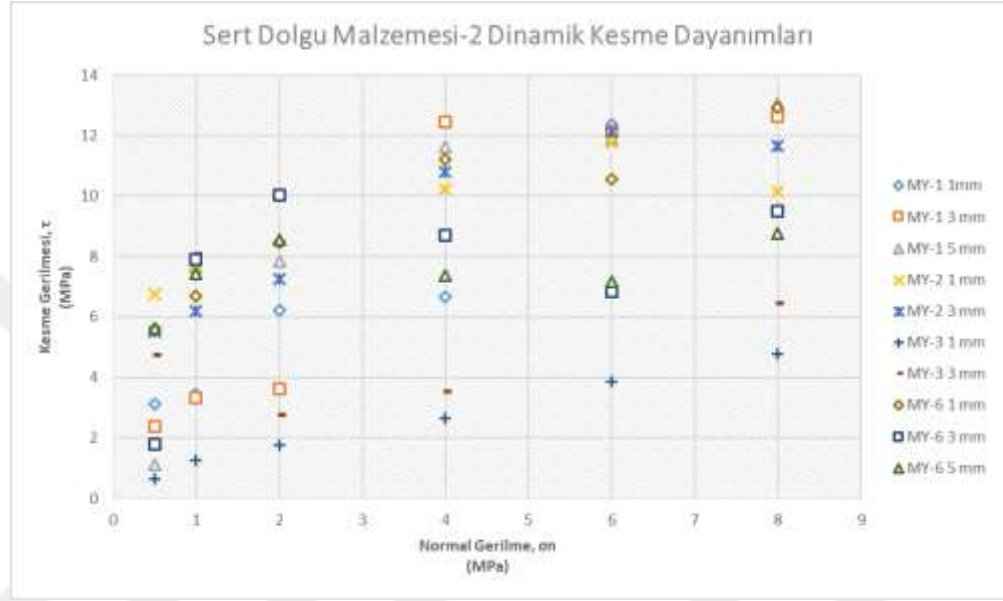
Kaya türleri açısından bakıldığında 1 mm yumuşak dolgu kalınlığında, elde edilen dinamik kesme dayanımları büyükten küçüğe doğru MY-1 diyabaz, MY-2 mermer, MY-4 vitrik tuf ve MY-3 litik tuf şeklinde sıralanmaktadır. Bu sıralamanın kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri ile paralellik göstermesi, dinamik kesme dayanımları üzerinde kayacın mekanik dayanımı ve süreksizlik özelliklerinin etkisini doğrulayıcı bir bulgu olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 4.16 Sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme çiftlerinin bir arada görünümü

Sert dolgu malzemesi-1 ile yapılan deneyler, kaya türleri göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, tüm dinamik kesme dayanımları arasında ilk üç sırayı MY-1 diyabaz kayasından elde edilen kesme dayanımlarının alması dikkat çekicidir. Özellikle MY-1'e kıyasla daha yüksek tek eksenli sıkışma dayanımına sahip MY-5 kayasında, hiçbir dolgu kalınlığında bu seviyelere ulaşamamış olması, sert dolgularda kesme davranışında dolgu kalınlığının belirleyici etkisinin azaldığını göstermektedir. Oysa yumuşak dolgu malzemesinde, aynı dolgu kalınlıklarına sahip farklı kaya türlerinin kesme dayanımları arasında belirgin bir yakınlık ve paralellik gözlenmiştir. Sert dolgu malzemesi-1 ile yapılan deneylerde ise bu eğilim bozulmuş, dolgu ile süreksizlik yüzeyi arasındaki aderans, dolgu kalınlığı ve kaya dayanımına kıyasla daha belirleyici bir faktör olarak öne çıkmıştır. MY-1 diyabaz kayasının taze kırık yüzey yapısı ile kullanılan sert

dolgu malzemelerinin kıvam ve yüzeye nüfuz etme özellikleri, elde edilen deney sonuçlarını ve yapılan çıkarımları desteklemektedir. Bununla birlikte, her iki sert dolgu malzemesi ile yapılan deneylerde en düşük kesme dayanımlarının MY-3 litik tüf kayasından elde edilmesi, kaya dayanımları arasındaki fark arttıkça bu parametrenin kesme dayanımı üzerindeki etkisinin yeniden belirginleştiğine işaret etmektedir.



Şekil 4.17 Sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deneylerinden elde edilen dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme çiftlerinin bir arada görünümü

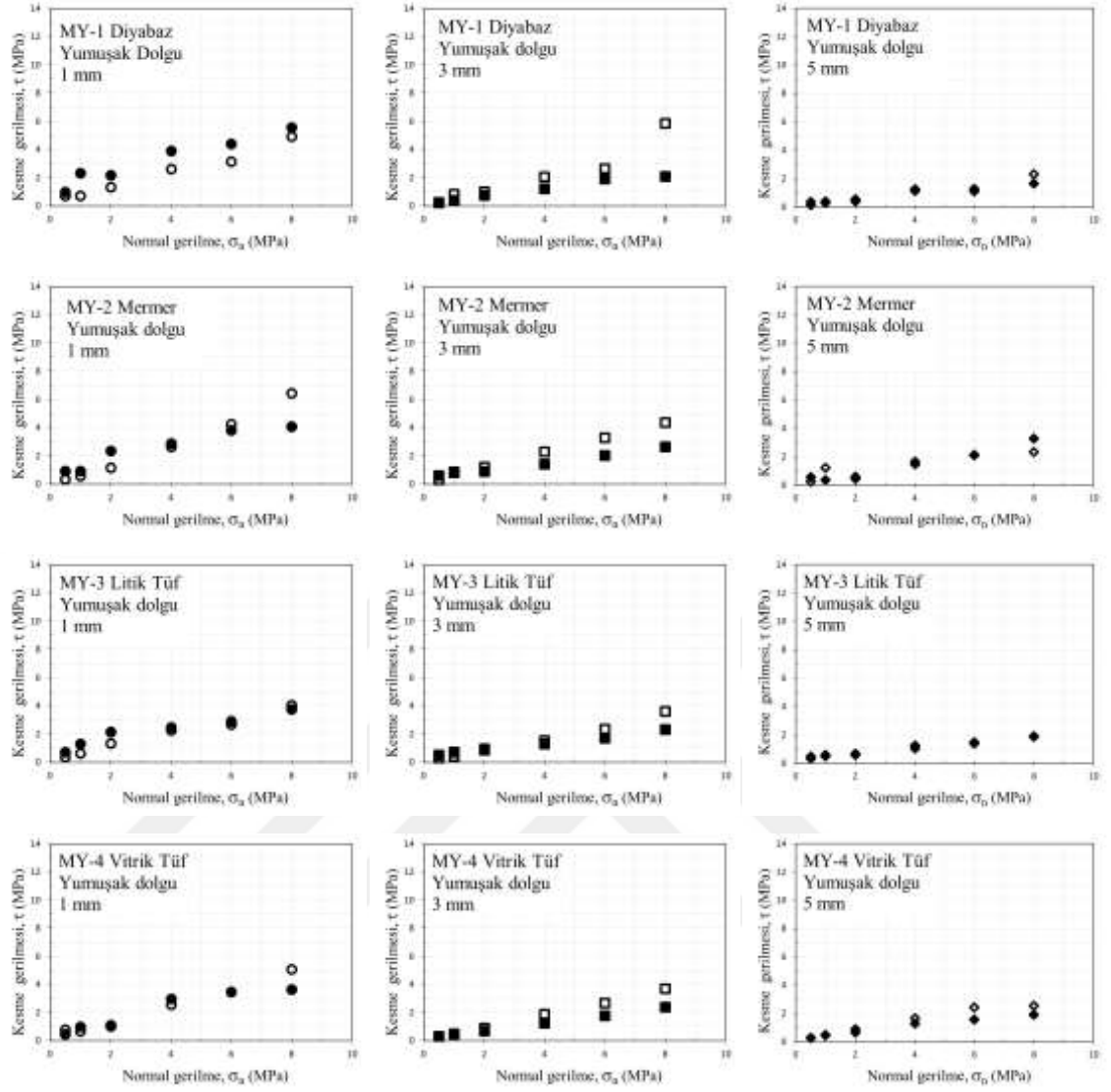
Sert dolgu malzemesi-2 ile yapılan deney sonuçları, büyük ölçüde sert dolgu malzemesi-1 ile elde edilen bulgularla örtüşmektedir. Özellikle MY-1'e kıyasla çok daha yüksek tek eksenli sıkışma dayanımına sahip olan MY-6 kayasının, bazı normal gerilme değerlerinde MY-1'den daha düşük, bazılarında ise daha yüksek kesme dayanımları sunması, kaya dayanımı parametresinin etkisinin fark açıldıkça belirginleştiğini güçlü biçimde ortaya koymuştur. Farklı kaya türleri ve dolgu kalınlıklarında benzer eğilimlerin gözlenmiş olması ise, önceki bulgulara dayalı çıkarımların doğruluğunu pekiştirmiştir.

4.8 Dolgulu Süreksizliklerin Statik ve Dinamik Kesme Dayanımlarının Karşılaştırılması

Doğal koşullarda kaya kütleleri doğal süreçler ve mühendislik uygulamalarına bağlı olarak statik yüklerin yanı sıra deprem, patlatma, trafik gibi farklı kaynaklardan gelen ani veya tekrarlayan dinamik yüklere de maruz kalmaktadır. Bu nedenle, dinamik yükler altındaki kesme davranışının incelenmesi, özellikle sismik aktivitelerin yoğun olduğu bölgeler için büyük önem taşımaktadır. Dinamik yükler süreksizlik yüzeyleri üzerindeki gerilme-deformasyon ilişkilerini, dolgu malzemesinin davranışını ve genel olarak kesme dayanımını etkileyebilir. Dolayısıyla, dinamik kesme dayanımının statik koşullara göre nasıl değiştiğinin anlaşılması, mühendislik çalışmaları için kritik olan mühendislik parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen dinamik kesme dayanımları, tez danışmanının yönetimindeki diğer tez çalışmasında (Üzgün, 2025) paralel olarak gerçekleştirilen statik kesme dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmada da aynı kayalar ve dolgu malzemeleri kullanılmış ve aynı yöntemlerle yapay dolgulu süreksizlik numuneleri oluşturulmuştur. Bu karşılaştırma sayesinde, statik yükler altında elde edilen kesme dayanımlarının, dinamik yüklemelerde nasıl farklılaştığı değerlendirilmiş olacaktır.

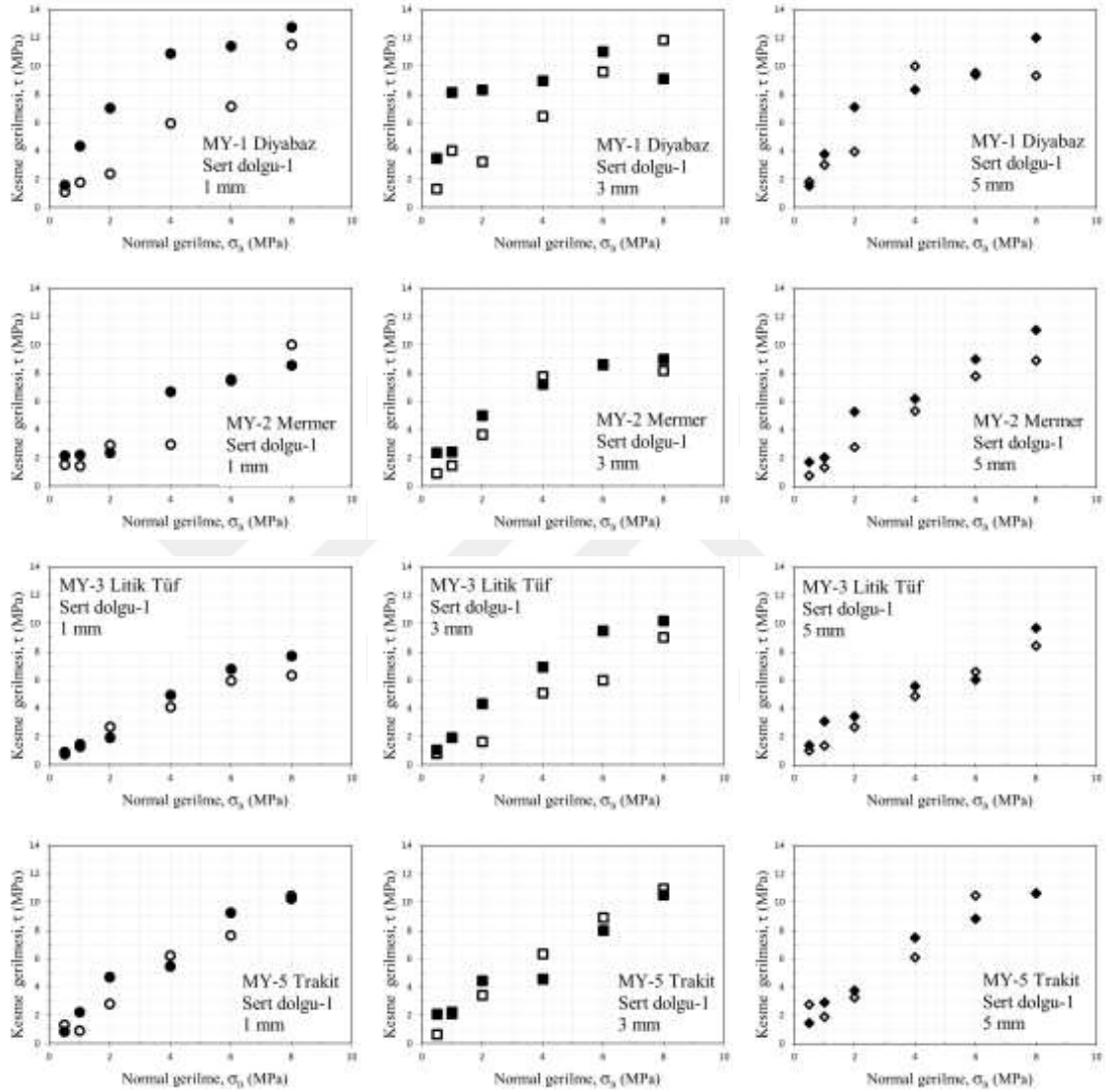
Bu çalışmada daha önce yalnızca dinamik koşullarda elde edilen verilerle hazırlanan kesme gerilmesi–normal gerilme grafiklerine, karşılaştırmalı analiz yapılabilmesi amacıyla statik yükleme altında elde edilen sonuçlar da eklenerek görselleştirilmiştir (Şekil 4.18-20).



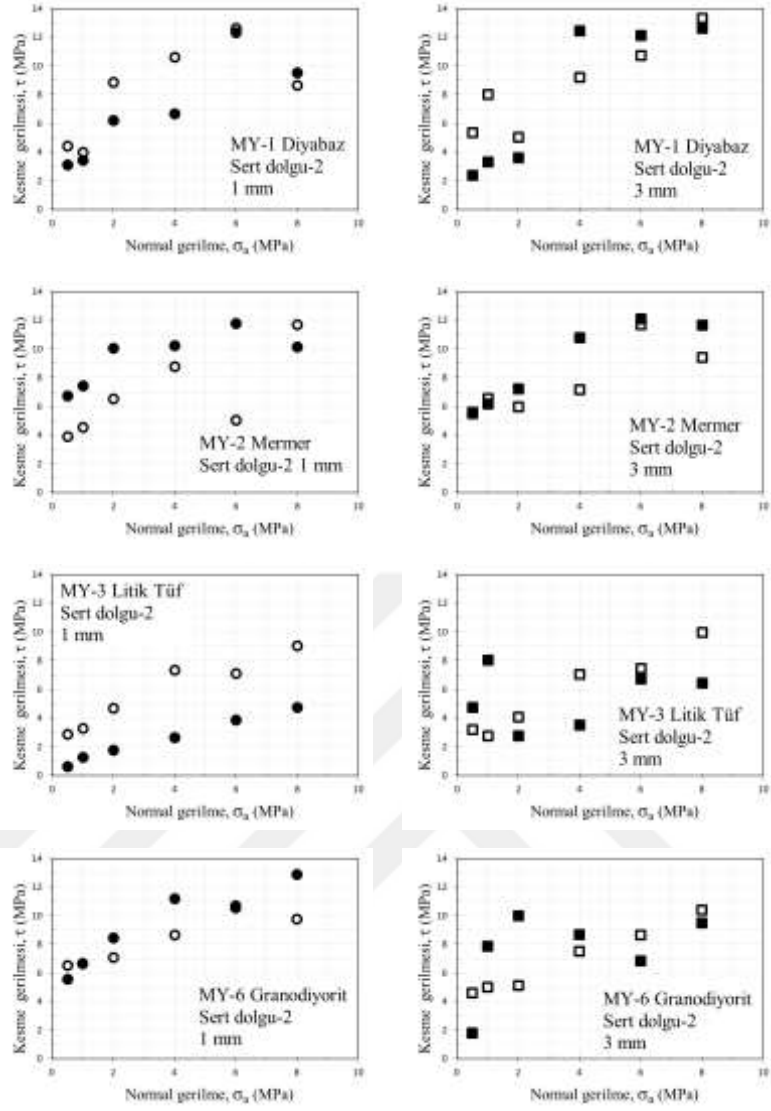
Şekil 4.18 Yumuşak dolgu malzemesinde statik ve dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri karşılaştırması (içi boş simgeler statik, dolgulu simgeler dinamik yüklerdir)

Yumuşak dolgulu yapay süreksizliklerde normal gerilme artışına karşı statik ve dinamik koşullarda elde edilen kesme gerilmelerindeki artış birbirlerine paralel bir görüntü sunmuştur (Şekil 4.18). Bu durum, kesme dayanımının normal gerilmeye bağlı değişiminin, yumuşak dolgu malzemesi açısından statik ve dinamik yükleme koşullarında büyük ölçüde benzerlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tüm kaya türlerinde, 5 mm yumuşak dolgu varlığında elde edilen statik ve dinamik kesme dayanımlarının büyük ölçüde çakışması ise, belirli bir eşik dolgu kalınlığının aşılması durumunda yumuşak dolgularda yükleme türünün (statik ya da dinamik) kesme dayanımı üzerinde anlamlı bir

fark yaratıp yaratmayacağı sorusunu gündeme getirmiştir. Ancak, bu çalışmada yalnızca tek bir tür yumuşak dolgu malzemesi kullanılmış olması, söz konusu soruya kesin ve genellenebilir bir yanıt verilmesini sınırlamaktadır.



Şekil 4.19 Sert dolgu malzemesi-1’de statik ve dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri karşılaştırması (içi boş simgeler statik, dolgulu simgeler dinamik yüklerdir)



Şekil 4.20 Sert dolgu malzemesi-2’de statik ve dinamik kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri karşılaştırması (içi boş simgeler statik, dolgulu simgeler dinamik yüklerdir)

Sert dolgu malzemelerinde yumuşak dolgudan farklı olarak, normal gerilme artışına bağlı kesme gerilmesi artışları az bir miktar daha düzensiz gelişmiştir (Şekil 4.19 ve 4.20). Bu düzensizliğin daha yüksek dayanıma sahip sert dolgu malzemesi-2’de göreceli olarak biraz daha belirgin olduğu gözlenmiştir.

Statik ve dinamik yükleme koşulları altında elde edilen kesme dayanımları arasındaki farkların nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla, her bir deney seti için dinamik kesme dayanımlarının statik kesme dayanımlarına göre yüzde değişimleri hesaplanmıştır

(Çizelge 4.11). Bu karşılaştırma, yükleme türüne bağlı olarak kesme dayanımında ortaya çıkan artış ya da azalışları sayısal olarak ortaya koymakta ve normal gerilme, dolgu türü, dolgu kalınlığı ile kaya tipi gibi parametrelerin bu değişime etkisini değerlendirme imkânı sunmaktadır. Karşılaştırmalar yapılırken genel eğilimler göz önünde bulundurulmuş, genel sonuçlardan çok fazla saparak istisnai durum oluşturan yüzde değişimleri değerlendirmeler esnasında dikkate alınmamıştır.

Yumuşak dolgu malzemesi kullanılarak yapılan deneylerde, tüm dolgu kalınlıkları dikkate alındığında, düşük normal gerilme seviyelerinde dinamik kesme dayanımı genel olarak statik kesme dayanımına kıyasla daha yüksek değerler vermiştir. Artan normal gerilmelerle birlikte bu fark azalmış, yüksek normal gerilme seviyelerinde ise birçok durumda statik kesme dayanımlarının dinamik değerlerin üzerine çıktığı gözlenmiştir. Bu durum, düşük normal gerilme koşullarında dinamik yüklemenin süreksizlik yüzeyinde ani bir temas etkisi yaratarak, kısa süreli olarak aderans ya da pürüz kilitlenmesini daha etkili hale getirebileceği şeklinde yorumlanabilir. Özellikle ince dolgu kalınlıklarında kaya–kaya kontağının kısmen korunuyor olması, bu ani zorlanmalarla birlikte geçici bir direnç artışına neden olmuş olabilir. Buna karşın, artan normal gerilmeyle birlikte temas yüzeylerinin daha fazla bastırılması, pürüzlerin kırılma riskini artırarak dinamik yükleme altında sistemin daha çabuk zayıflamasına yol açmış olabilir. Statik yüklemelerde ise yük yavaş ve dengeli aktarıldığından, temas yüzeyleri arasında daha sürdürülebilir bir sürtünme gelişmiş ve bu da yüksek normal gerilmelerde kesme dayanımını artırmış olabilir. Elde edilen bu sonuçlar, özellikle yükleme türü ile dolgu kalınlığı ve normal gerilme düzeyi arasındaki etkileşimin, kesme dayanımı üzerinde belirleyici olabileceğine işaret etmekte ve dinamik yükler altında süreksizlik davranışının statik yüklemelere göre farklılaşabileceğini göstermektedir. Ortalama değişim değerlerine bakıldığında 1 mm dolgu kalınlıklarında genel olarak dinamik kesme dayanımı daha yüksek iken, 3 mm dolgu kalınlıklarında statik kesme dayanımının daha yüksek olduğu söylenebilir. 5 mm dolgu kalınlığında yapılan deneylere ait sonuçlarda ise bu iki durumun arasında kalan bir eğilim gözlenmiştir. 5 mm kalınlığındaki dolgunun muhtemelen kaya-kaya temasını tamamen kesmiş olması, bu bulgunun temel sebeplerinden biri olarak değerlendirilebilir. Yani, mevcut malzeme ve deney koşullarında, dolgu kalınlığı arttıkça kesme dayanımlarında dinamik yüklemeler altında daha yüksek olan değerlerden, statik

yüklemeler altında daha yüksek değerlere doğru bir geçiş gözlenmiştir. Ancak, dolgu kalınlığının kaya-kaya temasını tamamen kesecek kritik eşik değerini aşmasıyla birlikte, bu genel düzenin dışında farklı mekanizmaların devreye girdiği ve sonuçların değerlendirmesinde bu mekanizmaların da göz önünde bulundurulması gerektiği düşünülmektedir.

Sert dolgu malzemeleri kullanıldığında genel olarak dinamik kesme dayanımları statik değerlere kıyasla daha yüksek sonuçlar vermiştir. Ancak, bazı istisnai durumlar da gözlenmiştir; örneğin, MY-1 diyabaz kayası ile 1 ve 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 kullanılarak yapılan deneylerde ve MY-3 litik tüf kayası ile 1 mm kalınlıkta aynı dolgu malzemesiyle yapılan deneyde, statik kesme dayanımları dinamik değerlere göre daha yüksek bulunmuştur. Belirli kaya ve dolgu eşleşmelerinde statik kesme dayanımının dinamik kesme dayanımından yüksek çıkması, dolgu ve kaya malzemelerinin pürüzlülük, sertlik ve aderans özelliklerinin dinamik yükleme koşullarıyla tam olarak uyum sağlamamasından kaynaklanabilir. Bu durum, dinamik yükleme sırasında temas yüzeyinde meydana gelen ani kırılmalar veya sürtünme kaybı gibi etkilerle ilişkili olarak gelişebilir. Sert dolgu malzemelerinde dolgu kalınlığındaki değişime bağlı olarak, statik ve dinamik kesme dayanımlarında anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu durum, sert dolgu malzemelerinin daha rijit bir yapı sunarak yük aktarım mekanizmasını dolgu kalınlığından bağımsız hâle getirebildiğini düşündürmektedir. Yükün büyük oranda doğrudan kaya yüzeylerine iletilmesi, dolgu kalınlığındaki değişimlerin kesme dayanımı üzerinde sınırlı etki yaratmasına neden olmuş olabilir. Yumuşak dolgu malzemelerinde gözlenen, düşük ve yüksek normal gerilme seviyeleri arasında statik ve dinamik kesme dayanımları bakımından ortaya çıkan üstünlük değişimi, sert dolgu malzemelerinde gözlenmemiştir. Daha rijit bir yapı sunan sert dolgu malzemelerinde bu durum da olağan bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.11 Dinamik kesme dayanımlarının, statik kesme dayanımları ile değişimi

Kaya/Dolgu	Dolgu Kalmılığı	σ_a (MPa)	$\tau_{dinamik}$ (MPa)	τ_{statik} (MPa)	Değişim (%)	Ortalama Değişim (%)
MY-1 Dişabaz / Yumuşak Dolgu	1 mm	0,5	0,99	0,73	36	69
		1	2,34	0,74	216	
		2	2,18	1,35	61	
		4	3,90	2,64	48	
		6	4,42	3,16	40	
		8	5,56	4,92	13	
	3 mm	0,5	0,26	0,22	18	-32
		1	0,41	0,84	-51	
		2	0,76	1,02	-25	
		4	1,22	2,06	-41	
		6	1,93	2,64	-27	
		8	2,10	5,86	-64	
	5 mm	0,5	0,35	0,13	169	38
		1	0,37	0,27	37	
		2	0,53	0,37	43	
		4	1,14	1,24	-8	
		6	1,28	1,11	15	
		8	1,63	2,29	-29	
MY-1 Dişabaz / Sert Dolgu Malzemesi-1	1 mm	0,5	1,58	1,12	41	89
		1	4,36	1,78	145	
		2	7,05	2,39	195	
		4	10,89	5,95	83	
		6	11,41	7,15	60	
		8	12,75	11,52	11	
	3 mm	0,5	3,48	1,31	166	76
		1	8,15	4,03	102	
		2	8,34	3,26	156	
		4	8,97	6,47	39	
		6	11,06	9,62	15	
		8	9,12	11,85	-23	
	5 mm	0,5	1,53	1,82	-16	17
		1	3,78	3,02	25	
		2	7,10	3,95	80	
		4	8,34	10,00	-17	
		6	9,37	9,52	-2	
		8	12,02	9,31	29	
MY-1 Dişabaz / Sert Dolgu Malzemesi-2	1 mm	0,5	3,13	4,44	-30	-17
		1	3,45	4,00	-14	
		2	6,22	8,86	-30	
		4	6,67	10,62	-37	
		6	12,35	12,63	-2	
		8	9,54	8,68	10	
	3 mm	0,5	2,38	5,36	-56	-17
		1	3,32	8,01	-59	
		2	3,61	5,04	-28	
		4	12,46	9,22	35	
		6	12,14	10,73	13	
		8	12,64	13,33	-5	

Çizelge 4.11 Dinamik kesme dayanımlarının, statik kesme dayanımları ile değişimi (devam)

Kaya/Dolgu	Dolgu Kalınlığı	σ_n (MPa)	τ_{dinamik} (MPa)	τ_{statik} (MPa)	Değişim (%)	Ortalama Değişim (%)
MY-2 Mermer / Yumuşak Dolgu	1 mm	0,5	0,92	0,34	171	49
		1	0,94	0,59	59	
		2	2,36	1,16	103	
		4	2,89	2,67	8	
		6	3,83	4,26	-10	
		8	4,08	6,45	-37	
	3 mm	0,5	0,61	0,32	91	-7
		1	0,86	0,80	7	
		2	0,91	1,22	-25	
		4	1,42	2,30	-38	
		6	2,03	3,29	-38	
		8	2,65	4,38	-39	
	5 mm	0,5	0,56	0,24	133	21
		1	0,36	1,21	-70	
		2	0,58	0,44	32	
		4	1,46	1,64	-11	
		6	2,11	2,13	-1	
		8	3,28	2,33	41	
MY-2 Mermer / Sert Dolgu Malzemesi-1	1 mm	0,5	2,16	1,51	43	32
		1	2,23	1,42	57	
		2	2,36	2,92	-19	
		4	6,67	2,96	125	
		6	7,55	7,47	1	
		8	8,55	10,00	-14	
	3 mm	0,5	2,37	0,91	160	44
		1	2,42	1,47	65	
		2	4,99	3,66	36	
		4	7,22	7,77	-7	
		6	8,58	8,63	-1	
		8	9,00	8,18	10	
	5 mm	0,5	1,71	0,74	131	55
		1	2,04	1,33	54	
		2	5,28	2,77	90	
		4	6,18	5,32	16	
		6	8,97	7,79	15	
		8	11,05	8,89	24	
MY-2 Mermer / Sert Dolgu Malzemesi-2	1 mm	0,5	6,75	3,92	72	54
		1	7,45	4,55	64	
		2	10,07	6,54	54	
		4	10,23	8,78	17	
		6	11,78	5,05	133	
		8	10,15	11,71	-13	
	3 mm	0,5	5,51	5,59	-1	15
		1	6,18	6,55	-6	
		2	7,24	5,99	21	
		4	10,80	7,19	50	
		6	12,11	11,71	3	
		8	11,66	9,42	24	

Çizelge 4.11 Dinamik kesme dayanımlarının, statik kesme dayanımları ile değişimi (devam)

Kaya/Dolgu	Dolgu Kalınlığı	σ_n (MPa)	τ_{dinamik} (MPa)	τ_{statik} (MPa)	Değişim (%)	Ortalama Değişim (%)
MY-3 Litik Tüf / Yumuşak Dolgu	1 mm	0,5	0,72	0,38	89	45
		1	1,32	0,64	106	
		2	2,17	1,34	62	
		4	2,48	2,29	8	
		6	2,92	2,68	9	
		8	3,76	4,05	-7	
	3 mm	0,5	0,52	0,32	63	11
		1	0,72	0,43	68	
		2	0,96	0,87	10	
		4	1,30	1,55	-16	
		6	1,72	2,35	-27	
		8	2,35	3,63	-35	
	5 mm	0,5	0,48	0,34	42	4
		1	0,49	0,59	-16	
		2	0,68	0,58	18	
		4	1,05	1,23	-14	
		6	1,39	1,46	-5	
		8	1,87	1,91	-2	
MY-3 Litik Tüf / Sert Dolgu Malzemesi-1	1 mm	0,5	0,76	0,91	-17	4
		1	1,47	1,30	13	
		2	1,93	2,68	-28	
		4	4,94	4,09	21	
		6	6,76	5,97	13	
		8	7,70	6,33	22	
	3 mm	0,5	1,06	0,80	32	50
		1	1,93	1,94	-1	
		2	4,34	1,65	163	
		4	6,93	5,09	36	
		6	9,51	5,98	59	
		8	10,20	9,04	13	
	5 mm	0,5	1,40	1,00	40	36
		1	3,07	1,37	124	
		2	3,42	2,67	28	
		4	5,58	4,85	15	
		6	6,02	6,58	-8	
		8	9,69	8,43	15	
MY-3 Litik Tüf / Sert Dolgu Malzemesi-2	1 mm	0,5	0,64	2,89	-78	-60
		1	1,27	3,29	-61	
		2	1,77	4,70	-62	
		4	2,65	7,34	-64	
		6	3,87	7,12	-46	
		8	4,76	9,06	-47	
	3 mm	0,5	4,75	3,21	48	18
		1	8,07	2,78	190	
		2	2,77	4,07	-32	
		4	3,53	7,05	-50	
		6	6,73	7,48	-10	
		8	6,46	9,97	-35	

Çizelge 4.11 Dinamik kesme dayanımlarının, statik kesme dayanımları ile değişimi (devam)

Kaya/Dolgu	Dolgu Kalınlığı	σ_n (MPa)	τ_{dinamik} (MPa)	τ_{statik} (MPa)	Değişim (%)	Ortalama Değişim (%)
MY-4 Vitrik Tuf / Yumuşak Dolgu	1 mm	0,5	0,48	0,78	-38	-2
		1	0,99	0,68	46	
		2	1,03	1,12	-8	
		4	2,99	2,58	16	
		6	3,46	3,48	0	
		8	3,65	5,07	-28	
	3 mm	0,5	0,31	0,33	-6	-23
		1	0,45	0,49	-8	
		2	0,69	0,89	-22	
		4	1,25	1,89	-34	
		6	1,77	2,67	-34	
		8	2,38	3,69	-36	
	5 mm	0,5	0,28	0,25	12	-18
		1	0,43	0,48	-10	
		2	0,64	0,88	-27	
		4	1,28	1,63	-21	
		6	1,55	2,43	-36	
		8	1,91	2,52	-24	
MY-5 Trakit / Sert Dolgu Malzemesi-1	1 mm	0,5	0,86	1,31	-34	31
		1	2,23	0,90	148	
		2	4,70	2,80	68	
		4	5,46	6,22	-12	
		6	9,26	7,65	21	
		8	10,26	10,45	-2	
	3 mm	0,5	2,07	0,64	223	36
		1	2,22	2,12	5	
		2	4,45	3,41	31	
		4	4,56	6,33	-28	
		6	8,02	8,92	-10	
		8	10,50	10,95	-4	
	5 mm	0,5	1,45	2,75	-47	5
		1	2,91	1,89	54	
		2	3,74	3,25	15	
		4	7,49	6,09	23	
		6	8,82	10,47	-16	
		8	10,65	10,60	0	
MY-6 Granodiyorit / Sert Dolgu Malzemesi-2	1 mm	0,5	5,56	6,54	-15	11
		1	6,69	6,65	1	
		2	8,45	7,10	19	
		4	11,21	8,67	29	
		6	10,56	10,70	-1	
		8	12,91	9,77	32	
	3 mm	0,5	1,80	4,60	-61	13
		1	7,89	5,03	57	
		2	10,02	5,14	95	
		4	8,70	7,52	16	
		6	6,85	8,67	-21	
		8	9,50	10,42	-9	

4.9 İstatistiksel Analizler ve Süreksizliklerin Dinamik Kesme Dayanımının Belirlenmesine Yönelik Ampirik Bir İlişkinin Geliştirilmesi

Çalışmada elde edilen deneysel veriler kullanılarak yumuşak dolgu malzemesi tek başına, sert dolgu malzemeleri birlikte ve tüm dolgu malzemeleri topluca değerlendirilerek, üç farklı durum için doğrusal ve doğrusal olmayan çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen doğrusal ve doğrusal olmayan modeller, henüz bağımsız bir deney veri seti ile doğrulanmamıştır. Dolayısıyla, sunulan ilişkiler doğrudan mühendislik tasarımına yönelik deterministik modeller olarak değil, deneysel gözlemleri tanımlamaya ve ilgili parametreler arasındaki etkileşimleri ortaya koymaya yönelik keşifsel modeller olarak değerlendirilmelidir.

Modellerin geçerliliği; tek bir deprem kaydı altında gerçekleştirilen dinamik yükleme koşulları ile sınırlı sayıda kaya türü, dolgu malzemesi, dolgu kalınlığı ve belirli pürüzlülük aralıklarıyla sınırlıdır. Bu bağlamda, farklı dinamik etkiler, pürüzlülük geometrileri ve dolgu koşulları için genellenebilirliğin ortaya konulabilmesi, ileride yapılacak doğrulama ve genişletilmiş deneysel çalışmalarla mümkün olacaktır.

4.9.1 Tüm veri seti ile çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri

Doğrusal Analiz: İstatistiksel analizlere çoklu doğrusal regresyon ile başlanmış, regresyonlar öncesinde bazı ön analizler yapılarak hem değişkenler değerlendirilmiş hem de doğrusal regresyon analizlerinin ön koşullarının sağlanıp sağlanmadığı durumlar kontrol edilmiştir. Verilerin dağılımları için SPSS yazılımı ile normallik testi yapılmış, Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk değerleri üzerinden değerlendirilmiştir (Çizelge 4.12).

Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk test sonuçlarına göre, veri setinin normal dağılıma uymadığı görülmüştür ($p < 0,05$). Ancak, bu analizde kullanılan toplam örneklem sayısının 204 olduğu dikkate alındığında, normallik testlerinin

yorumlanmasında dikkat edilmesi gereken önemli bir husus ortaya çıkmaktadır. Literatürde belirtildiği üzere, özellikle büyük örneklemelerde ($n > 30$), normallik testleri oldukça duyarlı hale gelmekte ve küçük sapmaları dahi istatistiksel olarak anlamlı kabul edebilmektedir (Field 2013; Tabachnick ve Fidell 2019). Bu durum, veri setinin pratikte parametrik analizler için uygun olmasına rağmen, teorik olarak normallik varsayımını ihlal etmiş gibi gözükmesine yol açmaktadır.

Çizelge 4.12 Normallik testi sonuçları

Değişkenler	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	İstatistik	df	Anlamlılık Sig.	İstatistik	df	Anlamlılık Sig.
Kaya Tek Eksenli Sıkışma	0,247	204	0,000	0,865	204	0,000
Normal Gerilme	0,220	204	0,000	0,857	204	0,000
t/a Oranı	0,185	204	0,000	0,911	204	0,000
Dolgu Kohezyonu	0,247	204	0,000	0,773	204	0,000
Dolgu İçsel Sürtünme Açısı	0,341	204	0,000	0,717	204	0,000
Süreksizlik Pürüzlülük Açısı	0,309	204	0,000	0,765	204	0,000
Süreksizlik Pürüzlülük Genliği	0,280	204	0,000	0,824	204	0,000
Dolgu Kalınlığı	0,227	204	0,000	0,848	204	0,000

Bu çalışmada veri yapısının gruplamalı (nested) ve tekrarlı ölçümler içermesi nedeniyle, normallik testleri bu karmaşık yapıyı tam olarak yansıtamamaktadır. Büyük örneklemelerde verilerin dağılımı normal olmasa bile, örneklem ortalamalarının dağılımının normal dağılıma benzeyeceğini ifade eden Merkezi Limit Teoremi'ne göre, yeterince büyük örneklem büyüklüğüne sahip çalışmalarda, dağılımın çarpık olması parametrik testlerin geçerliliğini önemli ölçüde etkilememektedir (Pallant, 2016). Bu nedenlerle, normallik varsayımının değerlendirilmesinde yalnızca p değerlerine değil; verilerin çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) değerlerine de bakılmıştır (Çizelge 4.13). Yapılan incelemede, tüm değişkenlerin çarpıklık ve basıklık değerlerinin ± 2 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Literatürde çarpıklık ve basıklık sınırları konusunda farklı görüşler olmakla beraber George ve Mallery (2010) çarpıklık ve basıklık değerleri ± 2 aralığında olan değişkenlerin normal dağılıma makul bir yakınlık gösterdiğini ve parametrik testler için genellikle kabul edilebilir olduğunu belirtmiştir.

Çizelge 4.13 Değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler ile çarpıklık ve basıklık katsayıları

		Kaya Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı		Normal Gerilme		t/a Oranı	
		İstatistik	Std.	İstatistik	Std.	Std.	Std.
Ortalama		67,515	1,725	3,583	0,191	1,249	0,052
Ortalama için % 95 güven	Alt sınır	64,114		3,208		1,147	
	Üst	70,915		3,959		1,350	
%5 kırılmış ortalama		66,978		3,509		1,219	
Medyan		66,800		3,000		1,150	
Varyans		606,786		7,404		0,541	
Standart sapma		24,633		2,721		0,736	
Minimum		30,000		0,500		0,320	
Maximum		114,700		8,000		2,700	
Aralık		84,700		7,500		2,380	
Çeyrekler arası aralık		13,000		5,000		1,190	
Çarpıklık katsayısı		-0,129	0,170	0,418	0,170	0,390	0,170
Basıklık katsayısı		-0,443	0,339	-1,296	0,339	0,899	0,339

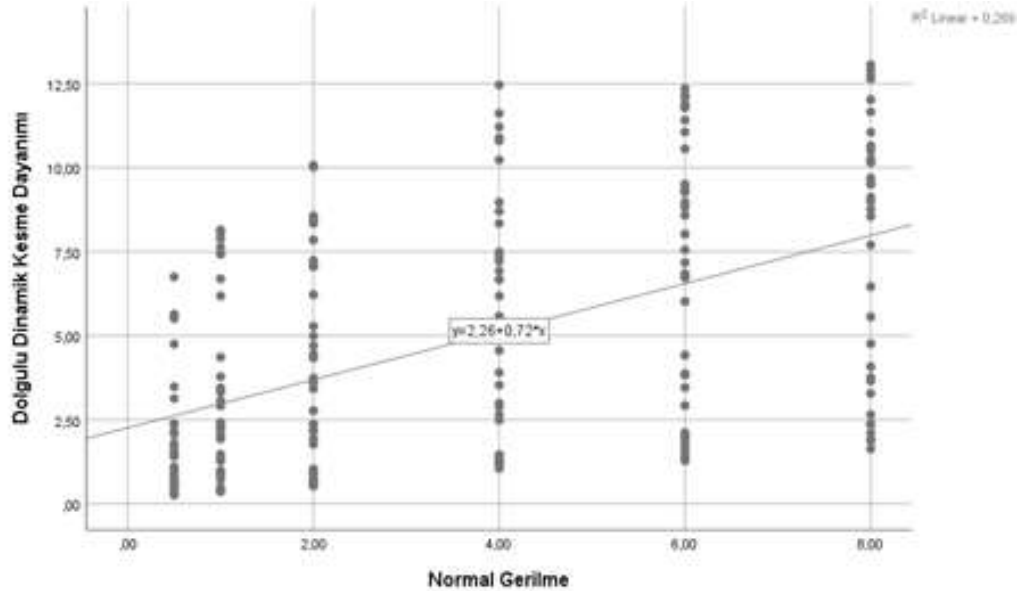
Çizelge 4.13 Değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler ile çarpıklık ve basıklık katsayıları (devamı)

		Dolgu Kohezyonu		Dolgu İçsel Sürtünme Açısı		Süreksizlik Pürüzlülük Açısı	
		İstatistik	Std.	İstatistik	Std.	Std.	Std.
Ortalama		2,654	0,148	49,365	1,329	15,519	0,073
Ortalama için % 95 güven	Alt sınır	2,363		46,745		15,376	
	Üst	2,945		51,985		15,663	
%5 kırılmış ortalama		2,670		49,728		15,539	
Medyan		3,000		59,000		15,870	
Varyans		4,448		360,176		1,081	
Standart sapma		2,109		18,978		1,040	
Minimum		0,020		24,200		14,040	
Maximum		5,000		68,000		16,640	
Aralık		4,980		43,800		2,600	
Çeyrekler arası aralık		4,980		43,800		2,360	
Çarpıklık katsayısı		-0,204	0,170	-0,506	0,170	-0,544	0,170
Basıklık katsayısı		-1,597	0,339	-1,608	0,339	-1,441	0,339

Çizelge 4.13 Değişkenlere ait tanımlayıcı istatistikler ile çarpıklık ve basıklık katsayıları (devamı)

		Süreksizlik Pürüzlülük Genliği		Dolgu Kalınlığı	
		İstatistik	Std. Hata	İstatistik	Std. Hata
Ortalama		2,274	0,028	2,759	0,108
Ortalama için % 95 güven aralığı	Alt sınır	2,220		2,547	
	Üst sınır	2,328		2,971	
%5 kırılmış ortalama		2,260		2,741	
Medyan		2,150		3,000	
Varyans		0,154		2,363	
Standart sapma		0,393		1,537	
Minimum		1,850		0,830	
Maximum		2,940		5,000	
Aralık		1,090		4,170	
Çeyrekler arası aralık		0,770		3,110	
Çarpıklık katsayısı		0,275	0,170	0,138	0,170
Basıklık katsayısı		-1,548	0,339	-1,351	0,339

Doğrusal regresyon analizinin bir diğer ön koşulu olan verilerin doğrusallık varsayımını test etmek amacıyla bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki ANOVA tabanlı doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenler analizi ile değerlendirilmiş; ayrıca scatter plot grafiklerinden yararlanılarak görsel inceleme yapılmıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 Doğrusallık testi için oluşturulan grafik örneği

Yapılan ANOVA doğrusallık testinde bağımlı değişken ile kaya tek eksenli sıkışma dayanımı, normal gerilme, dolgu kohezyonu ve içsel sürtünme açısı, pürüzlülük genliği bağımsız değişkenleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir doğrusal ilişki olduğu belirlenmiştir. Aynı testlerde kaya sıkışma dayanımı, dolgu kohezyonu ve pürüzlülük genliği parametrelerinde ilişkinin genelde doğrusal olmasına rağmen doğrusallıktan sapma olduğu da tespit edilmiştir. Bu sapmalar saçılım grafikleri ile incelenmiş ve önemli miktarda olmadıkları değerlendirilmiştir. Pürüzlülük açısı, dolgu kalınlığı ve t/a oranı parametrelerinde doğrusal ilişkinin sağlıklı olmadığı ve doğrusallıktan sapmalar olduğu belirlenmiştir.

Bağımlı değişken ve tüm bağımsız değişkenler arasında korelasyon analizi gerçekleştirilerek değişkenler arası ilişkiler detaylı şekilde incelenmiş ve çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) riskleri değerlendirilmiştir (Çizelge 4.14).

Çizelge 4.14 Tüm veriler dâhil Pearson korelasyon analizlerine ait sonuçlar

		Dinamik Kesme Dayanımı	Kaya UCS	Normal Gerilme	t/a Oranı	Dolgu Kohezyon	Dolgu İçsel Sürtünme Açısı	Pürüzlülük Açısı	Pürüzlülük Genliği	Dolgu Kalınlığı
Dinamik Kesme Dayanımı	Pearson Correlation	1	.336**	.519**	-.018	.526**	.653**	.073	.147*	.003
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.793	.000	.000	.301	.038	.979
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
Kaya UCS	Pearson Correlation	.336**	1	.800	-.049	.120	.238**	-.128	.502**	.083
	Sig. (2-tailed)		.000	1.000	.491	.088	.001	.067	.000	.239
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
Normal Gerilme	Pearson Correlation	.519**	.800	1	-.040	.000	.000	.000	.000	-.041
	Sig. (2-tailed)		.000	1.000	.570	1.000	1.000	1.000	1.000	.561
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
t/a Oranı	Pearson Correlation	-.018	-.049	-.040	1	.058	-.004	.164*	-.278**	.943**
	Sig. (2-tailed)		.793	.491	.570	.410	.955	.019	.000	.000
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
Dolgu Kohezyon	Pearson Correlation	.526**	.120	.000	.058	1	.835**	.259**	.115	.089
	Sig. (2-tailed)		.000	1.000	.410	.000	.000	.000	.100	.210
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
Dolgu İçsel Sürtünme Açısı	Pearson Correlation	.653**	.238**	.000	-.004	.835**	1	.252**	.164*	.031
	Sig. (2-tailed)		.000	.001	.955	.000	.000	.019	.056	.856
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
Pürüzlülük Açısı	Pearson Correlation	.073	-.128	.000	.164*	.259**	.252**	1	-.413**	.047
	Sig. (2-tailed)		.301	.067	.019	.000	.000	.000	.000	.509
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
Pürüzlülük Genliği	Pearson Correlation	.147*	.502**	.000	-.278**	.115	.164*	-.413**	1	.013
	Sig. (2-tailed)		.038	.000	.000	.100	.056	.000	.000	.859
	N		204	204	204	204	204	204	204	204
Dolgu Kalınlığı	Pearson Correlation	.003	.083	-.041	.943**	.089	.031	.047	.013	1
	Sig. (2-tailed)		.979	.239	.000	.210	.856	.509	.859	
	N		204	204	204	204	204	204	204	204

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Analizlerden t/a oranı, pürüzlülük açısı ve dolgu kalınlığı parametrelerinin dinamik kesme dayanımı ile çok düşük korelasyon katsayısına sahip olduğu; dolayısıyla kesme dayanımı üzerinde önemli bir etkilerinin olmadığı belirlenmiştir. t/a oranı ile dolgu

kalınlığı arasındaki 0,943 korelasyon katsayısı, dolgu kohezyonu ile dolgu içsel sürtünme açısı arasındaki 0,835 korelasyon katsayısı değerleri ise potansiyel çoklu doğrusallık problemine işaret etmektedir. Doğrusallık ve çoklu doğrusallık bir arada değerlendirilerek, doğrusal regresyon analizinden t/a oranı, pürüzlülük açısı, dolgu kalınlığı ve dolgu kohezyonu parametreleri çıkartılmıştır.

Ön koşulların değerlendirilmesi sonrası dinamik kesme dayanımı bağımlı değişken, kaya tek eksenli sıkışma dayanımı, normal gerilme, dolgu içsel sürtünme açısı ve pürüzlülük genliği bağımsız değişkenler olarak tanımlanarak tüm veriler ile çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.15). Bağımlı değişken sayısının 4'e indirilmesine rağmen düzeltilmiş R^2 değerinin 0,728 olarak elde edilmesi, özellikle kaya mekaniği gibi karmaşık bir alanda açıklama oranı yüksek ve güçlü bir model oluşturulduğunu göstermektedir. Durbin-Watson testi sonucunda elde edilen 1,092 değeri model artıklarında pozitif otokorelasyon olabileceğine işaret etmektedir. Bu durum, artıkların bağımsızlığı varsayımını zayıflatmakta ve regresyon modelinin tahmin sonuçlarının güvenilirliğini etkileyebilmektedir. Bu nedenle, modelin daha sağlam hale getirilmesi için, ileride yapılacak analizlerde doğrusal olmayan regresyon yöntemlerinin de denenmesi ve alternatif model yapılarına başvurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.15 Tüm veriler dâhil çoklu doğrusal regresyon model özeti

Model Özeti ^b					
Model	R	R Kare	Düzeltilmiş R Kare	Tahminin Standart Hatası	Durbin-Watson
1	0,857 ^a	0,734	0,728	1,956	1,092
a. Tahmin ediciler: (Sabit), Pürüzlülük Genliği, Normal Gerilme, Dolgu İçsel Sürtünme Açısı, Kaya UCS					
b. Bağımlı Değişken: Dinamik kesme dayanımı					

Modelin genel anlamlılığını test edebilmek için Çizelge 4.16'da verilen ANOVA tablosu incelendiğinde toplam varyansın önemli bir kısmının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığı görülmektedir. Elde edilen anlamlılık değeri ile yüksek F değeri regresyon modelinin istatistiksel olarak son derece anlamlı ve güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin tesadüfi olmadığını ve modelin güçlü bir açıklayıcılığa sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.16 Tüm veriler dâhil çoklu doğrusal regresyon ANOVA tablosu

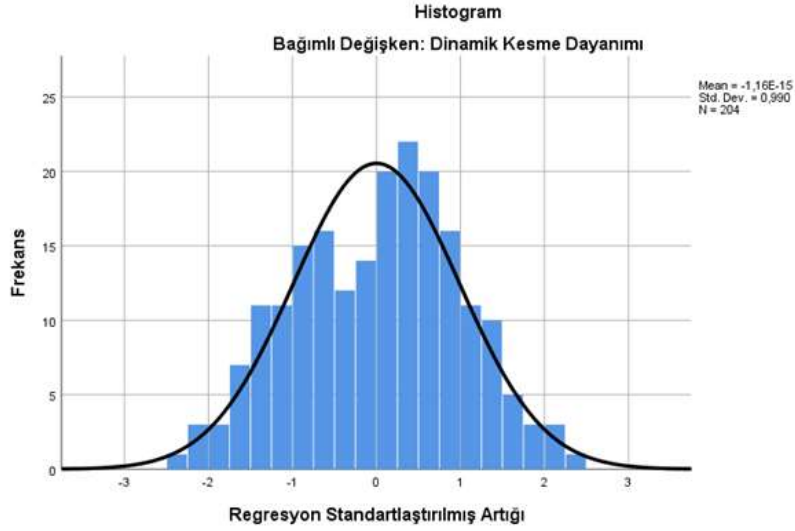
ANOVA ^a						
Model		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kare	F	Anlamlılık (Sig.)
1	Belirleme	2097,244	4	524,311	137,059	0,000 ^b
	Kalıntı	761,263	199	3,825		
	Toplam	2858,506	203			
a. Bağımlı Değişken: Dinamik kesme dayanımı						
b. Tahmin ediciler: (Sabit), Pürüzlülük Genliği, Normal Gerilme, Dolgu İçsel Sürtünme Açısı, Kaya UCS						

Çizelge 4.17’de regresyon katsayıları incelendiğinde, bağımsız değişkenlerden pürüzlülük genliğinin anlamlılık düzeyi $p > 0,05$ bulunmasına rağmen, bu değişkenin literatürde ve laboratuvar deneylerinde bağımlı değişken üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, söz konusu değişkenin modelde tutulması uygun görülmüştür. Regresyon analizinin ön aşamalarında yapılan dikkatli değerlendirmeler sayesinde, çok düşük VIF (Variance Inflation Factor) değerleri elde edildiği ve buna göre çoklu doğrusal bağlantı riskinin olmadığı görülmektedir. Modele etkisi yüksek olan gözlemler ve çok değişkenli uç değerler, Mahalanobis Distance ve Cook's Distance değerleri üzerinden kontrol edilmiştir. Maksimum Mahalanobis Distance değerinin 7,272 olduğu görülmüştür. Bu değer, dört bağımsız değişken için %99,9 güven seviyesindeki kritik ki-kare sınırı olan 18,47 değerinin oldukça altında kalmaktadır. Ayrıca, Cook's Distance değerlerinin maksimumu 0,042 olup, literatürde kabul edilen 1,0 sınırının oldukça altında bir seviyededir. Özetle, modeli bozan aşırı etkili gözlem veya uç değer tespit edilmemiştir.

Çizelge 4.17 Tüm veriler dâhil çoklu doğrusal regresyon katsayılar tablosu

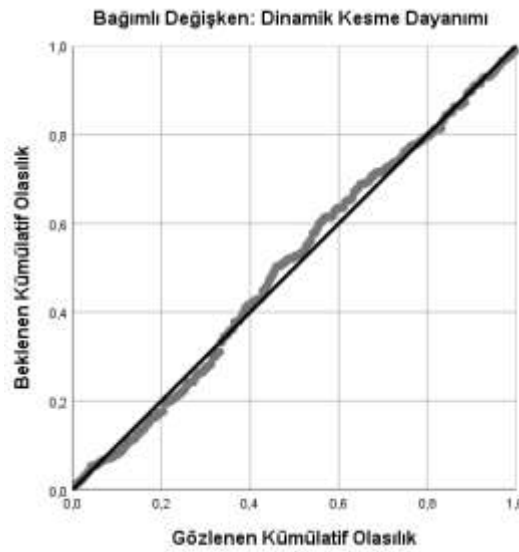
Katsayılar ^a									
Model	Standardize Edilmemiş Katsayılar		Standardize Katsayılar	t	Anlamlılık (Sig.)	B için %95 Güven Aralığı		Çoklu Doğrusallık İstatistikleri	
	B	Std Hata				Alt Sınır	Üst Sınır	Tolerans	VIF
(Sabit)	-4,590	0,860		-5,335	0,000	-6,286	-2,893		
Kaya UCS	0,034	0,007	0,223	5,191	0,000	0,021	0,047	0,723	1,382
Normal Gerilme	0,715	0,050	0,519	14,180	0,000	0,616	0,815	1,000	1,000
Dolgu içsel sürtünme açısı	0,121	0,007	0,611	16,194	0,000	0,106	0,135	0,941	1,063
Pürüzlülük Genliği	-0,620	0,404	-0,065	-1,532	0,127	-1,417	0,178	0,746	1,340
a. Bağımlı Değişken: Dinamik kesme dayanımı									

Regresyon artıklarının normal dağılıma uygunluğu, standartlaştırılmış artıkların histogramı ile değerlendirilmiş ve hata terimlerinin normal dağılım varsayımını destekleyen simetrik bir dağılım gözlemlenmiştir (Şekil 4.22).



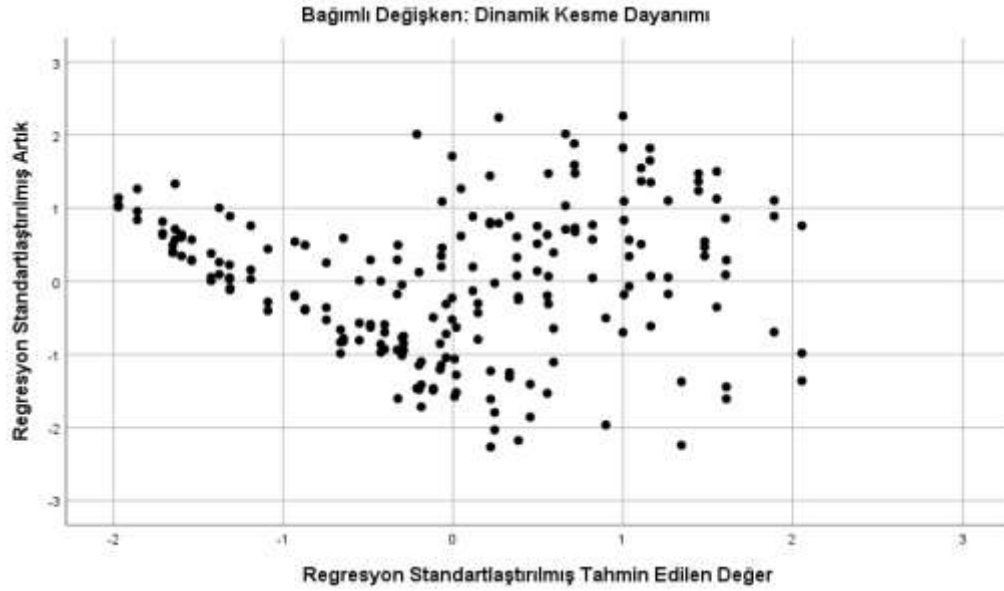
Şekil 4.22 Çoklu doğrusal regresyon analizinde tahminlere ait hataların histogram grafiği

Aynı durum Normal P-P Plot grafiğinde standartlaştırılmış artıkların beklenen doğrusal dağılım çizgisine oldukça yakın sıralanmasıyla da teyit edilmiş ve bu sonuç hata terimlerinin normal dağılım varsayımını desteklemiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 Regresyon standartlaştırılmış artıklarının Normal P-P grafiği

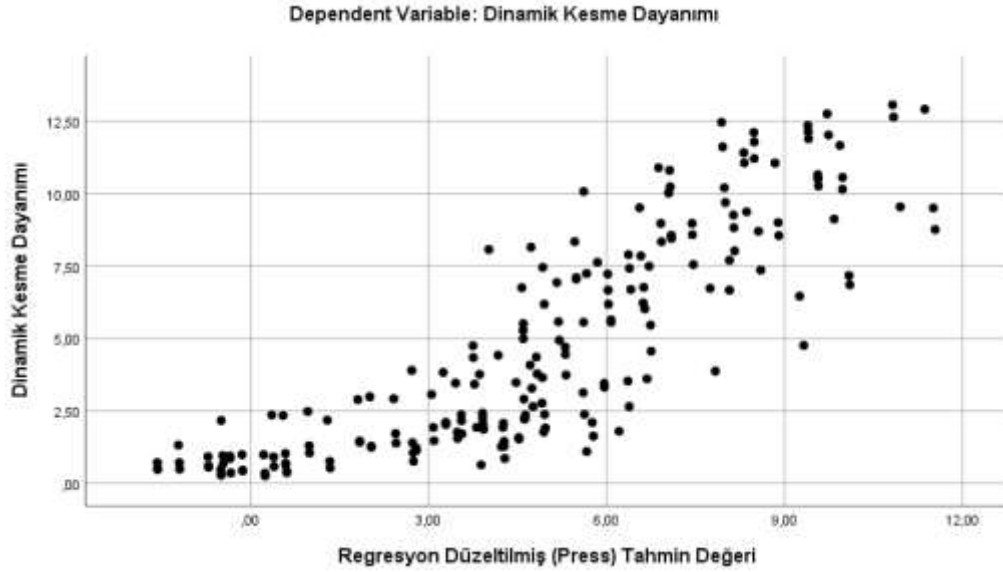
Regresyon modeline ait artıkların (hataların) tahmin edilen değerlere karşı dağılımı ideal olarak rastgele bir dağılım sergilemesi beklenir. Şekil 4.24 incelendiğinde artıkların tamamen rasgele dağılmadığı ve özellikle negatif tahmin edilen değerler bölgesinde hata varyansında bir sıkışma eğilimi olduğu gözlenmiştir. Bu durum modelde hafif bir heteroscedasticity (değişen varyans) sorunu olabileceğine işaret etmektedir. Ancak, gözlenen bu durum analiz sonuçlarının genel geçerliliğini ciddi şekilde etkileyecek düzeyde değildir. Yine de modelin bazı veri aralıklarında yeterli doğrusal yapı kuramayabileceği dikkate alınarak, bu çalışmada doğrusal olmayan regresyon analizleri de uygulanarak model performansı farklı yapılar üzerinden değerlendirilmiştir.



Şekil 4.24 Regresyon modeline ait standartlaştırılmış artıkların tahmin edilen değerlere karşı dağılımı

Regresyon Düzeltimi (PRESS) ile gözlenen değerler'in karşılaştırıldığı grafikte, regresyon modelinin çapraz doğrulama amacıyla elde edilen PRESS tahmin değerleri ile gözlenen dinamik kesme dayanımı değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir (Şekil 4.25). PRESS (Prediction Sum of Squares), modelin çapraz doğrulama performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan bir hata ölçüm yöntemidir. PRESS değeri her bir gözlemin model dışında bırakılarak tahmin edilmesi sonucu oluşan hata karelerinin toplamı üzerinden hesaplanır ve modelin yeni gözlemler üzerindeki tahmin başarısını göstermek için kullanılır. Noktaların genel eğilimi, modelin tahmin gücünün yüksek

olduğunu ve gözlenen değerleri başarılı bir şekilde öngörebildiğini göstermektedir. Ancak, özellikle yüksek dayanım değerlerinde tahmin hatalarının arttığı ve modelin bu uç değerler üzerinde daha sınırlı bir performans sergileyebileceği gözlemlenmiştir. Buna rağmen genel eğilim, modelin tahmin performansının tatmin edici seviyede olduğunu ve veri setinin büyük bölümünde güvenilir tahminler sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.25 Bağımlı değerler ile regresyon düzeltimi (PRESS) tahmin değerlerinin karşılaştırma grafiği

Çizelge 4.17’de verilen katsayılar kullanılarak, yumuşak ve sert dolgu malzemelerine ait veriler üzerinden çoklu doğrusal regresyon analizi sonucu tahmin denklemi oluşturulmuş ve 0,728 belirlenme katsayısı elde edilmiştir:

$$\tau_{din} = 0,034 UCS + 0,715 \sigma_n + 0,121 \phi_{dolgu} - 0,620 a - 4,590 \quad (4.1)$$

Doğrusal Olmayan Analiz: Çoklu doğrusal regresyon ile oluşturulan modelin bazı veri aralıklarında yeterli doğrusal ilişkiyi sağlayamadığı tespit edildiğinden, çalışmada çoklu doğrusal olmayan analizler de yapılmış ve en yüksek belirlenme katsayısına sahip, en kararlı modelin oluşturulması hedeflenmiştir.

Doğrusal olmayan regresyon analizleri öncesinde, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki monotonik ilişkileri incelemek amacıyla bu defa Spearman sıralama korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.18). Bu analiz, verilerin doğrusal dağılım varsayımını sağlamadığı durumlarda değişkenler arasındaki güçlü ilişkilerin tespitine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 4.18 Tüm veriler dâhil Spearman korelasyon analizlerine ait sonuçlar

		Correlations									
		Oranlık Kesme Dağılımı	Kıya UCS	Normal Gerilme	İla Oran	Dolgu Kohezyon	Dolgu içsel Sürtünme Açısı	Faizitlik Açısı	Faizitlik Genliği	Dolgu Kılınçlığı	
Spearman's rho	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	1.000	.292**	.549**	-.075	.335**	.639**	.629	.116	.086
		Sig. (2-tailed)		.009	.000	.366	.000	.000	.000	.098	.347
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
Kıya UCS	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	.292**	1.000	.000	.004	.132	.241**	.555	.191**	.124
		Sig. (2-tailed)		.000	1.000	.960	.061	.001	.435	.006	.077
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
Normal Gerilme	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	.549**	.000	1.000	-.044	.000	.000	.000	.000	-.042
		Sig. (2-tailed)		.000	1.000	.530	1.000	1.000	1.000	1.000	.555
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
İla Oran	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	-.075	.004	-.044	1.000	.081	-.025	.006	-.317**	.304**
		Sig. (2-tailed)		.366	.530		.249	.721	.222	.000	.000
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
Dolgu Kohezyon	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	.335**	.132	.000	.081	1.000	.545**	.252**	.121	.246**
		Sig. (2-tailed)		.000	.961	1.000	.249	.000	.000	.006	.000
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
Dolgu içsel Sürtünme Açısı	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	.639**	.241**	.000	-.075	.545**	1.000	.154*	.160*	.167*
		Sig. (2-tailed)		.000	.961	.530	.000	.000	.027	.032	.025
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
Faizitlik Açısı	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	.629	.555	.000	.086	.252**	.154*	1.000	-.039	.076
		Sig. (2-tailed)		.000	.960	.322	.000	.027		.577	.282
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
Faizitlik Genliği	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	.116	.191**	.000	-.317**	.121	.160*	-.039	1.000	.032
		Sig. (2-tailed)		.098	.960	.000	.086	.072	.577		.645
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204
Dolgu Kılınçlığı	Oranlık Kesme Dağılımı	Correlation Coefficient	.086	.124	-.042	.304**	.246**	.167*	.076	.032	1.000
		Sig. (2-tailed)		.347	.555	.000	.000	.025	.282	.645	
	N		204	204	204	204	204	204	204	204	204

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).
* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Yapılan Spearman sıralama korelasyon analizi sonucunda bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasında farklı düzeylerde monotonik ilişkiler gözlenmiştir. Özellikle dolgu içsel sürtünme açısı, normal gerilme ve dolgu kohezyonu değişkenlerinin bağımlı değişkenle orta ila yüksek düzeyde anlamlı ilişkiler sergilediği görülmüştür. Diğer değişkenler arasında ise korelasyon katsayıları daha düşük olup, bu durum veri yapısının doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkiler içerdiğine işaret etmektedir. Teorik olarak önemli olduğu bilinen bu değişkenler, korelasyon değerleri düşük olsa da analizlere dâhil edilmiştir. Ayrıca, t ve a parametreleri ile bunların oranı olan t/a değişkeni arasındaki çoklu bağlantı nedeniyle, analizlerde t/a oranı çıkarılarak yalnızca t ve a değişkenleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu yaklaşım modelin istikrarını artırmak ve bilgi tekrarını önlemek amacıyla tercih edilmiştir. t/a oranı hariç tutulduğu durumda, değişkenler arasındaki en yüksek korelasyon katsayısının 0,66'nın altında olması, çoklu bağlantı

riskinin düşük olduğunu ve model kurulumuna güvenle devam edilebileceğini göstermektedir.

Doğrusal olmayan regresyon analizleri, temel olarak önceden belirlenmiş matematiksel denklemler aracılığıyla gerçekleştirilmekte ve analiz sürecinde uygun model seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu tür analizlerde veri setinin yapısına ve değişkenler arasındaki potansiyel ilişki türlerine uygun olarak belirli model formlarının denenmesi gerekir. Bu doğrultuda çalışmada üstel, polinom, logaritmik ve güç modelleri gibi literatürde yaygın olarak kullanılan hazır denklemler tercih edilmiştir (Çizelge 4.19). Üstel ve güç modelleri özellikle değişkenler arasındaki orantısal ve çarpan etkilerini ortaya koymak açısından uygun görülürken, logaritmik model değişkenlerin etkilerinin azalan marjinal katkılarla açıklanabileceği durumlar için değerlendirilmiştir. Polinom model ise değişkenler arasındaki potansiyel eğrisel ilişkileri ve doğrusal olmayan paternleri temsil edebilme avantajı nedeniyle çalışmaya dâhil edilmiştir. Bu modellerin her biri farklı yapısal ilişkileri yansıtmaya potansiyeline sahip olduğundan, çoklu denemeler gerçekleştirilmiş ve model performansları karşılaştırılarak en yüksek belirleme katsayısı ve en düşük hata oranına sahip model belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.19 Doğrusal olmayan regresyonlarda kullanılan model türleri ve denklemleri

Model Türü	Model Denklemi
Üstel Model	$y = a \cdot e^{b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n}$
Polinom Modeli	$y = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n + c_1 \cdot x_1^2 + c_2 \cdot x_2^2 + \dots + c_n \cdot x_n^2$
Logaritmik Model	$y = a + b_1 \cdot \ln(x_1) + b_2 \cdot \ln(x_2) + \dots + b_n \cdot \ln(x_n)$
Güç (Power) Modeli	$y = a \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot \dots \cdot x_n^{b_n}$

Doğrusal olmayan regresyon analizleri sonucunda, üstel modelde 0,779, polinom modelde 0,758, logaritmik modelde 0,751 ve güç modelinde 0,822 belirlenme katsayıları (R^2) elde edilmiştir. En yüksek belirlenme katsayısı olan %82,2, güç (power) modeli tarafından sağlandığından, analiz ve yorumlar yalnızca bu model üzerinden detaylandırılmıştır.

Doğrusal olmayan regresyon analizinde model, SPSS tarafından belirlenen yakınsama (convergence) kriterini sağladığı görülmüş ve toplam 48 model denemesi sonrasında

çözüm tamamlanmıştır. Yakınsama toleransı olarak, art arda yapılan iterasyonlardaki hata kareleri toplamı arasındaki göreceli farkın en fazla 1,00E-008 (SSCON) olması hedeflenmiş ve bu kritere başarıyla ulaşılmıştır. Bu sonuç, modelin istatistiksel olarak güvenilir bir çözüme ulaştığını göstermektedir.

Doğrusal olmayan regresyon modelinde parametreler arasındaki korelasyonlar incelendiğinde genel olarak korelasyon katsayılarının kabul edilebilir seviyede olduğu; ancak, dolgu kohezyonu ile içsel sürtünme açısı arasında sınır değerin biraz aşıldığı görülmüştür (Çizelge 4.20). Bu durum, çoklu doğrusal bağlantı açısından dikkat edilmesi gereken bir durum olmakla birlikte, modelin genel geçerliliğini önemli ölçüde etkilemediği değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.20 Doğrusal olmayan regresyon analizinde parametre katsayıları arasındaki korelasyonlar

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	1,000	0,054	-0,037	0,491	-0,548	-0,791	-0,274	-0,010
X2	0,054	1,000	0,000	0,162	-0,188	-0,162	-0,409	-0,101
X3	-0,037	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002
X4	0,491	0,162	0,000	1,000	-0,801	-0,051	-0,029	-0,094
X5	-0,548	-0,188	0,000	-0,801	1,000	-0,032	-0,011	0,087
X6	-0,791	-0,162	0,000	-0,051	-0,032	1,000	0,354	-0,053
X7	-0,274	-0,409	0,000	-0,029	-0,011	0,354	1,000	0,034
X8	-0,010	-0,101	0,002	-0,094	0,087	-0,053	0,034	1,000
X1: Sabit, X2: Kaya UCS, X3: Normal Gerilme, X4: Dolgu Kohezyonu, X5: Dolgu İçsel Sürtünme Açısı, X6: Pürüzlülük Açısı, X7: Pürüzlülük Genliği, X8: Dolgu Kalınlığı								

ANOVA sonuçlarına göre modelin regresyon kareler toplamı artık kareler toplamına kıyasla oldukça yüksek bulunmuştur (Çizelge 4.21). Bu durum modelin açıklayıcı gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Serbestlik derecesi ve ortalama kareler değerleri ile desteklenen bu sonuç, modelin genel olarak anlamlı olduğunu işaret etmektedir. Özellikle regresyonun ortalama karelerinin (887,050) artıkların ortalama karelerine (2,592) göre oldukça büyük olması, modelin açıklama gücünün güçlü olduğunu işaret eder. Bu sonuçlar daha önce belirtilen belirlenme katsayısı ($R^2 = 0,822$) ile tutarlılık

göstermektedir ve modelin dinamik kesme dayanımını başarılı bir şekilde tahmin ettiğini desteklemektedir.

Çizelge 4.21 Doğrusal olmayan regresyon analizine ait ANOVA tablosu

Varyans Kaynağı	Kareler	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması
Regresyon (Model)	7096,404	8	887,050
Artıklar (Residual)	507,973	196	2,592
Toplam	7604,377	204	
Toplam (Düzeltilmiş)	2858,506	203	

Belirlenme katsayısı (R^2) = 1 - (Artık Kareler Toplamı / Düzeltilmiş Toplam Kareler) = 0,822

Güç Modeline ait parametre tahminleri, standart hatalar ve %95 güven aralıkları Çizelge 4.22’de sunulmuştur. Katsayılar, modelde yer alan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki yön ve büyüklük etkilerini göstermektedir.

Çizelge 4.22 Güç modeli doğrusal olmayan regresyon parametre tahminleri ve güven aralıkları

Parametre	Tahmin Edilen Katsayılar	Standart Hata	%95 Güven Aralığı	
			Alt Sınır	Üst Sınır
X1 (Sabit)	0,421	0,471	-0,509	1,350
X2 (Kaya UCS)	0,453	0,061	0,334	0,573
X3 (Normal Gerilme)	0,429	0,027	0,375	0,483
X4 (Dolgu Kohezyonu)	0,074	0,033	0,008	0,139
X5 (Dolgu İçsel Sürtünme Açısı)	1,064	0,175	0,718	1,410
X6 (Pürüzlülük Açısı)	-1,333	0,336	-1,995	-0,670
X7 (Pürüzlülük Genliği)	-0,554	0,115	-0,781	-0,326
X8 (Dolgu Kalınlığı)	-0,004	0,029	-0,061	0,054

Modelin parametre tahminleri genel olarak güvenilir ve modele uygun şekilde yorumlanabilir düzeydedir. Çoğu parametrenin güven aralıklarının sıfır değeri içermemesi, bu katsayıların istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve modele anlamlı katkı sağladığını desteklemektedir. Ancak, sabit terim ve dolgu kalınlığı parametrelerinin güven aralıklarının sıfır değerini içermesi, bu parametrelerin anlamlılık açısından sorgulanabileceğini göstermektedir. Dolgu kalınlığı parametresinin genel modeldeki

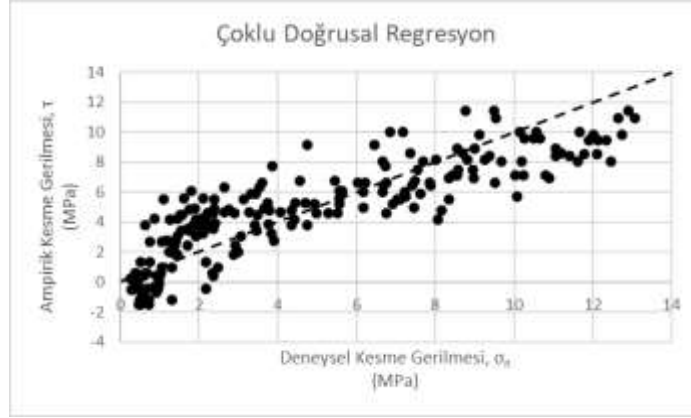
zayıf etkisinin, veri setindeki dolgu türlerinin heterojen yapısından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Yumuşak dolguda dolgu kalınlığının etkisinin daha yüksek olabileceği, ancak sert dolguda etkisinin düşük kaldığı düşünülmektedir. Sert dolgu örneklerinin sayısının fazlalığı bu genel analizin sonucunu etkilemiş olabilir. İlerleyen bölümlerde yumuşak ve sert dolgular üzerinde ayrı ayrı yapılacak regresyon analizi sonuçlarıyla tüm veri setinden elde edilen sonuçlar arasındaki sapmalar ve parametre etkilerinin dolgu türüne göre değişip değişmediği değerlendirilecektir.

Çizelge 4.22’de verilen katsayılar kullanılarak, yumuşak ve sert dolgu malzemelerine ait veriler üzerinden çoklu doğrusal olmayan regresyon analizi sonucu tahmin denklemi oluşturulmuştur:

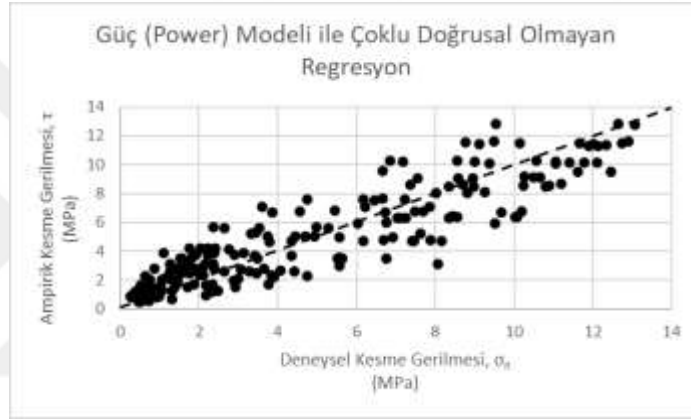
$$\tau_{din} = 0,421 * UCS^{0,453} * \sigma_n^{0,429} * c^{0,074} * \phi^{1,064} * l^{-1,333} * a^{-0,554} * t^{-0,004} \quad (4.2)$$

Çalışmada doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri sonucunda elde edilen tahmin denklemleri kullanılarak ampirik (tahmin edilen) dinamik kesme dayanımları hesaplanmıştır. Model performansının görsel olarak değerlendirilmesi amacıyla, deneysel ve hesaplanan ampirik değerler ile model uyum grafikleri oluşturulmuştur (Şekiller 4.26 ve 4.27).

Çoklu doğrusal model genel olarak pozitif yönlü bir ilişki sergilemektedir. Ancak, detaylı incelendiğinde modelin düşük ve yüksek dayanım değerlerinde yeterince başarılı tahminler üretemediği ve bu bölgelerde hata sapmalarının arttığı görülmektedir. Özellikle düşük dayanım seviyelerinde model, gözlenen değerleri sistematik olarak olduğundan yüksek tahmin etme eğilimi gösterirken; yüksek dayanım seviyelerinde ise nokta dağılımında artan bir saçılma söz konusu olmuştur. Bu durum, modelin uç değerleri kapsamada sınırlı bir yeterliliğe sahip olduğunu ve doğrusal varsayımın veri setinin tüm aralığı için uygun olmadığına işaret etmektedir. Ayrıca, tahmin edilen değerlerin hata terimleri ile ilişkisinin tamamen rasgele olmadığı; modelin bazı veri aralıklarında hata varyansının değişkenlik gösterdiği daha önceki analizlerde de vurgulanmıştır. Bu durum çoklu doğrusal regresyonun veri setinin tamamı için en uygun modelleme yöntemi olmayabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 4.26 Çoklu doğrusal regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği



Şekil 4.27 Güç modeli çoklu doğrusal olmayan regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği

Güç modeli çoklu doğrusal olmayan regresyon kapsamında oluşturulan ampirik ve deneysel kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırıldığı grafikte ise doğrusal modele kıyasla çok daha tatmin edici bir uyum gözlenmiştir. Özellikle düşük dayanım değerlerinde modelin oldukça başarılı ve isabetli tahminler ürettiği, veri noktalarının referans çizgisine yakın kümелendiği dikkat çekmektedir. Yüksek dayanım seviyelerinde ise doğrusal modele kıyasla daha az, fakat yine de kısmi saçılmaların olduğu görülmüştür. Güç modelinin veri setindeki doğrusal olmayan yapıyı daha doğru temsil ettiği ve deneysel verilerin doğasına daha iyi karşılık verdiği anlaşılmıştır. Ayrıca, bu modelin tüm veri aralıklarında hata dağılımını daha dengeli sunduğu ve uç değerlerdeki sapmaları minimize ettiği söylenebilir. Bu sonuçlar güç modelinin ampirik tahminler açısından daha kararlı ve güvenilir bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, yapılan karşılaştırmaların mevcut veri setini en doğru şekilde temsil eden modelin güç (power) modeli olduğu belirlenmiştir. Çoklu doğrusal olmayan analiz kapsamında güç modelinin veri yapısını daha sağlıklı yansıttığı ve düşük hata seviyeleriyle daha güvenilir tahminler sağladığı görülmüştür. Ayrıca, belirleme katsayısının en yüksek değerine güç modelinde ulaşılması, bu yöntemin tercih edilmesini destekleyen önemli bir bulgu olmuştur.

4.9.2 Yumuşak dolguda çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri

Bu kısımda yumuşak dolgu malzemelerine ait veriler ayrı olarak değerlendirilmiş ve dolgu türüne özgü etkilerin daha doğru analiz edilebilmesi amacıyla çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tüm veri setiyle yapılan ön değerlendirme aşamasındaki analizler bu kısımda da tekrarlanmış, sonuçlar gözden geçirilmiş ve gerekli durumlarda en sağlıklı analizin yapılabilmesi için gerekli istatistiksel adımlar uygulanmıştır.

Yumuşak dolgu malzemeleri özelinde yapılan analizlerde veri setinin kapsamı yalnızca tek bir dolgu türü ile sınırlı olduğundan, dolgu kohezyonu ve içsel sürtünme açısı parametreleri sabit bir değere indirgenmiştir. Sabit kalan parametrelerin varyansları sıfır olduğundan, bu değişkenler modele dâhil edilmemiştir.

Yumuşak dolguya indirgenen veri setinde normallik testleri (Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk) 0,05'in altında p değerleri vermiş; ancak, örneklem büyüklüğünün hala dikkate değer büyüklükte, çarpıklık ve basıklık katsayılarının da kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu dikkate alındığında parametrik analizlerin uygulanabileceği değerlendirilmiştir. Yapılan doğrusallık testleri sonucunda kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı, süreksizlik pürüzlülük açısı ve pürüzlülük genliği parametrelerinin bağımlı değişken ile istatistiksel olarak anlamlı bir doğrusal ilişki göstermediği belirlenmiştir. Bu nedenle, bu parametreler doğrusal regresyon analizinde değerlendirmeye alınmamıştır. Dolgu kalınlığı parametresinin ise doğrusal bir ilişki kurduğu; ancak, hata varyansında sapma olduğu gözlenmiş ve bu durum doğrusal olmayan bir yapı ihtimaline işaret

etmiştir. Bu nedenle dolgu kalınlığı doğrusal modelde analiz edilmiş ancak doğrusal olmayan modellerde ayrıca detaylı olarak incelenmiştir.

Bağımlı değişken ile dolgu kalınlığı (t) arasındaki Pearson korelasyon katsayısı -0,579, t/a oranı ile ise -0,575 olarak belirlenmiştir. Bu iki değişkenin korelasyon düzeyleri birbirine oldukça yakın olmakla birlikte t/a oranı bağlam açısından daha anlamlı yorumlar sağlayabileceği ve dolgu kalınlığının pürüzlülük genliğine göre normalize edilmiş etkisini temsil ettiği için dolgu kalınlığı değişkeni de çıkarılarak, yalnızca t/a değişkeni modele dahil edilmiştir.

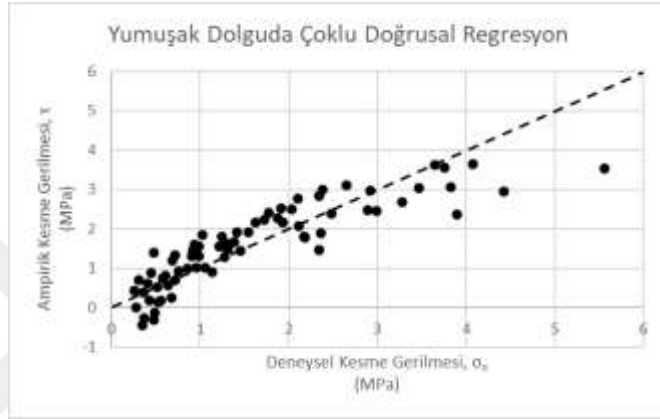
Ön değerlendirmeler sonucunda uygun model belirlenmiş ve yumuşak dolguya ait veriler kullanılarak, dinamik kesme dayanımı bağımlı değişken; normal gerilme ile t/a oranı ise bağımsız değişkenler olarak çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Modelin düzeltilmiş belirlenme katsayısı 0,766 olarak elde edilmiştir. Bu değer, yalnızca iki bağımsız değişken (normal gerilme ve t/a oranı) kullanılarak bağımlı değişkenin büyük bir kısmının başarıyla açıklanabildiğini göstermekte ve modelin güçlü bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Durbin-Watson katsayısının 0,983 olarak hesaplanması hata terimleri arasında pozitif otokorelasyon olabileceğine işaret etmektedir. Ancak, bu durum veri setinin görece küçük olması ve grup bazında çalışılıyor olması sebebiyle kısmen tolere edilebilir bir sonuçtur.

ANOVA tablosundan elde edilen F değeri (117,4) ve anlamlılık düzeyi ($p = 0,000$) regresyon modelinin genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Modelde yer alan tüm bağımsız değişkenlerin p değerleri 0,05'in altında bulunmuş ve değişkenlerin modele anlamlı katkı sağladığı belirlenmiştir. VIF değerlerinin 1,015 ile düşük çıkması modelde çoklu doğrusal bağlantı probleminin bulunmadığını göstermektedir.

Aykırı ve etkili gözlemler açısından yapılan incelemelerde maksimum Mahalanobis mesafesi 4,845 ve maksimum Cook's mesafesi 0,300 olarak bulunmuş, bu değerler istatistiksel sınırlar içerisinde kalmış ve model üzerinde aşırı etkili gözlemler bulunmadığı değerlendirilmiştir.

Yumuşak dolgular için oluşturulan bu model, dolgu türüne özgü etkileri yansıtan güvenilir ve geçerli bir yapı sunmaktadır. Detaylı hata ve kalıntı analizleri tüm veri seti için daha önce gerçekleştirilmiş olduğundan, bu aşamada yalnızca model performansını özetlemek ve tahmin denklemine odaklanmak yeterli görülmüştür.

$$\tau_{din} = 1,603 + 0,289 \sigma_n - 0,839 t/a \quad (4.3)$$



Şekil 4.28 Yumuşak dolguda çoklu doğrusal regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği

Şekil 4.28’de yumuşak dolgu verileri için oluşturulan çoklu doğrusal regresyon modelinin tahmin edilen ampirik kesme dayanımı ile deneysel kesme dayanımı karşılaştırılmıştır. Bazı veri noktaları doğrudan bir miktar sapma gösterse de; bu sapmaların modelin hata sınırları içerisinde kabul edilebilir seviyede olduğu ve genel olarak yumuşak dolgu verileri üzerinde iki bağımsız değişken ile oluşturulan modelin yeterli bir tahmin performansı sergilediği söylenebilir.

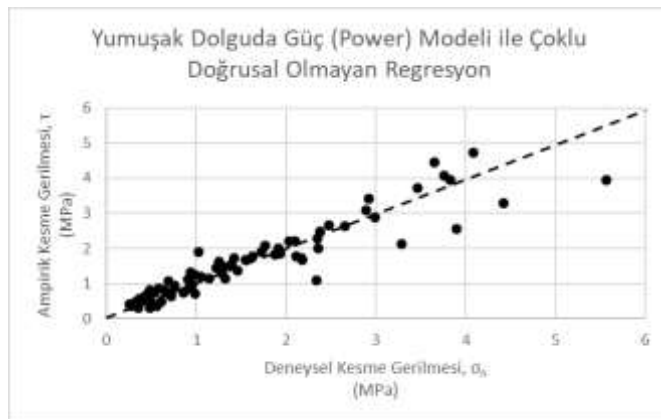
Yumuşak dolgu grubu için yapılan Spearman korelasyon analizi sonuçlarına göre bağımlı değişken ile en yüksek ilişkiler normal gerilme (0,800) ve t/a oranı (-0,575) parametreleri arasında bulunmuştur. Bu nedenle, çoklu doğrusal olmayan regresyon analizinde yalnızca bu iki parametre kullanılmıştır.

Yumuşak dolguya ait veriler üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan regresyon analizlerinde logaritmik model 0,781, polinom modeli 0,832, üstel model 0,834 ve güç

modeli 0,866 belirlenme katsayısı vermiştir. Güç modeli diğer modellere kıyasla en yüksek belirlenme katsayısını sağlamış ve veri setine en iyi uyumu göstermiştir. Polinom ve üstel modellerin de kabul edilebilir uyum düzeylerine sahip olduğu görülmekle birlikte, güç modelinin daha yüksek açıklayıcılık sunması ve hata seviyelerinin daha düşük olması nedeniyle analiz ve yorumlar güç modeli üzerinden detaylandırılmıştır. Yumuşak dolgu verileri için uygulanan güç modeli doğrusal olmayan regresyon analizinde modelin toplam varyansın önemli bir kısmını açıkladığı görülmektedir. Regresyon kareler toplamı (271,511), artık kareler toplamına (13,249) kıyasla oldukça yüksektir. Bu da modelin veri setine yüksek uyum sağladığını göstermektedir. Elde edilen belirlenme katsayısı ($R^2 = 0,866$) bu durumu desteklemektedir.

Regresyon analizinden elde edilen tahmin denklemi aşağıda verilmiş olup, deneysel ve denkleme bağlı tahmin edilen değerlere ait karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.29'da sunulmuştur. Noktaların genel eğilimi, modelin yumuşak dolgu verilerinde güçlü bir tahmin performansı sergilediğini göstermekte; yalnızca yüksek dayanım seviyelerinde kısmi sapmalar izlenmektedir.

$$\tau_{din} = 0,775 * \sigma_n^{0,583} * t/a^{-0,519} \quad (4.4)$$



Şekil 4.29 Yumuşak dolguda çoklu doğrusal olmayan regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği

4.9.3 Sert dolgularda çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri

Sert dolgulara ait veriler üzerinde gerçekleştirilen normallik testlerinde, daha önceki analizlerde karşılaşılan durumlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Verilerin normallik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, regresyon modelinden çıkartılması gereken bir parametre bulunmamaktadır.

ANOVA doğrusal ilişki testleri sonucunda, normal gerilme değişkeninin hem doğrusallık hem de doğrusallıktan sapma testlerinde uygun sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı ve pürüzlülük açısı değişkenlerinde ise doğrusallık sağlanmasına rağmen, doğrusallıktan sapma testlerinde anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, bu iki parametrenin doğrusal bir yapı göstermekle birlikte verinin bir kısmında doğrusal olmayan etkilerin de mevcut olabileceğine işaret etmektedir. Dolgu kalınlığı parametresinin doğrusallık testi uygun bulunmamış; ancak, sapma testi anlamlı çıkmıştır. Bu sonuç, dolgu kalınlığının mevcut yapı içerisinde doğrusal bir ilişki kuramadığını; ancak, doğrusal olmayan etkiler gösterebileceğini düşündürmektedir. t/a oranı ve pürüzlülük genliği parametrelerinin ise hem doğrusallık hem de sapma testlerinde uygun sonuç vermediği görülmüş ve bu nedenle bu parametrelerin modelden çıkarılması uygun bulunmuştur. Ayrıca, tüm veri seti ile yapılan analizlerde dolgu kohezyonu ve içsel sürtünme açısı değişkenleri üç farklı değere sahip olduğundan, sınırlı da olsa modele katkı sağladığı değerlendirilmiştir. Ancak, sert dolgu grubunda yalnızca iki farklı değer içermeleri ve bu değerlerin deneyler boyunca tekrarlaması, bu parametrelerin varyasyon açısından yetersiz kalmasına neden olmuştur. Literatürde dolgu kohezyonu ve içsel sürtünme açısının kesme dayanımı üzerinde etkili olduğu bilinse de mevcut veri setinde bu etkiyi yansıtacak yeterli veri çeşitliliği ve varyans sağlanamamıştır. Bu nedenle ilgili değişkenler, sert dolguda çoklu doğrusal regresyon analizlerinden çıkarılmıştır.

Ön değerlendirmeler sonucunda modelde kalan üç parametre üzerinde yapılan korelasyon analizlerinde çoklu doğrusallık problemi oluşturabilecek bir ilişkiye rastlanmamış ve parametrelerin bağımlı değişken ile olan korelasyon düzeyleri anlamlı bir seviyede bulunmuştur. Bu doğrultuda sert dolgulara ait veriler kullanılarak, tek eksenli sıkışma

dayanımı, normal gerilme ve pürüzlülük açısı parametreleriyle çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çoklu doğrusal regresyon analizi sonucunda sert dolgularda kurulan modelin düzeltilmiş belirlenme katsayısı $R^2 = 0,635$ olarak bulunmuş; modelin bağımlı değişken üzerindeki açıklayıcılık gücünün orta düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen $F = 76,9$ ve $p = 0,000$ değerleri bağımsız değişkenlerin modele anlamlı bir katkı sağladığını ve modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. VIF değerlerinin 1'e yakın çıkması modelde çoklu doğrusal bağlantı sorunu olmadığını desteklemektedir. Mahalanobis ve Cook mesafeleri incelendiğinde uç değer veya baskın gözlem riski taşıyan veri bulunmadığı görülmüştür. Standardize artıkların dağılımında da aşırı uç bir durum gözlenmemiştir. Regresyon analizinden gelen katsayılar ile sert dolgularda çoklu doğrusal regresyon tahmin denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\tau_{din} = 9,054 + 0,039 UCS + 0,934 \sigma_n - 0,546 i \quad (4.5)$$

Ampirik olarak bulunan kesme dayanımı ile deneysel kesme dayanımı grafiğinden modelin tahmin performansının makul bir seviyede olduğu söylenebilir (Şekil 4.30).



Şekil 4.30 Sert dolgularda çoklu doğrusal regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği

Sert dolgu malzemelerine ait verilerle çoklu doğrusal olmayan regresyon analizi öncesi spearman korelasyonları incelenmiştir. Dinamik kesme dayanımı ile düşük korelasyon katsayıları veren t/a oranı, dolgu kalınlığı ve pürüzlülük genliği parametreleri modelden çıkartılmıştır. Dolgu kohezyonu ve dolgu içsel sürtünme açısı parametreleri arasında ise yüksek düzeyde korelasyon tespit edilmiştir. Kaya ve kaya benzeri dolguların kesme dayanımının belirlenmesinde içsel sürtünme açısının daha temel ve kalıcı bir parametre olması nedeniyle dolgu kohezyonu analizden çıkarılmıştır.

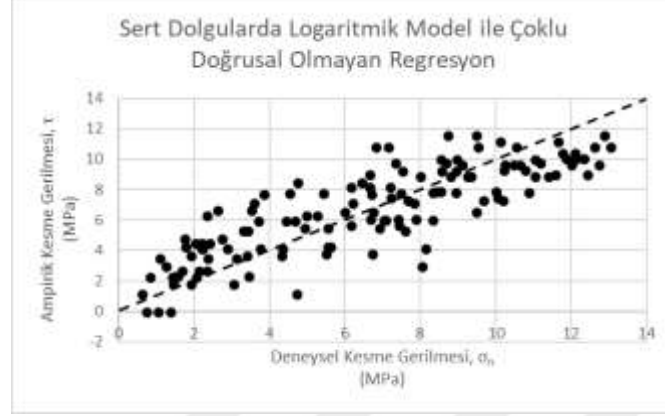
Sert dolgu verileri üzerinde uygulanan doğrusal olmayan regresyon analizlerinde üstel modelden elde edilen sonuçlar negatif R^2 değeri verdiği için modelin veri setine uygun bir yapıda olmadığı ve açıklayıcılığının zayıf olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, üstel model değerlendirme dışı bırakılmıştır. Güç modelinde belirleme katsayısı 0,681 ve logaritmik modelde 0,698 olarak elde edilmiştir. En yüksek belirlenme katsayısının küplerle polinom modelinde ($R^2 = 0,723$) elde edildiği görülmüştür. Ancak, karelerle polinom model ($R^2 = 0,721$) de oldukça yakın bir performans sergilemiştir. Her iki modelde elde edilen belirlenme katsayıları doğrusal modelden biraz daha yüksek bir uyum sağlasa da farkın oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir.

Küplerle polinom modelinden elde edilen parametre katsayıları değişkenler arasındaki ölçü birimi ve büyüklük farklarından dolayı aşırı yüksek değerler almış; bu da model katsayılarını saha uygulamalarında kullanılabilir olmaktan çıkarmıştır. Buna karşın, kareli polinom model ise bazı parametrelerde negatif sayı ve ondalıklı üslerin bulunması nedeniyle pratik uygulamalarda kullanımı sınırlı kalmıştır. Bu nedenlerle, korelasyon katsayısındaki kayıp göze alınarak, saha uygulamalarına ve pratik kullanıma daha uygun bir denklem sunan logaritmik modele geçilmiştir.

$$\tau_{din} = - 22,232 + (2,161 \cdot \ln UCS) + (2,644 \cdot \ln \sigma_n) + (8,086 \cdot \ln \phi) + (-5,820 \cdot \ln i) \quad (4.6)$$

Analiz sonucunda elde edilen deneysel dinamik kesme dayanımları ve ampirik dayanımlar grafik üzerine aktararak karşılaştırılmıştır (Şekil 4.31). Yüksek kesme gerilmesi değerlerinde veri noktaları arasındaki saçılımın arttığı ve bazı noktaların tahmin çizgisinden belirgin şekilde saptığı; dolayısıyla modelin yüksek gerilme bölgelerindeki

genellenebilirlik veya tahmin gücünün düşük gerilme bölgelerine kıyasla sınırlı kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.31 Sert dolgularda çoklu doğrusal olmayan regresyon için deneysel ve ampirik dinamik kesme dayanımı karşılaştırma grafiği

5. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Kaya kütlelerinde süreksizliklerin dolgu malzemesi varlığında ve farklı yükleme koşulları altında sergilediği davranışların anlaşılmasına yönelik olarak planlanan bu çalışma kapsamında, farklı doğal kaya türlerinde (diyabaz, mermer, litik tüf, vitrik tüf, trakit ve granodiyorit) oluşturulan yapay süreksizliklerin, yumuşak (kil) ve sert (porselen alçısı, polyester reçine/tuz karışımı) dolgu malzemeleri ile doldurulmuş hâldeyken dinamik yükler altındaki kesme davranışları deneysel ve istatistiksel yöntemlerle incelenmiştir. Toplamda 204 adet deneyden elde edilen dinamik kesme dayanımları; kayaçların mineralojik-petrografik özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımları, pürüzlülük parametreleri ve dolgu malzemelerinin mekanik özellikleri dikkate alınarak ayrıntılı biçimde analiz edilmiş; ayrıca, bu çalışmaya paralel yürütülen bir başka doktora araştırmasında (Üzgün, 2025) belirlenen statik kesme dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Dinamik kesme dayanımlarının öngörülmesine yönelik olarak çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilmiş ve ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Bu bölümde, yürütülen kapsamlı çalışmalardan elde edilen bulgular bütüncül bir çerçevede özetlenecek, literatürdeki benzer araştırmalarla karşılaştırılarak tartışılacak ve elde edilen sonuçlardan hareketle mühendislik uygulamalarına yönelik çıkarımlar ile gelecekte yapılabilecek araştırmalara ışık tutabilecek öneriler sunulacaktır.

Yapılan kapsamlı çalışma sonucunda elde edilen bulgular ve bu bulgulara ilişkin değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur:

1. Kayaların tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerlerinin 30 MPa ile 114,7 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Yapay süreksizliklerin pürüzlülük açıları $14,0^\circ$ ile $16,6^\circ$, pürüzlülük genlikleri 1,85 mm ile 2,94 mm arasında değişmiştir. Kullanılan yapay süreksizlik hazırlama yöntemi özdeş sayılabilecek süreksizlikler hazırlanmasını sağlamış ve bu da deneysel çalışmanın kontrol edilebilirliğini artırmıştır. Bununla birlikte, söz konusu yöntem pürüzlülük açısı ve genliği değerlerinin dar bir aralıkta temsil edilmesine neden olmuş ve süreksizlik pürüzlülüğünün mekanik davranış üzerindeki etkisinin daha geniş bir parametre aralığı için genellenmesini sınırlamıştır.

2. Çalışmada yumuşak dolgu malzemesi olarak likit limiti 50,5 ve plastik limiti 32,2 olan bir kil tercih edilmiştir. Sert dolgu malzemesi-1 olarak porselen alçısı, sert dolgu malzemesi-2 olarak ise polyester reçine/tuz karışımı uygulanmıştır. Malzemelerin kohezyon (c) değerleri sırasıyla 20 kPa, 5 MPa ve 3 MPa; içsel sürtünme açıları (ϕ) ise 24,2°, 59° ve 68° olarak belirlenmiştir. Seçilen dolgu malzemeleri, düşükten yükseğe değişen dayanım ve sürtünme özelliklerini temsil ederek dolgu türünün mekanik davranış üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamıştır. Ancak bu yaklaşımın tek bir yumuşak dolgu türü içermesi ve dolgular arasındaki ara dayanım seviyelerini kapsamaması, dolgu malzemelerinin süreksizlik davranışı üzerindeki etkisinin tüm dayanım aralıkları için kapsamlı biçimde ortaya konulmasını kısıtlamaktadır.
3. Yumuşak dolgu malzemesi (kil) içeren süreksizliklerde, dolgu kalınlığının artmasıyla dinamik kesme dayanımlarının azaldığı, 3 ve 5 mm dolgu kalınlıklarında birbirlerine yakın değerler sergilediği gözlenmiştir. Kaya türlerinden bağımsız olarak elde edilen bu bulgu, literatürde statik yükler için yaygın kabul gören “dolgu kalınlığının pürüzlülük genliğine oranının artmasıyla birlikte kesme dayanımının dolgu tarafından kontrol edilmeye başlandığı” görüşünün (Goodman 1970; Ladanyi ve Archambault 1977; Lama 1978; Phien-Wej vd. 1990; Papaliangas vd. 1990) dinamik yükler için de geçerli olduğunu ortaya koymuştur.
4. Sert dolgu malzemeleri ile gerçekleştirilen deneylerde, dinamik kesme dayanımının dolgu kalınlığından bağımsız kaldığı ve rastlantısal bir dağılım sergilediği görülmüştür. Bu durum, dolgu kalınlığının belirleyici rolünün yumuşak dolgularda daha etkin olduğunu; sert dolgularda ise dinamik kesme dayanımının dolgu kalınlığındaki değişimlere duyarlı olmadığını ve belirgin bir artış ya da azalış eğilimi göstermediğini ortaya koymaktadır.
5. Sert dolgu malzemeleriyle gerçekleştirilen dinamik kesme deneme deneylerinde, dolgu dayanımının kaya dayanımını aştığı koşullarda yenilmenin yalnızca süreksizlikte değil, doğrudan kayanın kendisinde de gelişebildiği belirlenmiştir. Bu

gözlem doğrultusunda, çalışmanın ilerleyen aşamalarında dolgu dayanımı kaya dayanımlarına göre daha uygun seviyelere çekilmiş ve deneysel program bu koşullar altında sürdürülmüştür. Dolayısıyla, dolgulu süreksizliklerin kaya kütleleri için her zaman bir zayıflık unsuru olarak görülmemesi gerektiği; Lama (1978) tarafından da belirtildiği gibi bazı durumlarda dolgunun iyileştirici bir etki oluşturabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca, deneyler esnasında yapılan gözlemsel değerlendirmeler, yenilme davranışında dolgu malzemesi ile süreksizlik yüzeyleri arasındaki aderansın da belirleyici bir etken olabileceğini göstermektedir.

6. Yumuşak dolgu malzemesinde dinamik kesme dayanımları, kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımları ile uyumlu olarak değişmiştir. Buna karşılık, sert dolgu malzemelerinde genel olarak böyle bir belirgin ilişki gözlenmemiştir. Bununla birlikte, göreceli olarak en düşük tek eksenli sıkışma dayanımına sahip litik tuf kayasında sınırlı bir artış gözlenmiş olup, farklı kaya türleri arasındaki göreceli tek eksenli sıkışma dayanımı farkı arttıkça, kaya dayanımının dinamik kesme dayanımı üzerindeki etkisinin daha belirgin hâle gelebileceği değerlendirilmiştir.
7. Yumuşak dolgu malzemesi ve göreceli olarak düşük dayanımlı sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen deneylerde, genel olarak normal gerilme arttıkça dinamik kesme dayanımlarının da arttığı gözlenmiştir. Buna karşılık, sert dolgu malzemesi-2 ile yapılan deneylerde normal gerilmedeki artışın dinamik kesme dayanımına sistematik ve belirgin bir katkı sağlamadığı belirlenmiştir. Kaya dayanımına yakın veya daha yüksek dayanımlı dolguların bulunduğu koşullarda, normal gerilmenin dinamik kesme dayanımı üzerindeki etkisinin doğrusal olmaktan uzaklaşabildiği değerlendirilmiştir.
8. Yumuşak dolgularda, düşük normal gerilme seviyelerinde genel olarak dinamik kesme dayanımları statik değerlerden yüksek çıkmış ancak, normal gerilme değerleri ve dolgu kalınlıkları arttıkça bu farkın azaldığı ve statik değerlerin daha yüksek hale geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, düşük normal gerilmelerde dinamik yüklemelerin ani temas etkisiyle oluşan geçici direnç artışına, yüksek normal gerilmelerde ise statik yüklemenin dengeli ve sürdürülebilir sürtünme mekanizmasının üstünlüğüne

bağlanabilir. İstisna olarak MY-4 vitrik tuf kayasında tüm normal gerilmelerde statik kesme dayanımları daha yüksek değerler vermiştir.

9. Yumuşak dolgularda 1 mm kalınlıkta, dinamik kesme dayanımları statik kesme dayanımlarından %45-69 arasındaki oranlarda daha yüksek bulunmuştur. 3 mm dolgu kalınlığında MY-3 litik tuf kayasında dinamik kesme dayanımları %11 oranında daha yüksek iken, diğer kaya türlerinde statik kesme dayanımları %7-32 arasındaki oranlarda daha yüksek çıkmıştır. 5 mm dolgu kalınlığında MY-4 vitrik tuf kayasında statik kesme dayanımları %18 daha fazla iken, diğer kaya türlerinde dinamik kesme dayanımları %4-38 aralığında daha yüksek değerler vermiştir.
10. Sert dolgu malzemelerinde, yumuşak dolgulardan farklı olarak, tüm normal gerilme seviyelerinde dinamik kesme dayanımları genellikle statik kesme dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, sert dolgu malzemelerinin dinamik yüklemeler altında daha etkin bir direnç mekanizması geliştirmesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, yüksek aderanslı polyester reçine/tuz karışımı (sert dolgu malzemesi-2) kullanılan deneylerde, statik yükleme sırasında oluşan sürdürülebilir bağın etkisiyle statik kesme dayanımlarının dinamik değerleri aştığı örnekler de kaydedilmiştir. Ancak genel eğilim, sert dolgularda dinamik yüklemelerin daha kritik sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.
11. Sert dolgu malzemesi-1 ile 1 mm kalınlıkta, dinamik kesme dayanımları statik kesme dayanımlarından %4-89 arasındaki oranlarda daha yüksek bulunmuştur. Benzer eğilim 3 mm dolgu kalınlığında %36-76 ve 5 mm dolgu kalınlığında %5-55 aralığındaki oranlarla gözlenmiştir.
12. Sert dolgu malzemesi-2 ile 1 mm kalınlıkta, MY-1 diyabaz ve MY-3 litik tuf kayalarında statik kesme dayanımları dinamik kesme dayanımlarından sırasıyla %17 ve %60 oranlarında daha yüksek iken, MY-2 mermer ve MY-6 granodiyorit kayalarında dinamik kesme dayanımları sırasıyla %54 ve %11 oranlarında daha yüksek bulunmuştur. 3 mm dolgu kalınlığında dinamik kesme dayanımları %13-18

arasındaki oranlarda daha yüksek iken, MY-1 diyabaz kayasında statik kesme dayanımları %17 oranında daha yüksek çıkmıştır.

13. Deneysel veriler üzerinde gerçekleştirilen istatistiksel çalışmaların ön değerlendirme ve korelasyon analizleri sonucunda, yumuşak dolgular için dinamik kesme dayanımında özellikle normal gerilme ve t/a oranının belirleyici olduğu görülmüştür. Dolgu malzemesinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin de etkili olması beklenmekle birlikte, çalışmada yalnızca tek tip yumuşak dolgu kullanıldığından bu parametrelerin katkısı istatistiksel olarak değerlendirilememiştir. Sert dolgularda ise kaya tek eksenli sıkışma dayanımı, normal gerilme, dolgu içsel sürtünme açısı ve pürüzlülük açısı anlamlı etkiye sahip parametreler olarak öne çıkmıştır. Farklı dolgu türlerine ait veriler bir arada değerlendirildiğinde ise, çalışma kapsamında seçilen parametrelerin tamamının dinamik kesme dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
14. Tüm deneysel verilerin dahil edildiği doğrusal ve doğrusal olmayan çoklu regresyon analizlerinde, en yüksek belirlenme katsayısı ($R^2=0,822$) doğrusal olmayan güç (power) modelinde elde edilmiş olup, bu modelde kaya tek eksenli basınç dayanımı, normal gerilme, dolgu kohezyonu, dolgu içsel sürtünme açısı, süreksizlik pürüzlülük açısı, süreksizlik pürüzlülük genliği ve dolgu kalınlığı belirleyici parametreler olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, geliştirilen modelin geçerliliği, deneysel çalışmada ele alınan kaya türleri, dolgu malzemeleri, dolgu kalınlıkları ve normal gerilme aralıkları ile sınırlıdır. Modelin, bu parametre aralıklarının dışına taşan koşullarda veya farklı dolgu–kaya kombinasyonlarında doğrudan kullanılmadan önce ilave doğrulama çalışmaları yapılması önerilmektedir.
15. Yumuşak dolgulara ait veriler üzerinde yapılan, normal gerilme ve t/a oranının bağımsız değişken olarak kullanıldığı doğrusal olmayan çoklu regresyon analizinde güç (power) modeli ile $R^2=0,866$ belirlenme katsayısına ulaşılmıştır. Sert dolgu verilerinde, kaya tek eksenli sıkışma dayanımı, normal gerilme, dolgu içsel sürtünme açısı ve süreksizlik pürüzlülük genliği parametrelerinin kullanıldığı logaritmik model ile doğrusal olmayan çoklu regresyon analizinde $R^2=0,698$ belirlenme katsayısı elde

edilmiştir. Elde edilen modeller, tamamen deneysel verilere dayalı ampirik ilişkiler sunmaktadır. Bu modellerin en önemli çıkarımlarından biri, sert ve yumuşak dolgular için etkin parametrelerin farklılaştığını ve dolgu karakterine göre ayrı değerlendirme yapılmasının gerekliliğini nicel olarak göstermesidir. Bununla birlikte, geliştirilen modeller, gözlenen farklılıkların altında yatan fiziksel mekanizmaları tüm yönleriyle açıklama iddiası taşımamaktadır.

Elde edilen bulgular ve değerlendirmeler ışığında, kaya kütlelerindeki süreksizliklerin dolgu malzemesi varlığında dinamik yükler altındaki kesme davranışlarını daha ayrıntılı olarak inceleyecek ve araştırmayı ileriye taşıyacak öneriler aşağıda sunulmaktadır:

1. Çalışma kapsamında oluşturulan süreksizliklerde karşılaşılan dar pürüzlülük açısı aralığının yapay süreksizlik olgusuyla ilişkili olup olmadığı, doğal süreksizliklerle karşılaştırılarak araştırılabilir. Önerilen araştırmanın özellikle yumuşak dolgu malzemesi içeren süreksizliklerde, pürüzlülük açısı etkisinin daha kapsamlı şekilde temsil edilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
2. Yumuşak dolgu malzemelerinin çeşitlendirilerek veya farklı su içeriklerinde uygulanarak, sert dolgu malzemelerinin daha geniş kohezyon ve içsel sürtünme açısı aralıklarında hazırlanarak dinamik kesme deneylerinin gerçekleştirilmesi gibi seçenekler çalışmanın kapsamını geliştirecektir. Ayrıca, farklı sert dolgu malzemeleri ve farklı süreksizlik yüzeyi doku özellikleri gösteren kaya türleriyle genişletilecek bir çalışma, dolgu malzemesi ile süreksizlik yüzeyi arasındaki aderans etkisinin kesme dayanımı üzerindeki katkısını netleştirecektir.
3. Kil türü dolgu malzemelerinde, kalınlığın süreksizlik yüzey pürüzlülük genliğine oranı (t/a) ile kesme dayanımı ilişkisi üzerine yapılan çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, sert dolgu malzemeleri için benzer çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, sert dolgularda t/a oranı etkisinin yumuşak dolgulardan farklı bir davranış sergilediğini göstermiştir. Ancak, dolgu kalınlıklarının daha yakın aralıklarla (örneğin 0,5 / 1 / 1,5 / 2 / 2,5 mm) oluşturulacağı bir çalışmanın, mevcut bulguların daha hassas biçimde değerlendirilmesine ve yumuşak dolgular için

literatürde önerilen kritik t/a oranlarına benzer oranlar önerilmesine olanak sağlayacaktır.

4. Kaya dayanımı ile dolgu dayanımlarının birbirine yaklaştığı ya da dolgu dayanımlarının kaya dayanımını aştığı koşulları hedef alan ileri çalışmalar gerçekleştirilerek, farklı dayanım seviyelerindeki dolgu-kaya etkileşimlerinin sınır değerlerinin belirlenmesine ve mühendislik uygulamalarında kritik eşiklerin tanımlanmasına katkı sağlanılabilir.
5. Bu çalışmada, yumuşak ve sert dolgularda statik ve dinamik yükleme tipleri altında kesme davranışlarının önemli ölçüde farklılaştığı tespit edilmiştir. Bu farkın araştırılmasında, kesme sırasında süreksizlik arayüzeylerindeki gerçek zamanlı deformasyon ve hasar birikimi mekanizmalarını görüntüleyebilecek sistemlerin (örneğin, yüksek hızlı kameralar veya DIC - Dijital Görüntü Korelasyonu) kullanılması, daha önce bahsedilen statik yüklemedeki "sürdürülebilir sürtünme" ile dinamik yüklemedeki "ani temas ve kırılma" etkilerinin doğrudan gözlemlenerek değerlendirilmesine ve modellenmesine önemli katkılar sunabilir.
6. Bu çalışmada elde edilen verilerin FLAC veya PFC gibi sayısal yöntemlerle modellenmesi, deneysel sonuçların farklı parametre kombinasyonları altında sanal simülasyonlarla test edilmesine ve ek deneylere gerek kalmadan daha geniş bir koşul aralığının incelenmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, çok sayıda dolgulu süreksizlik içeren büyük ölçekli kaya kütlelerinin davranışlarının simülasyonlarla araştırılması, laboratuvar ölçeğinde gözlenen mekanizmaların gerçekçi ölçekte değerlendirilmesine katkı sunabilir. Bu tür bir yaklaşımda model kalibrasyonu için mevcut deneysel veriler kullanılabileceği gibi, gerektiğinde saha verileriyle de desteklenmesi önemlidir.
7. Bu çalışmada kullanılan yapay süreksizlikler ve laboratuvar ölçeğindeki deneysel düzenekler, kontrollü koşullarda dolgu malzemesi ve süreksizlik davranışlarının anlaşılmasına önemli katkı sağlamıştır. Ancak, araziden temin edilecek doğal dolgulu süreksizlik örnekleri üzerinde yapılacak dinamik yükler altındaki laboratuvar deneyleri ile kaya–dolgu arayüzeyindeki gerçekçi mineralojik, yapısal ve hidro-

mekanik etkiler daha kapsamlı şekilde değerlendirilebilir. Böyle bir yaklaşım, laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçların saha koşullarına aktarılabilirliğini test ederek, mühendislik uygulamaları açısından çalışmayı bir adım ileriye taşıyacaktır.



KAYNAKLAR

- Ahola, M. P., Hsiung, S. M. and Kana, D. D. 1996. Experimental study on dynamic behavior of rock joints. In *Developments in geotechnical engineering* (Vol. 79, pp. 467-494).
- Asadi, M. S., Rasouli, V. and Barla, G. 2013. A laboratory shear cell used for simulation of shear strength and asperity degradation of rough rock fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 683-699.
- Asadizadeh, M., Moosavi, M., Hossaini, M. F. and Masoumi, H. 2017. Shear strength and cracking process of non-persistent jointed rocks: an extensive experimental investigation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 415-428.
- ASTM (American Society For Testing And Materials), 2002. Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength Of Intact Rock Core Specimens, ASTM D 2938.
- ASTM (American Society For Testing And Materials), 2004. Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements, ASTM D2664.
- Aydan, Ö., Tokashiki, N., Tomiyama, J., Iwata, N., Adachi, K. and Takahashi, Y. 2016. The Development of A Servo-control Testing Machine for Dynamic Shear Testing of Rock Discontinuities and Soft Rocks, *EUROCK2016, Ürgüp*, 791–796.
- Bahaaddini, M., Hagan, P. C., Mitra, R. and Khosravi, M. H. 2016. Experimental and numerical study of asperity degradation in the direct shear test. *Engineering Geology*, 204, 41-52.
- Bakhtar, K. & Barton, N. 1984. Large Scale Static And Dynamic Friction Experiments. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*.
- Barbero, M., Barla, G. and Zaninetti, A. 1996. Dynamic shear strength of rock joints subjected to impulse loading. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 33, No. 2, pp. 141-151). Pergamon.
- Barla, G., Barbero, M., Scavia, C. and Zaninetti, A. 1990. Direct shear testing of single joints under dynamic loading. In *Rock joints* (pp. 447-454). AA Balkema.
- Barla, G., Barla, M. and Martinotti, M. E. 2010. Development of a new direct shear testing apparatus. *Rock mechanics and Rock engineering*, 43, 117-122.
- Barton, N. 1973. Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Eng. Geol.* 7, 287-332.
- Barton, N. 1976. The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13, 1-24.
- Barton, N. & Bandis, S.C. 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In *Rock joints, proc. int. symp. on rock joints, Loen, Norway*, (eds N. Barton and O. Stephansson), 603-610. Rotterdam: Balkema.
- Barton, N. & Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics and Rock engineering*, Vol. 10, No. 1–2, pp.1–54.

- Barton, N. & Bandis, S. 1982. Effects of block size on the shear behavior of jointed rock. In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (pp. ARMA-82). ARMA.
- Beyhan, M. 2024. Süreksizliklerin makaslama dayanımını belirlemede kullanılan patton ölçütünün farklı bir yaklaşımla değerlendirilmesi. Doktora tezi. Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. Ankara.
- Byerlee, J. D. 1967. Theory of friction based on brittle fracture. Journal of Applied Physics. 38, 2928-2934.
- Coulomb, C. A. 1776. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., Vol. 7, pp. 343–387.
- Dang, W., Konietzky, H. and Frühwirth, T. 2016. Direct shear behavior of a plane joint under dynamic normal load (DNL) conditions. Engineering Geology, 213, 133-141.
- 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 Vallejo, L. G. & Ferrer, M. 2011. Geological engineering. CRC press.
- Dölek, İ., Uzelli, T., Ege, İ., and Çelik, Ö. 2023. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri ile oluşan kütle hareketlerine bir örnek: Tepehan heyelanı. Türk Coğrafya Dergisi, (83), 73-86.
- Field, A. 2013. Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. Sage Publications.
- Gao, Z., Wang, S., Yin, H., Zhao, Q., Vladimr, P. and Li, Y. 2023. Estimation of Shear strength parameters considering joint roughness: A stability case analysis of bedding rock slopes in an open-pit mine. Applied Sciences, 13(9), 5730.
- Geoengineer.org. 2015. Dam Vaiont Failure. <https://www.geoengineer.org/news/dam-vaiont-failure> (Son erişim tarihi: 9 Aralık 2025)
- George, D. & Mallery, M. 2010. SPSS for windows step by step: A simple guide and reference. Baston: Allyn & Bacon.
- 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.
- 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 ISRM Congress.
- Habibzadeh, F. 2020. Süreksizliklerin statik ve dinamik koşullardaki kesme dayanımının yapay süreksizlikler yoluyla karşılaştırılması. Doktora tezi. Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. 186 sayfa. Ankara.
- Hencher, S. R. & Richards, L. R. 2014. Assessing the shear strength of rock discontinuities at laboratory and field scales. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 883-905.
- Hoek, E. & Bray, J. 1981. Rock Slope Engineering, 3rd edn, Inst. Mining and Metallurgy, London, UK.

- Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. 2000. Support of underground excavations in hard rock. CRC Press.
- Homand, F., Belem, T. and Souley, M. 2001. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(10), 973-999.
- Horn, H. M. & Deere, D. V. 1962. Frictional characteristics of minerals. *Geotechnique* 12(4), 319-335.
- ICOLD. 1974. Lessons from dam incidents. International Commission on Large Dams, 41-46, Paris: ICOLD-Central Office.
- Indraratna, B. & Haque, A. 1997. Experimental study of shear behavior of rock joints under constant normal stiffness conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 141-e1.
- Indraratna, B. & Jayanathan, M. 2005. Measurement of pore water pressure of clay-infilled rock joints during triaxial shearing. *Geotechnique*, 55(10), 759-764.
- Indraratna, B., Jayanathan, M. and Brown, E. T. 2008. Shear strength model for overconsolidated clay-infilled idealised rock joints. *Géotechnique*, 58(1), 55-65.
- Indraratna, B., Mirzaghobanali, A., Oliveira, D. and Premadasa, W. N. 2012. Shear behaviour of rock joints under cyclic loading.
- Indraratna, B., Oliveira, D. A. F. and Brown, E. T. 2010. A shear-displacement criterion for soil-infilled rock discontinuities. *Géotechnique*, 60(8), 623-633.
- Indraratna, B., Premadasa, W., Brown, E. T., Gens, A. and Heitor, A. 2014. Shear strength of rock joints influenced by compacted infill. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 70, 296-307.
- Indraratna, B., Welideniya, H. S. and Brown, E. T. 2005. A shear strength model for idealised infilled joints under constant normal stiffness. *Geotechnique*, 55(3), 215-226.
- ISRM, 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Rock Characterisation Testing and Monitoring*.
- ISRM, 1981. *Rock Characterization Testing And Monitoring Suggested Methods*. ET BROWN Pergamon Press. Oxford, UK
- Jaeger, J. C. & Cook, N. G. W. 1970. Friction in granular materials. In *Proc. Int. Conf. Struct. and Solid Mech. Civ. Eng.*, Southampton, UK, Paper (Vol. 20, pp. 257-266).
- Jafari, M. K., Hosseini, K. A., Pellet, F., Boulon, M. and Buzzi, O. 2003. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7), 619-630.
- Jahanian, H. & Sadaghiani, M. H. 2014. Experimental study on the shear strength of sandy clay infilled regular rough rock joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 907-922.
- Karakus, M., Liu, Y., Zhang, G. and Tang, H. 2016. A new shear strength model incorporating influence of infill materials for rock joints. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2, 183-193.

- Konietzky, H., Frühwirth, T. and Luge, H. 2012. A new large dynamic rockmechanical direct shear box device. *Rock mechanics and rock engineering*, 45, 427-432.
- Krsmanovic, D. 1967. Initial and residual shear strength of hard rocks. *Geotechnique*, 17(2), 145-160.
- Kumsar, H., Aydan, Ö. and Ulusay, R. 2025. Geomechanical Evaluation of the Slope Failures Induced by the February 6, 2023 Great Earthquakes of Türkiye with a Special Emphasis on Large Scale İdillidere and Tepehan Rock Slope Failures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-23.
- Ladanyi, B. & Archambault, G. 1977. Shear strength and deformability of filled indented joints.
- Laginha, S. J. & Guerrero, M. 1968. Shear strength of rock masses at three Spanish dam sites. In 2nd Int. Symp. Rock Mechanics, Madrid 147-151.
- Lama, R.D. 1978. Influence of clay fillings on shear behaviour of joints.
- Lee, H. S., Park, Y. J., Cho, T. F. and You, K. H. 2001. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 38(7), 967-980.
- Li, H. B., Feng, H. P., Liu, B. and Li, J. R. 2006. Experimental studies on mechanical properties of rock joints under dynamic loading. *Key Engineering Materials*, 326, 1709-1712.
- Locher, H. G. 1968. Some results of direct shear tests on rock discontinuities. 2nd Int. Rock Mechanics Symp., Madrid, pp. 171-173
- Meng, F., Wong, L. N. Y., Zhou, H. and Wang, Z. 2018. Comparative study on dynamic shear behavior and failure mechanism of two types of granite joint. *Engineering geology*, 245, 356-369.
- Meng, F., Wong, L. N. Y., Zhou, H., Yu, J. and Cheng, G. 2019. Shear rate effects on the post-peak shear behaviour and acoustic emission characteristics of artificially split granite joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 2155-2174.
- Mirzaghobanali, A., Nemcik, J. and Aziz, N. 2013. Effects of shear rate on cyclic loading shear behaviour of rock joints under constant normal stiffness conditions. *Rock mechanics and rock engineering*, 47, 1931-1938.
- Mokhtarian, H., Moomivand, H., and 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.
- 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), 413-421.
- Niktabar, S. M., Rao, K. S. and Shrivastava, A. K. 2017. Effect of rock joint roughness on its cyclic shear behavior. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(6), 1071-1084.
- Pallant, J. 2016. SPSS Survival Manual: A Step by Step Guide to Data Analysis Using IBM SPSS.

- 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.
- Patton, F. D. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. Proceedings 1st Congress on Rock Mechanics, ISR Lisbon. Vol. 1, pp. 509–513
- 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.
- Premadasa, W. N. (2013). The influence of infill saturation on the shear strength of soil-infilled rock joints.
- Qi, S., Zheng, B., Wu, F., Huang, X., Guo, S., Zhan, Z., Zou, Y., and Barla, G. 2020. A new dynamic direct shear testing device on rock joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 4787-4798.
- Rocha, M. 1964. Mechanical behaviour of rock foundation in concrete dams. 8th ICOLD Congress, Edinburgh, 785-831.
- Sanei, M., Faramarzi, L. and Dehghani, B. 2014. Evaluation of rock discontinuity shear strength criteria based on the laboratory direct shear tests. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 26(3).
- She, C. X. & Sun, F. T. 2017. Study of the peak shear strength of a cement-filled hard rock joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 713-728.
- Singh, H. K. & Basu, A. 2017. A comparison between the shear behavior of ‘real’ natural rock discontinuities and their replicas. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 329-340.
- 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(6), 963-981.
- Sümer, Ö. 2024. Tepehan Rockslide: A large-scale earthquake-induced geological structure formed by Mw: 7.8 Kahramanmaraş (Pazarcık) earthquake, Türkiye. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 33(1), 40-55.
- Tabachnick, B. G. & Fidell, L. S. 2019. *Using Multivariate Statistics* (7th ed.). Pearson.
- Tai, D., Qi, S., Zheng, B., Wang, C., Guo, S. and Luo, G. 2023. Shear mechanical properties and energy evolution of rock-like samples containing multiple combinations of non-persistent joints. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(7), 1651-1670.
- Tan, R., Chai, J. and Cao, C. 2019. Empirical Shear Strength Criterion for Artificial Joint. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 283, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.
- Tang, J. Z., Yang, S. Q., Zhao, Y. L. and Tian, W. L. 2020. Experimental and numerical modeling of the shear behavior of filled rough joints. *Computers and Geotechnics*, 121, 103479.
- Thomas, H. 1979. *The Engineering of Large Dams*. London. John Wiley & Sons.

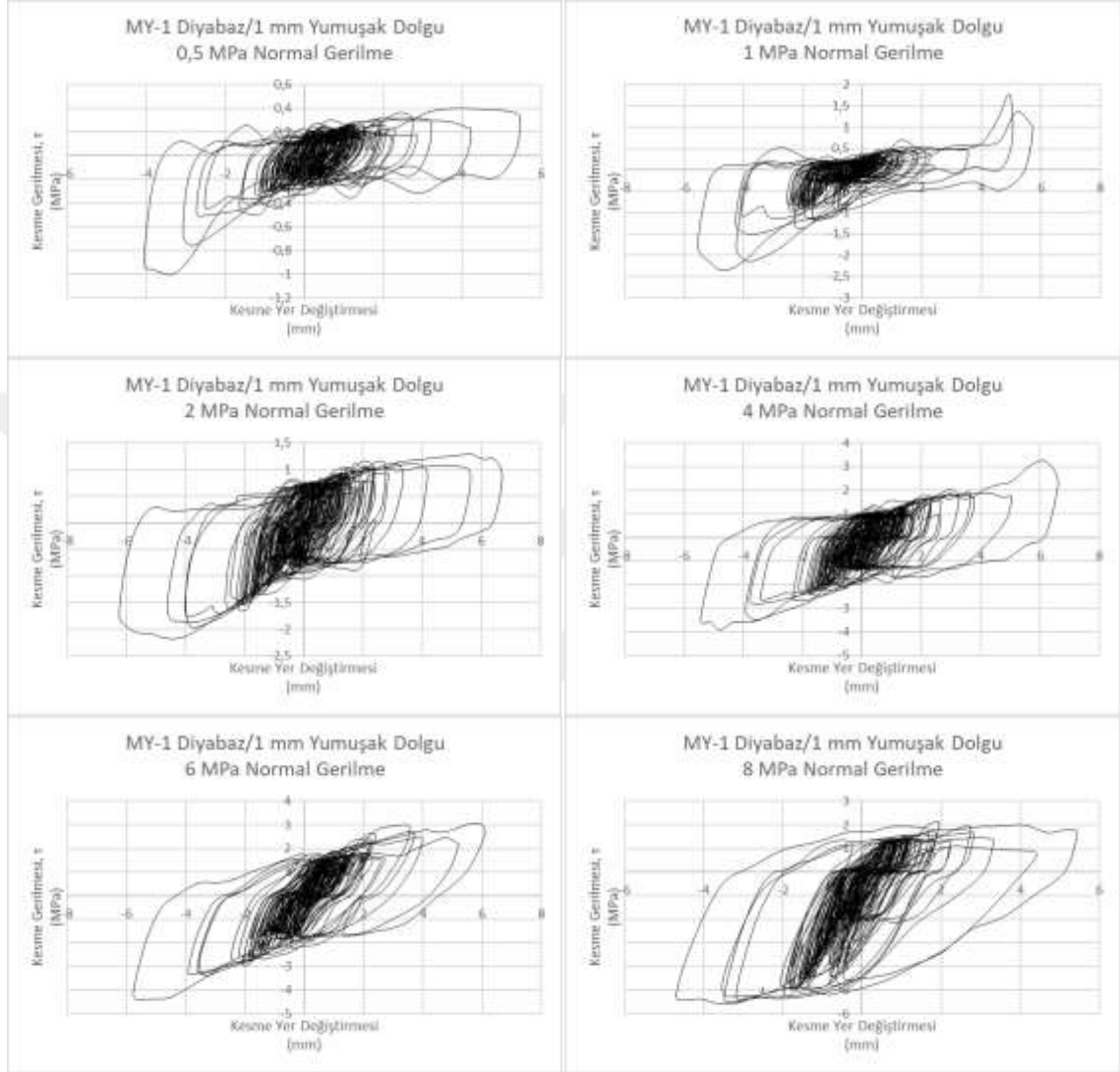
- Ulusay, R. 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 38.
- Üzgün, A. F. 2025. Süreksizliklerde dolgunun kesme dayanımına etkisinin nicelleştirilmesi. Doktora tezi. Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı. 149 sayfa. Ankara.
- Wallace, G. B., Slebir, E. J. and Anderson, F. A. 1969. Foundation testing for Auburn dam. 11th Svmp. Rock Mech., Berkelev, 461-498.
- Wang, F., Wu, B., Wang, S., Meng, F., Xiu, Z., Wang, C. and Wang, S. 2022. Shear response of rough rock discontinuities subjected to impact loading: experimental study and theoretical modelling. *Lithosphere*, 2022(Special 11).
- Wang, G., Wu, X., Zhang, X., Zhang, Z., Zhao, Z., Han, W., Wang, Y. and Zhao, C. 2020. Macro–Microscopic study on the shear characteristics of filled joints with different roughnesses. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 8331-8348.
- Wang, S., Wang, F. and Xiu, Z. 2019. Dynamic shear strength of rock joints and its influence on key blocks. *Geofluids*, 2019(1), 6803512.
- Wu, Q., Jiang, Y., Tang, H., Luo, H., Wang, X., Kang, J., Zhang, Z., Yi, X. and Fan, L. 2020. Experimental and numerical studies on the evolution of shear behaviour and damage of natural discontinuities at the interface between different rock types. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 3721-3744.
- Wyllie, D. C. & Mah, C. 2004. *Rock slope engineering*. CRC Press.
- Yakut, M. 2019. Malpasset Barajı kalıntıları ve kemer gövdesindeki yarık açıklık [Fotoğraf]. Kişisel arşiv.
- Yue, L., Niu, J., Ma, Q., Zhao, C., Cao, M. and Yu, B. 2023. Research on direct shear test of rock-like materials with two closed pre-existing cracks of different attitudes. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1053630.
- Zhang, K., Liu, Y., Lei, Q., Hou, S. and Yang, Q. 2023. Effect of dynamic cyclic shear on frictional strength weakening of a plane joint. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165, 107670.
- Zhang, X., Jiang, Q., Chen, N., Wei, W. and Feng, X. 2016. Laboratory investigation on shear behavior of rock joints and a new peak shear strength criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 3495-3512.
- Zheng, B., Qi, S., Huang, X., Guo, S., Wang, C., Zhan, Z. and Luo, G. 2020. An advanced shear strength criterion for rock discontinuities considering size and low shear rate. *Applied Sciences*, 10(12), 4095.
- Zhou, Y. & Zhao, J. (Eds.). 2011. *Advances in rock dynamics and applications*. CRC press.

EKLER

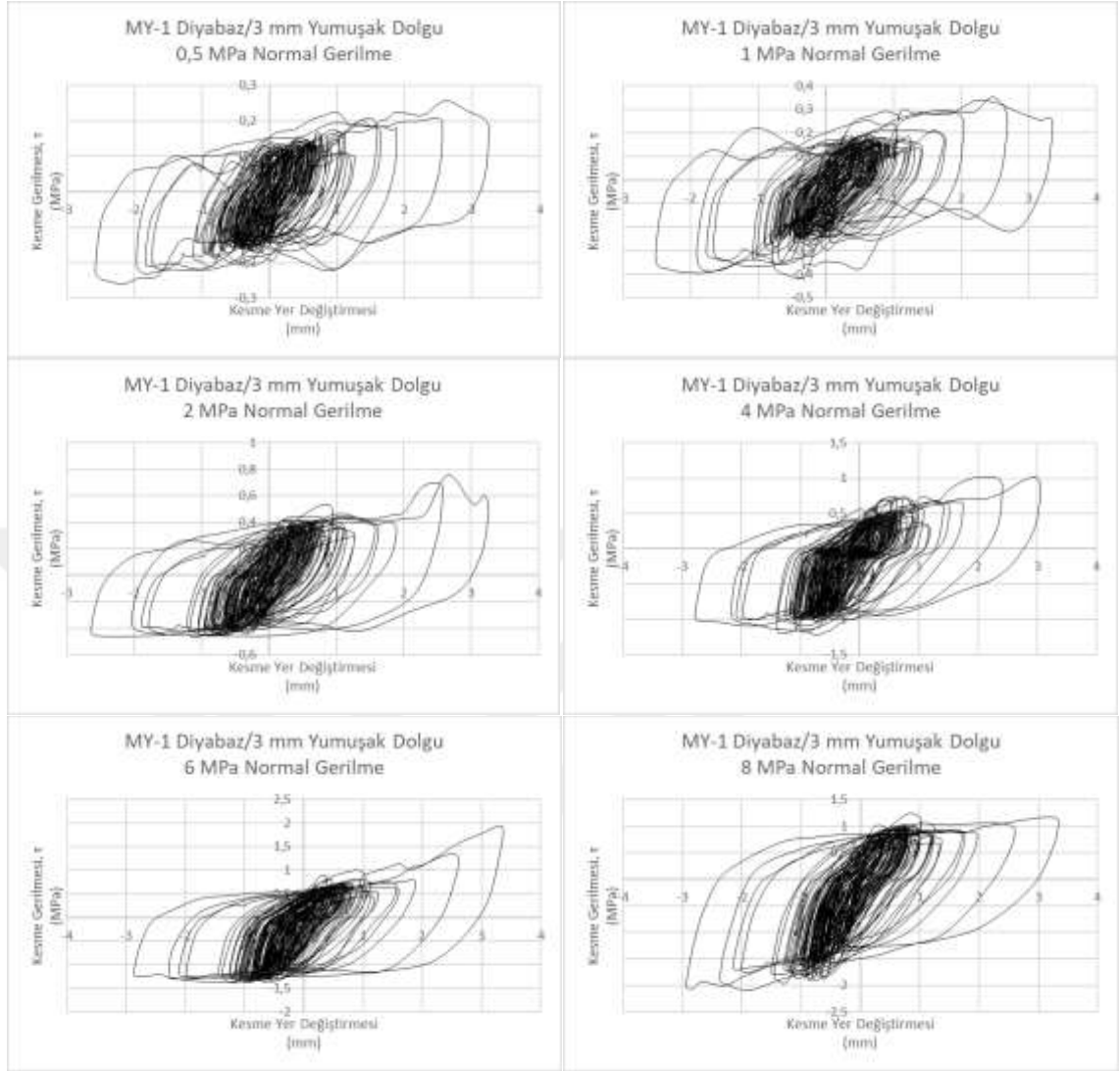
EK 1 Kesme Gerilmesi-Yer Değiştirme ve Kesme Gerilmesi-Normal Gerilme Grafikleri

EK 2 Doğrudan Dinamik Kesme Deney Numunelerinin Deneyler Öncesi ve Sonrası Fotoğrafları

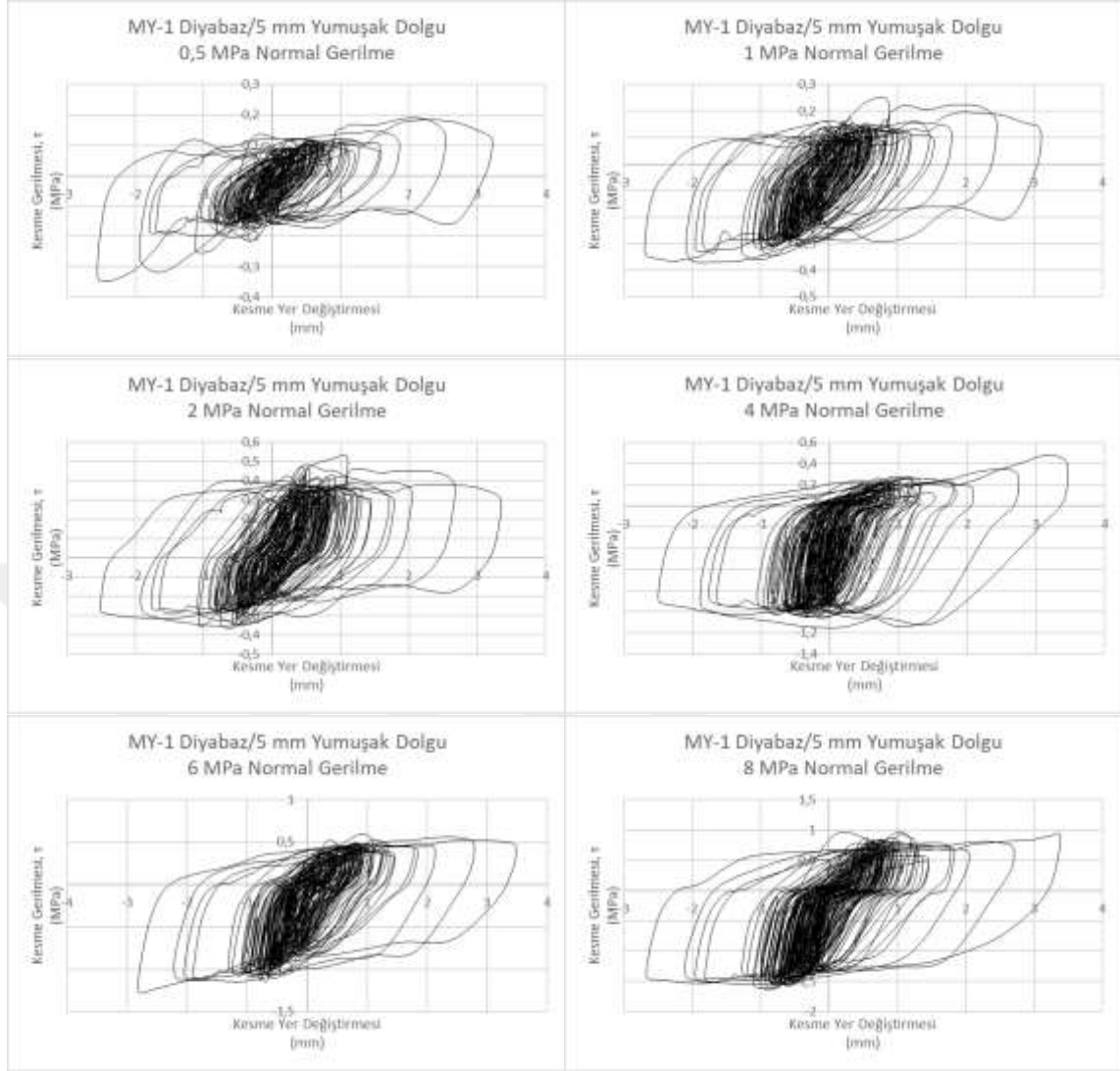
EK 1 Kesme Gerilmesi-Yer Değiştirme ve Kesme Gerilmesi-Normal Gerilme Grafikleri



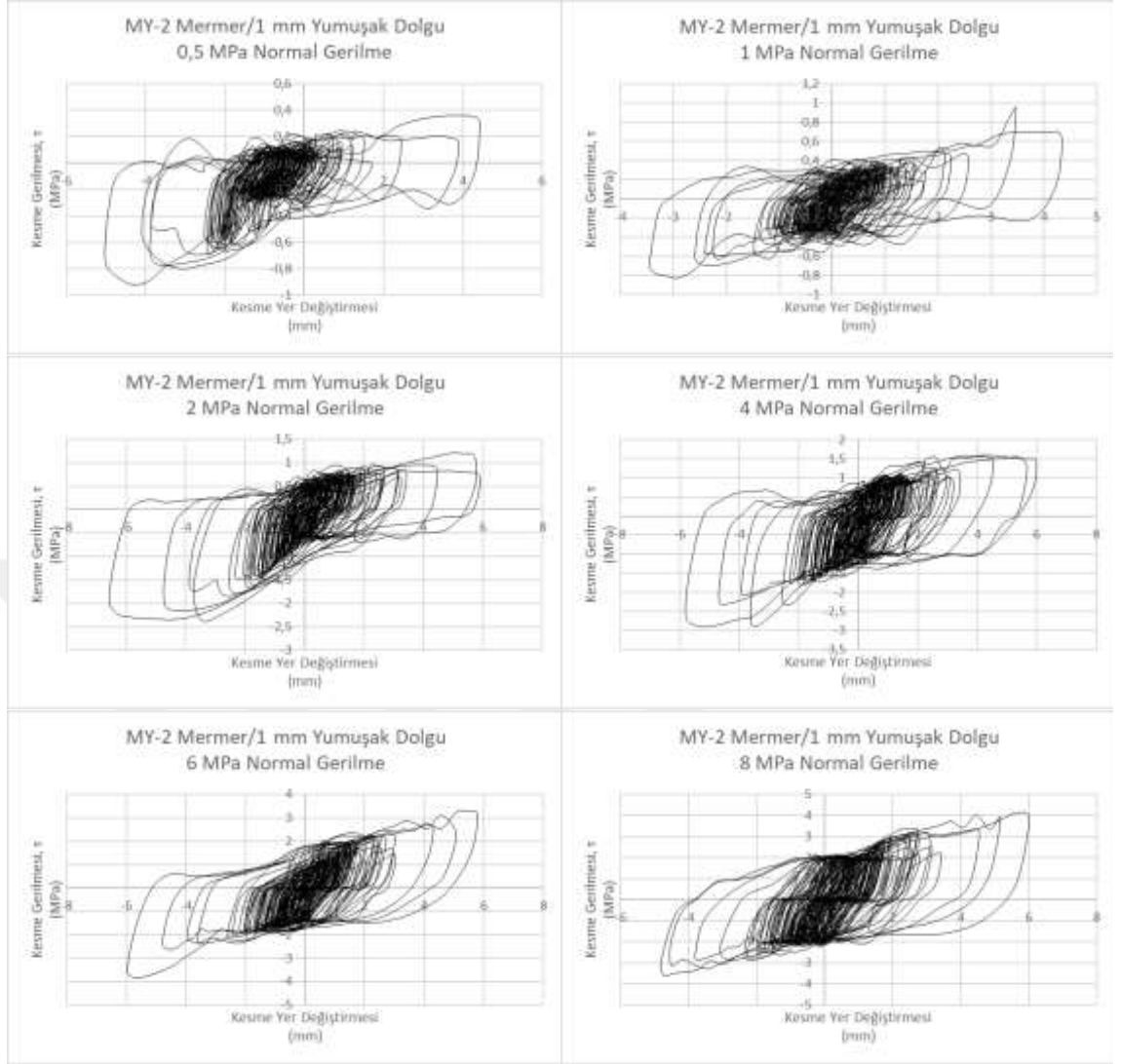
MY-1 Diyarbaz kayasında 1 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi grafikleri



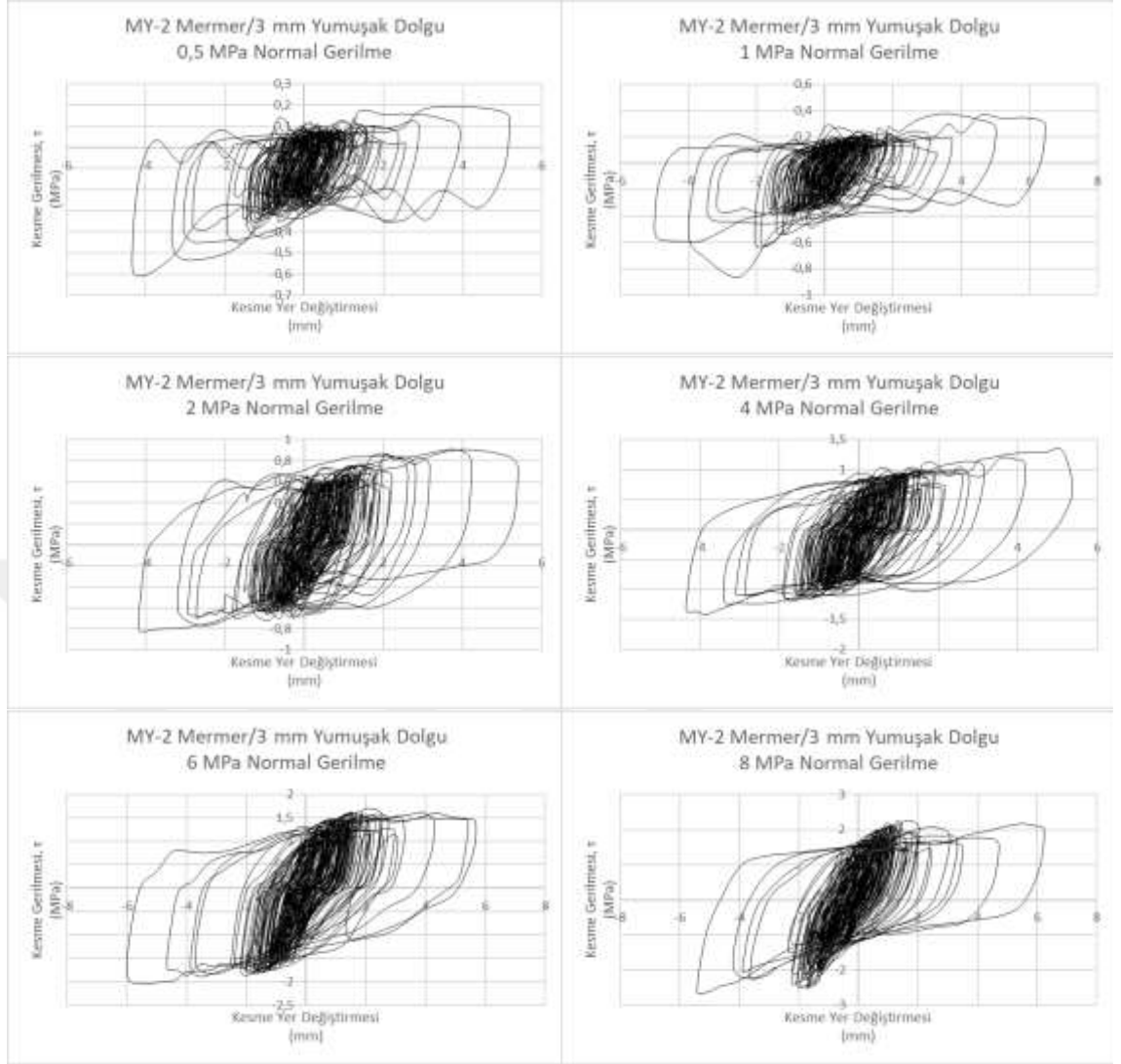
MY-1 Diyabaz kayasında 3 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



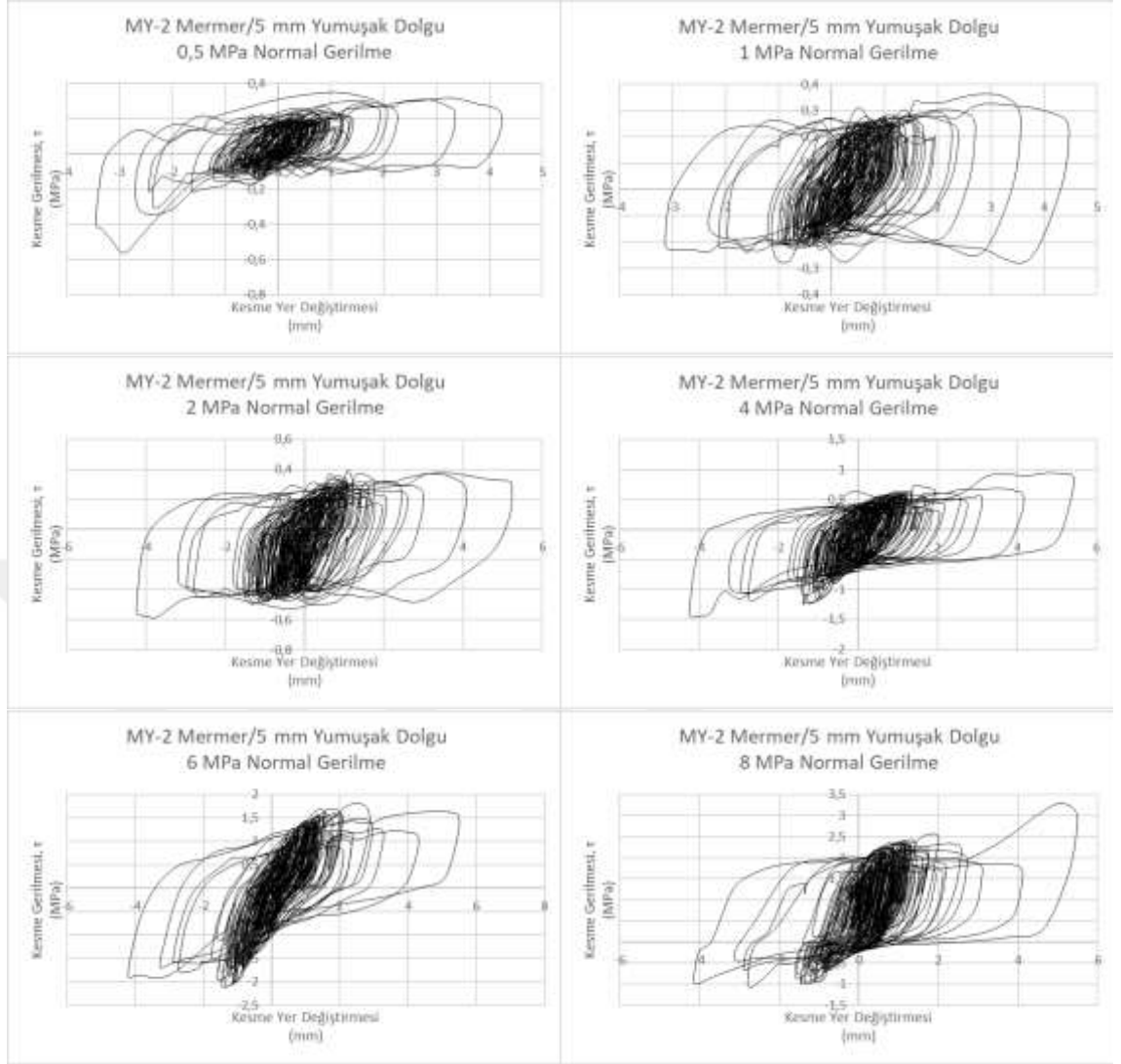
MY-1 Diyabaz kayasında 5 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



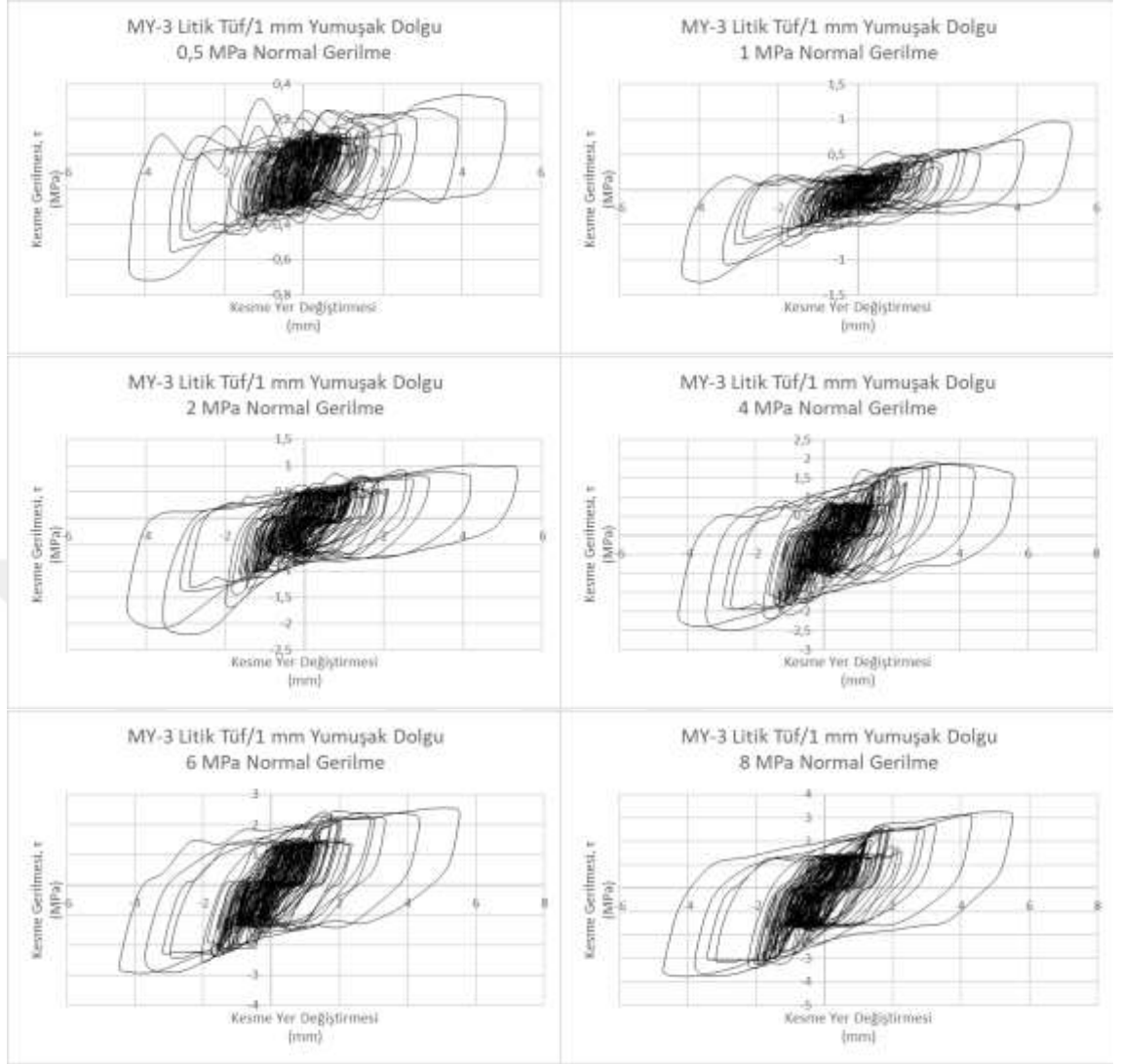
MY-2 Mermer kayasında 1 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



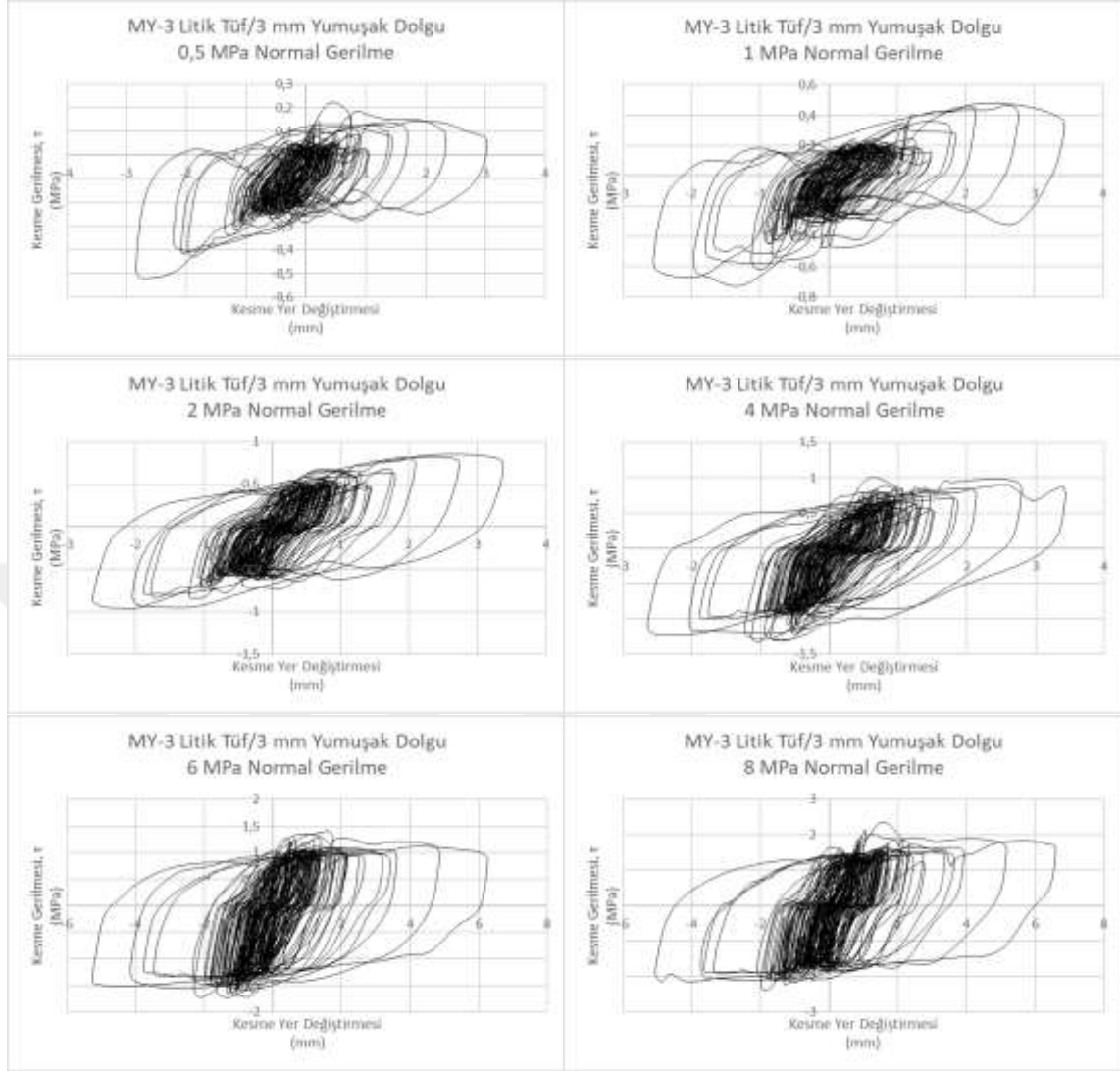
MY-2 Mermer kayasında 3 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



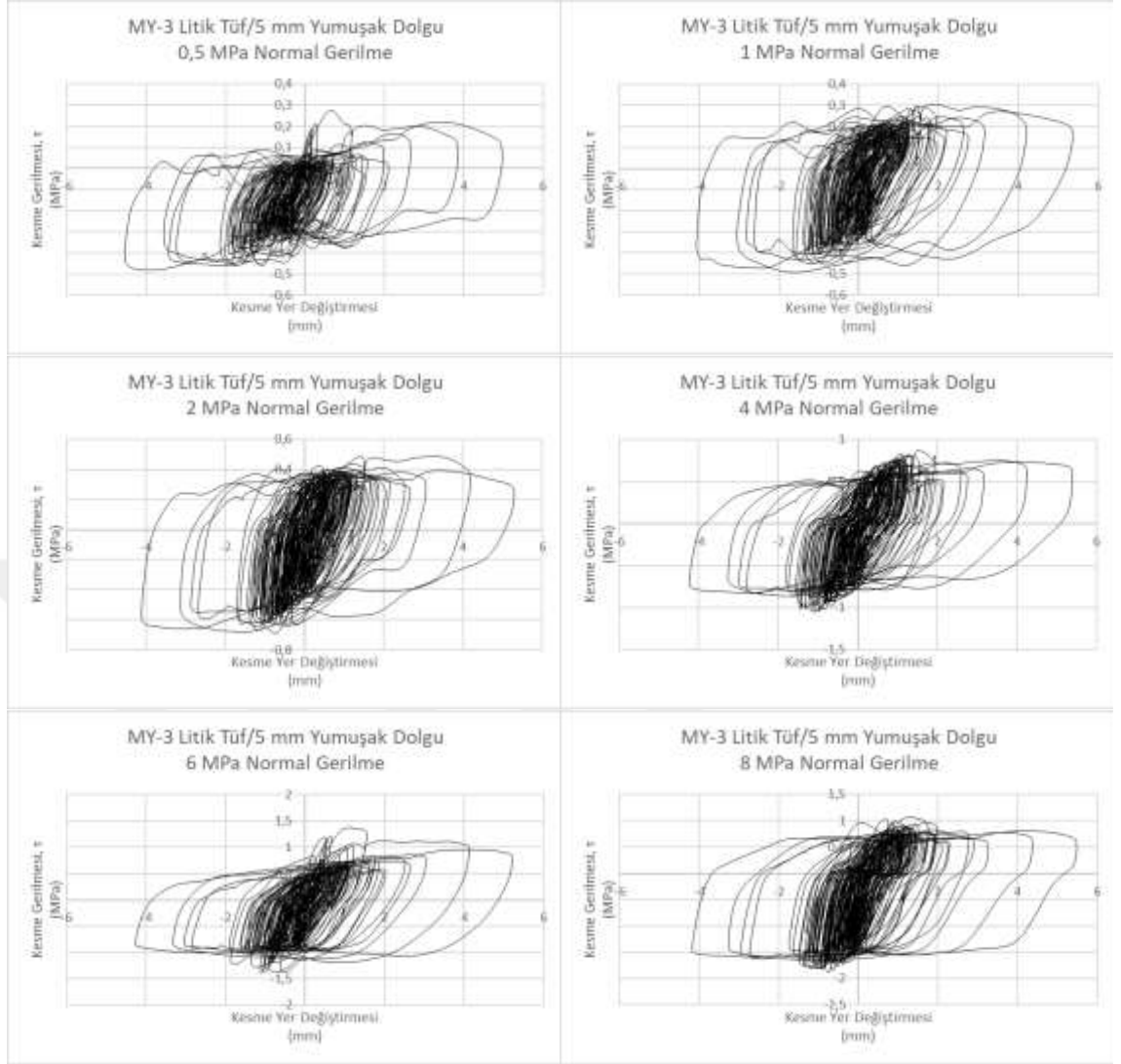
MY-2 Mermer kayasında 5 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



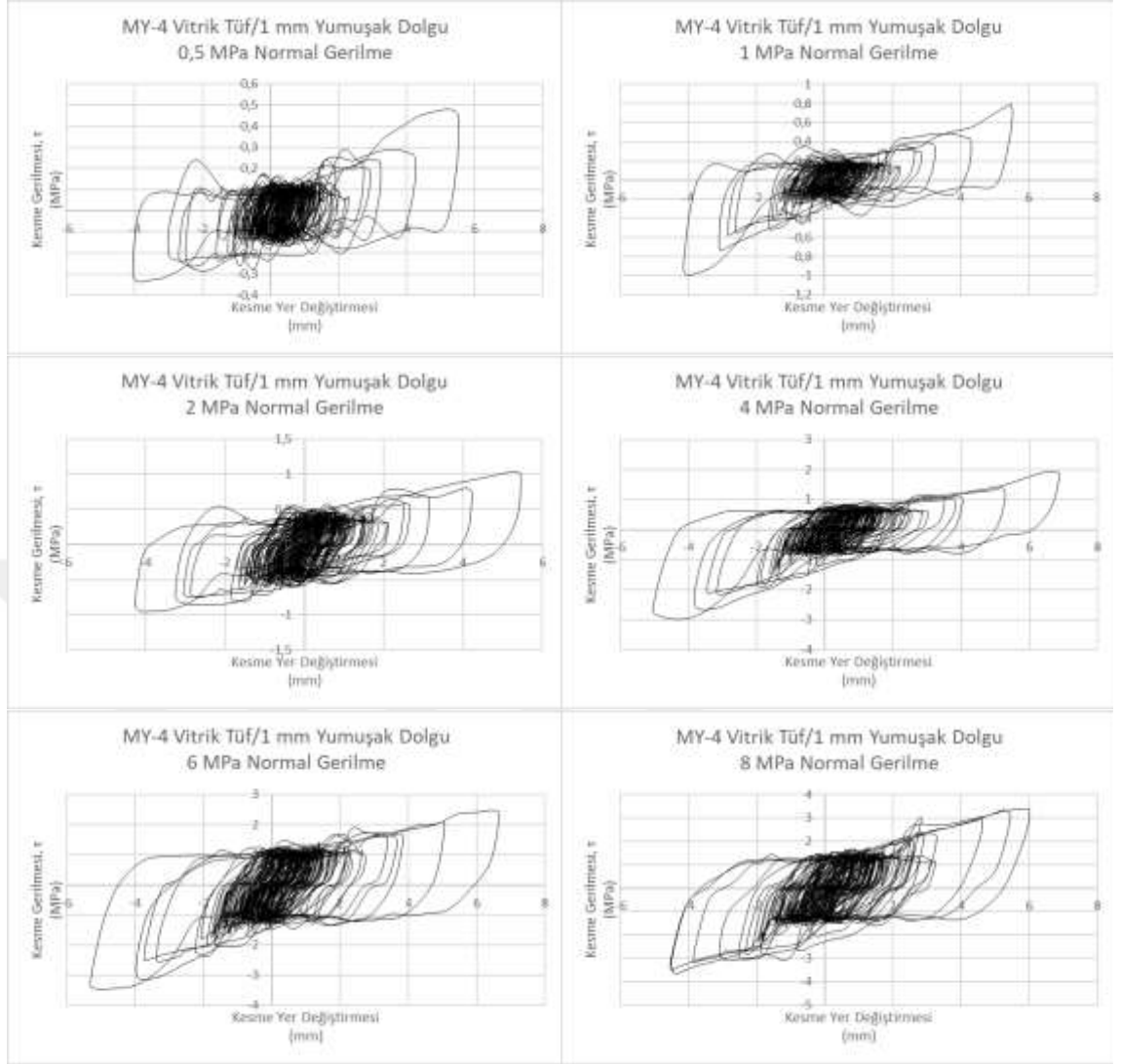
MY-3 Litik Tuf kayasında 1 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



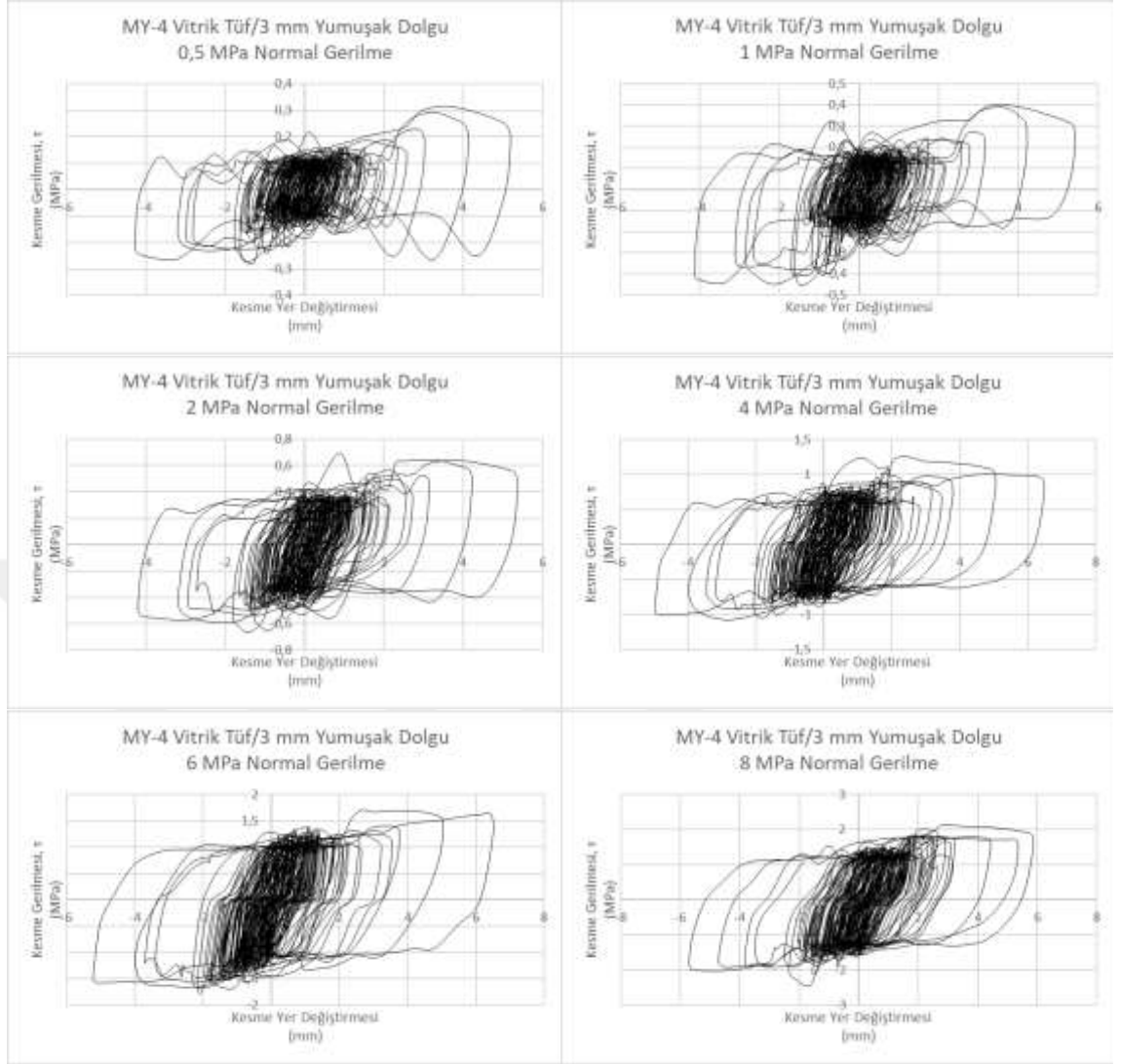
MY-3 Litik Tuf kayasında 3 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



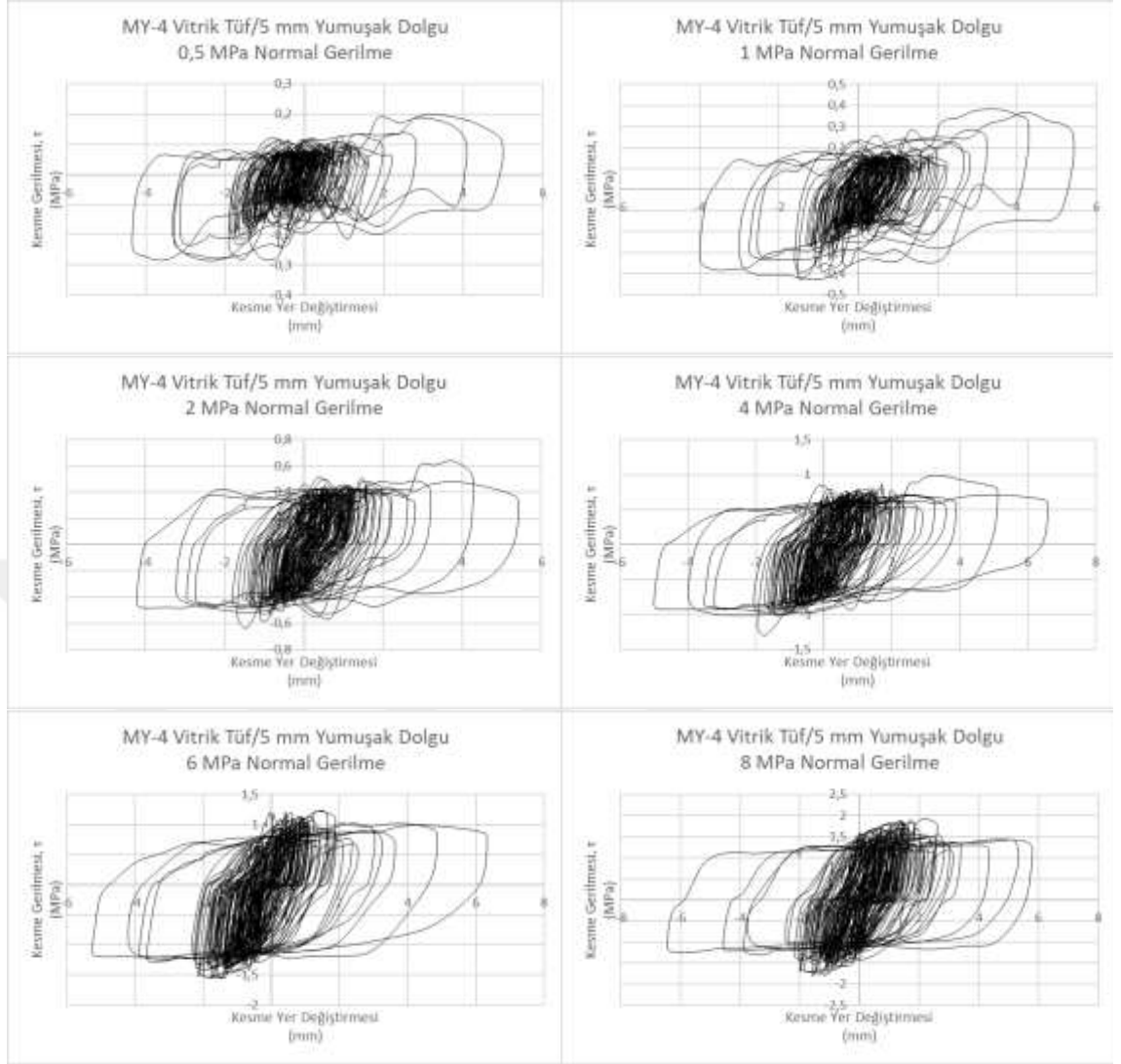
MY-3 Litik Tüf kayasında 5 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



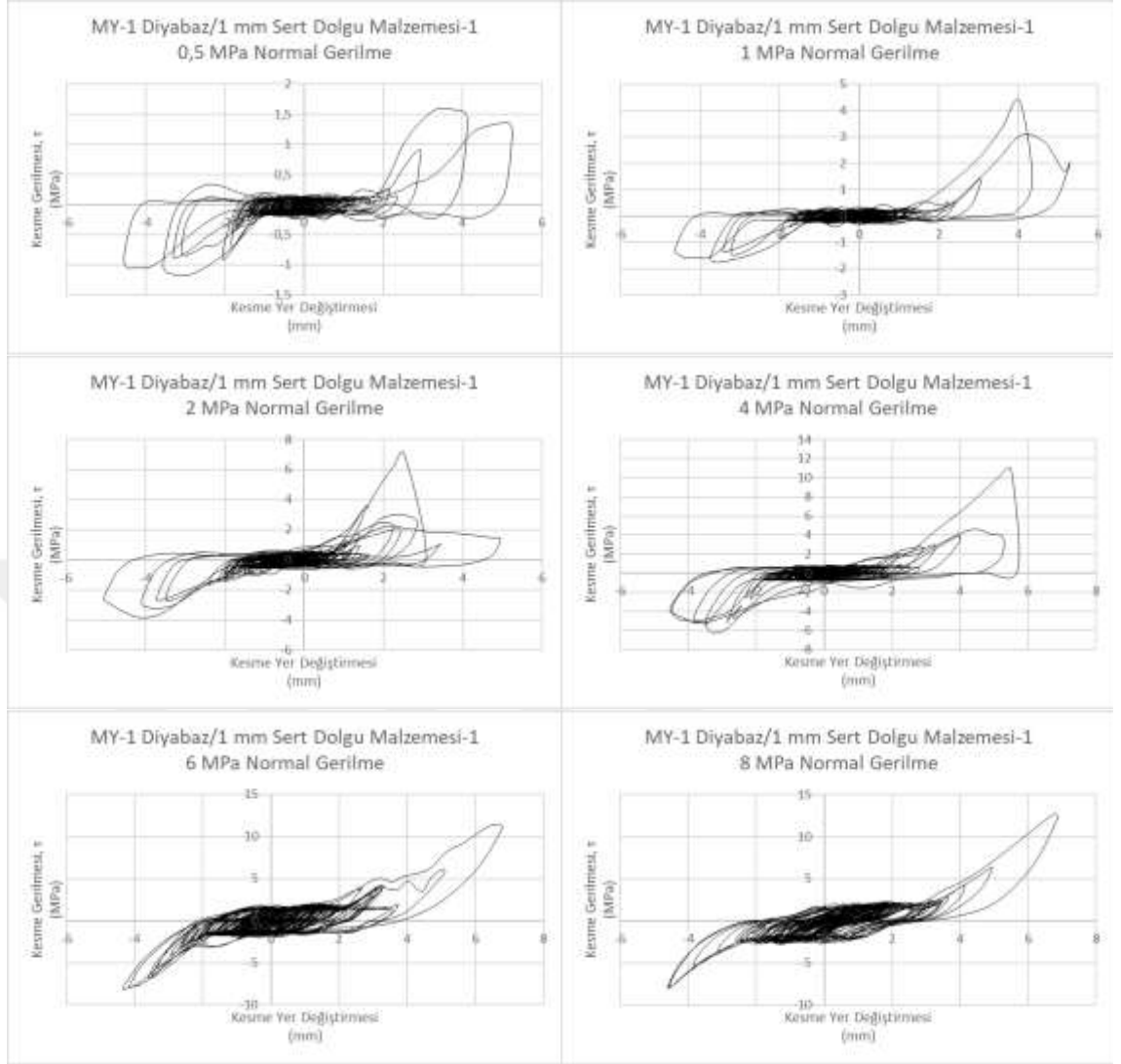
MY-4 Vitric Tuf kayasında 1 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



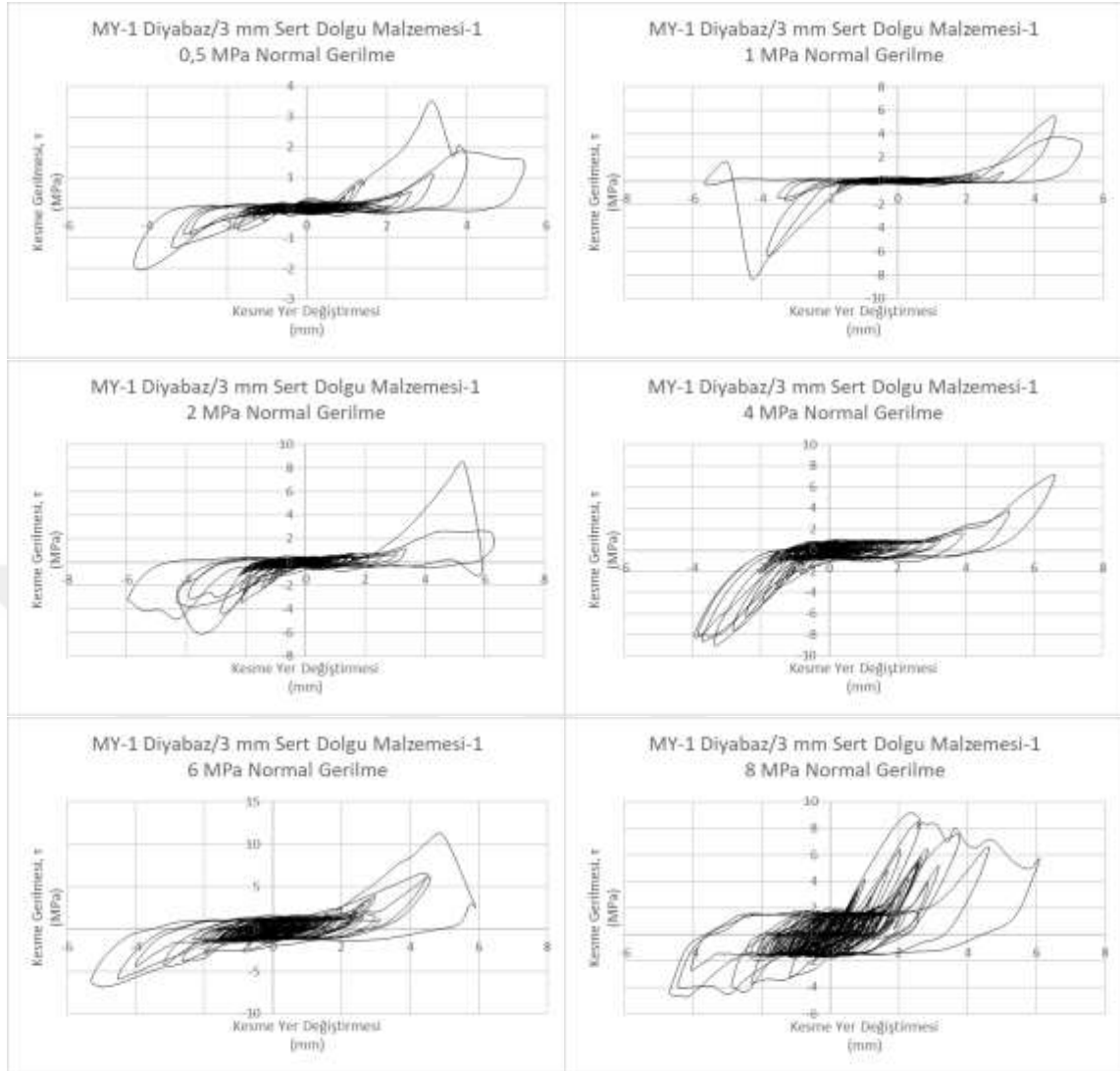
MY-4 Vitrik Tüf kayasında 3 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



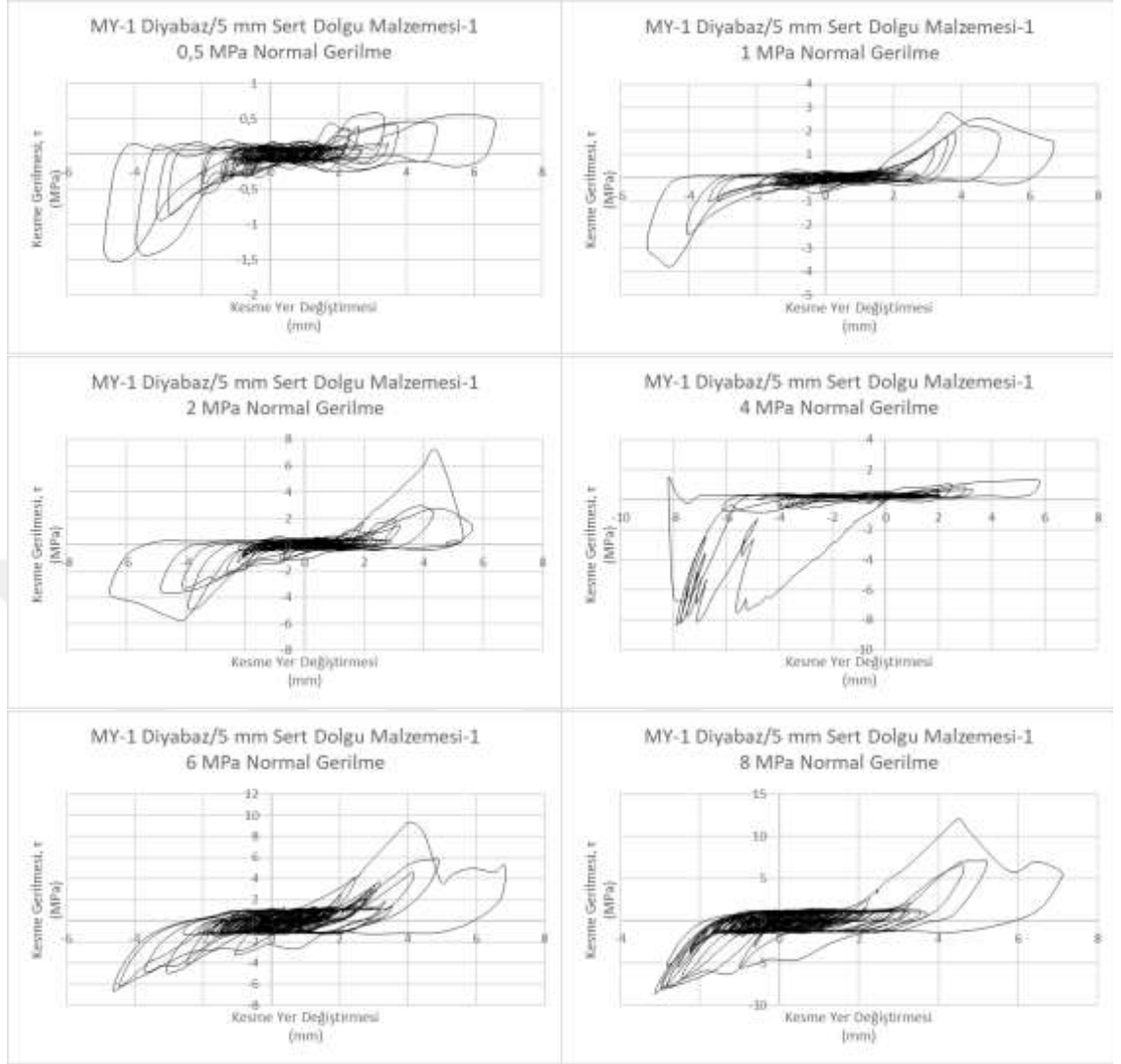
MY-4 Vitrik Tuf kayasında 5 mm yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



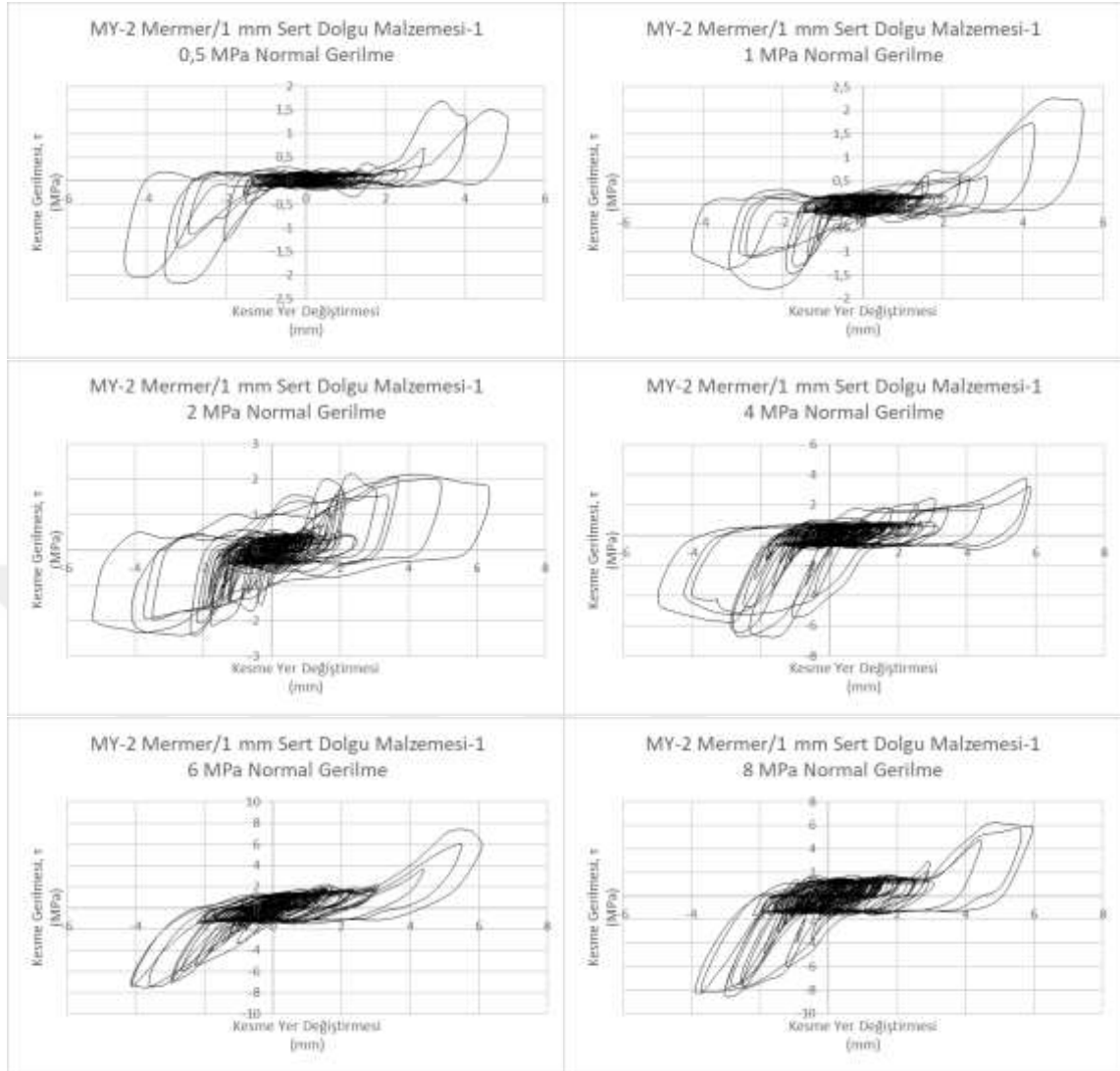
MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



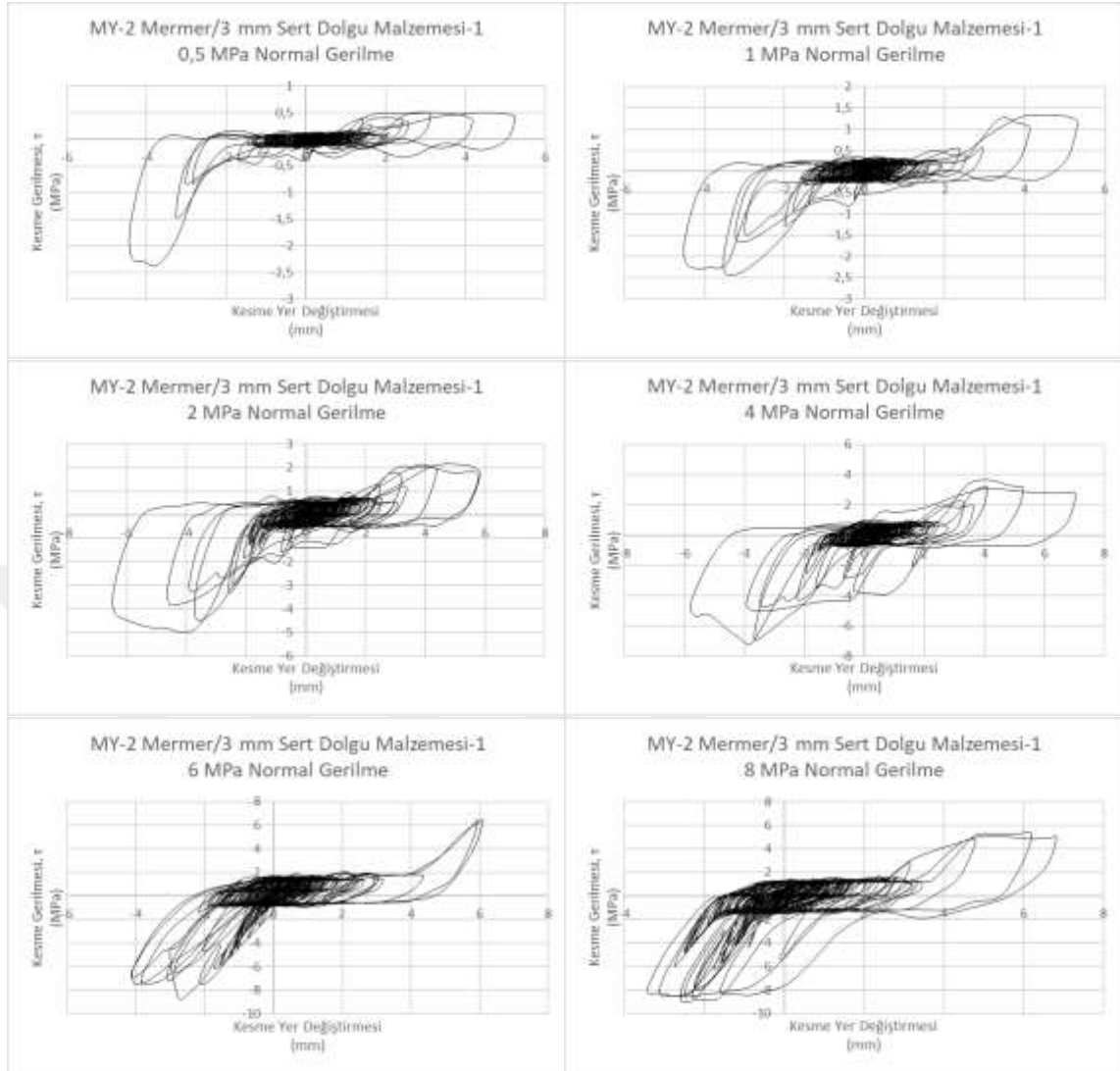
MY-1 Diyabaz kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



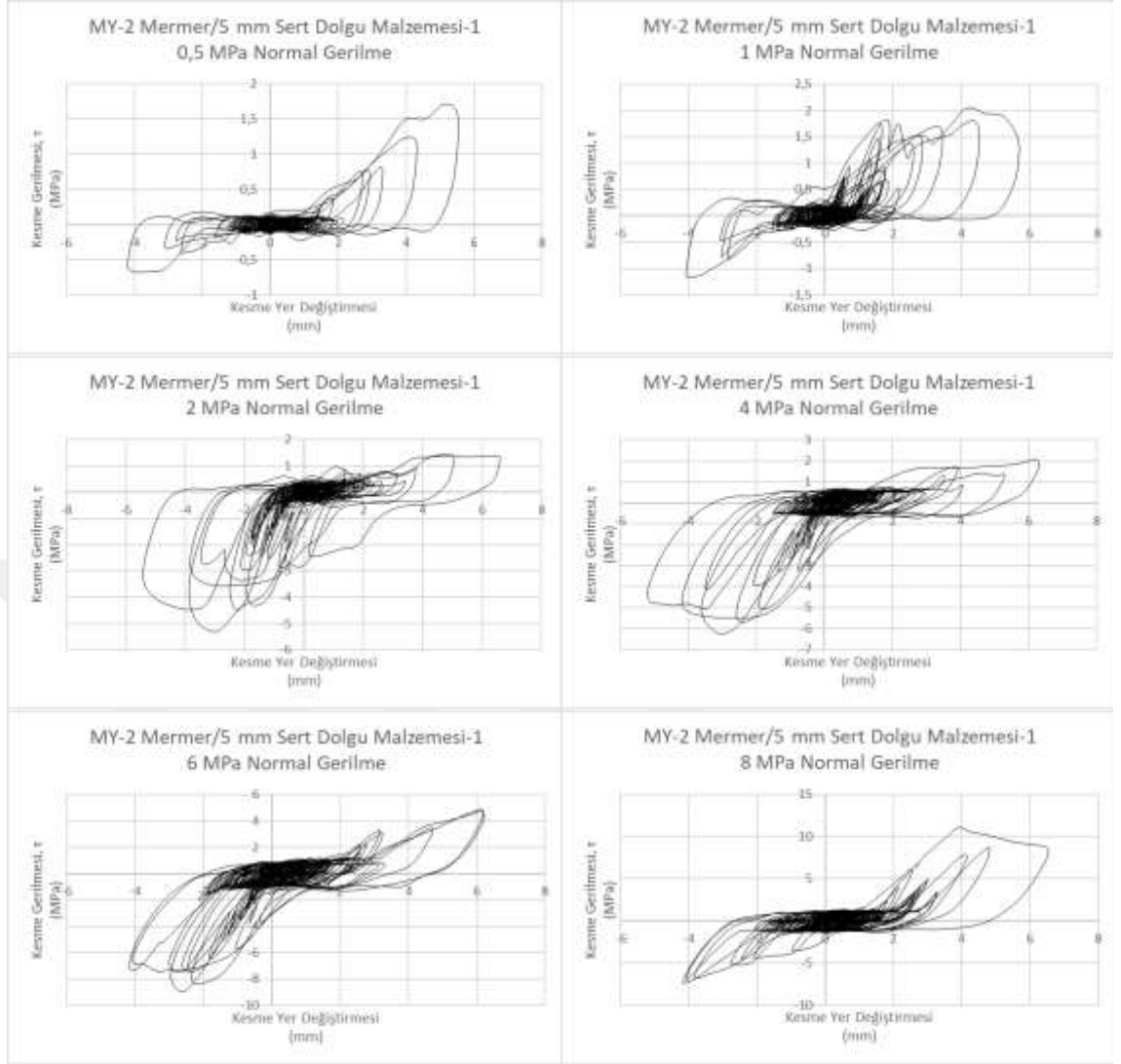
MY-1 Diyabaz kayasında 5 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



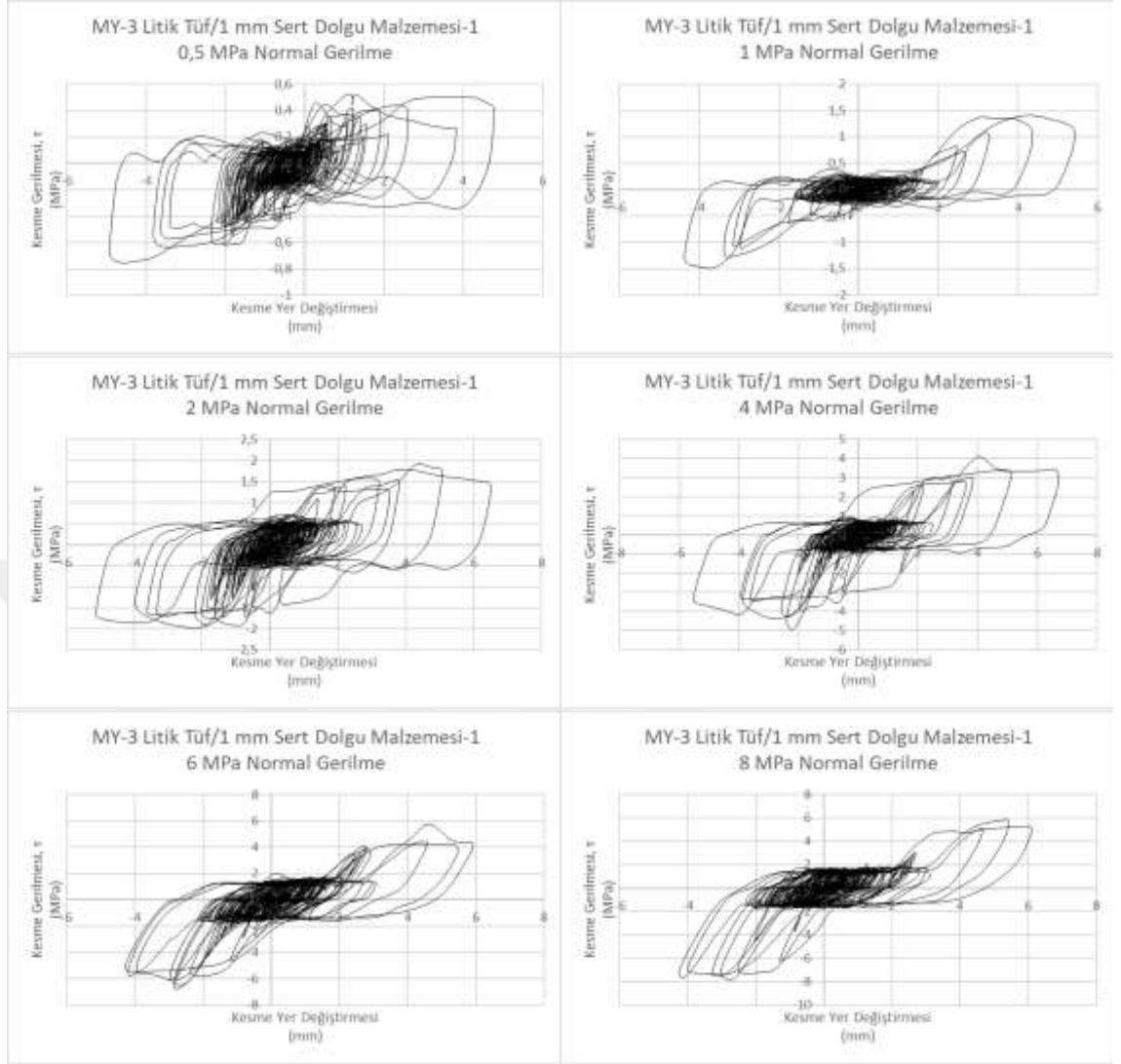
MY-2 Mermer kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



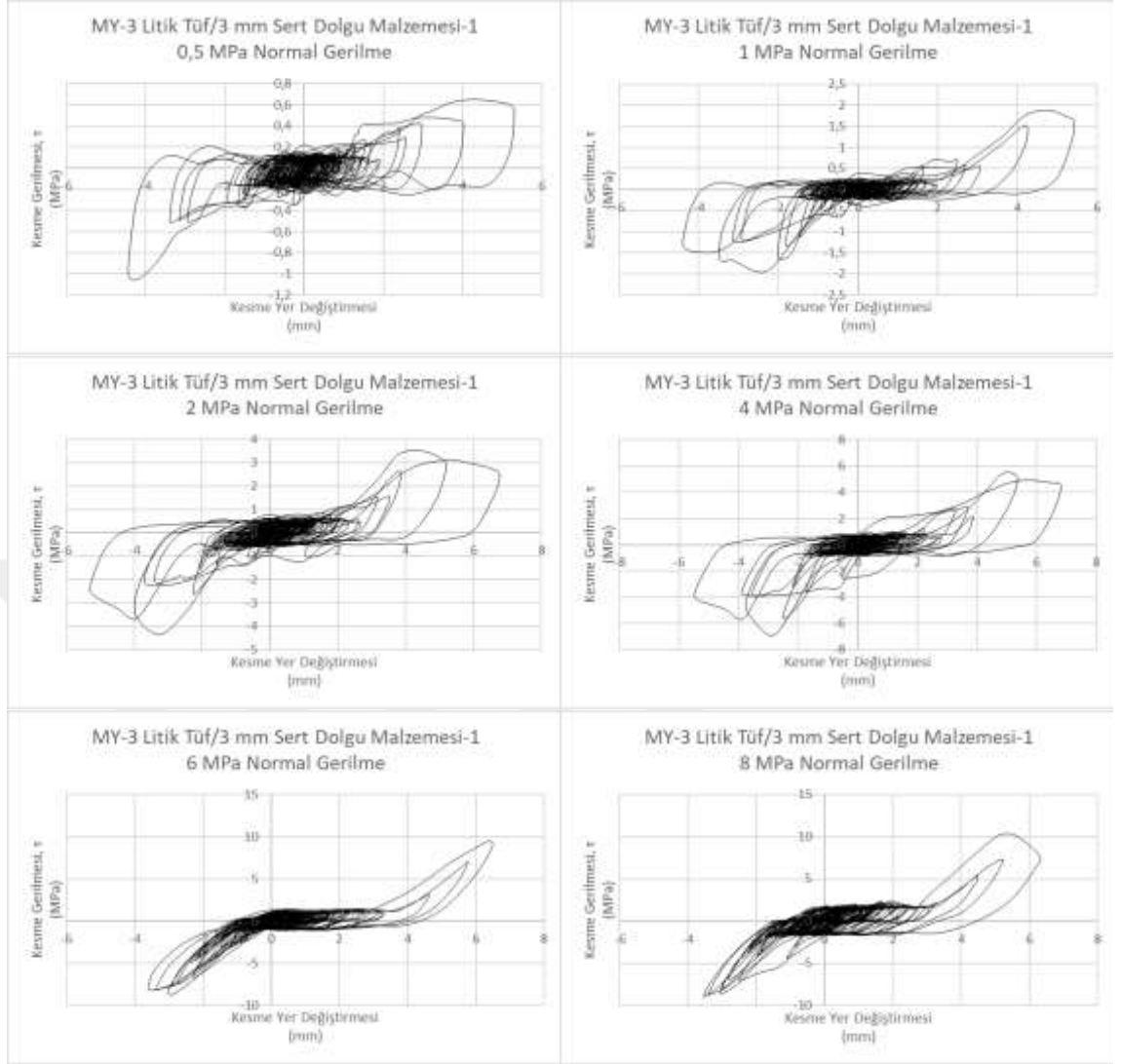
MY-2 Mermer kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



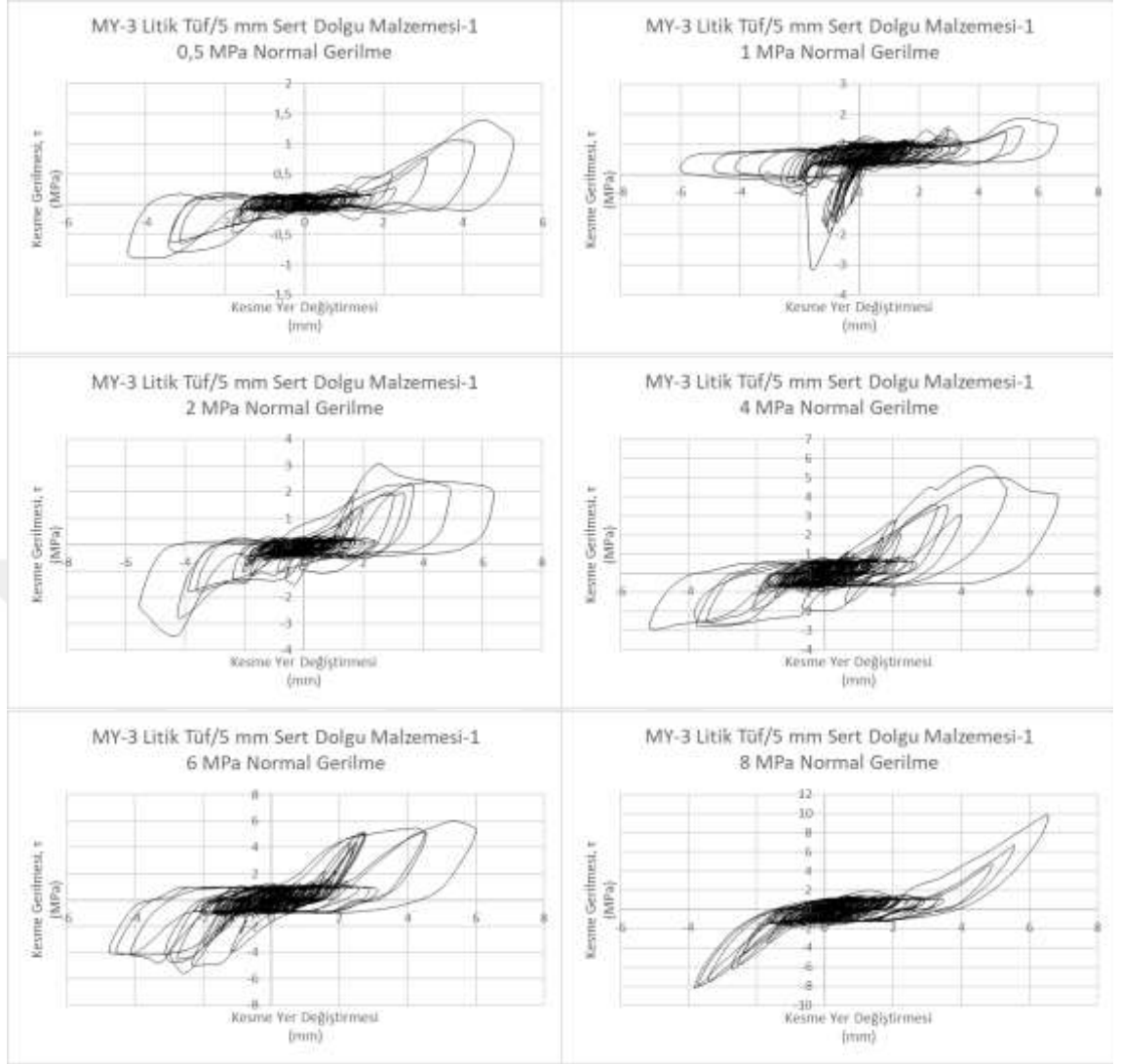
MY-2 Mermer kayasında 5 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



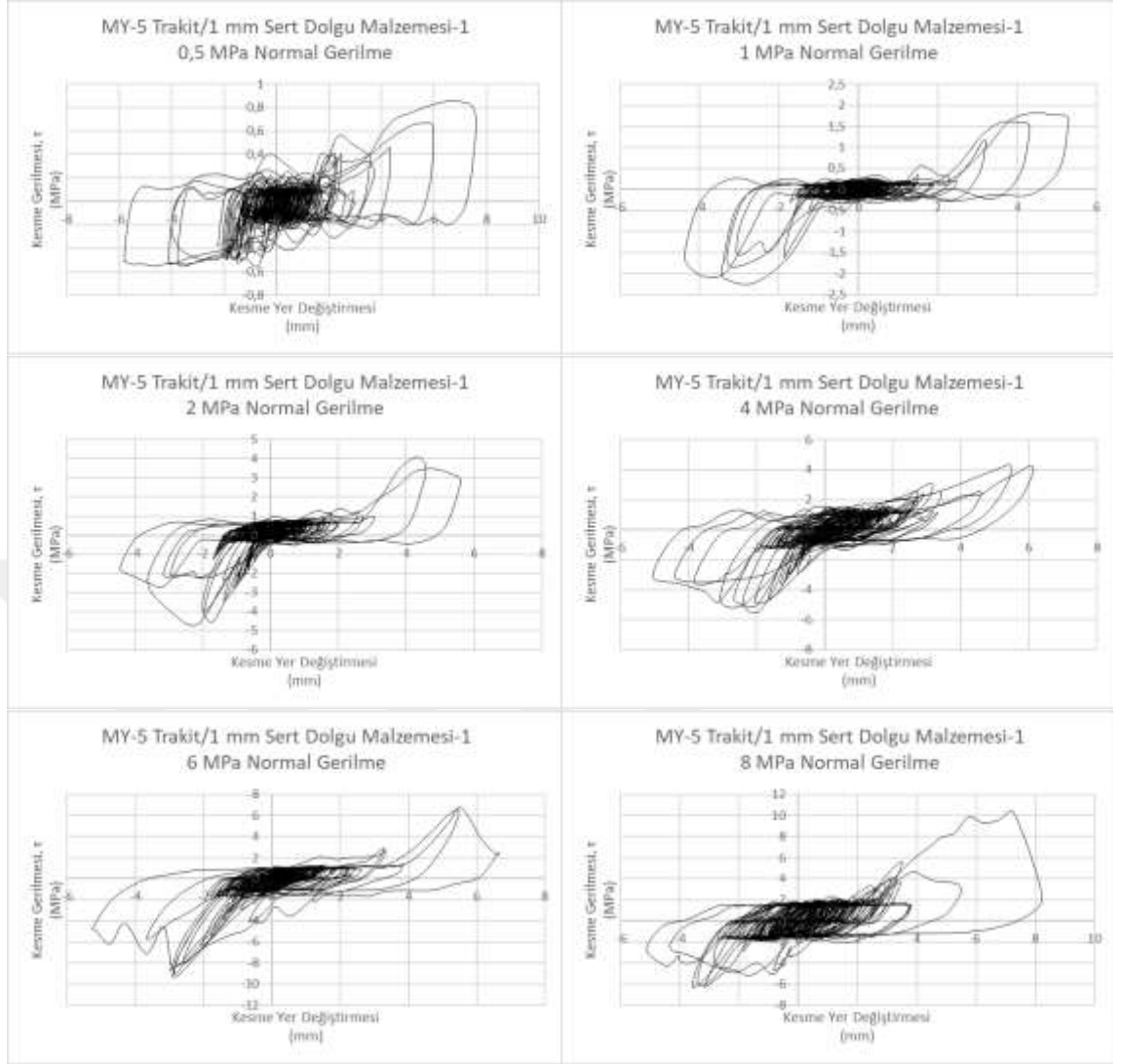
MY-3 Litik Tuf kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



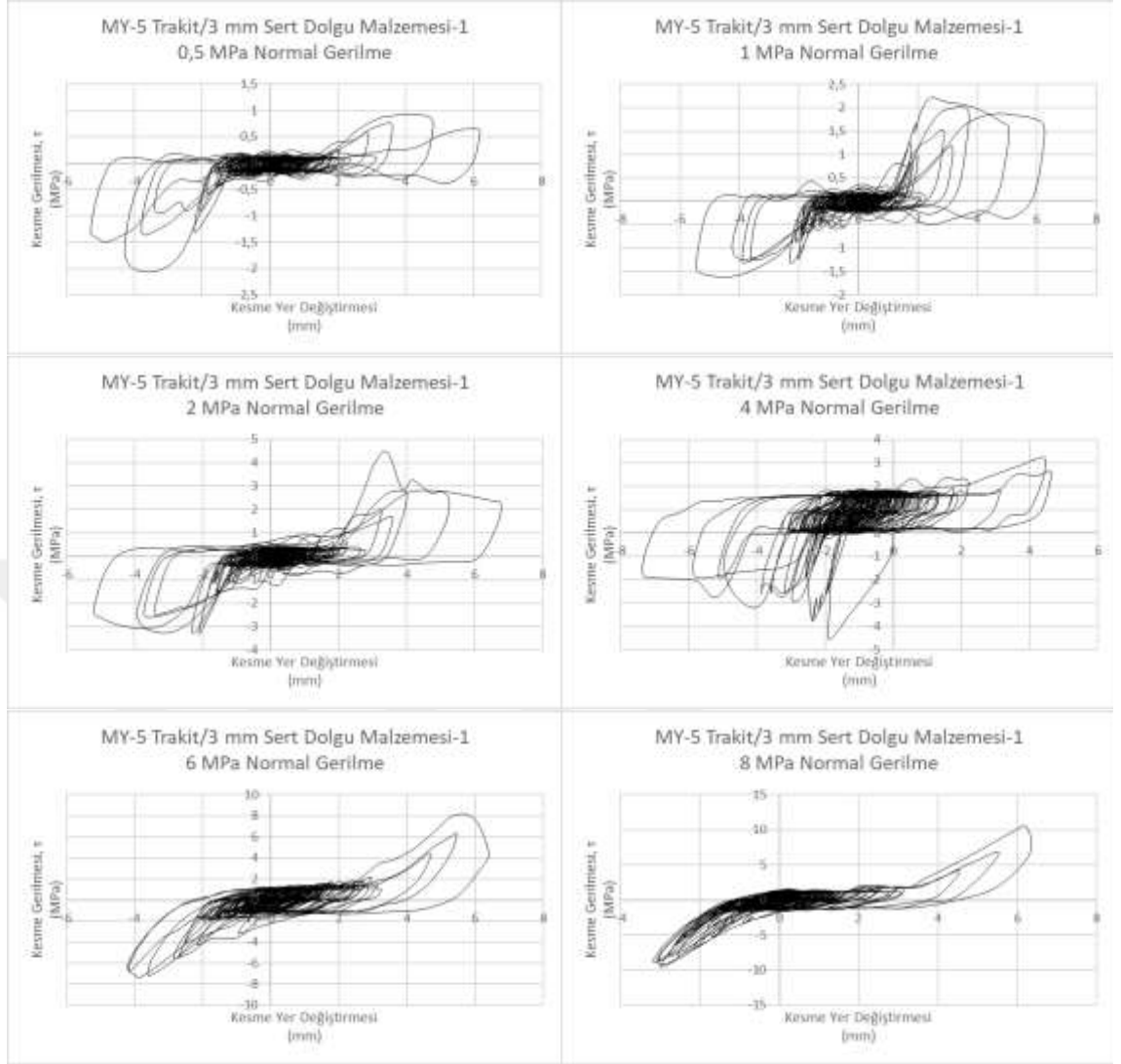
MY-3 Litik Tuf kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi grafikleri



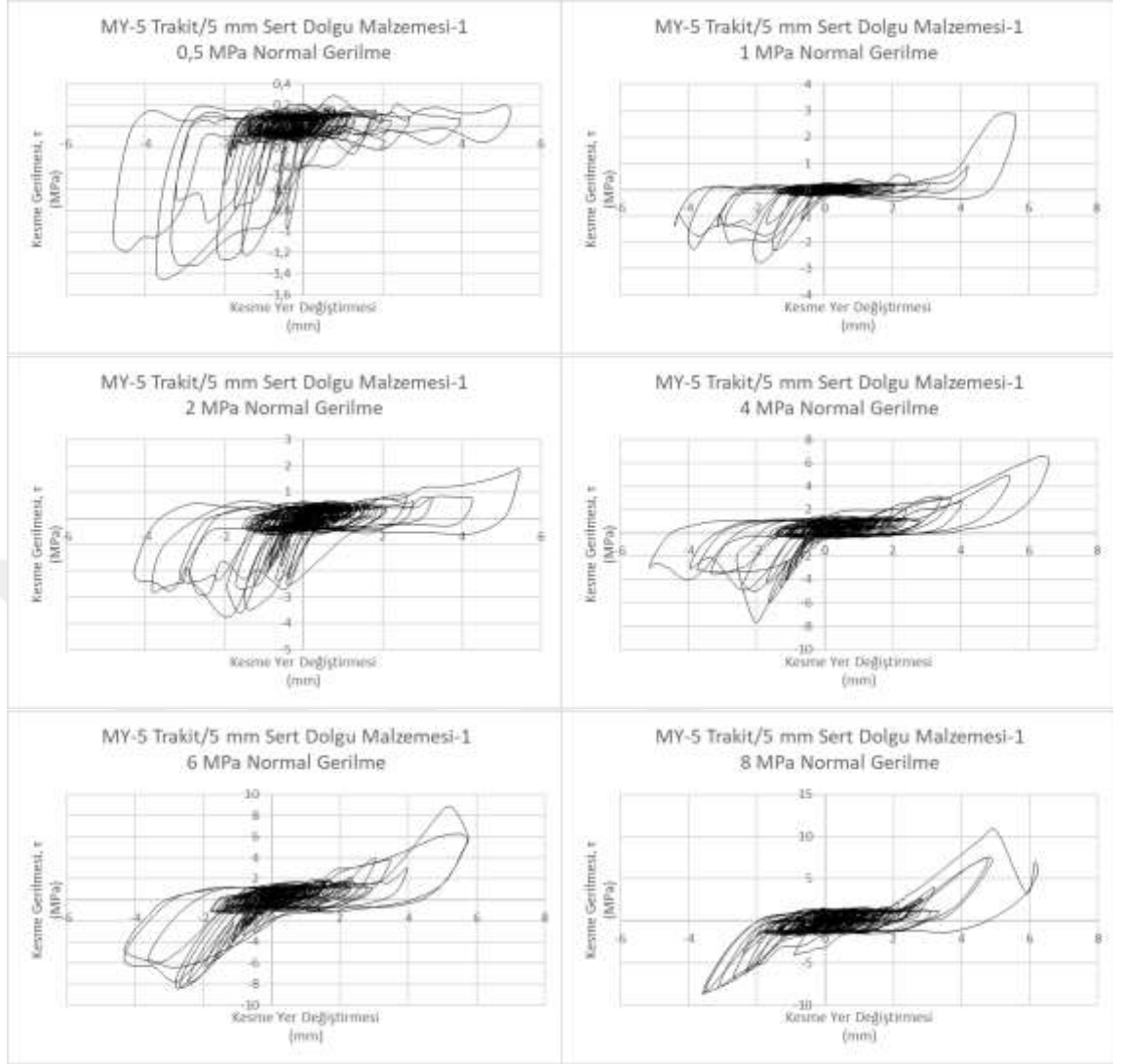
MY-3 Litik Tuf kayasında 5 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi grafikleri



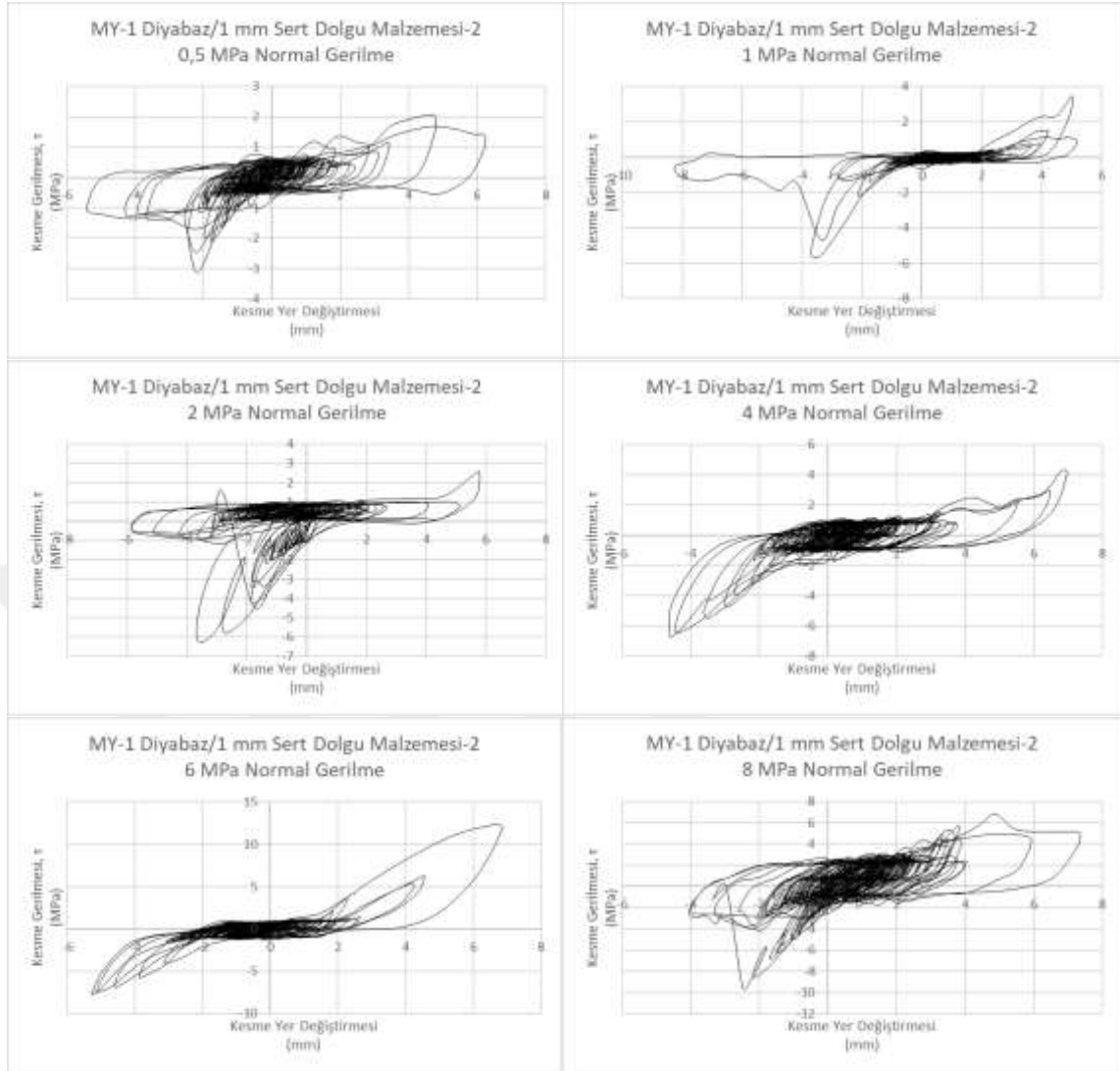
MY-5 Trakit kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



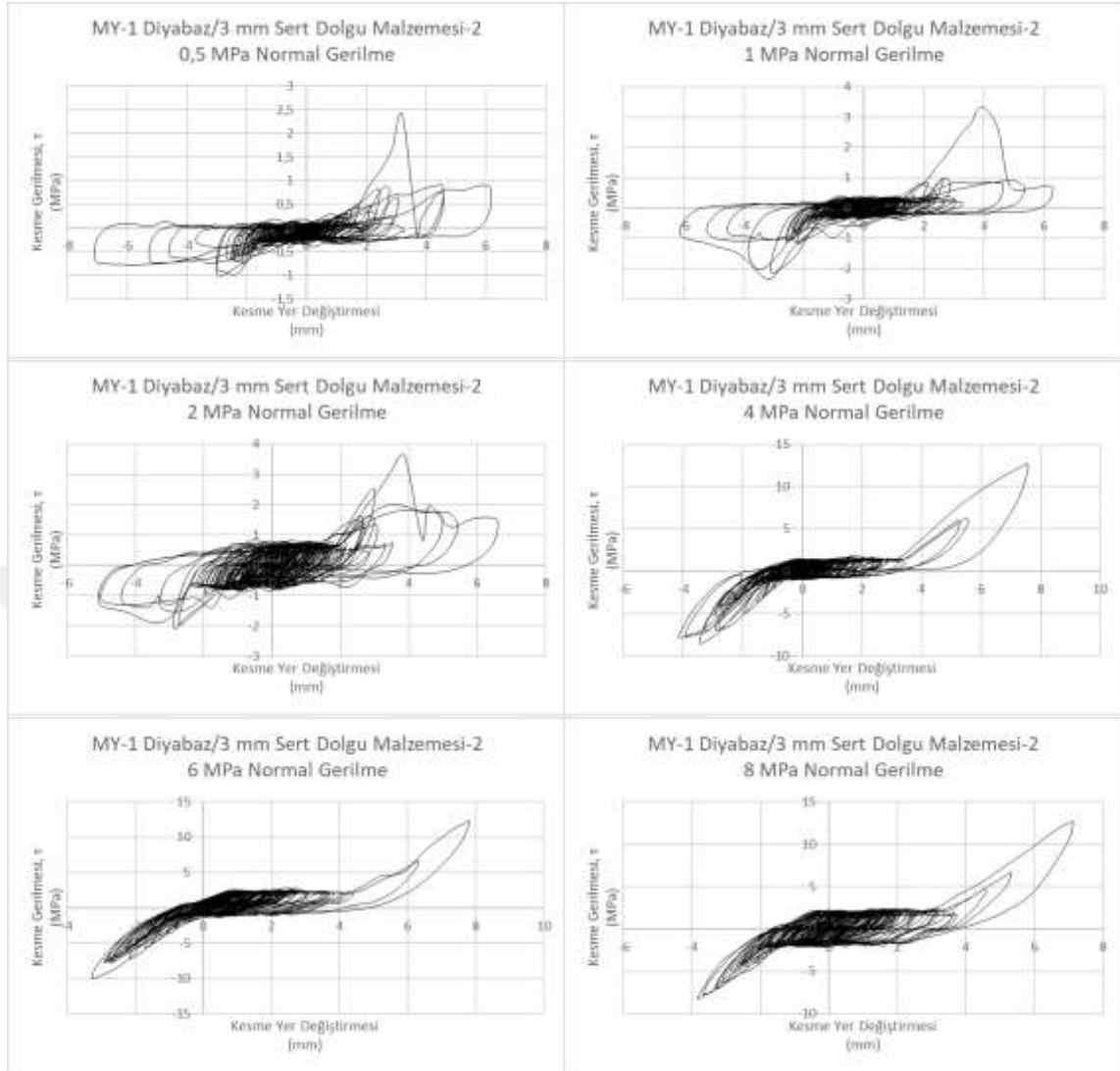
MY-5 Trakit kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



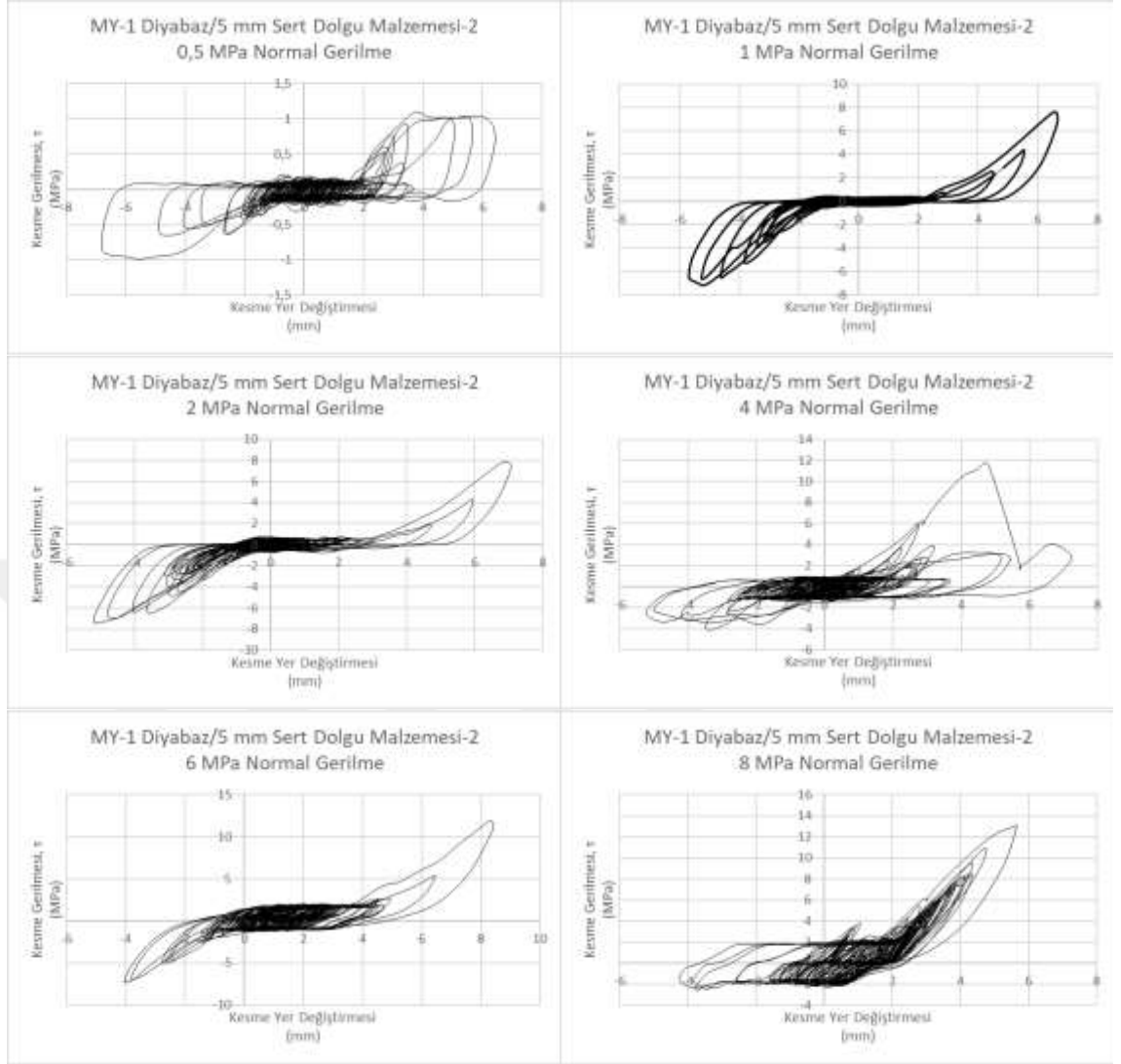
MY-5 Trakit kayasında 5 mm sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



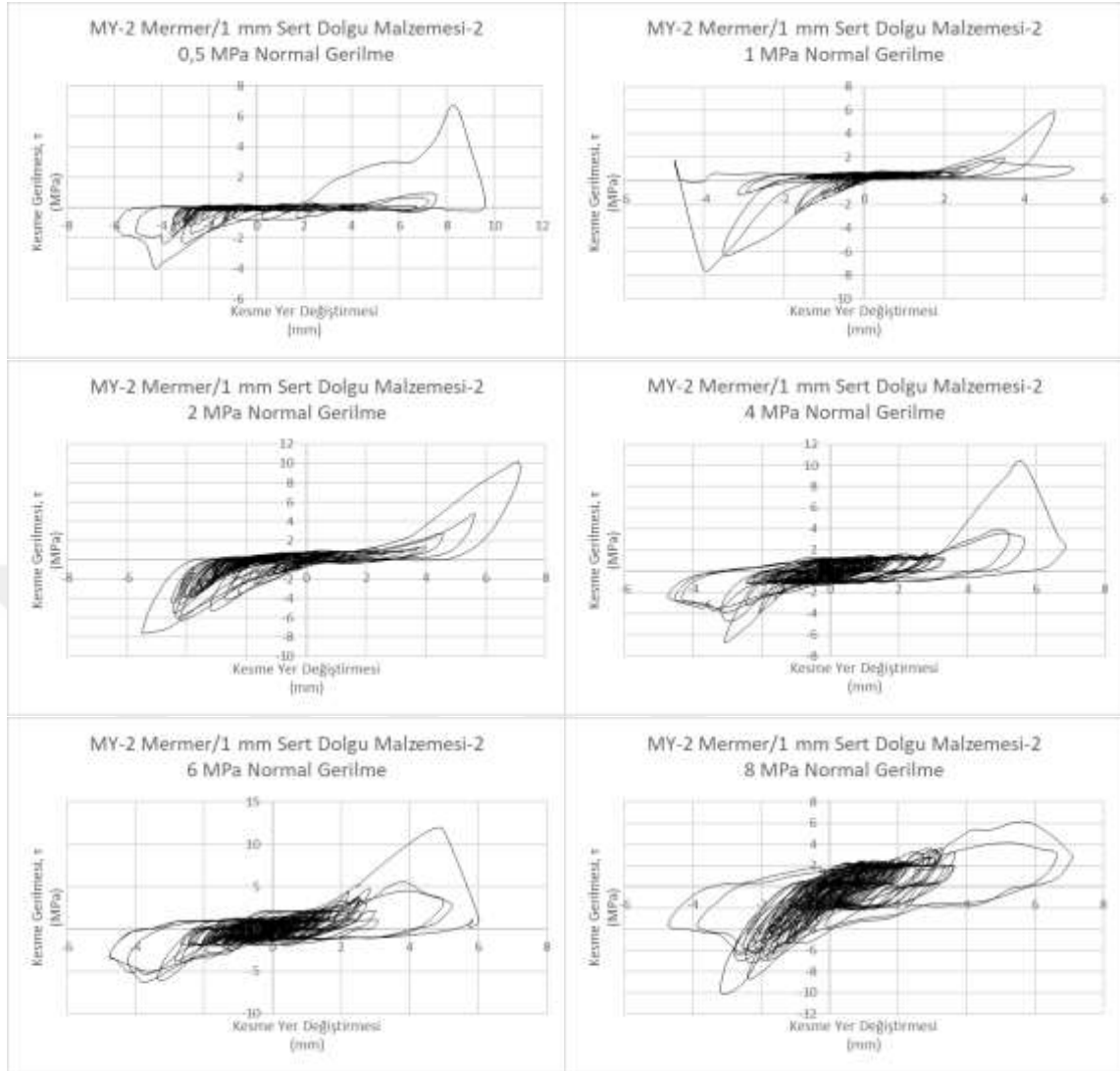
MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



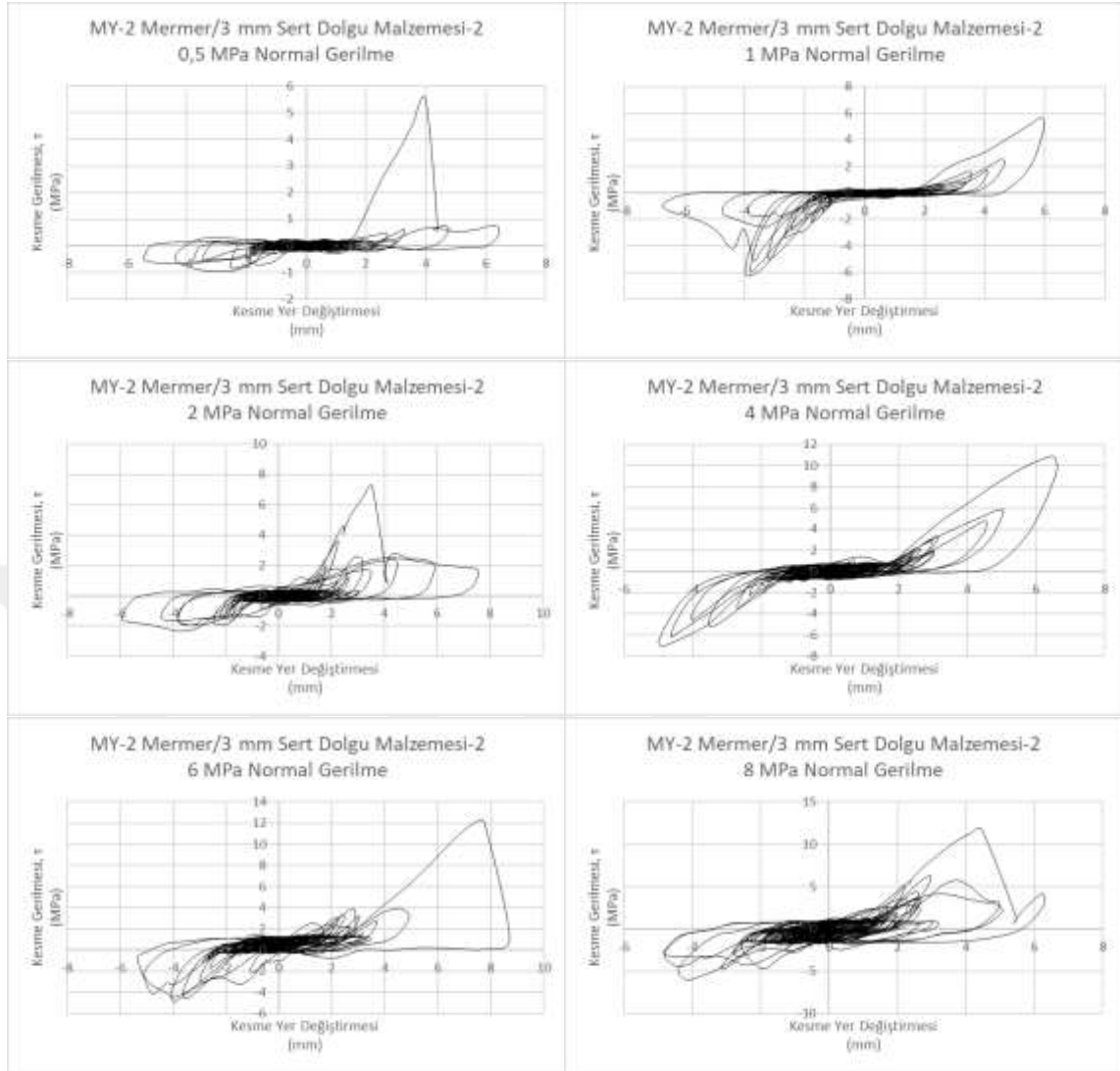
MY-1 Diyarbaz kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



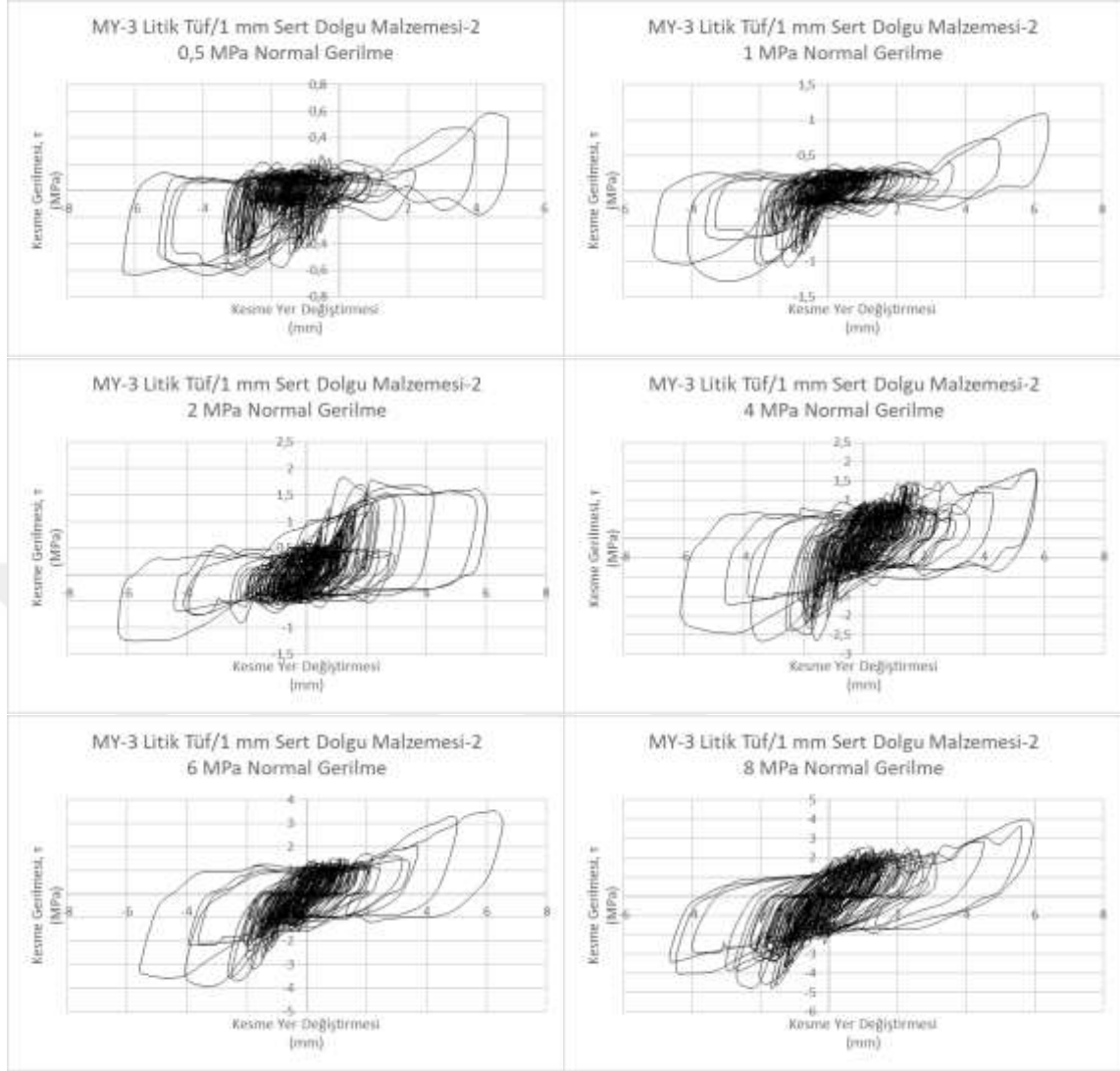
MY-1 Diyarbaz kayasında 5 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



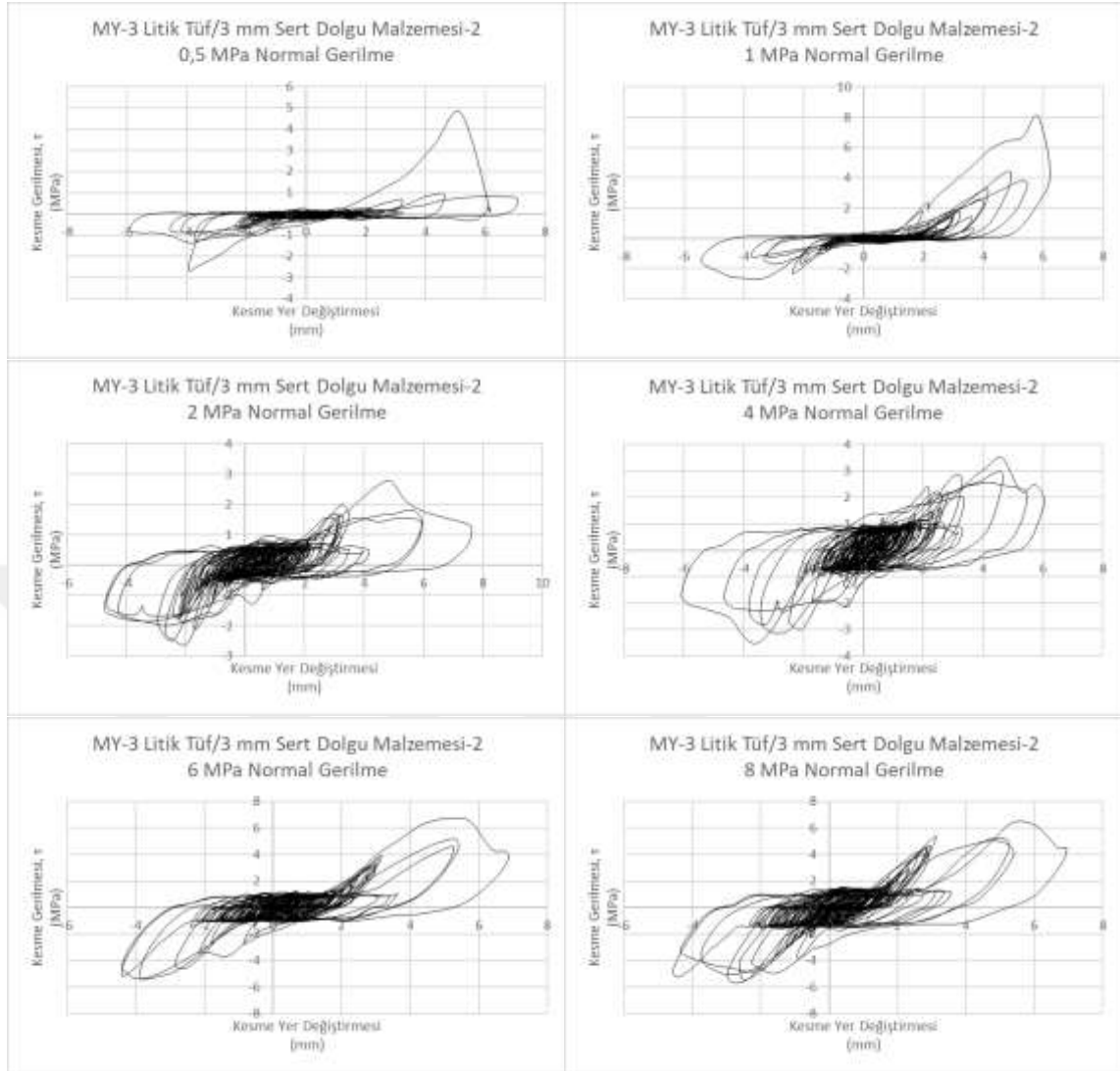
MY-2 Mermer kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



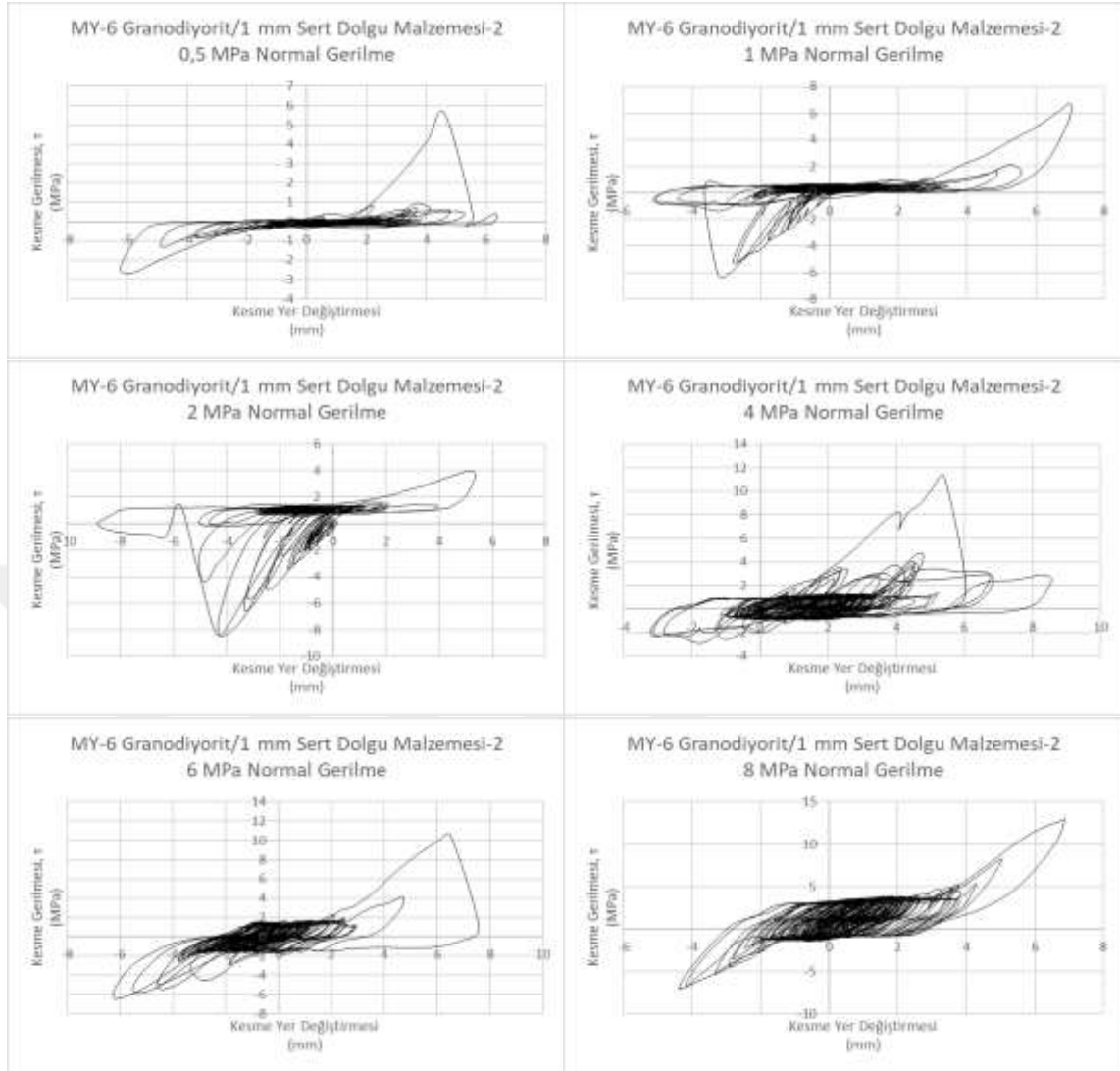
MY-2 Mermer kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



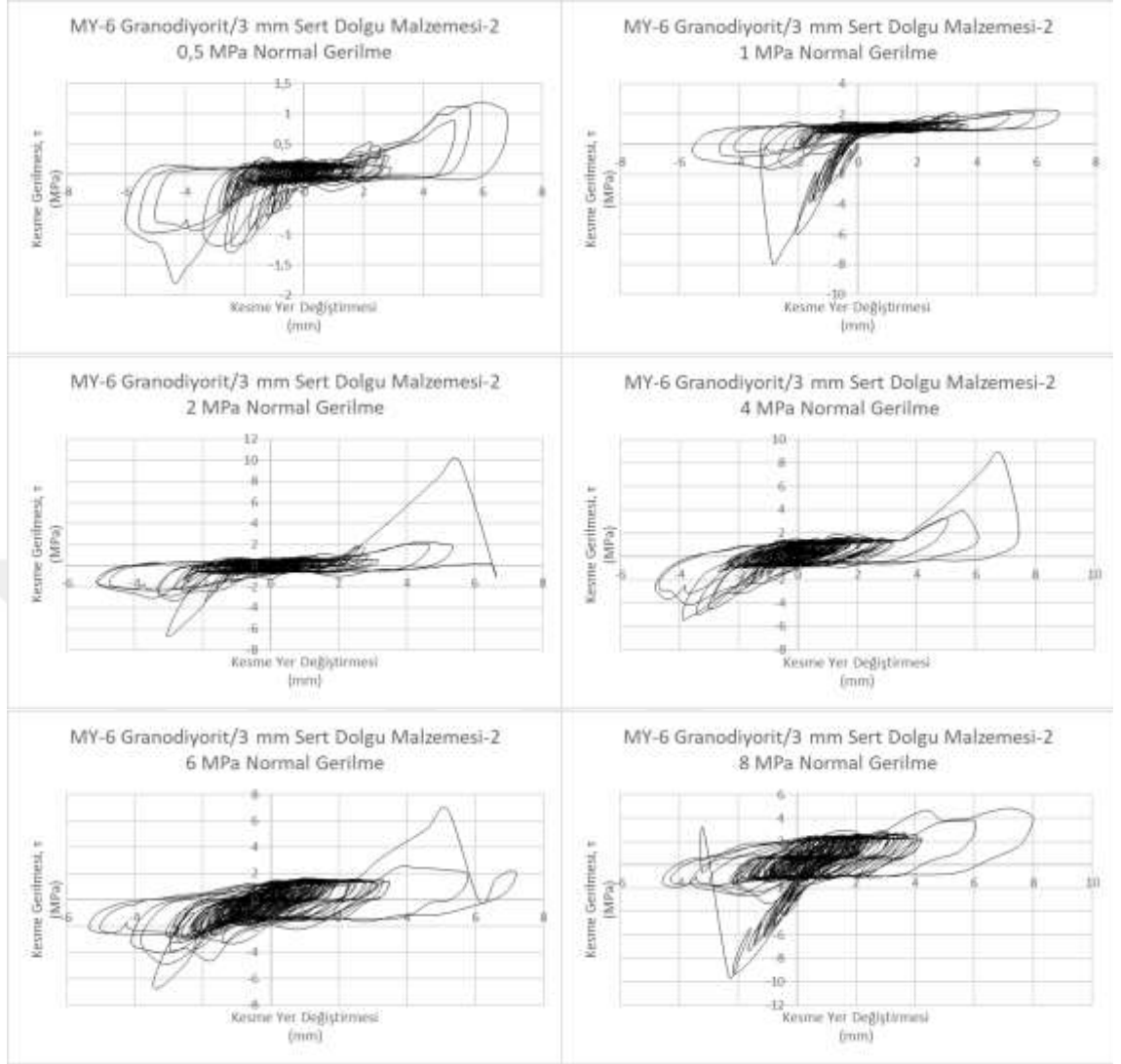
MY-3 Litik Tuf kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değiştirmesi grafikleri



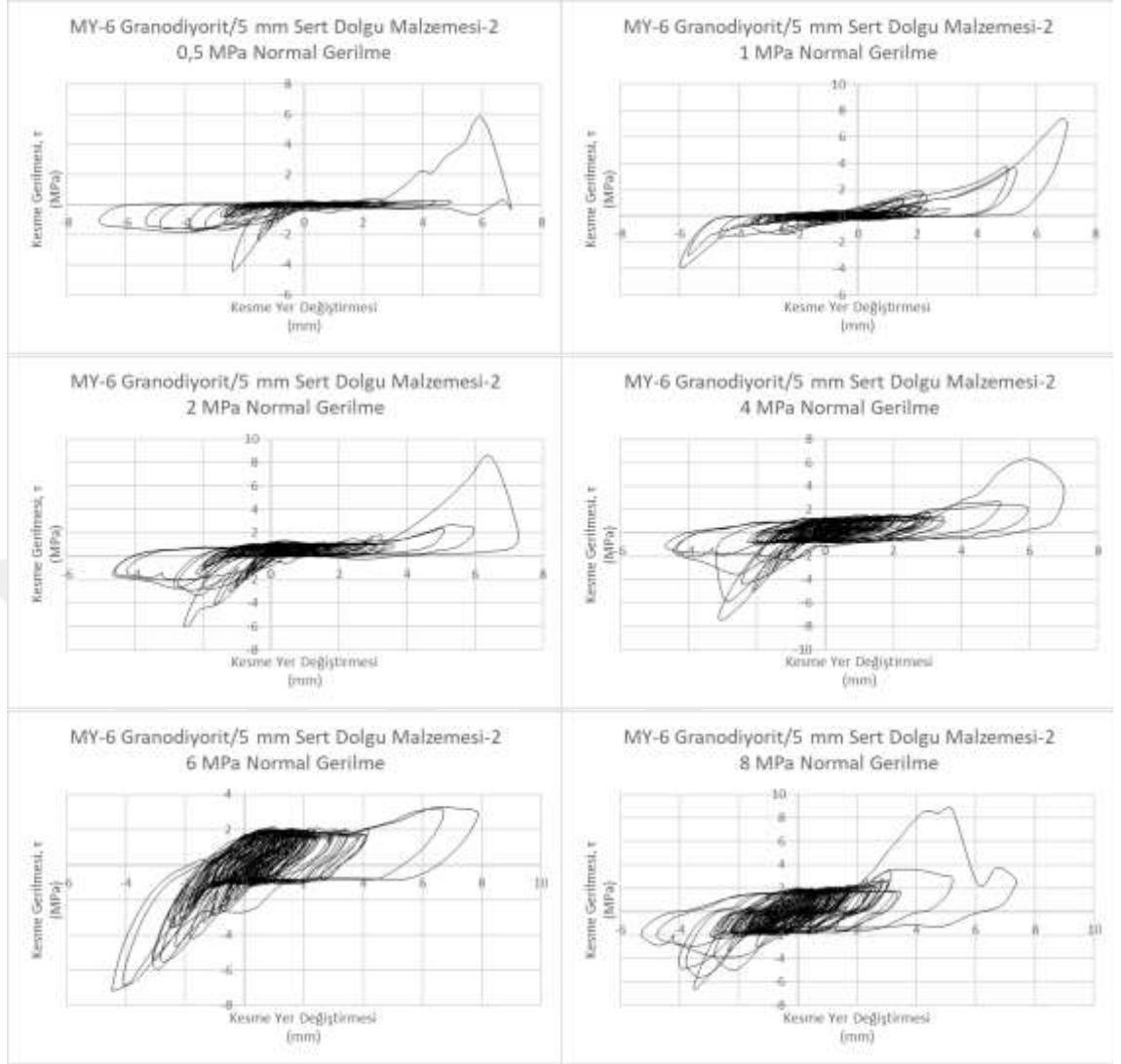
MY-3 Litik Tuf kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



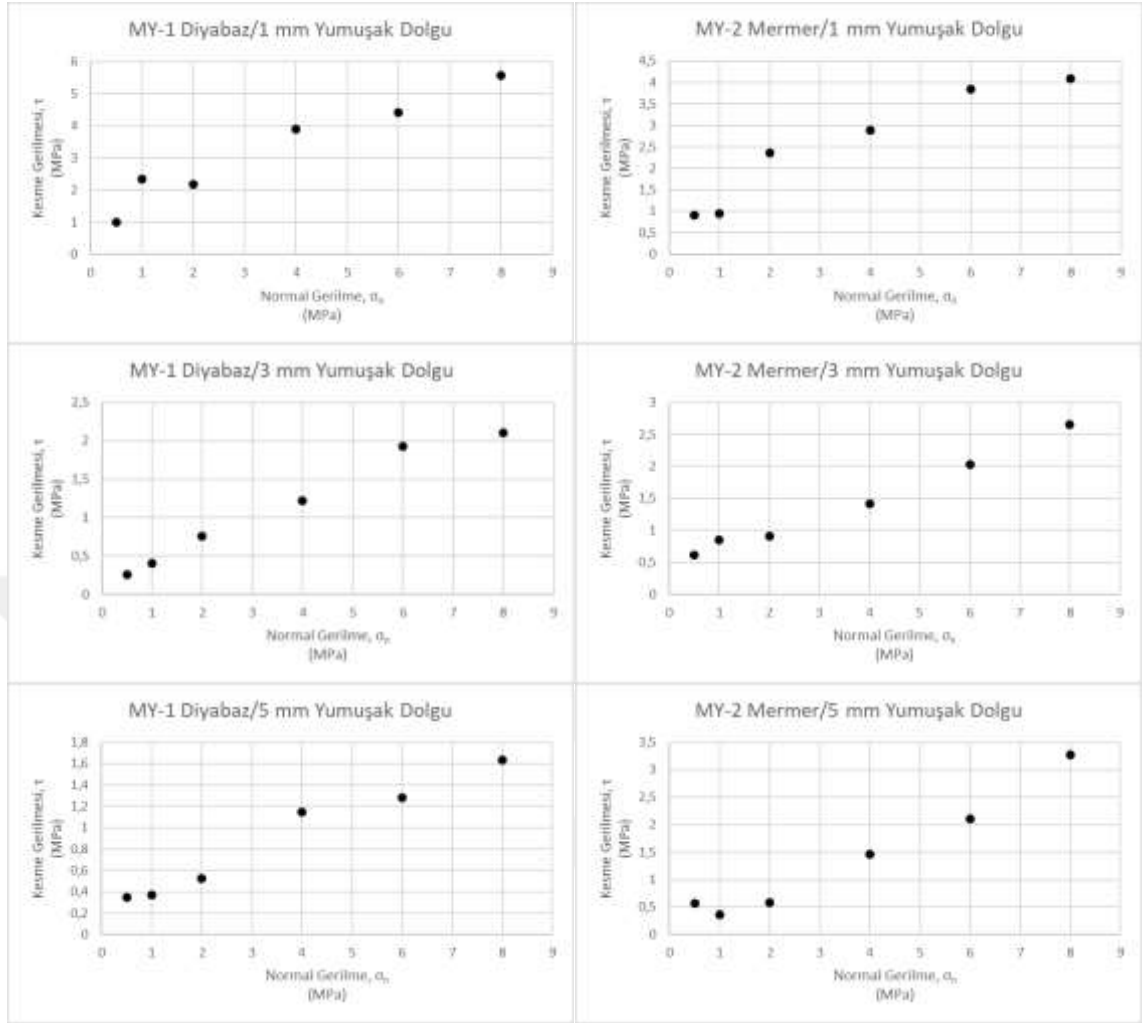
MY-6 Granodiyorit kayasında 1 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



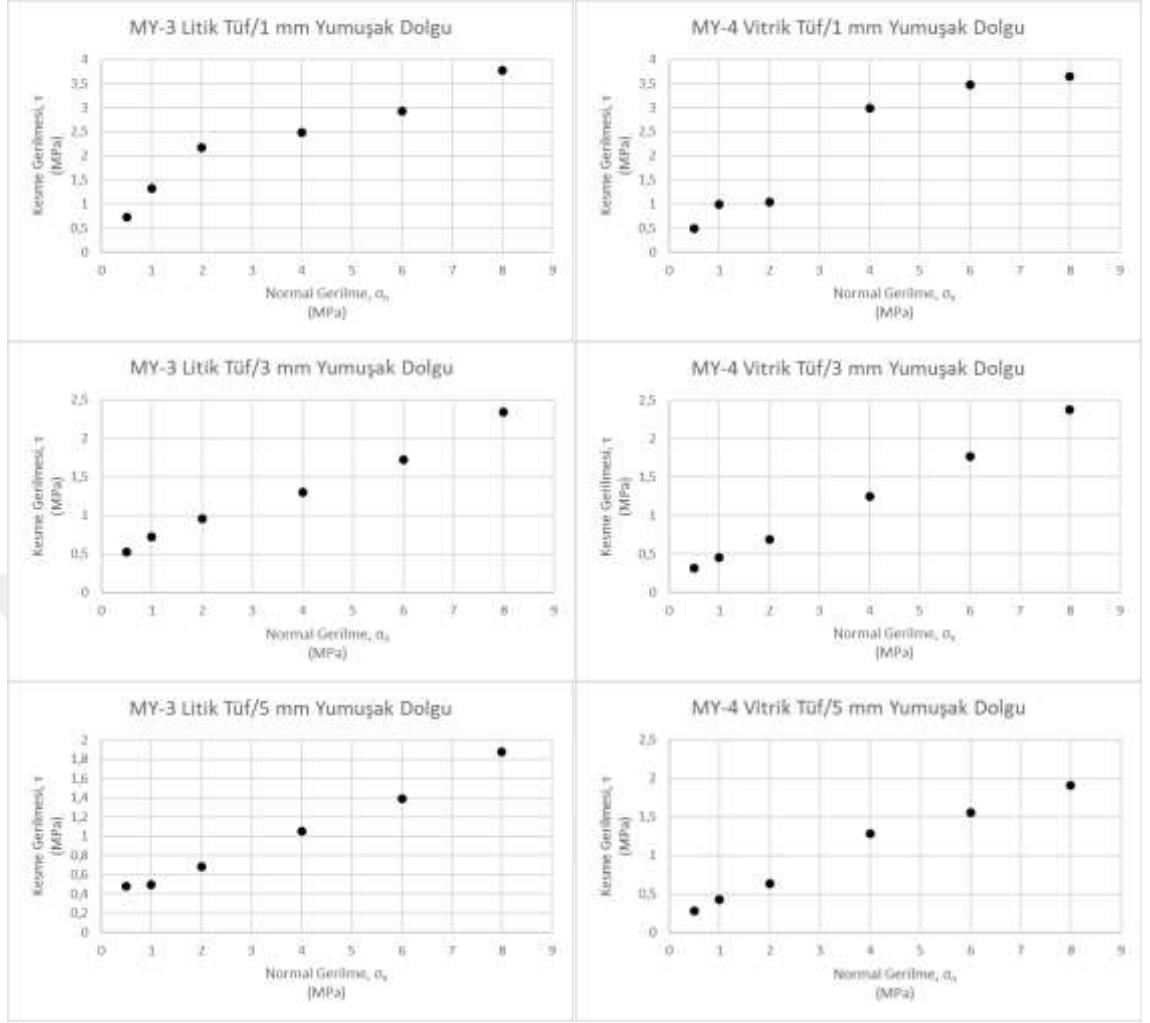
MY-6 Granodiyorit kayasında 3 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



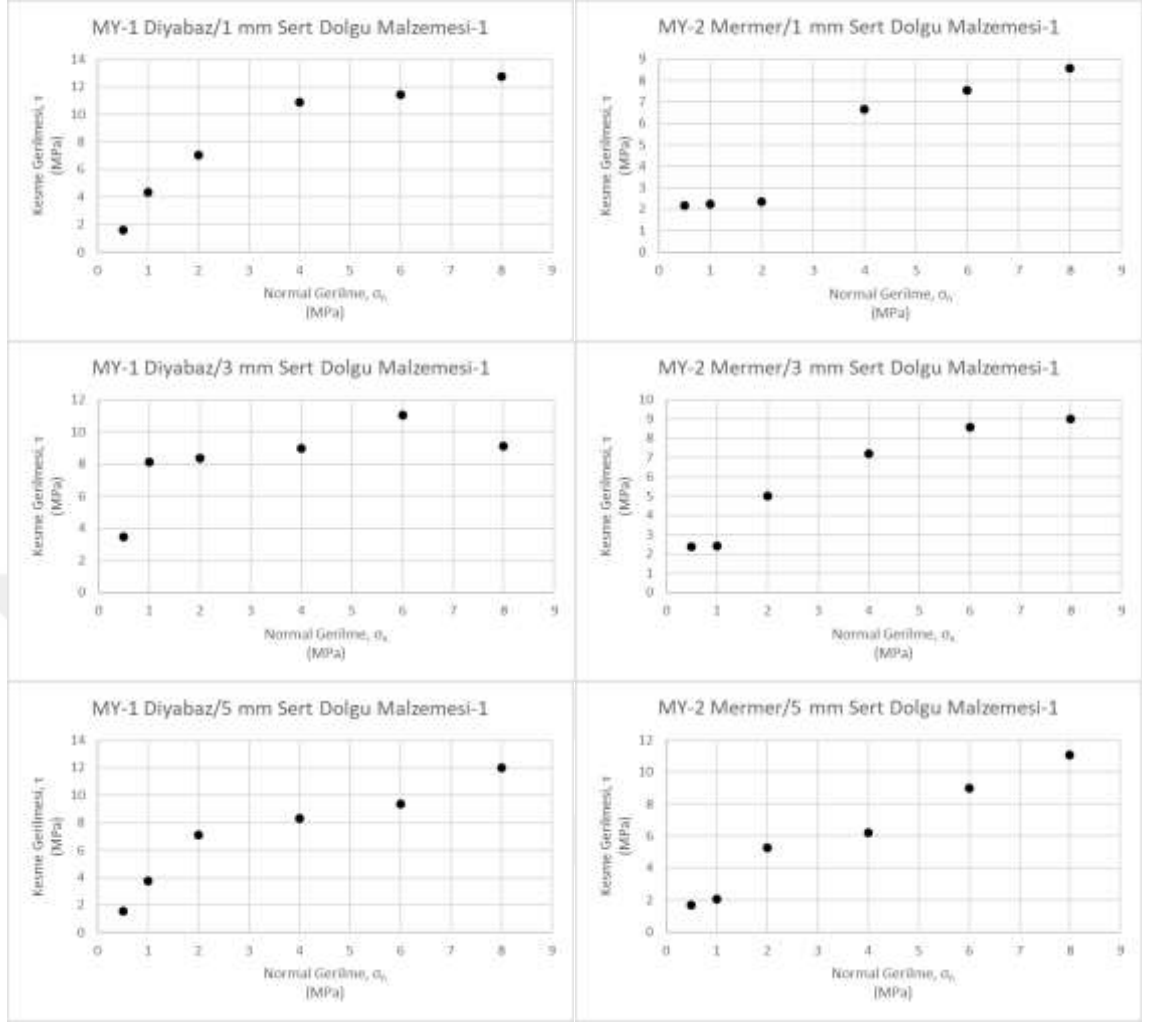
MY-6 Granodiyorit kayasında 5 mm sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-kesme yer değıştirmesi grafikleri



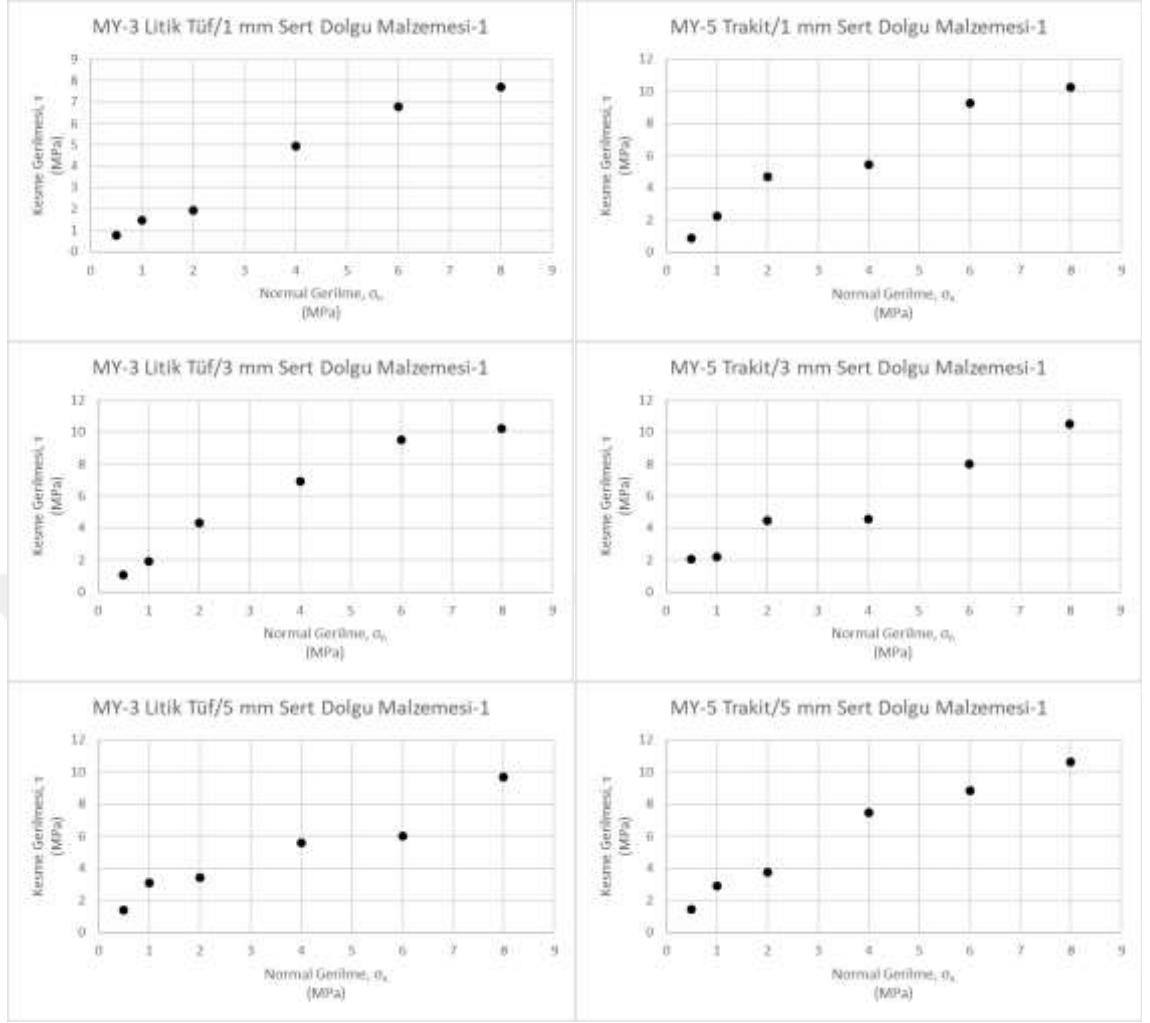
MY-1 Diyarbaz ve MY-2 Mermer kayalarında, yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



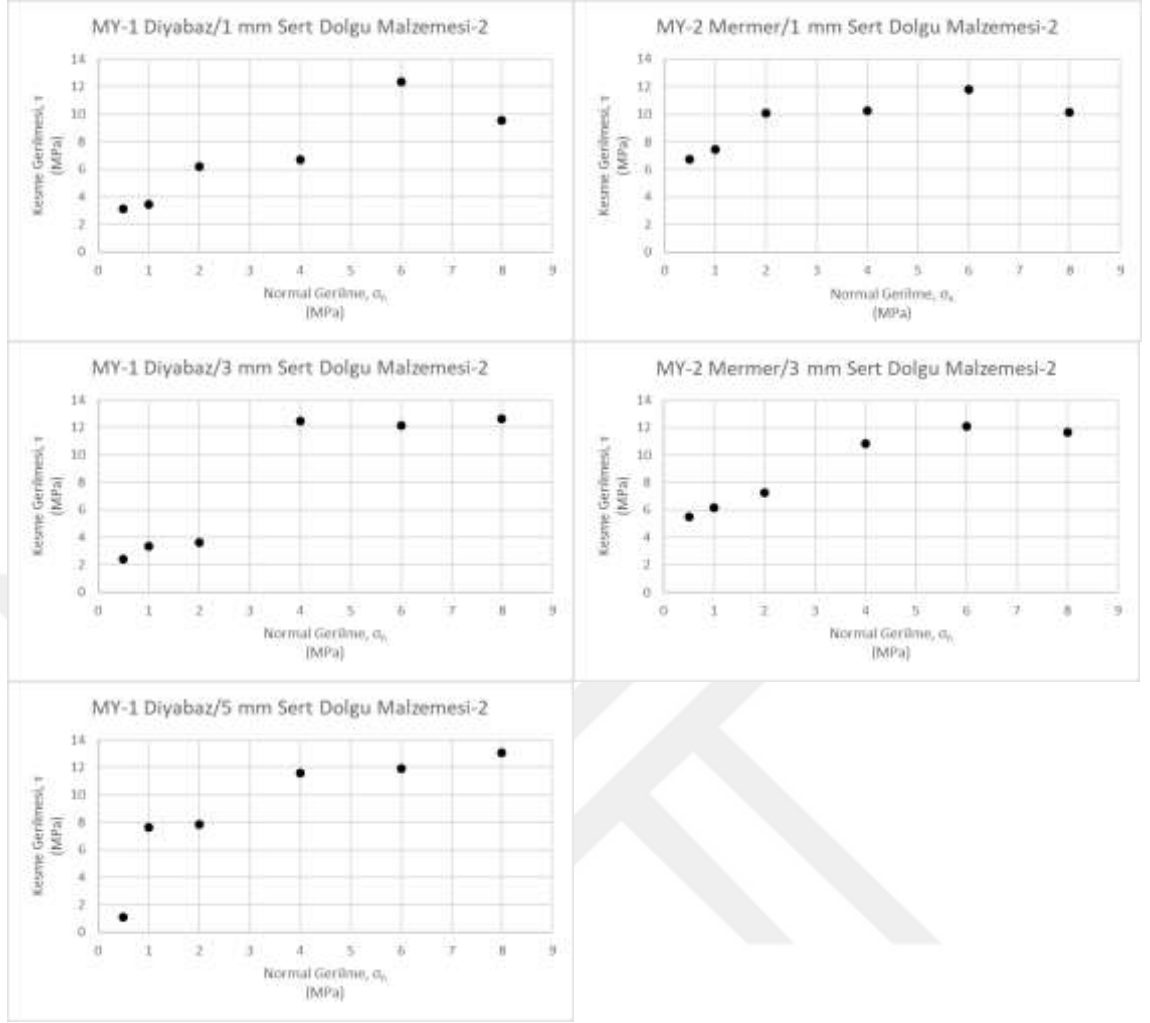
MY-3 Litik Tüf ve MY-4 Vitrik Tüf kayalarında, yumuşak dolgulu dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



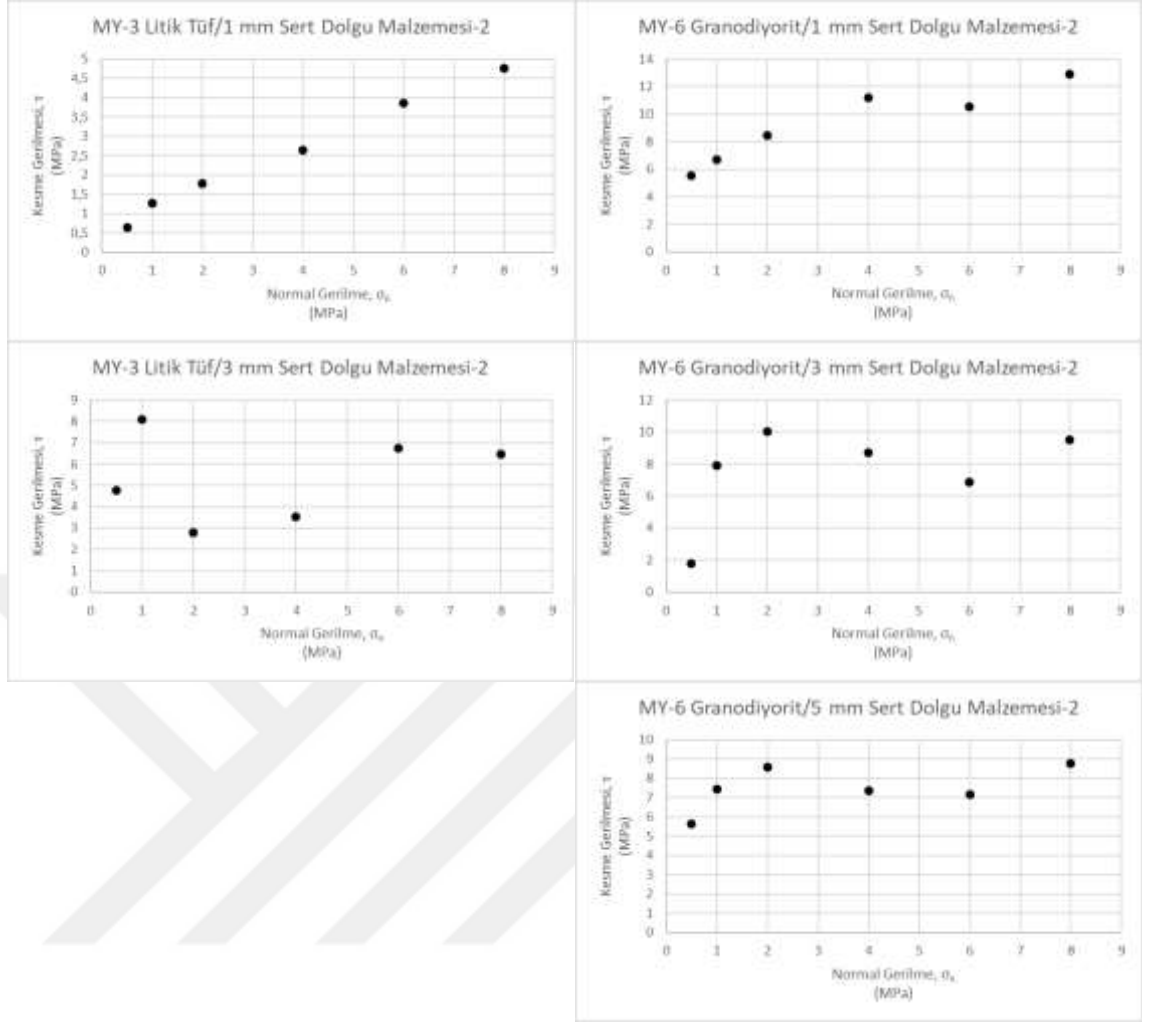
MY-1 Diyarbaz ve MY-2 Mermer kayalarında, sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



MY-3 Litik Tuf ve MY-5 Trakit kayalarında, sert dolgu malzemesi-1 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri



MY-1 Diyarbaz ve MY-2 Mermer kayalarında, sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri

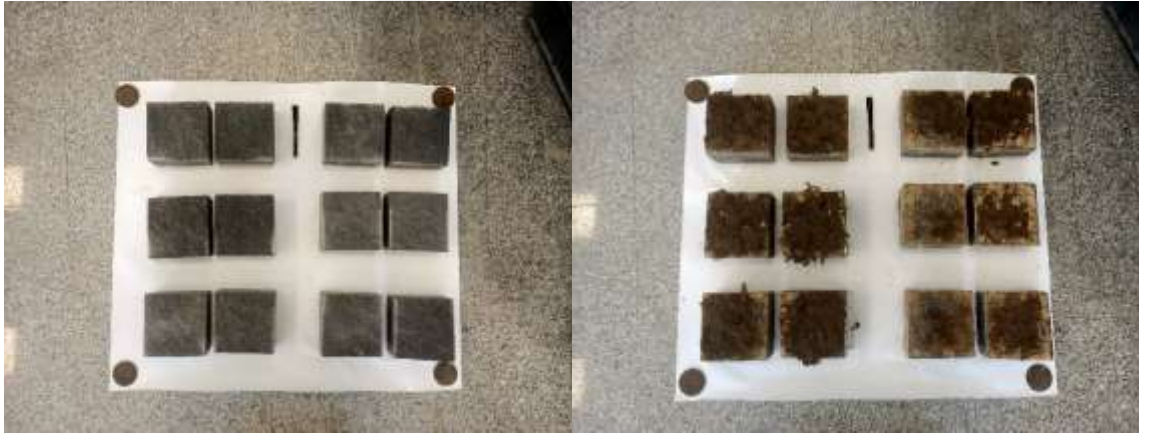


MY-3 Litik Tuf ve MY-6 Granodiyorit kayalarında, sert dolgu malzemesi-2 ile dinamik kesme deneylerinde, kesme gerilmesi-normal gerilme grafikleri

EK 2 Doğrudan Dinamik Kesme Deney Numunelerinin Deneyler Öncesi ve Sonrası Fotoğrafları



MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyabaz kayasında 3 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyarbaz kayasında 5 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 3 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 5 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-3 Litik Tüf kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümüleri



MY-3 Litik Tüf kayasında 3 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümüleri



MY-3 Litik Tuf kayasında 5 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-4 Vitrik Tuf kayasında 1 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-4 Vitrik Tf kayasında 3 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-4 Vitrik Tf kayasında 5 mm kalınlıkta yumuşak dolgu ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyabaz kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyabaz kayasında 5 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 5 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-3 Litik Tüf kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-3 Litik Tf kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-3 Litik Tüf kayasında 5 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümü



MY-5 Trakit kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümü



MY-5 Trakit kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-5 Trakit kayasında 5 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-1 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyabaz kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyabaz kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-1 Diyarbaz kayasında 5 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-2 Mermer kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-3 Litik Tf kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-3 Litik Tuf kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-6 Granodiyorit kayasında 1 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-6 Granodiyorit kayasında 3 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri



MY-6 Granodiyorit kayasında 5 mm kalınlıkta sert dolgu malzemesi-2 ile gerçekleştirilen dinamik kesme deney numunelerinin, deneyler öncesi ve sonrası görünümleri