



**AYRIK ELEMANLAR METODU İLE BİR
İSTİNAT DUVARI ARKASINDAKİ FARKLI
ŞEKİLSSEL ÖZELLİKLERE SAHİP GRANÜLER
ZEMİNLERİN DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ**

Omid NASİRPUR

Danışman: Prof. Dr. Semet ÇELİK

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**AYRIK ELEMANLAR METODU İLE BİR İSTİNAT DUVARI ARKASINDAKİ
FARKLI ŞEKİSEL ÖZELLİKLERE SAHİP GRANÜLER ZEMİNLERİN
DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

(Modeling the Behavior of Granular Soils with Different Shape Characteristics Behind a Retaining Wall with the Discrete Element Method)

DOKTORA TEZİ

Omid NASIRPUR

Danışman: Prof. Dr. Semet ÇELİK

Erzurum
Haziran, 2024

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**AYRIK ELEMANLAR METODU İLE BİR İSTİNAT DUVARI ARKASINDAKİ FARKLI
ŞEKİLSSEL ÖZELLİKLERE SAHİP GRANÜLER ZEMİNLERİN DAVRANIŞININ
MODELENMESİ**

Prof. Dr. Samet ÇELİK danışmanlığında, Omid NASIRPUR tarafından hazırlanan bu çalışma, 10/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Semet ÇELİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Babak KARIMI <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun 10/06/2024
tarih ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Semet ÇELİK danışmanlığında sunulan “Ayrık Elemanlar Metodu ile Bir İstinat Duvarı Arkasındaki Farklı Şekilsel Özelliklere Sahip Granüler Zeminlerin Davranışının Modellenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	10	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Metot	14	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	6	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Omid NASIRPUR	Prof. Dr. Semet ÇELİK
21.6.2024	21.6.2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

- Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.
- Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitim sürecinde ve tezimin çalışma süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Semet ÇELİK'e sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamındaki deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarında yürütülmüştür. Bu kapsamda, doktora çalışmalarım süresince PIV analizlerinde ve yorumlarında emeği geçen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Babak KARIMI'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmada kullanılan malzeme ve analiz uygulamasını temininde yardımcı olan AŞKALE ÇİMENTO fabrikası, *ALTAIR EDEM* firması ve çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve her zaman yanımda olan çok değerli arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Omid NASIRPUR

ÖZET

DOKTORA TEZİ

AYRIK ELEMANLAR METODU İLE BİR İSTİNAT DUVARI ARKASINDAKİ FARKLI ŞEKİLSEL ÖZELLİKLERE SAHİP GRANÜLER ZEMİNLERİN DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Omid NASIRPUR

Danışman: Prof. Dr. Semet ÇELİK

Amaç: Bu çalışmada, bir rijit istinat duvarı arkasında farklı granülometriye, rölatif sıklığa ve yuvarlaklıklara sahip zeminlerin aktif ve pasif durumlarında davranışlarının model deneylerle araştırılması ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Yöntemi (PIV) ve Ayrik Elemanlar Yöntemi (DEM) ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Köşeli kalker zemin laboratuvara getirildikten sonra Los Angeles aleti kullanılarak yuvarlak ve tam yuvarlak hale getirilmiş daha sonra eleklerden geçirilerek 4 farklı granülometriye sahip zeminler elde edilmiştir. Dört farklı granülometriye sahip köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak zeminler model tanka yerleştirilmiş ve istinat duvarına itme ve çekme uygulayarak zeminlerde oluşan aktif ve pasif durumlar araştırılmıştır. Ayrıca deneyler süresince fotoğraflar çekilmiş ve çekilen fotoğraflar PIV ile analiz edilerek istinat duvarının arkasındaki zeminlerin yer değişimleri gözlenmiştir. Son olarak, aktif ve pasif durumlar DEM ile modellenmiş elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Laboratuvar deneyleri, PIV ve DEM analiz sonuçlarından zeminlerin kayma mukavemeti açıları ve kayma yüzeyleri belirlenmiştir. Aynı rölatif sıklıkta köşeli daneli zeminlerin kayma mukavemeti açılarının ve pasif kuvvetin yuvarlak ve tam yuvarlak zeminlerden daha yüksek çıktığı görülmüştür. Aktif durumda da köşeli daneli zeminlerde aktif kuvvetin yuvarlak ve tam yuvarlak zeminlerden daha düşük çıktığı belirlenmiştir.

Sonuç: DEM modeli, laboratuvar deneyler ile tatmin edici bir uyum göstermiş ve kayma bölgelerini gerçekçi bir şekilde modellemiştir. Aktif durumda dane boyutu ve yuvarlaklığın artmasıyla yer değiştirme alanlarının daha büyük olduğu belirlenmiştir. Pasif durumda ise dane boyutu ve köşeliliğin artmasıyla yer değiştirme alanlarının daha büyük olduğu belirlenmiştir. Böylece aktif durumda yuvarlak zeminler köşeli zeminlere göre daha kritik bir davranışa sahip oldukları gözlenmiştir. Pasif durumda zeminin yer değiştirmeleri köşeliliğin ve boyutun artması ile daha öne çıktığı tespit edilmiştir. Deneysel ve modellemeler arasındaki kayma mukavemeti açılarındaki sapmalar, zemin partiküllerinin arasındaki sürtünmeden kaynaklanan kemerlenme etkisine bağlanabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İstinat Duvar, DEM, PIV, Dane Şekli, Yanal Zemin Basınçları

Haziran 2024, 133 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

MODELING THE BEHAVIOR OF GRANULAR SOILS WITH DIFFERENT SHAPE CHARACTERISTICS BEHIND A RETAINING WALL WITH THE DISCRETE ELEMENT METHOD

Omid NASIRPUR

Supervisor: Prof. Dr. Semet ÇELİK

Purpose: In this study, it is aimed to investigate the behavior of soils with different granulometries, relative densities and roundness behind a rigid retaining wall in active and passive states by model experiments and to compare the results obtained from experimental studies with Particle Image Velocimetry (PIV) and Discrete Element Method (DEM).

Method: After angular limestone soil were brought to the laboratory, they were rounded and well-rounded using a Los Angeles machine and subsequently sieved to obtain four different granulometries. These angular, rounded, and well-rounded soils with four different granulometries were then placed into a model tank, where pushing and pulling forces were applied to investigate the active and passive states of the soils against a retaining wall. Additionally, photographs were taken during the experiments, and these images were analyzed using PIV to observe the displacements of the soils behind the retaining wall. Finally, the active and passive cases are modeled with DEM and the results are compared with each other.

Findings: Shear strength angles and sliding surfaces of the soils were determined from the results of laboratory tests, PIV and DEM analysis. At the same relative density, angular soils have higher shear strength angles and passive force than round and well round soils. In the active state, the active force was lower for angular grained soils than round and full round soils.

Results: The DEM model showed satisfactory agreement with the laboratory experiments and modeled the shear zones realistically. In the active case, the displacement areas were found to be larger with increasing grain size and roundness. In the passive case, the displacement areas were found to be larger with increasing grain size and angularity. Thus, it is observed that round soils have a more critical behavior than angular soils in the active state. In the passive case, the displacements of the soil are found to be more prominent with increasing angularity and size. The deviations in shear strength angles between experimental and modeling results can be attributed to the arching effect caused by the friction between the soil particles.

Keywords: Retaining wall, DEM, PIV, Grain Shape, Lateral Earth Pressure

June 2024, 133 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	xv
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Yanal Zemin Basınçları.....	5
Rankine Teorisi: Granüller zeminler, aktif zemin basıncı	6
Yatay zemin yüzey durumu:	6
Eğimli zemin yüzey durumu:	7
Rankine Teorisi: Granüler zeminler, pasif zemin basıncı	7
Yatay zemin yüzey durumu:	7
Eğimli zemin yüzey durumu:	8
Coulomb Kama Teorisi	8
Zeminlerin Kayma Mukavemeti	10
Danelerin Şekilsel Özellikleri	12
Parçacık Görüntü Hız Ölçümü (PIV).....	15
PIV Metodolojisi	15
PIV'in Avantajları	16
Ayrık Elemanlar Metodu (DEM)	16
Ayrık Elemanlar Yönteminde Fiziksel Modeller	17
Temas Kuvveti Modelleri	17
Ayrık Elemanlar Yöntemin Kullanım Avantaj ve Dezavantajları:	18
Partikül şekilleri	19
DEM Uygulamaları.....	19
Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	20
MATERYAL ve METOT	44
Materyal	44

Kesme kutusu deneyi aleti	44
Deney Tankı ve Ekipmanları	45
Los Angeles aleti:.....	47
Kamera:	48
Metot	48
Maksimum ve minimum boşluk oranları	49
Kesme kutusu deneyleri	49
Parçacık görüntülü hız ölçüm yöntemi (PIVlab)	49
PIVlab program aşamaları.....	50
Malzeme kalibrasyonu	55
Altair EDEM yazılım ile simülasyon adımları.....	57
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	63
Kalker Zeminin Mekanik Özellikleri	63
Model İstinat Duvarın Deney Aşamaları	65
Model Yükleme Deneyleri.....	66
Köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deney sonuçları.....	66
Köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deney sonuçları	68
Yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deney sonuçları	69
Yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deney sonuçları.....	71
Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deney sonuçları.....	73
Tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deney sonuçları	74
PIVlab Yazılımı ile Model İstinat Duvarının Arkasındaki Zeminlerin Yer Değiştirmeleri.....	76
Köşeli zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler	76
Köşeli zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler	77
Yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler	78
Yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler.....	79
Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler	80
Tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler	81
Model Deneylerin DEM ile Modellenmesi.....	83
DEM Simülasyon Sonuçları.....	84
Köşeli zeminlerde pasif durumda DEM simülasyon sonuçları.....	84
Köşeli zeminlerde aktif durumda DEM simülasyon sonuçları	85
EDEM model istinat duvarına etkiyen pasif zemin basınçların gözlemi (yuvarlak zemin)	86

Yuvarlak zeminlerde aktif durumda DEM simülasyon sonuçları.....	87
Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda DEM simülasyon sonuçları.....	88
Tam Yuvarlak zeminlerde aktif durumda DEM simülasyon sonuçları	89
Kesme Kutusu, Model Deney, PIV ve DEM Sonuçlarının Karşılaştırılması	91
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	95
EKLER	100
EK 1. Restitüsyon Katsayıları (e), Statik Sürtünme Katsayıları (u_s)	100
ÖZGEÇMİŞ.....	116



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Cox (1927) göre danelerin yuvarlaklık sınıflanması	15
Tablo 2. Model Deneylerde Kullanılan Yük Hücresinin Özellikleri	46
Tablo 3. Köşeli danelerde, dane ile istinat duvarı ve kenar duvarlar arasındaki restitüsyon katsayıları- istinat duvarı ve kenar duvarların statik sürtünme katsayıları	59
Tablo 4. Yuvarlak danelerde, dane ile istinat duvarı ve kenar duvarlar arasındaki restitüsyon katsayıları- istinat duvarı ve kenar duvarların statik sürtünme katsayıları	59
Tablo 5. Tam yuvarlak danelerde, dane ile istinat duvarı ve kenar duvarlar arasındaki restitüsyon katsayıları- istinat duvarı ve kenar duvarların statik sürtünme katsayıları.....	59
Tablo 6. Cam ve Ahşap Malzemenin Poisson Oranları ve Young Modülleri	60
Tablo 7. Farklı Partikül Şekillerine Sahip Zeminlerin Granülometri Parametreleri.....	64
Tablo 8. Farklı Partikül Şekillerinde ve Rölatif Sıklıklarında Kesme Kutusu Deneylerinden Elde Edilen İçsel Sürtünme Açılırları	64
Tablo 9. Köşeli Zeminlerde Pasif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları (PIV)	77
Tablo 10. Köşeli Zeminlerde Aktif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları (PIV)	78
Tablo 11. Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları (PIV).....	79
Tablo 12. Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları (PIV).....	80
Tablo 13. Tam Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları (PIV).....	81
Tablo 14. Tam Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları (PIV)	82
Tablo 15. Köşeli Zeminlerde Pasif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları	84
Tablo 16. Köşeli Zeminlerde Aktif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları	85
Tablo 17. Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları	86
Tablo 18. Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları	87

Tablo 19. Tam Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açıları	89
Tablo 20. Tam Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açıları	90



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Sükünet durumunda düşey ve yanal zemin basınçları	5
Şekil 2. Aktif ve pasif zemin basınç durumları	5
Şekil 3. Aktif ve pasif zemin basınçları	6
Şekil 4. Kohezyonsuz yatay zemin için aktif basınç	7
Şekil 5. Kohezyonsuz yataydan β açısıyla eğimli zemin için aktif basınç	7
Şekil 6. Kohezyonsuz yatay dolgu için pasif basınç	8
Şekil 7. Kohezyonsuz zeminde Coulomb Kama Teorisi için aktif durum	9
Şekil 8. Kohezyonsuz zeminde Coulomb Kama Teorisi'ne göre pasif durum.....	9
Şekil 9. Mohr-Coulomb kırılma zarfı.....	11
Şekil 10. Dane şekil tanımlaması	12
Şekil 11. Dane şekillinin sınıflandırılması	13
Şekil 12. Dane boyutunun gösterimi	13
Şekil 13. Deneyleerde kullanılan kesme kutusu deney aleti	45
Şekil 14. Model deney tankı.....	45
Şekil 15. Yükleme Sistemi	45
Şekil 16. Hidrolik pompa kontrol ünitesi	46
Şekil 17. Deneyleerde kullanılan yük hücresi.....	46
Şekil 18. Model deneyleerde kullanılan deplasman Ölçer (LVDT)	47
Şekil 19. Deneyleerde kullanılan veri toplama sistemi.....	47
Şekil 20. Los Angeles cihazı (Deney aleti)	47
Şekil 21. (a) Nikon D80 SLR fotoğraf makinesi (b) Tripod	48
Şekil 22. PIVlab programının arayüzü.....	50
Şekil 23. PIVlab programında görüntü aktarma aşaması	50
Şekil 24. PIVlab programında görüntü ilgi alanı ve maske belirleme aşaması.....	51
Şekil 25. PIVlab programında görüntü ön işleme aşaması	51
Şekil 26. PIVlab programında ayarlar aşaması	52
Şekil 27. PIVlab uygulamasında analiz aşaması: a) başlangıçtan 2 saniye sonra b) başlangıçtan 30 saniye sonra	53
Şekil 28. PIVlab programında veri doğrulama aşaması	53
Şekil 29. PIVlab programında danelerin akış diyagramları (sol aktif ve sağ pasif durumlar) .	54
Şekil 30. EDEM yazılımının arayüzü.....	54
Şekil 31. Eğimli plaka düz atış deney sisteminin şematik diyagramı	55

Şekil 32. 6,30 ile 8,00 mm arası köşeli dane ile ahşap duvar arası restitüsyon katsayısını hesaplama deney aşamaları	56
Şekil 33. 6,30 ile 8,00 mm arası köşeli dane ile ahşap duvar arası için statik sürtünme katsayısının belirlenmesi	57
Şekil 34. EDEM yazılımına daneli malzemenin özelliklerinin giriş ekranı.....	58
Şekil 35. EDEM yazılımında model tank ve istinat duvarı özelliklerinin giriş ekranı	60
Şekil 36. EDEM yazılımında model tank ve istinat duvarı boyutlarının giriş ekranı	61
Şekil 37. EDEM yazılımında simülasyon aşamasında girilen veriler	62
Şekil 38. Aktif ve pasif zemin basınçların simülasyonları a) aktif durum b) pasif durum	62
Şekil 39. Deneylerde kullanılan zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri	63
Şekil 40. Deneylerde kullanılan zeminler ve partikül şekilleri	64
Şekil 41. Model deney sistemi	65
Şekil 42. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	66
Şekil 43. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	67
Şekil 44. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	67
Şekil 45. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	67
Şekil 46. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	68
Şekil 47. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	68
Şekil 48. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	69
Şekil 49. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	69
Şekil 50. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	70
Şekil 51. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	70
Şekil 52. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	70

Şekil 53. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	71
Şekil 54. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	71
Şekil 55. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	72
Şekil 56. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	72
Şekil 57. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	72
Şekil 58. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	73
Şekil 59. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	73
Şekil 60. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	74
Şekil 61. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	74
Şekil 62. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	75
Şekil 63. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	75
Şekil 64. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	75
Şekil 65. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	76
Şekil 66. Köşeli zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV).....	77
Şekil 67. Köşeli zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)	78
Şekil 68. Yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)	79
Şekil 69. Yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV).....	80
Şekil 70. Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV).....	81
Şekil 71. Tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)	82
Şekil 72. DEM simülasyonu ile köşeli zeminlerde pasif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları	84

Şekil 73. DEM simülasyonu ile köşeli zeminlerde aktif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları	85
Şekil 74. DEM simülasyonu ile yuvarlak zeminlerde pasif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları	86
Şekil 75. DEM simülasyonu ile yuvarlak zeminlerde aktif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları	87
Şekil 76. DEM simülasyonu ile tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları	89
Şekil 77. DEM simülasyonu ile tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları	90
Şekil 78. Farklı dane çap aralıklarında, şekillerinde ve rölatif sıklıklarda hazırlanmış zeminlerin aktif ve pasif durumları için PIV ve DEM simülasyonlarından elde edilen kayma mukavemeti Açıları	91
Şekil 79. Aktif ve pasif durumda model istinat duvarına etki eden bileşke kuvvetin rölatif sıklık, dane şekli ve dane boyutlarına bağlı olarak değişimi	92

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

ASSHTO	Amerikan Karayolları Birliği
ASTM	Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
DEM	Discrete Element Methods
D_r	Rölatif Sıklık
e	Restitüsyon Katsayısı
E	Young Modülü
e_{maks}	Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	Minimum Boşluk Oranı
F	Kuvvet
H	Derinlik
K_0	Sükûnetteki Zemin Basınç Katsayısı
K_a	Aktif Zemin Basınç Katsayısı
K_p	Pasif Zemin Basınç Katsayısı
PIV	Parçacık Görüntülü Hız Ölçüm Yöntemi
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine
ρ_k	Kuru Yoğunluk
\emptyset	İçsel Sürtünme Açısı
μ	Sürtünme Katsayısı
σ_1	Büyük Asal Gerilme
σ_3	Küçük Asal Gerilme

GİRİŞ

İstinat duvarları, çeşitli uygulamalarda zemine yanal destek sağlayan önemli yapılar olarak kabul edilir. Daha az alan kaplayarak artan yükleri taşıma yetenekleri nedeniyle tercih edilirler. Bir istinat duvarının performansı, özellikle dolgu malzemesinin sıkıştırma düzeyi ve yoğunluğu gibi dolgu malzemesinin özelliklerine bağlıdır. İstinat duvarlarında stabilite endişelerini göz ardı etmek önemli finansal kayıplara yol açabilir (Whitlow ve Whitlow 2001). İstinat duvarları üzerinde farklı koşullar altında araştırmalar yapılmıştır; bu koşullar statik ve dinamik senaryoları içerebilir ve aktif veya pasif zemin basınç modlarına göre analiz edilebilir (Altunbaş vd. 2019; Liu vd. 2020; Keshavarz ve Ebrahimi 2017). Coulomb ve Rankine Teorileri, istinat duvarlarının analizi ve tasarımında yaygın olarak kullanılırken, sonlu elemanlar analizi, limit analizi ve ayırık elemanlar yöntemi (DEM) gibi alternatif yöntemler daha karmaşık zemin-yapı etkileşimlerini analiz etmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemler, çeşitli yükleme koşulları altında zemin ve istinat duvar davranışının ayrıntılı modellenmesine olanak tanır (Zhou vd. 2017; Medina vd. 2018; Rui vd. 2020). Bir istinat duvarının hareketi, deneyimlediği yanal zemin basınçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle tasarım ve analiz sürecinde bu etkileri göz önünde bulundurmak önemlidir. Ancak, kapsamlı araştırmalara rağmen, istinat duvarlarının arkasındaki zeminin karmaşık davranışı hala zorluklar yaratmakta ve çelişkili sonuçlara yol açmaktadır. Bu farklılıklar, zemin özellikleri, sıkıştırma, nem seviyeleri ve yükleme koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir. Zemin ile istinat duvarları arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde modellemek zordur ve bu da istinat duvar tasarımını geliştirmek için deneysel ve teorik yaklaşımların daha fazla incelenmesini gerektirir. Doğrusal olmayan bir doğaya sahip olan istinat duvarı ile dolgu arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde modellemek oldukça zordur ve güvenilir sonuçlar için ayrıntılara dikkat edilmesini gerekir. Bir istinat duvarının davranışı, zeminin içsel sürtünmesi ve zemin ile duvar arasındaki sürtünme tarafından etkilenir ve bu nedenle sadece teorik yöntemlerle zemin deformasyonunu doğru bir şekilde tahmin etmek zordur. Bu nedenle, teorik tahminleri deneysel veriler ve yenilikçi analiz teknikleri ile desteklemek, istinat duvar tasarımının doğruluğunu artırmak için önemlidir (Xu vd. 2018). Bir istinat duvarının arkasındaki kayma yüzeyi, klasik zemin basınç teorisine göre genellikle düz varsayılır. Ancak, son yapılan model deneyler ve pratik projeler, bu varsayımın her zaman doğru olmadığını ve kayma yüzeyinin belirli durumlarda kavisli olabileceğini göstermiştir.

Kayma yüzeyinin bu düzlemsel olmayan yapısı, yanal zemin basıncının hesaplanması için istinat duvarının arkasındaki zeminin davranışını doğru bir şekilde modellemek için alternatif analitik yöntemler gerektirmektedir. İstinat duvarındaki aktif zemin basıncını doğru bir şekilde tahmin etmek tasarım açısından kritik öneme sahiptir. Coulomb teorisi, aktif zemin basıncının doğrusal bir dağılımını varsayar, ancak dağılım, duvar ile zemin arasındaki etkileşimden kaynaklanan kemerlenme etkileri nedeniyle doğrusal değildir. Kemerlenme etkileri, duvar hareketinin yönü ve modu, zemin tipi ve duvar sürtünmesi gibi faktörlerden etkilenir ve karmaşık bir aktif zemin basıncı dağılımına yol açar. Bu nedenle, farklı koşullar altında çeşitli yüklerle başa çıkma kabiliyetini sağlamak için bir istinat duvarı tasarlanırken bu faktörleri dikkate almak önemlidir (Zhou et al. 2017; Wei et al. 2018a; Liu et al. 2020; Rui et al. 2020). Partikül Görüntüleme ve Hız Ölçüm Sistemi yöntemi (PIV), zemin kütleindeki (Lashkari ve Jamali 2021), temel altında veya istinat duvarlarının arkasındaki malzemelerdeki kayma bölgelerini analiz etmek için kullanışlı bir araçtır. Bu bölgeler, istinat duvarı hareketinin türü ve kayma yüzeylerine sahip geleneksel zemin basınç mekanizmalarından etkilenir. Araştırmacılar bu mekanizmaları deneylerde gözlemleyerek ve yeniden üreterek, istinat duvarlarının arkasındaki zemin davranışını daha iyi anlayabilirler. PIV yöntemi, farklı yükleme koşulları altında sağlam ve güvenli istinat duvarlarının tasarımına yardımcı olarak zemin hareketlerine dair değerli bilgiler sağlar. Çok sayıda çalışma, istinat duvarlarının arkasındaki kırılma yüzeyinin genellikle aktif ve pasif koşullarda eğri olduğunu göstermiştir (Niedostatkiewicz et al. 2011; Tejchman et al. 2011; Li et al. 2017; Altunbas et al. 2019; Pietrzak ve Leśniewska 2012).

Pasif zemin basıncındaki bileşke kuvvetlerin dağılımı ve konumu, duvarın hareket modundan etkilenir. Duvar zemine doğru hareket ettiğinde, duvara baskı uygulayan kuvvetler artar, dolayısıyla yanal zemin basıncı artar. Tersine, duvar zeminden uzağa hareket ettiğinde, duvara çekme kuvvetleri uygulanır, bu da yanal zemin basıncını azaltır. Bu kuvvetler ve konumları doğrusal değildir ve yalnızca Coulomb teorisi kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilemez. Bu nedenle, zemin davranışını analiz ederken ve kararlı istinat duvarı yapıları tasarlarırken duvarın hareketini dikkate almak çok önemlidir (Peng et al. 2012).

Ayrık eleman yöntemi (DEM), araştırmacıların yanal zemin basıncı ile istinat duvarlarının hareketi arasındaki ilişkiyi incelemelerine olanak tanıyan bir sayısal modelleme tekniğidir. Partiküller ve sınırlar arasındaki mekanik etkileşimleri modelleyerek, DEM malzeme davranışının sanal bir gösterimini oluşturur. Bu yöntem, farklı istinat duvarı hareket modlarının yanal zemin basıncı üzerindeki etkilerini araştırmak için kullanılmıştır. DEM modelleri sanal laboratuvarlar olarak hizmet eder ve araştırmacıların geleneksel laboratuvar deneylerinin

sınırlamaları olmadan analizler yapmalarını sağlar. Ancak, DEM modellemeleri hesaplama açısından maliyetli ve zaman alıcı olabilir. Bunu çözmek için araştırmacılar, sistemdeki partikül sayısını azaltırken tutarlı bir temsili korumak, sistemi küçültmek ve benzer özelliklere sahip partiküleri gruplandırmak gibi teknikleri araştırmışlardır. Genel olarak, araştırmacılar DEM'in, istinat duvarı davranışını incelemede değerli bir araç olduğunu, tasarım ve inşaat uygulamalarının iyileştirilmesine katkıda bulunabileceğini belirtmişlerdir (Balevičius ve Kačianauskas 2008; Bierwisch et al. 2009; Walton ve Johnson 2010; Li et al. 2017; Coetzee 2019; Roessler ve Katterfeld 2018; Horabik et al. 2020). Modellemelerde hesaplama süresini azaltmak, sonuçların hala doğru ve modellenen sistemi temsil ettiğinden emin olmak önemlidir. Bu, temas parametreleri (restitüsyon katsayısı, statik sürtünme katsayısı, yuvarlanma sürtünme katsayısı), mekanik özellikler (kayma modülü, Poisson oranı, yoğunluk) ve partikül şekli gibi girdi parametrelerini doğru bir şekilde tanımlayarak başarılabilir. Bazı çalışmalar, güvenilir ve doğru DEM simülasyon sonuçları elde etmek için bu girdi parametrelerini doğru bir şekilde tanımlamanın önemini vurgulamıştır (Li et al. 2017; Wei et al. 2018b; Tang et al. 2019).

Partikül şekli, DEM kullanarak granüler malzemeleri model etmede önemli bir faktördür. Partiküllerin köşeliliği, granüler malzemelerin istifleme yoğunluğunu, maksimum ve minimum boşluk oranlarını önemli ölçüde etkiler. Daha büyük köşelilik, minimum ve maksimum boşluk oranlarının daha yüksek olmasına, artan yuvarlaklık ise bu parametrelerin daha düşük olmasına sebep olur (Cho et al. 2007; Ghalehjough et al. 2017). Bunun nedeni, köşeli partiküllerin daha düşük istifleme verimliliğine sahip olması, partiküller arasında daha geniş boşluklar ve daha yüksek boşluk oranları oluşturmalarıdır. Partiküllerin şekli ayrıca kayma dayanımı, deformasyon davranışı, akışa karşı direnç, mikro özellikler ve granüler malzemelerde sıvılaşmaya karşı hassasiyet gibi özellikleri de etkiler (Matsushima et al. 2009; Zhou et al. 2017, 2018; Wei et al. 2018a; Nie et al. 2020).

Granül malzemelerdeki düzensiz geometriye sahip partiküllerin davranışlarını DEM ile modellemek, daha karmaşık algoritmalar ve temas modelleri gerektirdiğinden oldukça zordur. Basit geometriye sahip olmayan düzensiz partiküllerin hareketlerini ve diğer partiküllerle etkileşimlerini doğru bir şekilde belirlemek için yeni algoritmalar gereklidir. Araştırmacılar, granül zeminin 3D şeklini karakterize etmek için mikro-CT tarama ve karmaşık algoritmaların yanı sıra DEM modellemelerini de kullanmaktadırlar. DEM ile düzensiz geometriye sahip partiküllerini modellemek hesaplama açısından maliyetli olsa da küre varsayımı gibi basit geometriler kullanılarak yapılan simülasyonlara kıyasla daha yüksek doğruluk sağlarlar. Partiküllerin yüzey düzensizlikleri, zeminin sıkıştırılabilirliğini ve kayma dayanımını etkiler. Partiküllerin kenetlenmesi, istifleme yoğunluğundan daha fazla kitle sürtünmesine etki eder ve

gerçek iç sürtünme değerlerini kullanmak, doğru yanal zemin basınç katsayıları elde etmek için önemlidir (Matsushima et al. 2009; Zhou et al. 2017; Wei et al. 2018b; Nie et al. 2020; Li et al. 2017).

Bu çalışmanın amaçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

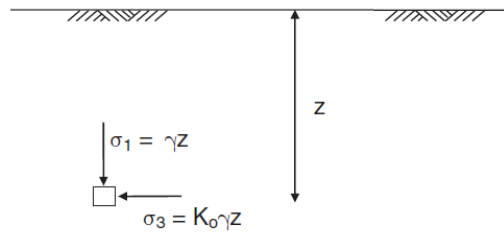
- Kaba daneli zeminler (kalker) üzerinde özgül ağırlık, elek analizi, rölatif sıklık, boşluk oranı ve kesme kutusu vb. deneyler yapılarak zeminlerin bazı mühendislik özellikleri elde edilmiştir.
- Farklı çap ve dane şekline sahip zeminler farklı rölatif sıklıklarda model tanka yerleştirilmiş ve aktif ve pasif durumlar incelenmiştir.
- Deney sırasında çekilen fotoğraflardan PIV tekniği kullanılarak zeminlerde oluşan yer değiştirmeler gözlenmiştir.
- İstinat duvarı sistemi ayrıca DEM ile modellenmiştir.
- DEM yönteminden elde edilen sonuçlar model deneyle ve PIV yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Yanal Zemin Basınçları

İstinat duvarına uygulanan yanal zemin basıncı 3 şekilde kategorize edilebilir:

Sükûnette zemin basıncı: Zemin yüzeyinden itibaren z derinliğindeki bir noktada toplam düşey gerilme düşünülen noktanın üzerindeki yüklerin toplamıdır. Homojen ve üzerinde dış yük olmayan bir zemin, σ_1 , Şekil 1'de gösterildiği gibi, üsteki zeminin ($= \gamma z$) ağırlığına bağlıdır.



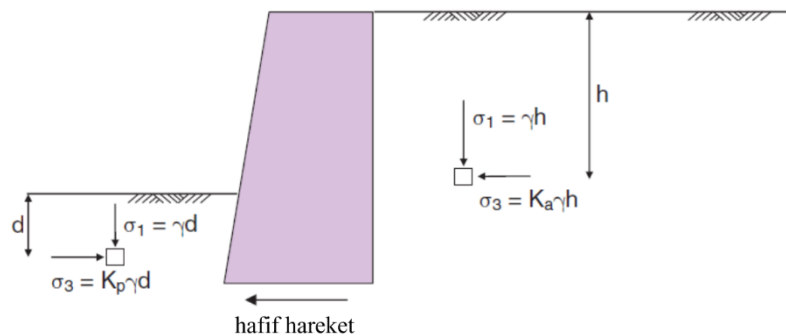
Şekil 1. Sükûnet durumunda düşey ve yanal zemin basınçları

Yanal zemin basıncı, σ_3 , bu noktaya etkileyen düşey gerilme ile k katsayısının çarpımına eşittir. Bu durumda, K_0 ile gösterilen sükûnetteki zemin basınç katsayısıdır. Literatürden deneysel olarak granül zeminler ve normal konsolide killer için $K_0 \approx 1 - \sin \phi$ olarak verilmiştir (Jaky, 1944).

Aktif ve pasif zemin basınçları: Aktif ve pasif zemin basınçları: Arka yüzeyi düşey olan bir istinat duvarı, kohezyonsuz yatay yüzeye sahip bir zemini desteklenmesi durumunda, zemin yüzeyinin altındaki herhangi bir noktadaki düşey gerilme $\sigma_1 = \gamma \times h$ olacaktır.

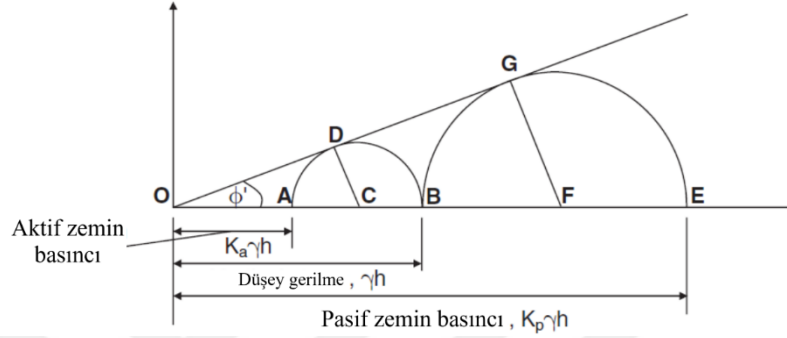
$$\text{Duvarın arkasında, } h \text{ derinlikte, düşey gerilme, } \sigma_1 = \gamma h \quad (1)$$

$$\text{Duvarın önünde, } d \text{ derinliğinde, düşey gerilme, } \sigma_1 = \gamma d \quad (2)$$



Şekil 2. Aktif ve pasif zemin basınç durumları (Smith, 2014)

Duvarın hafifçe ileri doğru hareket ederse duvarın arkasındaki zemin genişleme gösterecek ve yanal zemin basıncı da azalacaktır. İstinat duvarının önündeki zemin ise sıkışacak dolayısıyla yanal zemin basıncında artışa neden olacaktır. Bu durumda, sükûnet durumuna ek olarak iki farklı durum oluşacaktır. Genişlemede, zeminde aktif durum ve sıkıştırmada ise pasif durum meydana gelecektir. Duvarın arkasındaki zemin aktif durumdadır ve böylece zeminin duvar üzerinde uyguladığı basınç aktif basınçtır. Aksine, duvarın önündeki zemin pasif durumdadır ve böylece zeminin duvar üzerinde uyguladığı basınç pasif basınçtır (Smith, 2014).



Şekil 3. Aktif ve pasif zemin basınçları (Smith, 2014)

$$\text{Duvarın arkasında (aktif), } \sigma_3 = K_a \gamma h \quad (3)$$

$$\text{Duvarın önünde (pasif), } \sigma_3 = K_p \gamma d \quad (4)$$

Aktif ve pasif basınçları, zeminin dayanabileceği sırayla minimum ve maksimum yanal basınç (σ_3) değeridir. Aktif ve pasif yanal zemin basınçları, iki temel teori, Rankine (1857) ve Coulomb (1776) tarafından hesaplanmaktadır.

Rankine Teorisi: Granüller zeminler, aktif zemin basıncı

Yatay zemin yüzey durumu:

Mohr diyagramına göre (Şekil 3)

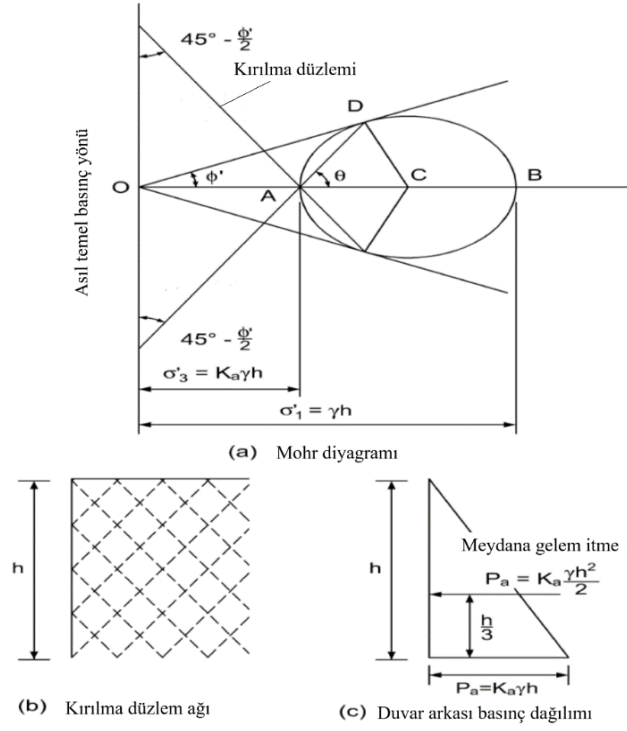
$$K_a = \frac{K_a \gamma h}{\gamma h} = \frac{OA}{OB} = \frac{OC - AC}{OC + CB} = \frac{OC - DC}{OC + DC} = \frac{1 - \frac{DC}{OC}}{1 + \frac{DC}{OC}} = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (5)$$

Trigonometriye göre,

$$\frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (6)$$

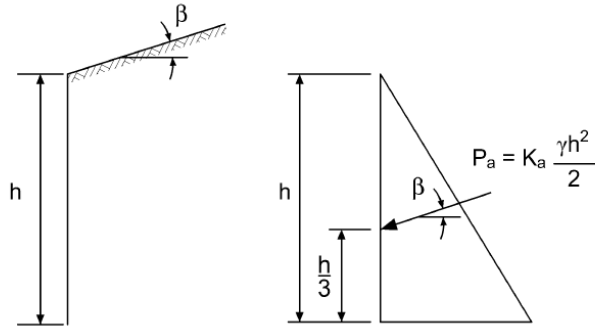
Bundan dolayı,

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (7)$$



Şekil 4. Kohezyonsuz yatay zemin için aktif basınç

Eğimli zemin yüzey durumu:



Şekil 5. Kohezyonsuz yataydan β açısıyla eğimli zemin için aktif basınç

$$K_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \Phi')}}{\cos \beta + \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \Phi')}} \quad (8)$$

Rankine Teorisi: Granüler zeminler, pasif zemin basıncı

Yatay zemin yüzey durumu:

Mohr diyagramına göre (Şekil 3):

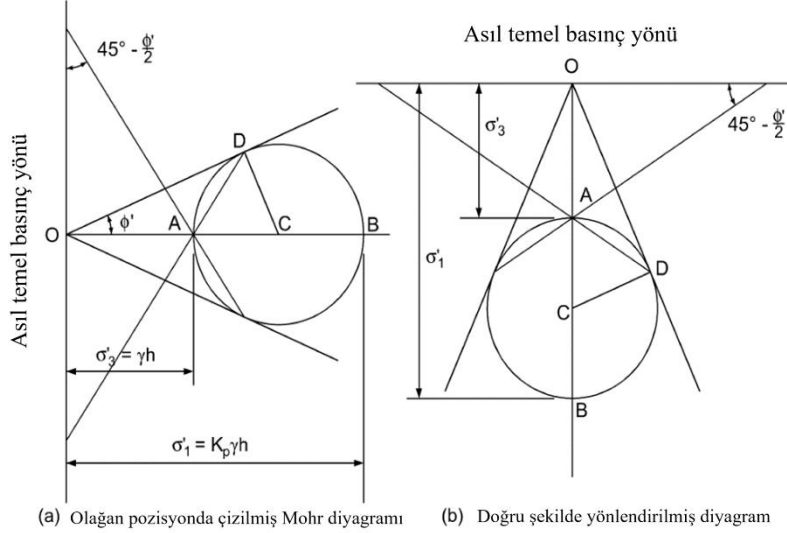
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{OB}{OA} = \frac{OC+DC}{OC-DB} = \frac{1+\sin \phi'}{1-\sin \phi'} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (9)$$

Trigonometriye göre,

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (10)$$

Bundan dolayı,

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (11)$$



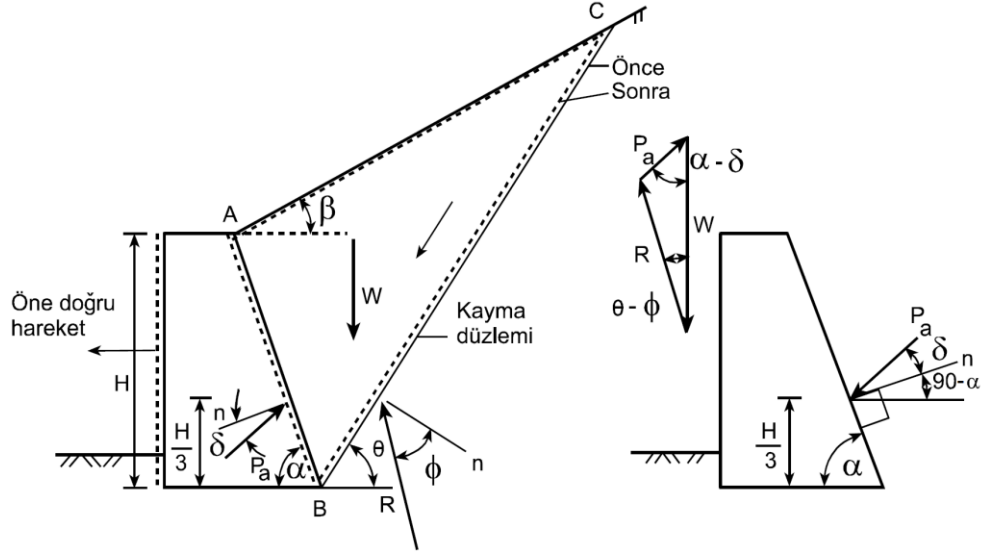
Şekil 6. Kohezyonsuz yatay dolgu için pasif basınç

Eğimli zemin yüzey durumu:

$$K_p = \cos \beta \frac{\cos \beta + \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \phi')}}{\cos \beta - \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \phi')}} \quad (12)$$

Coulomb Kama Teorisi

Coulomb tarafından önerilen bu Metot, Rankine metoduna kıyasla daha geniş bir uygulama alanına sahiptir ve pratikte karşılaşılan koşullara uyum sağlamak üzere çeşitli yazarlar ve araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Coulomb Teorisi, dayanma duvarının arkasındaki dolgu malzemesindeki kayma kamasını ve duvar ile zemin arasındaki sürtünmeyi hesaba katar. Bu teoriye göre, kayma kamasına etki eden kuvvetlerin dengesi gözetilerek, duvarın karşı koyduğu aktif (P_a) ve pasif (P_p) basınçlar belirlenir. Kohezyonsuz zeminlerde aktif durumda, duvarın öne doğru hareketi sırasında arkada oluşan üçgen şeklindeki kama aşağı doğru kayar. Bu durum için kamaya etki eden kuvvetler ve etkileşim noktaları Şekil 7'de gösterilmiştir (Smith, 2014).



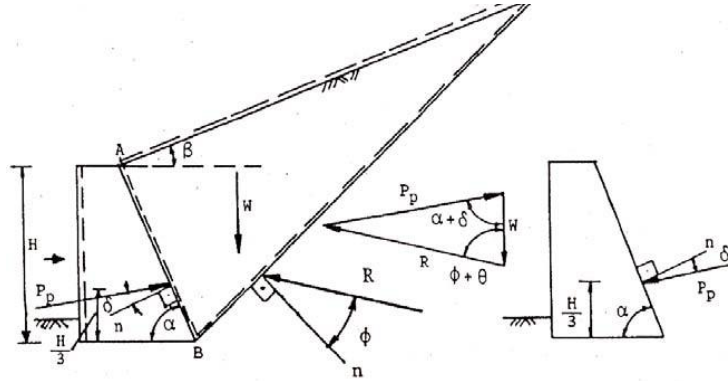
Şekil 7. Kohezyonsuz zeminde Coulomb Kama Teorisi için aktif durum

Şekilde gösterilen ABC kamasının dengesi yazıldığında ve P_a 'nın, aktif bileşke kuvvetinin maksimum olduğu koşul uygulandığında, aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$p_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (13)$$

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \theta)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (14)$$

Kohezyonsuz zeminde pasif durumda, duvarın arkaya doğru hareketi sırasında oluşan üçgen kama da yukarı doğru hareket eder (Şekil 8).



Şekil 8. Kohezyonsuz zeminde Coulomb Kama Teorisi'ne göre pasif durum

Yine, şekilde gösterilen ABC kamasının dengesi yazıldığında ve P_p 'nin, pasif bileşke kuvvetinin minimum olduğu koşul uygulandığında, aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$p_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p \quad (15)$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (16)$$

Hesaplamalarda $\delta=0$, $\alpha=90^\circ$ ve $\beta=0$ olduğunda, aktif ve pasif zemin basıncı katsayıları Rankine Teorisi ile aynıdır. Sürtünme açısı δ 'nın değeri 0 ile ϕ arasında değişkenlik gösterir. Terzaghi'ye göre δ t değeri $\phi/2$ ile $2/3\phi$ arasında olmalıdır (Smith, 2014).

Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Zeminlerin kayma mukavemeti, yük uygulandığında zemin danelerin birbirine göre hareket etmeye başladığı ve kayarak göçme meydana geldiği noktadır. Bu noktadan sonra zemin daha fazla yük taşıyamaz. Drenajsız kayma mukavemeti, göçme zarfı oluşmadan zeminin karşı koyabileceği en yüksek kayma gerilmesidir. Bu parametre, arazide ve laboratuvar ortamında deneylerle belirlenebilir. Matematiksel olarak, zeminlerin kayma mukavemeti Coulomb (1776) tarafından ilk kez ifade edilmiştir. Bu konuda birçok hipotez ve çalışma bulunmaktadır. Zemin mühendisliği alanında bu parametre, yapıların temel tasarımında ve zemin stabilitesinin analizinde önemli bir rol oynar. Zeminlerin kayma mukavemeti, inşaat mühendisliği ve zemin mekaniği alanında büyük bir öneme sahiptir. Bu parametreyi anlamak, yapıların güvenliğini sağlamak ve zeminle etkileşimini doğru bir şekilde değerlendirmek için kritik bir adımdır.

Mohr-Coulomb Kırılma Teorisi, zemin mekaniğinde en yaygın kullanılan teorilerden biridir. Bu teori, Coulomb (1776) tarafından ortaya atılmış ve Mohr (1900) tarafından geliştirilmiştir. Temel olarak, bu teori zeminin göçme davranışını analiz eder.

İşte Mohr-Coulomb Kırılma Teorisi'nin temel prensipleri:

Normal Gerilme (σ): Bir noktada zemine uygulanan yükün zemin yüzeyine dik olan bileşenidir. Normal gerilme, zeminin taşıma kapasitesini etkiler.

Kayma Gerilmesi (τ): Zeminin içindeki tanecikler arasındaki sürtünme nedeniyle oluşan gerilmedir. Kayma gerilmesi, zeminin kayma dayanımını belirler.

Göçme Zarfı: Mohr gerilme daireleri ile gösterilen bir doğru, zeminin göçme durumunu temsil eder. Bu doğru, normal ve kayma gerilmesi bileşenlerinin konumunu gösterir.

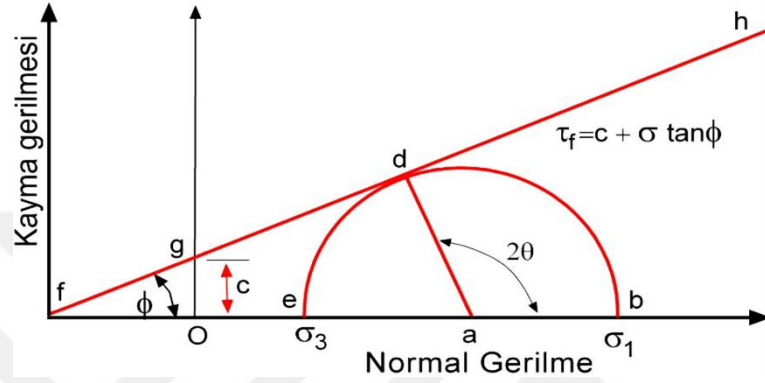
Matematiksel olarak, Mohr-Coulomb Kırılma Teorisi aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\tau = c + (\sigma \times \tan \phi) \quad (17)$$

Burada:

- (τ) kayma gerilmesini,
- (c) kohezyonu,
- (σ) normal gerilme bileşenini,
- (ϕ) içsel sürtünme açısını temsil eder.

Bu teori, zemin mühendisliği ve yapı tasarımında önemli bir rol oynar. Göçme analizleri, temel tasarımı ve zemin stabilitesi değerlendirmelerinde Mohr-Coulomb Kırılma Teorisi sıkça kullanılır.



Şekil 9. Mohr-Coulomb kırılma zarfı

Kayma mukavemeti açısı, zemin mekaniğinde önemli bir parametredir ve daneler arasındaki etkileşimi tanımlar. Kayma mukavemeti açısını etkileyen parametreler (Holtz & Kovacs, 1981):

Boşluk Oranı: Zemin içindeki boşlukların oranı, kayma mukavemeti açısını etkiler. Daha büyük boşluk oranı, daha düşük kayma mukavemetine yol açar.

Köşelilik: Danelerin şekli ve köşeleri, kayma mukavemeti açısını etkiler. Daha köşeli daneler arasındaki sürtünme daha yüksek olur.

Dane Boyutu Dağılımı: Farklı boyutlardaki danelerin karışımı, kayma mukavemetini etkiler. İyi derecelenmiş zeminler, daha homojen bir kayma davranışına yol açabilir.

Yüzey Pürüzlülüğü: Daneler arasındaki sürtünmeyi artırabilir. Daha pürüzlü yüzeyler, daha yüksek kayma mukavemetine katkıda bulunabilir.

Su Muhtevası: Su içeriği, zeminin kayma mukavemetini etkiler. Daha yüksek su içeriği, kayma dayanımını azaltabilir.

Dane Boyutu: Danelerin boyutu, sürtünme ve kilitleme bileşenlerini etkiler. Daha büyük veya daha küçük daneler farklı davranışlara yol açabilir.

Kilitleme bileşimi, zeminin sıklığı ve dağılımı ile ilgilidir. Bu, danelerin birbirine nasıl bağlandığını ve zeminin genel yapısını etkiler. Daneler arasındaki sürtünme ve kilitleme,

kayma mukavemeti açısının temel bileşenleridir. Bu faktörler, zeminin davranışını anlamak ve mühendislik tasarımlarında doğru değerleri kullanmak için önemlidir (Shackelford, 2005).

Danelerin Şekilsel Özellikleri

Danelerin şekilsel özellikleri, zemin mekaniğinde önemli bir rol oynar ve danelerin davranışını etkiler. Bu konuda ilk çalışmalar Mackie (1897) ve Dunn (1911) tarafından yapılmıştır ve birçok çalışma Cox 1927, Russel ve Taylor (1937), Riley 1941, Powers 1953, Drake 1970, Barrett 1980, Powers 1982, Janoo 1998, Drolon *et al.* 2000, Drevin 2006, Yu *et al.* 2007 tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalar, zemin mühendisliği ve jeoloji alanında danelerin özelliklerini anlamak ve doğru değerleri kullanmak için önemlidir. Danelerin şekil, boyut ve pürüzlülük gibi özellikleri, zemin davranışını etkiler ve mühendislik tasarımlarında dikkate alınmalıdır.

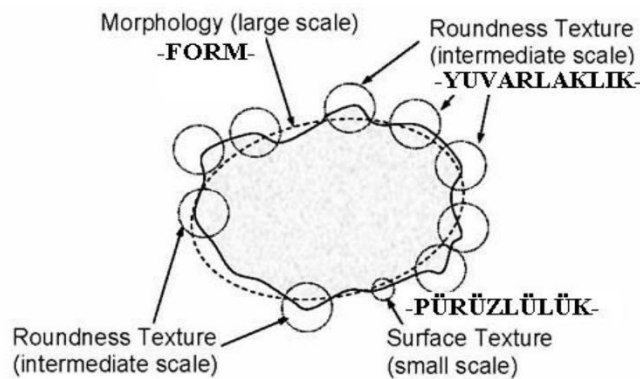
Danelerin şekilsel özellikleri, granüler zeminlerin mühendislik özelliklerini belirlemede önemlidir. Bu özellikler, danelerin şekli, büyüklüğü, dağılımı ve pürüzlülüğünü içerir. Dane ölçeğine bağlı olarak, şekil üç ana grupta incelenir:

Form: Danelerin şekli, küresel, kübik, yassı/plaka veya silindir şeklinde olabilir.

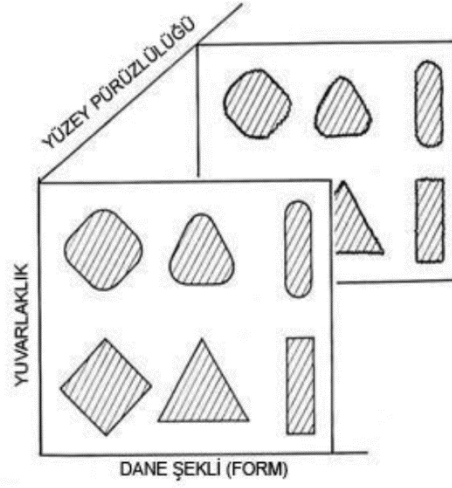
Yuvarlaklık: Danelerin boyutları ve köşeliliği, yuvarlaklık özelliğini etkiler.

Pürüzlülük: Daneler arasındaki yüzey pürüzlülüğü, kayma mukavemetini etkiler.

Bu özellikler, zeminlerin davranışını anlamak ve mühendislik tasarımlarında doğru değerleri kullanmak için önemlidir. Şekil 8’de bu özelliklerin dane ölçeğine bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmektedir. Şekil 9’de ise dane şekli, yuvarlaklık ve pürüzlülük örnekleri verilmiştir.

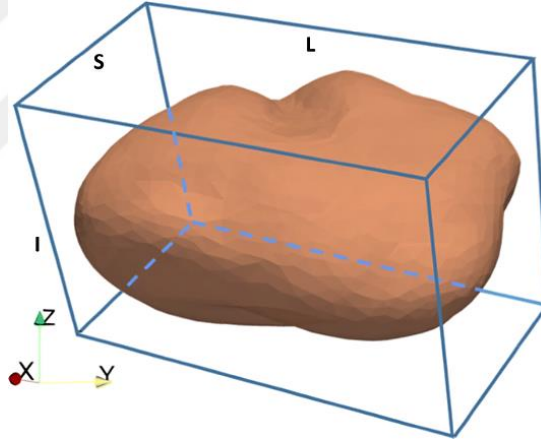


Şekil 10. Dane şekil tanımlaması (Mitchell ve Soga, 2005)



Şekil 11. Dane şeklinin sınıflandırılması (Barrett, 1980)

Danenin şeklini belirlemek için uzun, orta ve kısa boyutlara ihtiyaç vardır. Bu boyutlar sırasıyla L, I ve S ile gösterilir (Şekil 10). Araştırmacılar, dane boyutlarını ölçmek için farklı yöntemler önermiştir. En yaygın kullanılan yöntem, danenin kumpas ile en büyük çapının (L) ölçülmesi ve daha sonra buna dik olarak I ve S'nin ölçülmesidir (BLOTT & PYE, 2008).



Şekil 12. Dane boyutunun gösterimi

Danelerin özellikleri, granüler zeminlerin davranışını anlamak ve mühendislik tasarımlarında doğru değerleri kullanmak için önemlidir. İşte bu parametrelerin bazıları:

Boyut:

- Danelerin boyutu, granülometrik analizle belirlenir.
- En yaygın olarak kullanılan boyut ölçüleri arasında çap, genişlik, uzunluk ve kalınlık bulunur.
- Boyut dağılımı, zeminin davranışını etkiler.

Şekil:

- Danelerin şekli, küresel, kübik, yassı/plaka veya silindir şeklinde olabilir.

- Şekil, zeminin taşıma kapasitesini ve kayma mukavemetini etkiler.

Pürüzlülük:

- Daneler arasındaki yüzey pürüzlülüğü, kayma mukavemetini etkiler.
- Pürüzlü yüzeyler daha yüksek kayma dayanımına katkıda bulunabilir.

Köşelilik:

- Danelerin köşeleri, yuvarlaklık ve sürtünme özelliklerini etkiler.
- Daha köşeli daneler arasındaki sürtünme daha yüksek olabilir.

Danelerin boyutu, şekli ve pürüzlülüğü, granüler zeminlerin mühendislik özelliklerini belirlemede kritik rol oynar.

Yuvarlaklık (Roundness), danelerin orta ölçekteki bir morfolojik özelliğidir. Bu özellik, danelerin köşe ve kenarlarının ortalama eğrilik yarıçapının en büyük iç kürenin yarıçapına oranı olarak ifade edilir (Shackelford, 2005). Yuvarlaklık, danenin çıkıntı köşelerinin keskinliğine bağlı olarak değişir. Yuvarlaklık, zeminlerin davranışını anlamak ve mühendislik tasarımlarında doğru değerleri kullanmak için önemlidir. Danelerin şekil özellikleri, granüler zeminlerin taşıma kapasitesini ve kayma mukavemetini etkiler.

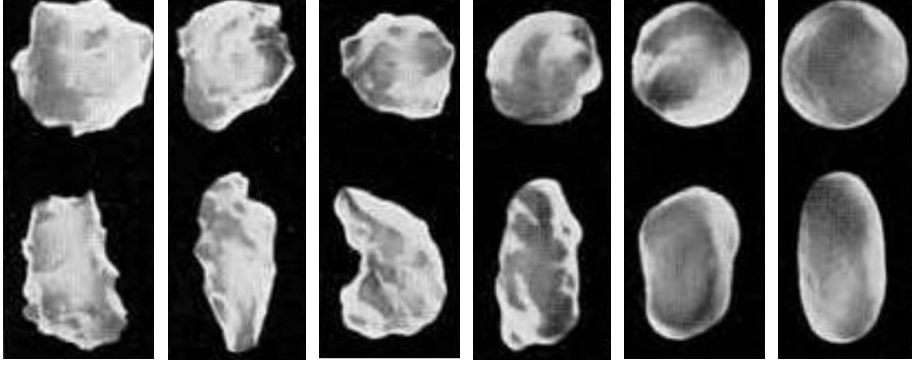
Danelerin yuvarlaklığını hesaplamak bazen zor olabilir, özellikle yarıçapları doğrudan ölçmek mümkün değildir. Cox (1927) tarafından önerilen bir formül, sadece danelerin alan ve çevre değerlerini kullanarak yuvarlaklık değerini tahmin etmeye yardımcı olur. Bu formül, danenin köşeli mi yoksa yuvarlak mı olduğunu belirlemek için kullanışlıdır. Temel prensip, dairenin alanının çevresinin karesine oranının sabit olmasıdır. Bu sayede yuvarlaklık değeri hesaplanabilir.

$$R = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (18)$$

A= dane alanı

P= Dane çevresi

Tablo 1. Cox (1927) göre danelerin yuvarlaklık sınıflandırması

Yuvarlaklık Değeri	<0,5	0,5-0,65	0,65-0,70	0,70-0,75	0,75-0,77	0,77-0,80	0,80-1,00
Dane Görüntüsü							
Yuvarlaklık Sınıfı	-	Çok Köşeli	Köşeli	Yarı Köşeli	Yarı Yuvarlak	Yuvarlak	Tam Yuvarlak

Parçacık Görüntü Hız Ölçümü (PIV)

Parçacık Görüntü Hız Ölçümü (PIV), deforme olan bir malzemenin, özellikle de tanecikli akış çalışmalarında, tam alan hız dağılımını ölçmek için kullanılan güçlü, tahribatsız bir optik tekniktir. PIV'de, malzemenin içindeki tek tek parçacıklar izleyici görevi görerek harici tohumlama parçacıklarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. PIV, ardışık dijital görüntüleri analiz ederek, malzemenin hareketinin ve zaman içindeki deformasyonunun yüksek çözünürlüklü olarak izlenmesini sağlayabilir (White et al., 2002- Thielicke ve Stamhuis, 2014).

PIV Metodolojisi

Görüntü Alma: Yüksek hızlı bir kamera, bir lazer veya başka bir ışık kaynağı ile aydınlatılan deforme olan malzemenin ardışık görüntülerini yakalar.

Görüntü Ön İşleme: Elde edilen görüntüler, sonraki analizlerin doğruluğunu artırmak için parazit azaltma ve iyileştirme dahil üzere ön işleme adımlarından geçer.

Görüntü Yoğunluğu Alanı: PIV algoritması, görüntü yoğunluğu modelini gri tonlama gösterimi olarak yorumlar, burada her pikselin yoğunluğu, akıştaki parçacıklar tarafından saçılan veya yayılan ışığa karşılık gelir.

İlgi Alanı (AOI): Ayrıntılı analiz için görüntü içinde belirli bir bölge, ilgi alanı seçilir.

Sorgulama Pencere: AOI, sorgulama pencere veya hücreleri olarak adlandırılan küçük alt bölgelere ayrılır. Her sorgulama penceresi, toplu hareketi analiz edilen bir grup parçacık içerir.

Çapraz Korelasyon Analizi: PIV'nin kalbi çapraz korelasyon fonksiyonudur. Bu fonksiyon, iki ardışık görüntüdeki bir sorgulama penceresi içindeki parçacık modellerini karşılaştırır. Korelasyon zirvesini maksimize eden yer değiştirme, görüntüler arasındaki zaman aralığında o penceredeki parçacıkların ortalama hareketini gösterir.

Hız Hesaplama: Yer değiştirmenin zaman aralığına bölünmesiyle her sorgulama penceresi için ortalama hız vektörü belirlenir.

Vektör Alanı Oluşturma: Tek tek hız vektörleri, tüm AOI'deki akış modelini temsil eden kapsamlı bir hız vektör alanı oluşturmak için birleştirilir.

Yinelemeli İyileştirme: Doğruluğu artırmak için analiz, sorgulama pencerelerinin boyutunu ve şeklini ayarlayarak ve gelişmiş korelasyon algoritmaları kullanarak yinelemeli olarak iyileştirilebilir.

PIV'in Avantajları

Tahribatsız: PIV, malzemenin doğal akışını bozmaz, doğru ölçümler sağlar.

Tam Alan Ölçümü: Noktasal ölçüm tekniklerinin aksine, PIV tüm ilgi alanı boyunca hız verileri sağlar.

Yüksek Mekânsal Çözünürlük: PIV, ince ölçekli akış yapılarını çözebilir ve karmaşık akış modellerini yakalayabilir.

Zamansal Çözünürlük: Yüksek hızlı kameralarla PIV, hızlı akış dinamiklerini takip edebilir.

PIV, aşağıdakiler gibi granüler akış olaylarını incelemede paha biçilmez olduğunu kanıtlamıştır:

- Kayma bantları ve lokalizasyon
- Parçacık etkileşimleri ve çarpışmaları
- Sıkışma ve sıkışmama geçişleri
- Granüler malzemelerin reolojisi
- Haznelerde ve silolarda akış

PIV, granüler malzemelerin kinematikini araştırmak için çok yönlü ve güçlü bir araçtır ve karmaşık akış davranışlarına ilişkin ayrıntılı bilgiler sağlar (Widulinski et al., 2011).

Ayrık Elemanlar Metodu (DEM)

Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method, DEM), granüler malzemelerin dinamik davranışlarını analiz etmek üzere Cundall ve Strack tarafından 1979 yılında geliştirilen sayısal bir modelleme yaklaşımıdır. Bu metodoloji, süreklilik modellerinin aksine, malzemenin

sürekli bir ortam olarak kabul edilmesi ve içerisindeki parçacıkların bağımsız hareketlerinin ve rotasyonlarının ihmal edilmesi yerine, daneleri sistemlerdeki parçacıkların ve bunların aralarındaki etkileşimlerin hesaba katılmasını sağlar (O'Sullivan, 2011).

Cundall ve Strack'ın (1979) belirttiği üzere, DEM'de iki parçacık arasındaki temas kuvvetleri ve her bir parçacığın temas sonrasında gösterdiği hareket, hareket denklemleri ile hesaplanmaktadır. Kuvvetlerin hesaplandığı zaman diliminde parçacıkların hız ve ivmeleri sabit kabul edilir. Ayrıca, zaman dilimi öyle bir şekilde ayarlanır ki, bir zaman dilimi boyunca sadece parçacığın yakın çevresindeki komşuları temas kuvvetleri üzerinde etkili olur. Her zaman diliminde, temas kuvvetlerinin sebep olduğu parçacık hareketleri Newton'un ikinci yasası kullanılarak hesaplanır ve temas kuvvetlerinin yol açtığı yer değiştirmeler kuvvet-yer değiştirme ilişkisi ile saptanır (Ghorbani, 2019).

DEM simülasyonları uygulanırken, ilk olarak geometri, malzeme özellikleri ve sistem yükleme veya deformasyon şeması tanımlanmalıdır. Simülasyon, belirlenen sayıda iterasyon için geçici veya dinamik analiz şeklinde başlatılır. Her iterasyonda, temas halindeki parçacıklar saptanır ve aralarındaki temas kuvvetleri hesaplanır. Bu temas kuvvetlerine dayalı olarak, her parçacığın üzerine etki eden kuvvetler ve momentler, parçacıkların translasyonel ve rotasyonel hareketlerini belirlemek üzere hesaplanır. Parçacıkların yer değiştirmeleri ve yönelimleri güncellenir, ve bir sonraki iterasyonda temas kuvvetleri bu yeni duruma göre hesaplanır. Simülasyon, belirlenen iterasyon sayısına ulaşana kadar bu işlem tekrarlanır (Ghorbani, 2019).

Ayrık Elemanlar Yönteminde Fiziksel Modeller

Parçacıklar arasındaki temas kuvvetleri, temas noktasına normal ve teğet olmak üzere iki ana bileşene ayrılır. Bu normal ve teğetsel bileşenler, yaylar, sürgüler ve sönümleyicilerin birleşiminden oluşan 'temas modelleri' ile temsil edilir. Normal bileşen için en temel model, Hertz (1882) tarafından önerilen modelken, teğet bileşen için Mindlin (1949) ve Mindlin ve Deresiewicz (1953) tarafından geliştirilen modeller tercih edilir. Bu temel temas modelleri ve daha ileri düzey modeller aşağıda detaylandırılmıştır (Ghorbani, 2019).

Temas Kuvveti Modelleri

Herhangi bir DEM yazılımında temas kuvvetleri, aşağıdaki iki ana kategoride incelenir:

- **Temas düzlemine normal kuvvetler:** Bu kuvvetler, temas eden iki yüzey arasındaki dik kuvvetleri ifade eder.
- **Temas düzlemine teğet kuvvetler:** Bu kuvvetler, temas eden yüzeyler arasındaki paralel kuvvetleri temsil eder.

Küresel parçacıklar için, temas düzlemi iki kürenin merkezlerini birleştiren çizgiye dik olarak tanımlanır. Parçacık-yüzey temasında ise, bu çizgi bir kürenin merkezi ile yüzeyi oluşturan üçgenin en yakın noktasını birleştirir. Yuvarlak olmayan parçacıklar için temas düzlemini belirleme süreci daha karmaşıktır ve aşağıdakilerden herhangi birini hesaplamayı gerektirebilir:

- İki parçacığın en yakın noktaları.
- Bir parçacık ile bir üçgenin en yakın noktaları.
- Fiziksel temas durumunda maksimum örtüşme mesafesine sahip iki nokta.

İlk adım, standart bir CAD paketi kullanarak geometrinin oluşturulması ve daha sonra hareketli partiküllerin sınır hareketinin tanımlanmasıdır. Yığın malzemeler daha sonra sistem içinde belirli başlangıç koordinatlarında bırakılır. Simülasyon küçük artımlı zaman aşamalarını kullanarak ilerler ve her partikül üzerindeki toplam kuvvet, zamanın her anında belirlenir. Toplam kuvvet, tüm mekaniksel temas ve gövde kuvvetlerinin toplamıdır.

$$\sum F = F_{Temas} + F_{Gövde} = m\bar{a} \quad (19)$$

Modeldeki cisim kuvveti; yerçekimi, akışkan sürüklemesi, adezyon/kohezyon, elektrostatik ve manyetik kuvvetleri içerebilir. Her bir parçacığın yer değiştirmeleriyle birlikte doğrusal ve açısal hızlarını (spin) tahmin etmek için bir zaman entegrasyon şeması kullanılır.

Ayrık Elemanlar Yöntemin Kullanım Avantaj ve Dezavantajları:

Avantajlar:

- Geoteknik uygulamalarda sürekli yaklaşıma göre karmaşık yapısal ilişkiler gerektirmez.
- Granüler malzemelerin farklı davranışlarını gerçekçi bir şekilde simüle eder.
- Malzeme davranışını tanımlamak için temas sertliği ve sürtünme katsayısı gibi fiziksel anlamları açık olan daha az parametre kullanır.
- Parçacık tabanlı mekanizmaları, kırılma mekaniği, dinamik sorunları, büyük yer değiştirme/gerinim problemlerini (örneğin başarısızlık sonrası mekanizmalar), zemin-yapı etkileşimini vb. araştırmada etkilidir.
- Tamamen dinamik doğası sayesinde problemlerin görsel olarak tanınmasında verimlidir.

Dezavantajlar:

- Aşırı hesaplama zamanı gerektirir, bu da büyük ölçekli simülasyonlar için pratik olmamasına neden olur.

- Malzeme özelliklerini belirlemek için kalibrasyon çalışmalarına ihtiyaç duyar.
- Geometrilere oluşturmada zorluklar sunar.
- Piyasada DEM (Ayrık Eleman Yöntemi) için kullanılabilir bilgisayar programlarının sınırlı olması

Partikül şekilleri

DEM modelindeki parçacık şekli gösterimi birçok uygulamada kritik bir öneme sahiptir. Çoğu DEM modeli, küresel partikül şekillerini doğruluktan değil, kolay temas saptaması ve üst üste gelme avantajlarından dolayı kullanır. Bununla birlikte, bu ideal şekil temsili, mekanik kenetleme, sıralama sistemlerinin performansının tahmin edilmesi, titreşimli besleyicilerin ve iletişim cihazları gibi gerçek daneli malzemeler tarafından sergilenen çoğu olguyu doğru bir şekilde modellemede başarısız olur. Küresel olmayan şekilleri temsil etmek için birkaç farklı yöntem önerilmiştir. En basit ve en yaygın olarak kullanılan, yapıştırılmış küre veya çoklu küre yöntemidir. Bu tekniğin kullanılmasının bir avantajı, hesaplama zamanını artırmamasına rağmen, kürelerle ilişkili temas tespitinin sadeliğinin muhafaza edilmesidir. Herhangi bir şeklin modellenemesine rağmen, önemli bir dezavantajı, keskin kenarlara ve aspekt oranlarına sahip olan şekillerin hesaplanmasının zorluğudur. Ayrıca, yüzeyin “engebeli” yapısı temaslar arasında yapay sürtünme yaratır. Ancak, bu şekiller için, temas algılama, hesaplama açısından pahalı ve bazı uygulamalar için yavaştır. Grafik kartları ve çok çekirdekli CPU'ları kullanan hızlı çözücülerin, bu yöntemi eskisinden daha pratik hale getirmiştir (Bharadwaj, 2014).

DEM Uygulamaları

DEM şu anda karıştırma, ayırma, depolama ve taşıma, taşıma ve sıvı-parçacık akışları gibi süreçleri incelemek için kullanılmaktadır. Bir DEM simülasyonu, aşağıdakiler gibi bazı önemli büyüklüklerin tahmin edilmesini sağlayabilir:

- Ekipmanların kuvvet, tork ve güç tüketimi
- Ekipmanların kuvvet, tork ve güç tüketimi
- Akış modelleri ve oranları
- Ekipmanın kuvvet, tork ve güç tüketimi
- Yüzeylerde aşınma ve gerilme şekilleri
- Kırılma oranları ve enerji spektrumları
- Hız profilleri ve sönmüş bölgeler
- Karıştırma ve ayırma modelleri
- Kalış zamanı ve partiküllerin dağılımı

DEM'in FEM ve çok diğ er yöntemlerle birleştirilmesi, bu teknolojinin şu ana kadar mümkün olmayan birçok sürecin performansını tahmin etmek için uygulanabilirliğini arttırmıştır (Bharadwaj, 2014).

Konu ile İlgili Yapılmış  alışmalar

Literatürde DEM kullanılarak istinat duvarlarının davranışının incelendiği çalışmalar kısıtlıdır. Bu bölümde konuyla ilgili literatürde yapılmış çalışmalar özetlenerek sonuçları verilmiştir.

White ve Take (2002) doktora çalışmalarında kullanmak amacıyla GeoPIV yazılımını programlamışlardır. GeoPIV yazılımı, geoteknik deneylerin analizinde partikül görüntü hız prensipleri üzerinde Matlab modülü olarak uygulanmıştır.  alışmalarında dijital görüntülerden yer değiştirme alanlarını ölçmek için GeoPIV kullanmanın pratik ayrıntılarını açıklamışlardır.

Paik ve Salgado (2003)  alışmalarında yatay ötelemeye maruz kalan rijit bir istinat duvarı üzerindeki aktif zemin basıncını hesaplamak için dolguda meydana gelen kemerleme etkilerini dikkate alan yeni bir formülasyon önermişlerdir. Önerilen formülasyonun doğruluğunu kontrol etmek için, denklemden elde edilen tahminler hem mevcut tam ölçekli deney sonuçları hem de mevcut denklemlerden elde edilen değerlerle karşılaştırılmışlardır. Önerdikleri denklemlerin hem toprak basıncı dağılımını hem de ötelenen duvar üzerindeki yanal aktif toprak kuvvetini tatmin edici bir şekilde tahmin ettiğini göstermişlerdir.

Sullivan et al. (2004)  alışmalarında kesme kutusu deneyini, bir dizi fiziksel deneylerle birlikte ayrıık elemanlar analiz metodu kullanılarak incelenmişlerdir. Laboratuvar deneyleri ve sayısal simülasyonlar arasındaki uyum, tamamen tatmin edici olmamıştır. Simülasyonların sonuçları kullanılarak hesaplanan sürtünme açısı, fiziksel deneylerden elde edilenden 3  daha düşük çıkmıştır.

Mirghasemi ve Maleki (2006)  alışmalarında, Bir istinat duvarının arkasındaki aktif ve pasif toprak basıncı dağılımı için Ayrıık Eleman Yöntemine (DEM) dayalı statik ve psödo- statik analiz sunmuşlardır. Mevcut modeldeki zemin kütlesi, elasto-plastik Winkler yayları ile bağlanan bloklardan oluşuyormuş gibi ele alınmıştır. Homojen ve homojen olmayan zeminin statik ve psödo-statik yanal basıncını içeren bir istinat duvarının arkasındaki zemin basıncının analizine yönelik yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için birkaç deney yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda, sonuçların diğer yöntemlerle ve ayrıca deneylerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. (Zhou et al., 2022)

Nimbalkar et al. (2006)  alışmalarında, zemin ve duvara etkiyen yapay dinamik sismik kuvvetleri kullanılarak sismik koşullar altında gerekli olan duvarın tasarım ağırlığını pasif

zemin basınç koşullarını belirlemiştir. Bu dinamik yöntemde, sismik uyarım nedeniyle dolgu ve istinat duvarı boyunca hareket eden kayma ve primer dalgalarındaki amplifikasyonun zaman, faz farkı ve amplifikasyon etkisini dikkate almışlardır. Bu çalışmada pasif zemin basınç koşulları altında rijit dikey model istinat duvarı dikkate alınmıştır. Duvar sürtünme açısı, zemin içsel sürtünme açısı, kayma dalga hızı, primer dalga hızı, yanal titreşim periyodu, yatay ve düşey sismik ivme gibi parametrelerin istinat duvarının kayma stabilitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sismik ivmelerin yatay ve düşey yönde artmasıyla, istinat duvarının kayma stabilitesinin önemli ölçüde azaldığını belirlemiştir.

Balevičius ve Kačianauskas (2008) çalışmalarında esas olarak partiküllerin sayısının azalmasının etkisini araştırmışlardır. Fortran 90 ve C++ üzerinde yazılan kodları analizlerde kullanarak sonuçları birbiriyle karşılaştırmışlar ve Fortran 90'ın yaklaşık 5-5,5 kat daha hızlı olduğunu göstermişlerdir. Partiküllerin miktar sınırlamasını, granüler malzemenin toplam kütesini sabit tutarak partiküllerin yarıçapını artırarak uygulamışlardır. 1980, 10000 ve 20400 adet partikül kullanılarak üç boyutlu hunide doldurma ve boşaltmanın bilgisayar simülasyonları, partikül yarıçaplarının artmasıyla partikül sayısındaki azalmanın malzeme homojenliği nedeniyle yapay bir sürtünme oluşturduğunu göstermişlerdir. Azaltılmış kütle fraksiyonu ve boşaltma sırasındaki hızı, tam malzeme boşaltımı için en uzun süreye, duvarların azalmış normal ve artan kayma basıncına neden olmuştur.

Gali ve Krishna (2008) çalışmalarında dolgu rölatif sıklığının sismik tepki üzerindeki etkisini üç farklı istinat duvarı kullanarak laboratuvar model deneyler ile incelemiştir. Dolgu rölatif sıklığının takviyeli istinat duvarlarının sismik performansı üzerindeki etkisi yalnızca çok düşük rölatif sıklıkta ve daha yüksek taban uyarılında görmüşlerdir. Daha yüksek dolgu rölatif sıklık ile inşa edilen duvarlar, daha yüksek taban uyarılında daha düşük rölatif sıklıklarda inşa edilen duvarlara kıyasla daha az yüzey deformasyonu ve daha fazla ivme büyütmesi tespit etmişlerdir. Daha güçlü sismik olaylar durumunda, dolgu uygun şekilde sıkıştırılmazsa istinat duvarlarında oluşacak hasarın daha fazla olacağını belirtmişlerdir.

Matsushima et al. (2009) çalışmalarında ay zemininin üç boyutlu (3D) dane şeklini karakterize etmek ve DEM ile Ay zemininin simülasyonlarını yapmak için kullanılan bir prosedürü açıklamışlardır. Gerçek Ay zemini için ayrıntılı 3D dane şekli bilgisi mevcut olmadığından çalışmalarında simülatif bir malzeme olan FJS-1 kullanılmışlardır. Yeni geliştirdikleri bir görüntü analizi prosedürünü tek tek daneleri tanımlamak için kullanmışlardır. Elde ettikleri dane şekli verilerini kullanarak, yeterli sayıda FJS-1 danesini verimli bir modelleme şemasıyla DEM simülasyonu için doğrudan modellemişlerdir. Daha sonra modellenen danelerle bir dizi parçacık akış simülasyonu gerçekleştirilmişlerdir. Elde edilen

eğim açılarının deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir. Temas rijitliği, restitüsyon katsayısı ve parçacıklar arası sürtünme gibi dane parametrelerinin eğim açısı üzerindeki etkisini tartışmışlardır.

Abdeli et al. (2010) çalışmalarında, 3000 m su derinliklerinde kuru ve suya duygun kum için EDEM 'in uygulama olanaklarını araştırmışlardır. Kum gibi granüler malzemeleri DEM 'de modellemek için en büyük sorunun, doğru kum davranışını (makro özellikler, yığın özellikleri) oluşturmak için simülasyondaki partiküllerin özelliklerini (mikro özellikler) düzenlemektir. Modellemelerin güvenilirliğini kontrol etmek için pasif zemin basıncı ve yığın açısı gibi deneyler kumla modellenmiştir ve modelleme sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Partiküllerin etkileşim özelliklerinin, partikülün hareketi üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu ve numunelerin içsel sürtünme açısı ile bir partikülün statik sürtünme katsayısının aynı olduğunu tespit etmişlerdir. Küresel olmayan partiküllerin model sonuçlarını, analitik sonuçlarla karşılaştırmışlar ve küresel olmayan partiküllerden elde edilen sonuçların, küresel partiküllerin sonuçlarına göre analitik sonuçlara önemli ölçüde daha yakın olduğunu bulmuşlardır.

Niedostatkiewicz et al. (2010) çalışmalarında. bir istinat duvarının yanal zemin basıncı problemi için kohezyonsuz kumdaki kayma bölgelerinin gelişimi, PIV kullanılarak deneysel olarak incelemişlerdir. Yatay ötelemeye, topuk ucu ve tepesi etrafında dönmeye maruz kalan rijit bir istinat duvarının aktif ve pasif durumları için küçük ölçekli laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Başlangıçtaki kum yoğunluğunun hacimsel ve deviatorik birim deformasyon dağılımı üzerindeki etkisine odaklanmışlardır. Başlangıçta yoğun olan kum için elde edilen sonuçları, Cambridge Üniversitesi'nde X-ışınları ile elde edilen sonuçlarla niteliksel olarak karşılaştırmışlardır. Maksimum kayma ve hacimsel genişleme şekil değiştirmenin en küçük değerinin duvarın topuk ucu etrafında döndüğünde meydana geldiğini bulmuşlardır. Başlangıçta yoğun kumdaki kayma bölgelerindeki genişleme, gerinim yumuşamasına, yani bir maksimuma ulaştıktan sonra pasif zemin basınç durumunda zemin basınçlarında bir azalmaya ve minimuma ulaştıktan sonra aktif bir durumda zemin basınçlarında bir artışa neden olduğunu görmüşlerdir.. Düşük başlangıç boşluk oranına sahip kumdaki kayma bölgelerinin kalınlığı, yüksek başlangıç boşluk oranına sahip kuma göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Feng ve Gao (2010) çalışmaları kapsamında, istinat duvarlı dolguların ötelenme hasarlarının sismik analizi için üç parçalı bir kama yöntemi geliştirmişlerdir. Önceki geleneksel limit denge yöntemlerinden farklı olarak, yeni yöntem hem katı atık kayma mukavemetinin hem de istinat duvarının deprem sırasında düzenli depolama sahalarının ötelenme göçmeleri üzerindeki etkilerini ortaya koyabilmektedir. Geliştirilen yöntemin parametre çalışmaları,

çeşitli yatay sismik katsayılar için güvenlik faktörünün sismik katsayının artmasıyla azaldığını, atık kütlelerinin altındaki minimum sürtünme açısının artmasıyla ise hızla arttığını göstermişlerdir. Atık kütleleri altındaki minimum sürtünme açısının artırılması, dikkate alınan koşul altında güvenlik faktörünü artırmak için diğer parametrelerden daha etkili olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, daha yüksek sürtünme açısına sahip üst dolgu malzemelerinin seçilmesinin, deprem sırasında düzenli depolama sahalarının ötelenme başarısızlığı potansiyelini önemli ölçüde azaltacağından bahsetmişlerdir. Güvenlik faktörünün çeşitli yatay sismik katsayılar için istinat duvarının yüksekliğinin artmasıyla kademeli olarak arttığı görülmüştür. Bu nedenle daha yüksek bir istinat duvarının depolama sahasının sismik stabilitesine faydalı olduğu görülmüştür.

Wilson et al. (2010), pasif zemin basıncını, büyük ölçekli deneylerle incelemek için %7 silt içeriğine sahip farklı yoğunlukta olan kum üzerinde iki farklı deney yaparak, yatay ve düşey yönlere bitişik dolgu ile serbestçe yer değiştiren düşey betonarme duvar kesitine yanal yük uygulamışlardır. Kaydedilen pasif direncin, desteklenen dolgu yüksekliğinin %2,7-3'lük yatay yer değiştirmesinde bir pik değere ulaşılan kadar arttığı ve daha sonra rezidüel seviyeye düştüğünü bulmuşlardır. Bu deney konfigürasyonunda, düşük mobilize duvar-toprak sürtünmesi nedeniyle üçgen bir göçme kaması gözlemlendiği belirtilmiştir. Dolgu direnç parametreleri, gözlenen kırılma mekanizmasına göre tahmin edilerek, Coulomb ve log spiral tahminlerinin çok iyi tahminler olduğunu ifade etmişlerdir. Bu tahminlerden, üç eksenli ve doğrudan kesme testi verileriyle birlikte, teorik tahminleri ölçülen pasif dirençle karşılaştırılmışlardır. Deney verileri kullanılarak, daha geniş bir pratik uygulama yelpazesi için ek yük-yer değiştirme eğrileri üretmek üzere kalibre edilmiş bir sonlu eleman modeli kullanılmış ve yük-deplasman eğrilerinin hiperbolik modele yaklaşımları da sağlanmıştır.

Härtl ve Ooi (2011) çalışmalarında doğrudan kesme deneyinde parçacık şekli ve parçacıklar arası sürtünmenin yığın sürtünmesi üzerindeki etkisini araştırmak için ayrık elemanlar yöntemi (DEM) kullanılmışlardır. Küresel ve küresel olmayan partiküller, 2'ye kadar partikül en-boy oranı ve tam bir partiküller arası temas sürtünme katsayısı aralığı veren iki örtüşen küre kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bunlar, tek cam boncuklar ve eşleştirilmiş cam boncuklar üzerinde yapılan fiziksel Jenike kesme deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Doğrudan kesme deneyinde yığın dane sürtünmesini üretmek için partiküller arasındaki geometrik etkileşimden kaynaklanan temas sürtünmesi ve partikül kenetlenmesi arasındaki etkileşim araştırılmış ve birkaç önemli gözlem rapor edilmiştir. Sonuçlar ayrıca partikül kenetlenmesinin yığın sürtünmesi üzerinde paketleme yoğunluğundan daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ve her partikül şekli için; DEM'in benzer başlangıç paketleme yoğunluğu

elde edildiği sürece sınırlayıcı yığın sürtünmesinin iyi bir nicel eşleşmesini üretebileceğini göstermiştir.

Widulinsk et al. (2011) çalışmalarında başlangıçta yoğun olan kumda yarı statik kayma bölgelerinin bir modelini simüle etmek için ayırık eleman yönteminin (DEM) kapasitesini kontrol etmeyi amaçlamışlardır. Ayırık hesaplamaları, pasif ve aktif yatay ötelemeye, tepe ve topuk etrafında dönmeye maruz kalan rijit ve çok pürüzlü bir istinat duvarı ile gerçekleştirilmişlerdir. Kumun davranışını simüle etmek için, dane yuvarlanma direncine izin veren üç boyutlu küresel ayırık model kullanılmışlardır. Hesaplanan kayma bölgelerinin geometrisi, X-ışınları ve Dijital Görüntü Korelasyon tekniği (DIC) kullanılarak laboratuvar model testlerinin deneysel sonuçlarıyla niteliksel olarak ve mikro-kutupsal hipoplastik bünye modeli ile elde edilen sonlu eleman sonuçlarıyla niceliksel olarak karşılaştırılmışlardır. Sonuçlar, ayırık bir modelin kumun iç kısmındaki kesme bölgelerinin deneysel modelini gerçekçi bir şekilde tahmin edebildiğini göstermişlerdir. Deneysel ve sonlu eleman hesaplamaları ile tatmin edici bir uyum sağlamışlardır.

Peng et al. (2012) pasif rijit istinat duvarı basıncını hesaplamak için tüm yer değiştirme modlarını dikkate alan genel bir analitik yöntem çıkarmışlardır. İlk olarak, genel yer değiştirme modu fonksiyonu oluşturulmuş, daha sonra yanal pasif basınca karşılık gelen yatay yer değiştirmenin doğrusal olduğu ve istinat duvarının arkasındaki zeminin bir dizi yay ve ideal rijit plastisite gövdeden oluştuğu varsayımları yapılmış, Coulomb teorisine dayalı pasif rijit istinat duvarı basıncını hesaplamak için genel analitik yöntem önerilmiştir. Analitik sonuçlar, pasif toprak basıncının bileşke kuvvetlerinin Coulomb teorisindekilere eşit olduğunu, ancak pasif basıncın dağılımının ve bileşke kuvvetinin konumunun pasif yer değiştirme modu parametresine bağlı olduğunu ve birincisinin zemin derinliğinin parabolik bir fonksiyonu olduğunu göstermişlerdir. Analitik sonuçlar ile deneysel sonuçların birbiri ile iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Pietrzak ve Leśniewska (2012) makalelerinde rijit bir duvar tarafından tutulan dolgu granüler zemin örneği üzerinde gerçekleştirilen küçük ölçekli bir model deneyin ayrıntılı bir çalışmasından bahsetmişlerdir. Deneysel verilerin sonuçlarından, yatay yönde ötelenen istinat duvarın arkasındaki granüler malzemenin deformasyonunun bazı döngüsel değişikliklere uğrayabileceğini göstermişlerdir. Çok hassas PIV yönteminin kullanılmasının, daneli malzemelerin mikro ve makro ölçekli davranışını ilişkilendirmeye yardımcı olacağından bahsetmişlerdir.

Ahmadi ve Hajjalilu (2012) çalışmalarında, dolgunun üstünde donatı bulunan ve bulunmayan bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Taşıma kapasitesi adımı ve dolgu göçme

bölgelerinde zemin kırılma, PIV yöntemi kullanılarak analiz edilerek şerit temellerinin taşıma kapasitesi, analitik prosedürler ile incelenmiştir. Sonuçlar, esnek istinat yapılarının üst bölgesinin donatılandırılmasının, donatılandırılmamış durumdan daha uygun olabileceğini göstermişlerdir. Donatı tabakalarının sayısı artırılarak nihai taşıma kapasitesi ve duvar dönmesinin önemli ölçüde iyileştiğini gözlemişlerdir. Tabakalar boyunca gerilme dağılımı ve duvar yer değiştirmesinin şerit yükünün konumuna bağlı olduğunu bulmuşlardır.

Taheri ve Ghanbari (2013) çalışmalarında, takviye edilmiş arka dolgulu bir istinat duvarı üzerinde bir çizgisel ek yükünün neden olduğu basıncı belirlemek için analitik yöntemler kullanmışlardır. Yatay dilimler yöntemi gözden geçirilmiş ve bu yöntemin tam bir formülasyonu, sürtünmeli veya kohezyonlu-sürtünmeli dolgulara sahip güçlendirilmiş istinat duvarları üzerindeki bir çizgisel sürşarj yükünün etkisini belirlemek için önermişlerdir. İlk olarak, donatı içermeyen duvarlarda çizgisel ek yükten kaynaklanan yanal basıncı hesaplamış ve diğer tekniklerle karşılaştırmışlardır. Daha sonra, bu formülasyon kullanarak, çizgisel ek yükten kaynaklanan aktif toprak basıncının bir değerlendirmesini yapmışlardır. Son olarak, donatılı dolgu duvarlardaki aktif zemin basıncı ve takviye kuvvetleri üzerine çizgisel sürşarjın etkisini göz önünde bulunduran yeni bir formül önermişlerdir.

Ertugrul ve Trandafir (2013) çalışmalarında deforme olabilen geofom katkı ve granüler kohezyonsuz malzemeden oluşan kompozit dolgu içeren küçük ölçekli esnek konsol duvar modelleri üzerinde gerçekleştirilen 1-g sarsma tablası testlerinin sonuçlarını sunmuşlardır. Deneyler sırasında model istinat duvarının farklı seviyelerindeki yanal dinamik zemin basınçlarını ve duvar yer değiştirmelerini izlemişlerdir. Deforme olabilen kaplamalara sahip istinat duvarlarının zemin basınçlarını ve yer değiştirmelerini, geofom kaplamasız modellerinkilerle karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalar sonucunda, istinat duvarı modeline yerleştirilen düşük rijitlikteki geofom panellerin duvar yüksekliği boyunca yer değiştirmeyi ve dinamik yanal basınç profilini etkilediğini göstermişlerdir. Duvar modelinin esneklik oranı arttıkça yük ve yer değiştirme azaltma etkinliğinin azalmıştır. Öte yandan, sismik uyarımın genliği ve frekans oranı arttıkça deforme olabilen kaplamanın dinamik yük azaltma etkinliği de artmıştır. Deforme olabilen tabakanın göreceli esnekliği (polistiren malzemenin kalınlığı ve elastik sertliği) yük azaltma miktarında önemli bir rol oynamıştır. Dinamik zemin basıncı katsayıları analitik bir yaklaşımla hesaplananlarla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemle hesaplanan basınç katsayılarının, düşük esneklik oranına sahip duvar modeli üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Jung *et al.* (2013) çalışmalarında çelik çerçeve ve hem sürekli hem de süreksiz özelliklere sahip dolgu malzemelerinden oluşan hücresel bir yapı olan istinat duvarının kayma

direncini net bir şekilde belirlemek için bir teknik geliştirilmişlerdir. Bu makale, bu tür bir yapının çerçeveleri ve dolgu malzemesi arasındaki kesme davranışının ve etkileşiminin tanımlanmasının zor olduğu süreklilik mekaniğine dayalı mevcut analiz yaklaşımının sınırlanmasının üstesinden gelmek için, farklı eleman yöntemine yer değiştirme artımlı analizi getirmektedir. Önerilen yaklaşım kullanılarak elde edilen sonuçlar, doğruluğunu teyit etmek için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Dolgu malzemelerinin içsel sürtünme açısının ve aşırı yüklemenin, hücresel yapı tipine sahip bir istinat duvarının kayma direncini belirleyen ana faktör olduğunu göstermişlerdir.

Teffo ve Naude (2013) çalışmalarında ayrık eleman modellemesi (DEM) için Eskom sınıfı kömürün restitüsyon katsayısını, statik ve yuvarlanma sürtünmesini deneysel olarak belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu parametrelerin, taşıma sırasında kömürün akışını ve davranışını simüle etmek için daha sonraki DEM çalışmalarında kullanılması amaçlanmıştır. Simülasyonun gerçekçi sonuçlar vermesi için numunelerde tespit edilen farklı kömür şekillerine ait parametreler belirlenmiştir. DEM'in küresel parçacıklar kullandığı ve DEM'de varsayılan parametreleri ile ölçülenler arasındaki farkın %97 gibi önemli bir oranda farklı olduğu, bundan dolayı parametrelerin deneysel olarak belirlenmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Sonuçta, azaltılmış planlanmamış aksama süresi, üretim kaybı, ürün teslimatındaki gecikmeler ve bakım maliyeti ile en iyi şekilde çalışabilen bir malzeme taşıma sisteminin tasarlanmasına izin vereceğinden ve ayrıca sistemi yeniden tasarlama ve değiştirme maliyetinden tasarruf sağlayacağından bahsedilmiştir.

Fukumoto *et al.* (2014) çalışmalarında, sismik yükleme altında kuru taş yığıma istinat duvarını oluşturan blokların şekil etkisi, santrifüj model deneyleri ve üç boyutlu ayrık eleman yöntemi kullanılarak sayısal simülasyonlar yoluyla araştırmışlardır. Kübik ve kama şekilli bloklar karşılaştırılmıştır. Hem fiziksel deneyler hem de sayısal simülasyonlar için, toplam kütle kübik blokların daha büyük olmasına rağmen, kama şeklindeki blokların duvarında oluşan sismik direncin kübik blokların duvarından daha yüksek çıktığını belirlemişlerdir. Bu nedenle, şekil etkisinin mekanizmasını araştırmak için ayrık eleman modeli ile detaylı bir inceleme yapmışlardır. Her bir taş blok ile dolgu arasındaki sürtünme direncine katkıda bulunan yüzey alanının, kuru taş yığıma istinat duvarının anti-sismik mukavemetini harekete geçiren anahtar parametre olduğunu belirlemişlerdir.

He *et al.* (2014) çalışmalarında, ayrık eleman yöntemine (DEM) uygulanan parçacıklar arası yuvarlanma direncini dikkate alan bir temas modeli ile çeşitli duvar hareket modları altında rijit bir istinat duvarında oluşacak zemin basıncını analiz etmeye odaklanmışlardır. İlk olarak, parçacıklarda yuvarlanma direncini dikkate alan bir temas modelini açıklamış ve DEM'e

uygulamışlardır. Temas model parametrelerini, kumlu bir numune üzerinde yapılan iki eksenli deneylerin DEM simülasyonundan belirlemişlerdir. Ardından, dolgudaki daneler arası yuvarlanma direncinin etkisi, malzemede daneler arası yuvarlanma direnci olan ve olmayan bir öteleme yer değiştirmesine maruz kalan sert bir duvara karşı aktif ve pasif zemin basıncını karşılaştırılarak tartışmışlardır. Üçüncü olarak, yuvarlanma direncini dikkate alan DEM modeli, rijit duvar dönme veya öteleme gibi daha genel bir şekilde hareket ederken aktif ve pasif toprak basınçlarını araştırmak için kullanmışlardır. Son olarak, başlangıç yoğunluğunu ve dolgunun parçacık boyut etkisini tartışmışlardır. Sonuçlar, DEM simülasyonunda parçacıkların yuvarlanma direnci hesaba katıldığında simülasyon sonuçlarının daha uygun olduğunu ve pratik durumla uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, DEM analizlerinde daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için parçacıkların yuvarlanma direnci dikkate edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Ahn ve Cheng (2014) çalışmalarında, tam ölçekli bir sarsma masası deneyine dayalı olarak simüle edilmiş depremler altında Lastikten Türetilmiş Agregata (TDA) dolgusunun dinamik performansını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. İvmeler, duvar yer değiştirmeleri ve dinamik basınçlar gibi ana test sonuçları bu makalede sunulmuş ve tartışılmıştır. Geleneksel toprak dolgululu bir duvarın benzer bir sarsma masası testiyle karşılaştırıldığında, duvar kayma miktarının arttığı, ancak TDA dolgusu tarafından duvara uygulanan dinamik basıncın önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Thielicke ve Stamhuis (2014), akışkanların hız ölçümü için MATLAB'da kullanıcı dostu, açık kaynaklı PIVlab uygulamasını yazmışlardır. Buna göre doğru akış ölçümü için görüntü ön koşullandırma, alt piksel pik değerler, veri doğrulama prosedürleri, enterpolasyon algoritmaları ve düzeltme yöntemleri gibi yöntemler dikkate alınmıştır. Birkaç algoritmanın doğruluğu belirlenerek, en uyumlusu PIVlab'da uygulanmıştır. Yazılım, akışkan hızlarının "geleneksel" ölçümlerinden ziyade aynı zamanda hücreler içindeki akışları, insan kalbinin ekokardiyografi hız ölçümü ve kum ve çakıl deformasyonunda da uygulanması mümkün olduğu beklenmiştir.

Marigo ve Stitt (2015) çalışmalarında birleşik kürelerden hazırlanan özel silindirik tabletlerin davranışını incelemek için dönen aşınma cihazını ayırık elemanlar yöntem ile EDEM yazılımı üzerinde modellenerek, detaylı incelemeler ve girdi parametrelerinin kalibrasyonunu ve doğrulanmasını kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Sonuçlar, deneysel verilerle niteliksel ve nicelik bakımından karşılaştırılmıştır. Niteliksel karşılaştırmada çoğu durumda iyi sonuçlar alındığı ancak ayrıntılı nicel karşılaştırmada bazı önemli hatalarla daha az başarılı olduğunu göstermişlerdir.

Nitka *et al.* (2015) çalışmalarında, yatay olarak ötelenen küçük ölçekli rijit bir istinat duvarı için başlangıçta orta yoğunlukta kohezyonsuz kumdaki kayma bölgeleri, farklı ortalama dane çapına sahip küre şeklinde partiküller kullanılarak ayırık elemanlar yöntemi (DEM) ile analiz etmişlerdir. Yatay ötelenmeye maruz kalan çok kaba bir istinat duvarı için pasif kum göçmesi tartışılmıştır. DEM hesaplamalarını farklı ortalama dane çapları ile gerçekleştirmişlerdir. Girdaplar, kuvvet zincirleri, girdap yapıları ve yerel boşluk oranı dalgalanmaları gibi granüler kayma bölgelerinde ortaya çıkan mikro-yapısal olaylar incelenmiştir. Kesme bölgelerinin hesaplanan geometrisini, DIC kullanılarak analiz edilen laboratuvar model deneylerinin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. DEM'in, istinat duvarının arkasındaki kumda kayma lokalizasyonunun geometrisini tanımlama ve granüler kayma bölgelerindeki mikro yapının gelişimini takip etmede kabiliyet gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Yan *et al.* (2015) araştırmalarında, DEM girdi parçacık özelliklerinin belirli bir basit sistem için yığın tepkileri üzerindeki etkisini anlamak için parametrik çok seviyeli bir duyarlılık yöntemi kullanılmışlardır. Young modülü, sürtünme parametreleri ve restitüsyon katsayısı gibi partikül özelliklerinin, malzeme geri tepme açıları ve partikül akış hızı (FR) üzerindeki etkilerini değerlendirmek için sistematik olarak değiştirilmişlerdir. Partiküller arası statik sürtünmenin hem nihai yığın açısını hem de FR'yi belirlemede birincil rol oynadığı ve bunu partiküller arası yuvarlanma sürtünme katsayısının izlediği gösterilmiştir. Partikül restitüsyon katsayısı ve Young modülünün önemsiz etkilere sahip olduğunu ve güçlü çapraz korelasyon gösterdiğini bulmuşlardır. Önerilen yaklaşımda, bir sistemde belirli DEM girdi parametrelerinin önemini göstermek için kullanılacak sistematik bir yöntem sağlanmıştır.

Cinicioğlu ve Abadkon (2015) araştırmalarında kohezyonsuz zeminler için genişleme açısını ön kayma ortalama efektif gerilme ve rölatif sıkılık ile ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Buna göre, bir tasarım projesinin zemin inceleme aşamasında ölçülebilen veya hesaplanabilen değişkenler kullanılarak genişleme açısını tahminini mümkün olacağını bulmuşlardır. Bu amaçla kum üzerinde deneysel bir çalışma yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar genişleme açısı ile kayma öncesi zemin özellikleri arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılmıştır. Üç eksenli veya kesme kutusu deneyleri uygulanarak, birimden bağımsız iki zemin sabiti gerektiren denklemi önerilerek genişleme açısını elde etmişlerdir. Ayrıca, pik sürtünme açısını tahmin etmek için önerilen genişleme denklemi, sürtünme açısı ve genişleme açısı arasındaki doğrusal bir ilişki ile birleştirilerek yeni bir denklem oluşturmasıyla, pik sürtünme açısı, ön kayma özelliklerden hesaplanmasını sağlamıştır.

Thakur *et al.* (2016) çalışmalarında, sınırlı ve sınırlandırılmamış serbest basınç deneyini kırılma durumuna gelene kadar, yarı statik modelleme altında kohezyonsuz ve kohezyonlu

zemin için ölçekten bağımsız tahminler üretmek için gerekli olan model parametrelerinin ölçeklendirilmesini araştırmışlardır. Sonuçlar, yükleme ve boşaltma için temas sertliğinin (normal ve teğetsel), partikül boyutuyla doğrusal olarak ölçeklendiğini ve kohezyon kuvvetinin, partikül boyutunun karesiyle çok iyi ölçeklendiğini göstermektedir. Temas sertliği doğrusal olarak ölçeklendiğinde, farklı partikül boyutları için makroskobik ve mikroskobik davranışta çok iyi bir uyum bulunmuştur. Yükleme ve boşaltma, yarı-statik yüklemeyi sağlamak için 10 mm / s'lik aksenal bir hızda gerçekleştirilmiştir. Basit ve hızlı modelleme için, bu çalışmada kullanılan partikül şekli küresel seçilmiştir ve her modellemede üniform bir dane çapı kullanılmıştır. Sertliği ölçeklendirmeden partikül boyutunu arttırmanın, referans duruma kıyasla daha yumuşak bir kütle tepkisi ürettiği açıkça bulunmuştur. Bu ölçeklendirme ilkesi, ölçeklendirilmiş partikül DEM modelinin tek eksenli deneyde çok daha küçük partiküllerden oluşan bir malzeme gibi toplu mekanik yükleme tepkisi sergilemesine izin verilmiştir.

Liu *et al.* (2016) çalışmalarında asfalt karışımı numunesinin ayırık elemanlar yöntemine dayalı olarak üretilme yöntemini değerlendirmek için üç boyutlu kaba agregalar oluşturmak için bir algoritma sunmuşlardır. Modellemelerinin sonucunda, bu algoritmanın agrega partiküllerinin gerçek geometrisini (şekil, boyut, kırılma yüzeyi ve köşelilik) yansıtabileceğini göstermişlerdir. Bu algoritmadan oluşturulan dijital üç boyutlu numune, asfalt karışımları için iri agregalar, hava boşlukları ve asfalt mastiklerinden oluşan üç fazlı sistemi iyi bir şekilde modelleyebilmiştir. Asfalt karışımlarının iki boyutlu kesitinin sonuçları, dijital asfalt karışımı numunesinin gerçek asfalt karışımıyla iyi bir uyum içinde olduğunu ve değerlendirme indekslerinin, dijital numunenin gerçek asfalt karışımını yansıtıp yansıtamayacağını nicel olarak analiz etmek için kullanılabileceğini göstermiştir. Ayırık elemanlar yöntemine dayanan önerilen yaklaşımın, mikro mekanik analiz için asfalt karışımlarının homojenliğini değerlendirmek için ek bir araç olarak kullanılmasını önermişlerdir.

Wu *et al.* (2016 çalışmalarında, DEM'e dayalı bir yığın modeli sunmuşlardır. Eğimli bir olukta akan sert bir duvara çarpan kuru tanecikli akışın çeşitli testlerinin sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonlarda farklı küreselliğe sahip beş yığın modeli kullanılmışlardır. Simülasyonlarda, küresel partiküllerin yerine, daha iyi performans gösteren yığın partikül modeli kullanılmıştır. Modelin doğruluğunu ve etkililiğini gösteren, duvarın her bir parçasının normal kuvveti, toplam normal kuvvet ve model ile deney arasındaki eğilme momenti açısından tatmin edici bir uyum gözlenmiştir. Farklı yığın çapına sahip gruplar kullanılarak yapılan hesaplama sonuçları ile aynı çaptaki kümeler ile yapılan hesaplama sonuçlarının karşılaştırılmasında, partikül çap dağılımının daha geniş olduğu, ardından duvarın sınır kuvvetinin daha büyük olduğu gösterilmiştir. Gerçek dane akışlarına göre, karışık partikül

bileşimine ve aynı çapa sahip partiküllerin akışlarının model analizini gerçekleştirmişlerdir. İstinat duvarın sınır kuvvetindeki artışın partikül çapındaki artıştan kaynaklandığını göstermişlerdir. Bir istinat yapısına karşı granüler akışın anlaşılması ve felaketleri önlemek veya hafifletmek için mühendislik yapı tasarımı için bir referans ve temel sağlandığını belirtmişlerdir.

Khosravi *et al.* (2016) çalışmalarında, aktif öteleme modu altında yatay dolgu boyunca hareket eden üniform bir sürşaj yüke sahip rijit bir istinat duvarı problemini iki boyutlu bir denge sisteminde incelemiştir. Bir istinat duvarının arkasındaki kırılma bölgesinde dikey, yatay ve kayma gerilmelerinin büyüklüğünü ve dağılımını tahmin etmek için yeni denklemler geliştirmişlerdir. İstinat duvarın arkasında kemerleme etkisi, maksimum gerilmeler nedeniyle uçtan biraz uzakta oluştuğunu belirlemişlerdir. Önerilen formülasyonların sonuçlarını, mevcut formülasyonlar ve laboratuvar ölçekli deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Önerilen analiz, yatay aktif gerilme dağılımı, duvardaki yatay aktif kuvvetin büyüklüğü ve uygulama yüksekliği için karşılaştırılabilir yaklaşımlar sağlamıştır.

Kamiloğlu ve Şadoğlu (2017) çalışmalarında, granüler dolguyu destekleyen kısa taban ve alt dişe sahip bir konsol istinat duvarı üzerinde etkili olan aktif zemin basınçları belirlemek için analitik bir çözüm sunmuşlardır. Üç farklı zemin itkisinin duvarın arka yüzünün üç farklı kısmına etki ettiği düşünülmüştür ve itkiler limit denge yöntemi kullanılarak türetilmiştir. Aktif zemin itki formülleri, zemin itki katsayıları, birim ağırlık ve duvar yüksekliği açısından basitleştirilmiştir. Çeşitli duvar boyutlarına ve içsel sürtünme açılarına bağlı olarak zemin katsayılarını elde etmek ve zemin itki katsayılarını ve göçme yüzeyi açılarını temsil eden grafikler hazırlamak için bir algoritma geliştirmişlerdir. Birinci, ikinci ve üçüncü bölgelere etki eden zemin itkileri, artan içsel sürtünme açısı ile azaldığı ancak artan içsel sürtünme açısı ile göçme yüzeyleri ile yatay arasındaki açılar (θ ve ψ) arttığını belirlemişlerdir. Temel kalınlığındaki artışlar, birinci ve ikinci bölgeye etki eden zemin itkilerinde azalmaya ve üçüncü bölgede artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Kayma yüzeyleri ile yatay arasındaki ψ açısı, temel kalınlığı ve topuk uzunluğundan etkilenmiştir. Açık (ψ), 20° ile 48° arasındaki bir içsel sürtünme açısı aralığı için 50° ile 74° arasında değiştiği gözlenmiştir. Rankine ve Coulomb teorilerinin bulunduğu güvenlik faktörleri ile önerilen metotların karşılaştırılmasından, Rankine teorisinin diğer metotlardan daha muhafazakâr olduğunu tespit etmişlerdir.

Karimi *et al.* (2017) çalışmalarında, model deneylerle bir şerit temelin taşıma kapasitesi üzerine dane yuvarlaklığının etkisini araştırmışlardır. Deneyleri 3 yuvarlaklık grubunda, 0,30 mm'den 4,75 mm'ye kadar değişen aralıklarda 6 farklı granülometride ve %30, %50 ve %70'lik 3 rölatif sıklıklarda gerçekleştirmişlerdir. Kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen

deneysel sonuçlar ve teori arasında kabul edilebilir bir ilişkinin olduğunu belirlemişlerdir. Yuvarlaklığın serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisinin, büyük rölatif sıkılıklarda ve büyük partikül boyutlarında daha belirgin olduğunu görmüşlerdir. Partiküllerin şeklinin köşeliden yuvarlağa değişmesinin, serbest basınç mukavemetinin azalmasına, yuvarlaktan tam yuvarlağa değişmesinde ise bu etkinin daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Keshavarz ve Ebrahimi (2017) araştırmalarında, eksenel simetrik istinat duvarlarının pasif yanal zemin basıncını incelemeye çalışmışlardır. Analizler için Gerilme Karakteristikleri Yöntemini kullanmışlardır. Gerilme denge denklemleri, karakteristik çizgiler boyunca sonlu farklar yöntemi ile elde etmişlerdir. Dolgu eğimi, duvar açısı ve istinat duvarı yarıçapının istinat duvarı üzerindeki pasif basınç dağılımı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında duvarı sürtünmeli ve adezyonlu kabul etmişlerdir. Eksenel simetrik istinat duvarının yanı sıra, analiz düzlem şekil değiştirme koşulundaki bir duvarı da kapsamıştır. Sonuçların geçerliliğini, sonlu elemanlar yöntemi ve SCM aracılığıyla bir dizi model geliştirilip karşılaştırılarak teyit etmişlerdir. Çalışmada, eksenel simetriye sahip istinat duvarlarının pasif yanal basınç seviyesinin düzlem şekil değiştirme koşulundaki duvarlardan daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, duvarın eksenel simetrisi veya düzlem şekil değiştirme tipinin, sonlu eleman modelinde belirgin olan serbest akma gerilmesi seviyesini etkilemediğini belirlemişlerdir.

Kotroc ve Kerenyi (2017) çalışmalarında, kohezyonlu bir zeminin direk kesme deneyinin simülasyonu için üç boyutlu (3D) bir ayrık elemanlar modeli geliştirmişlerdir. EDEM yazılımında mevcut olan Hertz-Mindlin bağlanma temas modelinin özelliklerini gerçek doğrudan kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre kalibre etmeyi amaçlamışlardır. Kohezyon ve içsel sürtünme açısını, zemin modelinin Mohr-Coulomb çizgisinin denkleminde hesaplamışlardır. Doğrudan kesme laboratuvar deneyinin ayrık eleman yöntemi kullanılarak çok iyi bir şekilde simüle edilebileceğini göstermişlerdir. Modelin hesaplanan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri ile gerçek kohezyonlu zeminin karşılık gelen mekanik özellikleri, sırasıyla yüzde 4,44 ve yüzde 4,66'lık bağıl hata ile iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Li *et al.* (2017) çalışmalarında, DEM ile demir cevheri öğütme cihazının içinde neler olduğunu tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Düzensiz şeklin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamak için parçacık şeklinin modellenmesinde küre yığın yöntemi kullanılmışlardır. Parçacıklar arası temas parametrelerini sistematik olarak değiştirmişlerdir. Parçacık ve duvar arasındaki temas parametrelerini, tek boyutlu demir cevheri parçacıklarının duruş açısı üzerindeki etkisini tamamen değerlendirmek amacıyla keyfi olarak varsaymışlardır. Sonuçlar, restitüsyon katsayısının göz önünde bulundurulmuş aralıkta değiştirilmesinin yatış açısında

belirgin bir farka yol açmadığını, ancak yatış açısının yuvarlanma/statik sürtünme katsayısına karşı güçlü bir duyarlılığa sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, statik sürtünme katsayısının etkisini, yuvarlanma sürtünme katsayısının etkisinden daha önemli bulmuşlardır. Tahmine dayalı denklem oluşturmuşlar ve tahmin edilen ve modellenen yığınak açısı arasında çok yakın bir uyum gözlemişlerdir. Bu denklem, DEM modellemelerin uygulanmasına yardımcı olabilecek partiküller arası temas parametrelerinin kalibrasyon süresini büyük ölçüde kısaltılmıştır.

Zhou *et al.* (2017) çalışmalarında, parçacık şeklinin etkilerini modellemek amacıyla ikili kümelenmiş parçacıklardan ve yuvarlanma direncine sahip dairesel parçacıklardan oluşan iki grup numuneyi DEM simülasyonunda test etmişlerdir. Yuvarlanma sürtünme katsayısını, enerji dağılımına dayalı olarak tahmin etmişlerdir. Yuvarlanma direncinin ve parçacık şeklinin kayma mukavemeti, deformasyon davranışı ve eş eksenli olmama üzerindeki etkilerini yeniden karşılaştırmışlardır. Sayısal sonuçlarda, yuvarlanma direncinin parçacık şeklinin tepe mukavemeti üzerindeki etkisini iyi bir şekilde yeniden ürettiğini göstermişlerdir. Bununla birlikte, yuvarlanma direncinin getirdiği artık mukavemeti, elastisite modülünü, poisson oranını, dilatasyon ve eş eksenli olmama gibi diğer makro özelliklerin her ikisi de parçacık şeklinin etkisi ile karşılaştırdıklarında belirli farklılıklar görmüşlerdir. Farklılıkların, parçacık şekli daha uzun hale geldikçe numunelerin artan sıkıştırılabilirliğinden kaynaklandığı ve bunun artan yuvarlanma sürtünmesi ile yeniden üretilemeyeceğini düşündüklerini ifade etmişlerdir.

Zhou *et al.* (2017) Zhou *et al.* (2017) çalışmalarında, yatay öteleme maruz kalan rijit bir istinat duvarı üzerindeki aktif toprak basıncını hesaplamak için yeni bir formülasyon önermişlerdir. Çalışmalarında, dolguda meydana gelen kemerlenme etkilerini hesaba katmışlardır. Önerdikleri formülasyonun doğruluğunu kontrol etmek için denklemden elde edilen tahminler hem mevcut tam ölçekli deney sonuçlarıyla hem de mevcut denklemlerden elde edilen değerlerle karşılaştırmıştır. Hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki karşılaştırmaları sonucunda, önerilen denklemlerin hem zemin basıncı dağılımını hem de ötelenen duvar üzerindeki yanal aktif toprak basıncını tatmin edici bir şekilde tahmin ettiğini göstermişlerdir. Önerdikleri denklemler kullanılarak aktif toprak basınçlarının hesaplanmasını kolaylaştırmak amacıyla, değiştirilmiş bir aktif basınç katsayısı ve yanal aktif kuvvetin etkin uygulama yüksekliği de zemin sürtünme açısı ve duvar sürtünme açısı fonksiyonları olarak sağlanmıştır.

Li *et al.* (2017) çalışmalarında, zemin kemerlenme teorisine dayanarak, gerilme durumu ve duvarın arkasındaki dolgunun temel gerilme dönüşünün etkisi analiz edilerek, ayrıca, istinat duvarının yer değiştirme (öteleme, üstten ve alttan dönme yer değiştirme durumları) etkisini

dikkate alan zemin basıncının dağılımı için yeni bir hesaplama yöntemi elde ederek ve müşterek kuvvetinin değişimi ve zemin basıncın konumu ile birlikte yer değiştirme değerinin değişimi analiz edilmiştir. Önerilen yöntemle hesaplanan sonuçların, diğer yöntemler ve deney gözlemleri arasında karşılaştırma yapılarak, önerilen yöntemle hesaplama sonuçlarının deneysel gözlemlerle daha iyi uyduğu göstermişlerdir. Zemin aktif duruma ulaştığında öteleme yer değiştirmesinin $0,0005H$ olduğunu, üst ve alt taraftaki dönüş açılarının sırasıyla $0,0015$ rad ve $0,001$ rad olduğunu belirlemişlerdir. İncelemelerinde aktif zemin basıncının dağılım eğrilerinin doğrusal olmadığını: T durumu için, istinat duvarının üst ve orta kısımlarında derinliğin artmasıyla aktif zemin basıncın artması, alt kısımdaki derinlik arttıkça aktif zemin basıncın azalması ; RB durumu için, aktif zemin basıncı istinat duvarının üst kısmındaki T durumuyla aynı olduğu ancak aktif zemin basıncı T durumundakinden veya istinat duvarının alt kısmındaki Coulomb teorisinden daha büyük olduğu; RT durumu için, aktif zemin basıncı istinat duvarının üst kısmında büyük olduğu ancak aktif zemin basıncı önce artması, ardından artan derinlikle azalması görülmüştür.

Coetzee (2018) yaptığı çalışmada, ölçeklenmiş ve ölçeklenmemiş partiküllerde partikül-partikül sürtünme katsayısını kalibre etmek için mısır danelerinin dinamik yığın açısını ölçmek için büyük bir döndürme tamburu kullanmıştır. Eşdeğer DEM modelinde 9'a kadar faktörle ölçeklendirilmiş daneleri kullanmıştır. 4'e kadar (tambur/partikül çapı ≥ 25) tüm ölçeklendirme faktörleri için yığın açısını doğru bir şekilde tahmin eden küçük bir parçacık-parçacık sürtünme katsayıları aralığı tanımlanabilirken, daha büyük ölçeklendirme faktörlerinin tutarsız sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Kalibre edilmiş parametre setini daha sonra ölçekli danelerin hazne boşaltımı modellemesinde kullanmıştır. Sonuçlar, maksimum ölçek faktörünün hazne açıklığının boyutundan bağımsız olduğunu ve boşaltma hızını ve hız alanını doğru bir şekilde modellemek için sırasıyla 1,3 ve 2,5'ten küçük olması gerektiğini göstermiştir.

Karimi *et al.* (2018) çalışmalarında danelerin yuvarlaklığı ve morfolojisinin zeminin kayma kırılma mekanizması üzerindeki etkisini laboratuvar model deneyleri kullanarak araştırmışlardır. 0,3-4,75 mm aralığında üç farklı yuvarlaklığa sahip daneler üç farklı rölatif sıklıkta tanka yerleştirmiş ve model deneyler yapmışlardır. Deneyler sırasında bir dizi fotoğraf çekerek zemin deformasyon mekanizmasını PIV yöntemi ile analiz etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, numune boyutlarının artmasının, zeminin etkilenen alanını artırdığını görmüşlerdir. Zeminin kayma göçme mekanizmasının, artan dane yuvarlaklığı ile genel kayma kırılmasından zımbalama kayma kırılmasına doğru değiştiği belirtilmiştir. Köşeli zemin danelerinin keskin köşeleri ve yüksek sürtünmesinin zeminin sürekli bir alan gibi davranmasına neden olduğu bulunmuştur.

Medina *et al.* (2018) yaptıkları çalışmalarında, Coulomb zemin basıncı teorisine göre, normal konsolide zeminler için, sükkûnetteki yanal basınç katsayısının granüler veya kohezif, gevşek veya sıkı, sert veya yumuşak kohezif zemin olmasından bağımsız olarak 1'e eşit olduğu, sonucuna varmışlardır. Ayrıca, sükkûnet durum ile aktif basınç arasındaki ve sükkûnet durum ile pasif basınç arasındaki ara durumlar için zemin basıncını hesaplamaya yönelik bir metodoloji sunmuşlardır. Granüler zeminlerde, duvarın küçük hareketi tolere edildiğinde, duvarın aktif tarafındaki zemin basıncını hesaplamak için yaklaşık 0,80 ka, pasif basınç için ise 1,20 kp kullanılmasını önermişlerdir. Daha büyük hareket kabul edildiğinde, yanal zemin basınçlarının Rankine veya Coulomb teorilerine göre hesaplanması önermişlerdir.

Roessler ve Katterfeld (2018) yaptıkları çalışmada, kaldırma silindiri ile yapılan yığınak açısı deneyin sonuçlarının, deney aparatının boyutları ve dane boyutu dağılımı açısından nasıl bağımsız olduğunu ve sadece silindirin kaldırma hızına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Deneyler 2 mm/s ile 200 mm/s aralığında değişen bir kaldırma hızıyla yapılmıştır. 2 mm/s, 8 mm/s ve 16 mm/s yavaş kaldırma hızları kullanılarak, uçtan kazığın tabanına (enine kesitte) sürekli yığınak açısı oluşurken, 100 mm/sn'den yüksek kaldırma hızlarında, kazık oluşumlarında iki yığınak açısı izlemiştir. DEM modellemelerinde, yığınak açısına esas olarak daneler üzerindeki statik sürtünme katsayıları (μ_s) ve yuvarlanma sürtünme katsayıları (μ_r) etkili olduğunu bulmuşlardır. Küresel olmayan danelerin modellenmesinde, yuvarlanma sürtünme katsayısının gerçek danelerin şeklinin dikkate alınarak daha yüksek yuvarlanma sürtünme katsayısı değerleri kullanılmasını ve deneylerde μ_r yaklaşık olarak μ_s 'nin %1'i kadar seçilmesini önermişlerdir.

Wei *et al.* (2018) çalışmalarında, belirli bir düzensizlik düzeyinde rastgele 3 boyutlu partikül şekilleri oluşturmak için hesaplama ve biriktirme maliyetlerinde büyük bir verimliliğe sahip basit bir yöntem önermişlerdir. Partikül şekillerini oluşturmak için kullanılan SH faktörlerinin, klasik partikül parametreleri ile iyi bir şekilde uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bu yöntemle üretilen partiküllerin, SH yönteminin doğası gereği pürüzsüz olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle, kristalleşme yoluyla oluşan partiküller ve malzemelerde ortak olan keskin köşeleri modellemenin maliyetli olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada göre önerilen yöntem, partikül şekli üzerine gelecekteki ayırık eleman yöntemi ve deneysel çalışmalar için büyük bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Song *et al.* (2018) çalışmalarında, Geocell takviyeli istinat duvarlarının sonlu elemanların kuvveti azaltma tekniğiyle ile hasar moduna ilişkin sayısal analizler yapmışlardır. Yaptıkları sayısal modelin etkinliğini santrifüj model deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Geocell ile güçlendirilmiş zeminin görünür kohezyonunun, duvar tabanı ile temel arasındaki

sürtünmenin, duvardaki zayıf ara katmanın ve iki katmanlı geocell düzeninin etkilerini araştırmak için kalibre edilmiş sonlu elemanlar prosedürü kullanarak parametrik çalışmalar yapmışlardır.. Görünür kohezyonun çok büyük olduğu veya duvar ile temel arasındaki sürtünmenin küçük olduğu veya duvarda zayıf bir ara tabakanın mevcut olduğu durumlarda, geocell takviyeli istinat duvarlarında benzer şekilde kayma göçmesinin meydana geldiğini göstermişlerdir. Coulomb'un kama teorisinin bu koşullar altında geocell takviyeli istinat duvarının stabilite analizi için uygun olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, mühendislik uygulamalarıyla daha alakalı olan diğer koşullarda, geocell takviyeli istinat duvarlarının yenilme modunun şev yenilmesine benzediği ve şev stabilite analizinde kullanılan mukavemet azaltma tekniğinin geocell takviyeli istinat duvarlarının stabilite analizi için uygun olabileceği belirtilmiştir.

Xu *et al.* (2018) çalışmalarında, statik koşullar altında rijit bir istinat duvarının arkasındaki sürtünmeli-kohezyonlu dolgu boyunca gerilme dağılımını değerlendirmek için hesaplama açısından verimli, analitik bir yaklaşım sunmuşlardır. Log-spiral tipinde yaygın olarak benimsenen dikey dilim yöntemi, limit-denge toprak basıncı değerlendirme yöntemleri, dolgudaki gerilmelerdeki değişimi yakalamak için daha küçük zar dilimlere ayırmışlardır. Zar yöntemi çıktılarını, Sonlu Elemanlar Modellerinden türetilen sonuçlarla doğrulamışlardır. Önerilen zar yöntemi ile elde edilen normal ve kayma gerilmelerinin dağılımı, sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla dolgunun çoğu bölümünde iyi bir uyum göstermiştir. Bu çalışmada önerilen zar yöntemi, FEM gibi hesaplama gerektiren sayısal tekniklere gerek kalmadan dolgu içindeki gerilme dağılımını tahmin edilebilmektedir. Gerilme dağılımı daha sonra duvarın yer değiştirme ve zemin yüzeyinin oturma hesaplamalarında kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Altunbaş *et al.* (2019) çalışmalarında, kohezyonsuz dolguya ötelenen sert bir istinat duvarının, pasif yanal zemin basınç davranışını ayırık elemanlar yöntem ile modellemişlerdir. Ortalama 3 mm çapında küresel şekilli daneler, sistemin modellemede kullanılmıştır. Duvar, yarı statik akışı sağlamak için 2 mm/sn'lik sabit bir hızda ötelenmiştir. DEM sonuçlarına göre, numunelerin kırılma yüzey geometrileri, duvar basınç dağılımı ve genişleme yanıtları değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda görüldüğü gibi, DEM analizlerinde eğrisel kayma yüzeyi sadece kaba istinat duvarı ve periyodik yan duvarlar mevcut olduğunda elde edildiği görünmüştür. Sonuçlar, istinat duvarı ile daneler arasındaki sürtünmenin, ortaya çıkan pasif zemin basınç üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Ek olarak, yan duvarların büyük ölçüde danelerin hareketini etkilediği ve bu nedenle kırılma kamasının geometrisini değiştirdiği gösterilmiştir. Temas noktalarında gerçekçi tepkileri tahmin etmek için yuvarlanma direncini

önemli olduğu bulunmuştur. Sınır koşulları, dolgunun makro ölçekli özelliklerinden oldukça etkilendiği görülmüştür.

Cao *et al.* (2019) çalışmalarında, yatay kohezyonsuz zeminde kemer etkisi dikkate alınarak rijit istinat duvarlarına karşı pasif zemin basıncını belirlemek için yeni bir analitik yöntem önermişlerdir. Kayma yüzeyinin kırılma açısı formülünde, duvar-zemin sürtünme açısının etkisini de hesaba katmışlardır. % 38, % 63 ve % 80 rölatif sıklığa sahip kuru kum zemin üzerinde yapılan model deney sonuçlarının önerilen yöntemle uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir. Pasif zemin basıncının, $\delta = 0^\circ$ olduğunda doğrusal olduğu ve $\delta, 0^\circ$ 'dan $= \varphi / 3$ 'e çıktıkça, pasif zemin basıncının dağılımı kademeli olarak doğrusaldan doğrusal olmayana doğru geçiş yaptığı ve dağılım eğrisinin eğriliğinin arttığı görülmüştür. Duvarın altından oluşan bileşke kuvvetin yerinin, φ ve δ değişmesiyle kademeli olarak değişmiştir. Ancak her zaman $H/3$ 'ten daha düşük olduğu görülmüştür.

Katterfeld ve Rössler (2019) çalışmalarında, DEM kalibrasyon prosedüründe parametre seçiminin belirsizliği sorunu, farklı standart deneyleri dikkate alarak ve çakıl kullanarak tartışmışlardır. Deneylerde kullanılan farklı standart deney donanımları ayrıntılı olarak açıklanmıştır ve referans deneyleri ve modelleme serileri gerçekleştirilmişlerdir. Makroskobik referans kriterlerinin (AoR, kayma açısı, kütle akış hızı vb) partikül kayması ve yuvarlanma sürtünmesi katsayılarına bağımlılığını sunmuşlardır. Deneysel referans kriterlerini yeniden üretmeye izin veren sonsuz sayıda sürtünme katsayısı kombinasyonu sorunu, sistematik bir parametre varyasyonu ile gösterilmiştir. Ayrıca, deney ve modellemedeki ölçüm hatalarının dikkate alınmasıyla birlikte bireysel deney kriterlerinin kombinasyonunun, sürtünme katsayılarının daha net bir şekilde seçilmesine nasıl izin verdiği vurgulanmıştır. Hızlı akış rejimleri altında daneli ve serbest akışlı kütle malzemeler için DEM sürtünme parametrelerinin kalibrasyonu için aşağı çekme deneyi, standart bir deney olarak kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Yüksek sayıda modelleme ve ilgili yüksek hesaplama çabası nedeniyle, kalibrasyon prosedürünün uygulanabilmesi için uygun bir optimizasyon algoritmasının kullanılması önerilmiştir. Dört kalibrasyon kriterine sahip tek bir deney olarak önerilen aşağı çekme deneyi, yalnızca bir simülasyon modelini çalıştırmak için sayısal çabanın azaltılması nedeniyle DEM parametre kalibrasyonunun otomatik optimizasyon prosedürü ve gerçekçi modelleme sonuçlarını elde etmek için çok faydalı olduğu görülmüştür.

Lommen *et al.* (2019) çalışmalarında, endüstride kullanılan ekipmanların daha düşük fiyat ve zamanla modellemek için orijinal partiküllerin hangi ölçeğe kadar ölçeklenmesi gerektiğini araştırmışlardır. Partikül ölçekleme işleminin, modellenen kütle malzemenin gerçekçi davranışını veya kütle malzeme taşıma ekipmanı ile etkileşimini değiştirmemesinin

çok önemli olduğunu tartışmışlardır. Çapı 8 ila 14 mm arasında ve küresel demir cevheri peletleri kullanılmıştır. Materyal davranışını üç laboratuvar deneyi (iki yığınak açığı deneyi ve bir penetrasyon deneyi) kullanarak karakterize etmişlerdir. Kaba ölçekleme etkisinin modellenen kayma davranışı üzerinde etkisini incelemek için yığınak açığı modelleri yapılmıştır. Ölçeklenen ve ölçeklenmeyen farklı ölçü faktörüne sahip malzeme modelleme sonuçları, ölçülen malzeme davranışı ve malzeme-ekipman etkileşimi ile karşılaştırılmıştır. Ayırık elemanlar yöntemiyle seçilen kaba ölçeklenen yaklaşımının doğrulanması için bir kepçe boşaltıcının simülasyon modeli kullanılmıştır. Ölçekleme yöntemini kullanarak yapılan, makroskobik deneylerin, tutarlı malzeme davranışını gösterdiğini belirtmişlerdir.

Tang *et al.* (2019) çalışmalarında, granüler malzemelerin restitüsyon katsayısını ölçmek için bir eğimli plaka düz atış deney sistemi ve ayırık partiküller ile sürekli sınır yüzey materyalleri arasındaki sürtünme katsayısını ölçmek için bir kayma sürtünme deney cihazı geliştirilmişlerdir. Ölçüm yönteminde, serbest kütle darbe deneyini inceleyerek ve tartışarak düşük hızla partikül çarpışmasının restitüsyon katsayısını etkileyen partikül kütlesi, düşme yüksekliği, çarpışma malzemesinin özellikleri, kalınlık, çarpışma malzemesine göre partikülün çarpışmasının anlık hızı, iki çarpışma malzemesi arasındaki temas yüzeyinin eğriliği ve çarpışma geçmişi gibi faktörleri incelemişlerdir. Cam boncuk partiküllerin, cam boncuk ile cam plaka, cam plaka ve lastik membran kompoziti aralarında olan restitüsyon katsayıları ve cam boncuklar ile lastik film ve filtre kâğıdı arasındaki sürtünme katsayılarını tasarlanan yöntemlerle ölçmüşlerdir. Ölçülen restitüsyon katsayısı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak, üç eksenli deney ve serbest basınç deneyi için ayırık elemanlar yöntem ile modelleme gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar ve ayırık elemanlar yöntem ile modelleme sonuçlarını karşılaştırarak, tasarlanan ölçüm yöntemlerinin ve ayırık elemanlar yöntem ile modellemenin uygulanabilirliğini doğrulamışlardır.

Yang ve Deng (2019), ayırık elemanlar yöntemi ile ötelenen dar genişliğe sahip rijit istinat duvarının arkasındaki kohezyonsuz zeminin davranışını modellemek için Partikül Akış Kodu (PFC-2D) yazılımını kullanmışlardır. Modellemelerde, duvarın hareketi aktif zemin basıncının olduğu değere ulaştığında zeminin göçme modeline odaklanmışlar ve kayma yüzeyin şeklini çekim alanına almışlardır. PFC-2D'de elde edilen kayma yüzeyleri ile limit denge yöntemine dayalı olarak rijit istinat duvarının arkasındaki dar dolguya etki eden aktif zemin basıncına çözüm elde etmek için basitleştirilmiş bir analitik yöntem sunmuşlardır. Hesaplanan değerlerin, önceki literatürdeki laboratuvarda yapılan deneylerden elde edilen değerlerle uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca dolgu genişliğinin, zeminin içsel sürtünme açısının ve duvar-zemin sürtünme açısının aktif zemin basıncının dağılımına etkilerini tartışmışlardır.

Aktif zemin basıncı katsayısının derinlikle azaldığı ve Rankine teorisi ile hesaplanan değerden daha küçük olduğunu bulmuşlardır. Dar dolguya sahip istinat duvarlarının yanal zemin basıncının azaltılmasının nedenini çoğunlukla zemin kemer etkilerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Homojen zemin, 0,03 m ile 0,05 m arasında değişen yarıçaplara sahip disk şekilli partiküllerden modellenmiştir. DEM modellemelerinde, hesaplama süresi, partikül sayılarına büyük ölçüde bağlı olduğu için "ölçek büyütme" tekniğini kullanmışlardır. Ötelenen duvar, yarı-statik koşulları karşılayabilmesi için hafif bir doğrusal hız (0.0001 m/s) ile hareket ettirilmiştir. Duvarın yer değiştirmesi, duvar yüksekliğinin yüzde 0,1'ine ulaştığında aktif zemin basıncının meydana geldiği varsayılmıştır. Dolgu genişliği azaldıkça aktif zemin basıncının büyüklüğünün azaldığı izlenmiştir.

Arda ve Çinicioğlu (2019), çalışmalarında, yanal aktif yönde hareket edebilen ve düşey sürşarj uygulayabilen küçük ölçekli 1g fiziksel istinat duvarı modeli oluşturmuşlardır. Fiziksel bir model deney düzeneği kullanılarak, çeşitli yoğunluk-gerilme düzenlemeleri altında, değişen partikül şekilleri ve boyutlarına sahip üç farklı granüler dolgu malzemesi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Model deneylerinden elde edilen görüntüler (PIV) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir ve kayma yüzeyi geometrileri elde edilmiştir. Böylece kırılma anında partikül boyutunun, şeklinin ve sürşarj yükünün kayma yüzeyi geometrileri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Soltanbeigi *et al.* (2020) çalışmalarında, kohezyonsuz dolgularda gerilme lokalizasyonu ve sonuçta ortaya çıkan kırılma yüzeylerin gelişimini araştırmak için Akpınar kumu kullanarak ötelenen rijit istinat duvarların aktif yanal durumunu 1g küçük ölçekli model deneyleri ile araştırmışlardır. Deney esnasında kayma bantlarının oluşumunu görselleştirmek için (PIV) yöntemi ile analiz etmişlerdir. Ölçülen yoğunluk ve gerilme büyüklüklerini kullanarak dolgu malzemesinin pik genişleme ve sürtünme açılarını hesaplamışlardır. Model duvarın hareketleri ile kayma bantlarının gelişimini incelemişler ve kayma bandı kalınlığının belirlenmesi için iki yeni yöntem önermişlerdir. Granüler zeminlerde kayma bandı özellikleri ile genişleme özellikleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu sonucuna varmışlardır.

Hlosta *et al.* (2020) ayırık elemanlar yönteminin (DEM) ilgili parametrelerinin belirlenmesine ve sanal malzeme oluşturulmasına yol açacak yöntemleri ve kalibrasyon prosedürünü incelemişlerdir. Yedi tip partikülü, şekillerine (küresel ve küresel olmayan), boyutlarına ve yoğunluklarına göre seçmişlerdir. İlk kalibrasyon deneyinde, sanal dolgulanmış partiküllerin şekil doğruluğunu ve kütle yoğunluğunu belirlemek için uygulamışlardır. Modelleme serileri gerçek deneylerle karşılaştırılmıştır ve sanal partiküllerin boyutu, şekli ve yoğunluğu optimize edilmiştir. Üç aparatı kullanarak, DEM modellemelerinde partiküllerin

davranışını tanımlayan temas modeli için girdi parametre değerlerini deneysel olarak belirlemişlerdir. Çalışmada, partikül sayısı, dolgu oluşturma yöntemi ve sanal malzemenin kalibrasyonu sürecinde yığınak açısının değerlendirme yöntemleri gibi faktörlerin etkisini incelemişlerdir. En fazla tekrarlanabilir sonuçları dönen tambur ile elde etmişlerdir. Kayma modülünü optimize ederek modellemenin hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmışlardır.

Liu *et al.* (2020) çalışmalarında, derin bir istinat yapısının arkasındaki zeminin yüzeyi aşırı yüklü olan sınırlı genişlikte $c-\Phi$ kohezyonlu zemin için değiştirilmiş bir aktif zemin basıncı hesaplama modeli oluşturmuşlardır. Geliştirilmiş zemin kemer etkisi yoluyla üç temel sorun ele alınmıştır. Öncelikle zemin kemer etkisi dikkate alınarak zemin-duvar etkileşim mekanizması belirlenir. Sınırlı bir zeminin kayma yüzeyinin, istinat duvarı tabanından geçen ve mevcut yeraltı yapısının yan duvarını, mevcut yan duvar boyunca zemin yüzeyine ulaşana kadar kesen çift katlı bir çizgi olduğu kanıtlanmıştır. İkinci olarak sınırlı genişlik sınırı açıklanmaktadır. Üçüncüsü, sınırlı $c-\Phi$ zemin parametrelerinden aktif zemin basıncındaki değişim belirlenir. Yanal aktif zemin basıncı katsayısı, simetrik katener eğrisinin iyileştirilmiş zemin kemer etkisine dayalı olarak doğrusal olmayan bir şekilde dağıtılır. Ayrıca aktif zemin basınç dağılımı, istinat duvarının üst kısmındaki çekme çatlağı, bileşke kuvveti ve etki noktası elde edilmiştir. Rankine yöntemi gibi mevcut analitik yöntemlerle karşılaştırıldığında bu çalışmada önerilen modelin ölçülen ve sayısal sonuçlara çok daha yakın sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Zemin kohezyonunun ve sınırlı genişliğin etkisinin göz ardı edilmesi, istinat yapısının genel stabilitesini azaltacak ve riski arttıracığından bahsetmişlerdir.

Rui *et al.* (2020) çalışmalarında, kayma yüzeylerinin şeklini ve zemin basınç dağılımını araştırmak için farklı sınır koşullarına sahip altı model deney gerçekleştirmişler ve ötelenen istinat duvarlarının kayma yüzeyleri, özellikle dar dolguya sahip olanların şekli, dolgu en-boy oranı (0,50 ile 2,67), sürtünme açısı ve zemin kemerlenme etkilerinin neticesinde doğrusal olmadığını belirlemişlerdir. Sükûnet durumunda ölçülen zemin basınçları, genellikle Jaky ve Janssen'in yöntemlerinden elde edilen sonuçlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. En-boy oranının düşmesi ile kemerlenme etkisinden dolayı zemin basıncının azalmasının daha belirgin hale geldiğini ifade etmişlerdir. Ötelenen duvarın yer değiştirmesinin artmasıyla, kayma gerilmelerinin dağılımının daha yoğun hale geldiği ve kayma yüzeyinin etki noktasının kolayca belirlendiği ifade edilmiştir. % 0,4 H duvar hareketinde aktif yanal zemin basınca ulaştığı bulunmuştur. Önerilen yöntemin doğruluğu, elde edilen deneysel veriler ve literatürle doğrulanmıştır.

Soltanbeigi *et al.* (2021) çalışmalarında, çeşitli şekil temsil yöntemlerinin ve bunların parametrelerinin etkisini tanımlamak için yığın açısı ve doğrudan kesme kutusu deneyi

modellenmesini kullanmışlardır. Şeklin toplu tepkiyi nasıl etkilediğini temsil etmek için kullanılan çeşitli yolları gösteren, farklı yaklaşımlar arasında karşılaştırmalara olanak tanıyan kapsamlı niceliksel sonuçlar sunmuşlardır. Yığın açısı deneylerinin modellenmesi, üç yuvarlanma sürtünme modelinin hepsinin küp ve silindirik partiküllerin özelliklerini modelleyebildiğini göstermişlerdir. Kesme kutusu deneylerinin modellenmesi, dikkate alınan küresel olmayan partiküllerin mukavemeti ve genleşme tepkisinin yalnızca elasto-plastik yuvarlanma direnci modeliyle tahmin edilebileceğini göstermişlerdir.

Nguyen *et al.* (2021) çalışmalarında, Vietnam DT84 çeşidi soya fasulyesi için Ayrık Eleman Modelleme (DEM) girdi parametrelerini kalibre etmeyi amaçlamışlardır. Öncelikle soya fasulyesinin şeklinin dijital görüntülerini analiz etmişler ve şekil göstergeleri aracılığıyla parçacıkların şeklinin küreye göre sapmasını ölçmüşlerdir. İkinci olarak soya fasulyesinin fiziksel özelliklerini (boyut dağılımı ve gravimetrik özellikler) ve parçacıklar ile malzeme yüzeyleri arasındaki statik sürtünme katsayısını deneylerle ölçmüşlerdir. DEM giriş parametrelerinin geri kalanı, seçilen parçacık akışı deneyleri ve toplu yoğunluk silindiri, silo boşaltma ve eğimli silindir dahil ilgili DEM simülasyonlarını birleştirerek kalibre etmişlerdir. DEM girdi parametrelerinin son seti, diğer soya fasulyesi çeşitleri için literatürdeki önceki araştırmalarla karşılaştırılmış ve güçlü bir korelasyon olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, DEM simülasyonlarında DT84 soya fasulyesini modellemek için küresel parçacıkların kullanılabilirliği ve görüntü analizinden elde edilen danelerin eşdeğer çapı parçacık ağırlığını yaklaşık olarak hesaplamak için kullanılabilirliğini göstermişlerdir.

Gade ve Dasaka (2022) çalışmalarında, EPS geoföamın istinat duvarları üzerindeki sürşarj kaynaklı yanal zemin basınçları üzerindeki hem kısa hem de uzun vadeli etkisini 1-g model çalışmaları aracılığıyla araştırmışlardır. 10–25 kg/m³ aralığında dört yoğunlukta geoföam ve 25–75 mm aralığında üç kalınlıkta geoföam kullanmışlardır. Duvarın yüksekliği boyunca çeşitli noktalardaki yanal zemin basıncı, zemin basınç hücreleri kullanarak izlemişlerdir. Ek yük altında geoföam sıkışması ve dolgu oturmalarını da görüntü analizi kullanarak ölçmüşlerdir. Bir dizi model deneyden, geoföam kullanımıyla istinat duvarı üzerindeki yanal zemin basıncının hem kısa hem de uzun süreli yükleme koşullarında azaldığını gözlemlemişlerdir. Ek yük altında geoföam sıkışması ve dolgu oturmalarını da görüntü analizi kullanarak ölçmüşlerdir.

Ma *et al.* (2022) çalışmalarında, püskürtme betonun nemli kütesinin temas parametrelerini doğru ve hızlı bir şekilde elde etmek için fiziksel istifleme testi ve simülasyon yöntemini kullanmışlardır. Hertz-Mindlin ile JKR (Johnon-Kendall-Roberts) modelini temel alarak ayrık eleman simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Yedi başlangıç parametresini taramak

için P-BD kullanıldığında, JKR yüzey enerjisinin, parçacıklar arasındaki yuvarlanma sürtünme katsayısının ve parçacık darbesinin eski haline dönme katsayısının, püskürtme betonun nemli kütesinin durma açısı üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu bulmuşlardır. B-BD'ye göre, duruş açısı ve anlamlılık parametrelerinin ikinci dereceden regresyon modelini kurmuşlardır. Sonuçlar, bu çalışmada önerilen kalibrasyon yönteminin, fiziksel istifleme testini doğru bir şekilde simüle edebildiğini ve nemli püskürtme beton kütesinin temas parametrelerinin kalibrasyonu için bir referans sağlayabileceğini göstermişlerdir.

Zhou *et al.* (2022) çalışmalarında, farklı şekillerdeki ıslak kum ve çakıl parçacıklarının parametrelerini JKR temas modeline göre kalibre etmişlerdir. Sonuçlarda, yüzey enerjisi ve yuvarlanma sürtünme katsayısının, durma açısının tanjantını etkileyen önemli faktörler olduğunu ortaya koymuşlar ve bu da titreşim tarama sırasında ıslak kum ve çakıl parçacıklarının simülasyon doğruluğu üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Ek olarak, simülasyon ve deney arasındaki durma açısının tanjantı ve hata, dolum topu yarıçapının artmasıyla birlikte arttığını ve simülasyonun doğruluğunun azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca küresel model yerine küresel olmayan modelin kum ve çakıl parçacıklarının eleme işlemini daha iyi simüle edebileceğini bulmuşlardır.

Li *et al.* (2022), çalışmalarında derin öğrenmeyle geliştirilmiş ayırık elemanlar yöntemine (DEM) dayalı çakıl-kum karışımının gerçekçi modellenmesi için sistematik bir çerçeve geliştirmeyi amaçlamışlardır. Partikül konturunu hızlı bir şekilde tanımlamak ve bir algoritma kombinasyonuna dayalı partikül şekli kitaplıkları oluşturmak için etkili ve kullanışlı bir yöntem önermişlerdir. Ayrıca elde edilen gerçekçi kaba ve ince dane şekillerine göre iki grup çakıl-kum karışımı üzerinde DEM tabanlı serbest basınç deneyleri yapmışlardır. İri partikül şekillerinin ve ince kum içeriğinin çakıl-kum karışımlarının makroskobik ve mikroskobik davranışları üzerindeki etkilerini niceliksel ve karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

Chen *et al.* (2022), çalışmalarında kum partiküllerin küreselliğinin kumun doğrudan kesme performansına etkisi ayırık elemanlar yöntemi (DEM) kullanılarak araştırılmıştır. Yuvarlak partiküllerden düzensiz kuma kadar farklı yaklaşma yöntemlerini modellemek için iki yöntem uyarlamışlardır. Makro tepki, düzensiz kumun daha düşük normal gerilmede yuvarlak partiküllere göre daha yüksek bir kesme mukavemetine sahip olduğunu göstermişlerdir. Parçacığın şekli, daha yüksek normal gerilmede kayma mukavemeti üzerinde daha az etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Kumun düzensiz şeklinin kayma bandı oranının artmasına neden olduğunu görmüşlerdir. Ancak kayma bandı oranı küresellikle ilişkili değildir. Her koşulda, kayma bandı içindeki partiküller, kayma bandı dışındaki partiküllerden daha

büyük bir ortalama dönme açısına sahiptir. Partiküllerin şekli yuvarlaklaştığında, kayma bantları içindeki ve dışındaki partiküllerin ortalama dönme açısının arttığını bulmuşlardır.

Jiang *et al.* (2022) çalışmalarında, doğal kum zemininin nasıl çöktüğünü ve istinat duvarına uyguladığı yatay basıncı, toplam kuvveti ve devrilme momentini incelemiştir. İki boyutlu ayrık elemanlar yöntemini (DEM) kullanarak doğal kum danelerinin birbirine bağlanma kuvvetleri hesaba katarak sayısal modelleme yapmışlardır. Rankine teorisine dayalı yarı-analitik çözümler sunulmuş ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma, istinat duvarının hareket şekli ve kum danelerinin arasındaki bağlanma kuvvetinin, zemindeki kayma zonunun oluşumu ve yanal basıncın artması üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Bağlanma kuvveti ne kadar yüksekse, yanal basınç da o kadar fazla oluşmuş ve istinat duvarına daha fazla yük uygulandığı görülmüştür. Bu çalışma, özellikle duvarın dönme hareketi durumunda zemin basıncının artışı daha iyi açıkladığına ve istinat duvarı tasarımının iyileştirilmesine yardımcı olacağına değinilmiştir.

Yıldız (2023), çalışmanın amacı, zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak konsol tipi istinat duvarlarının dinamik davranışını incelemek ve duvar yüksekliği değişiminin etkilerini araştırmaktır. Üç farklı konsol duvar yüksekliği, beş farklı temel zemini koşulu ve üç farklı deprem kaydı kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik çözümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, duvar dinamik davranışının yer hareketi frekans içeriği, duvar yüksekliği ve zemin-yapı etkileşimi faktörlerinden önemli ölçüde etkilenebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, farklı tasarım amaçlarını karşılamak için farklı yüklere ve zemin etkilerine maruz kalan istinat yapılarının dinamik davranışında önemli farklılıklar bulunmuştur.

Salamat ve Genç (2023) yüksek kaliteli beton üretimi için dev bir beton santrali tasarlanmışlardır. Bu çalışmada, karıştırma işlemini simüle etmek için DEM yöntemini kullanmışlardır. Farklı ve aynı boyutlu danelerle yapılan simülasyonlar sonucunda, dolum sırasında ayrışma ve karıştırıcıda topaklanma gözlemlenmemişlerdir. Homojen daneler simülasyonda ise akışkanlık, yayılma ve kayma karışım mekanizmaları incelemiş ve karışım indeksini hesaplanmışlardır. Sonuç olarak, DEM yöntemi ile beton santralinin karıştırma performansının iyileştirilmesine katkı sağlandığı ifade edilmiştir.

Zhang *et al.* (2023) kum danelerinin DEM simülasyonlarında kullanılan parametreleri kalibre etmek için gerçekçi modelleme ve görüntü analizi ile çok-amaçlı bir optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde, gerçek kum açısı ve dinamik kum açısı fiziksel deneylerle elde edildikten sonra, Latin hiperküp örnekleme ve radyal baz fonksiyonu kullanarak kum danelerinin parametrelerini optimize etmişlerdir. Sonuç olarak, geliştirilen yöntem hem

doğrulama deneylerinde hem de santrifüj pompalarda aşınma davranışının incelenmesinde yüksek doğruluk sağlamış olup, DEM yönteminin endüstriyel uygulamalarda verimliliği artırdığı kanıtlanmıştır.

Huang *et al.* (2023) çalışmalarında, dağlık bölgelerde heyelan (granüler akış) kontrolünde çoklu yarıkların nasıl kullanılabilir diye araştırmışlardır. Bilgisayar simülasyonları (DEM) kullanılarak akışın bu yapılarla nasıl etkileştiği ve yarıkların boyutu, aralığı gibi faktörlerin akış davranışını nasıl etkilediğini analiz etmişlerdir. Bu analizlere dayanarak, yarıklardan geçen akış hızının tahmin edilmesi için geliştirilmiş bir yöntem önermişlerdir. Araştırma sonuçları, yarıkların boyutunun, sayısının ve aralıklarının akışın kontrolünü önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, bu yapıların tasarımının optimize edilmesi için kullanılacak anahtar bir faktör (göreceli yarıkların ayrımı) tespit etmişlerdir.

Wu *et al.* (2024) çalışmalarında, yarıkların elemanlar yöntemi (DEM) kullanarak granüler akışın istinat duvarı üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Hem kuru hem de ıslak durumlar simüle edilmiş ve akışın taşıma etkisi nedeniyle duvar üzerindeki kuvvetin önemli ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca, ıslak zemin malzemesi ile taşımayı simüle etmek için DEM, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile kullanılmıştır. Sonuçlar, akışkanın taşıma etkisini daha da azalttığını göstermiştir.

Fattah *et al.* (2024) çalışmalarında, istinat duvarlarının trafik veya trenlerden kaynaklanan dinamik yüklere (titreşimlere) maruz kaldıklarında yanal olarak ne kadar hareket ettiğini (yatay ötelenme) araştırmışlardır. Bu hareketlerin genellikle duvar tasarımı yapılırken göz ardı edildiğinden bahsedilmiştir. Duvarın biraz yanal hareket etmesinin, arkasındaki zeminden gelen kuvveti (aktif basınç) azalttığı ve önündeki zeminden gelen kuvveti (pasif basınç) arttırdığı ifade edilmiştir. Bu sayede daha ekonomik duvar tasarımları elde edileceğinden bahsedilmiştir. Araştırmacılar, titreşimlerin şiddeti, duvar arkasındaki zemin tipi ve duvar ile titreşim kaynağı arasındaki mesafe gibi farklı koşullar altında bir duvarın ne kadar hareket edeceğini test etmişlerdir. Daha güçlü titreşimlerin ve daha gevşek zeminlerin duvarın daha fazla hareket etmesine neden olduğunu, duvar ile titreşimler arasındaki mesafenin ise hareketi azalttığını bulmuşlardır.

MATERYAL ve METOT

Materyal

DeneYlerde kullanılan zemin

Bu tez çalışmada kullanılan kireçtaşı (kalker), Erzurum'da faaliyet gösteren Aşkale Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Kireçtaşı, doğada kireçtaşı veya kalker olarak bulunan bir kayadır. Kireçtaşı, kalsiyum karbonat (CaCO₃) minerallerinden oluşur ve çeşitli minerallerin bileşimine bağlı olarak renkleri değişebilir. Kireçtaşı, inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemelerden biridir. İnşaat harçlarında ve beton yapımında kullanılır. Ayrıca, hidrolik bağlayıcı olan çimentonun ana ham maddesidir. Kireçtaşı, yüksek sıcaklıklarda kilden ayrıştırılarak çimento üretiminde kullanılır. Kireçtaşı sertlik seviyesi 3 ve özgül ağırlığı 2,5 ila 2,7 g/cm³ arasında değişir. Traverten oluşumları yeraltı su kaynaklarında bulunurken, kireçtaşı yatakları kimyasal, organik veya mekanik çökme yoluyla deniz veya tatlı su ortamlarında oluşur (Nakach *et al.* 2004).

Çalışmada, kireçtaşı yıkanmış, etüvde 105 °C'de kurutulmuş ve 4 farklı dane çapı aralığı oluşturulmuştur (2,0-3,35 mm, 3,35-4,75 mm, 4,75-6,30 mm, 6,30-8 mm). Bu zeminlerin bazı geoteknik özellikleri, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği ve Geoteknik Laboratuvarında yapılan deneylerle belirlenmiştir. Zeminlerin özgül ağırlık deneyi ASTM D 854'e göre, ve elek analizi ASTM D 1140'a göre yapılmıştır.

Kesme kutusu deneyi aleti

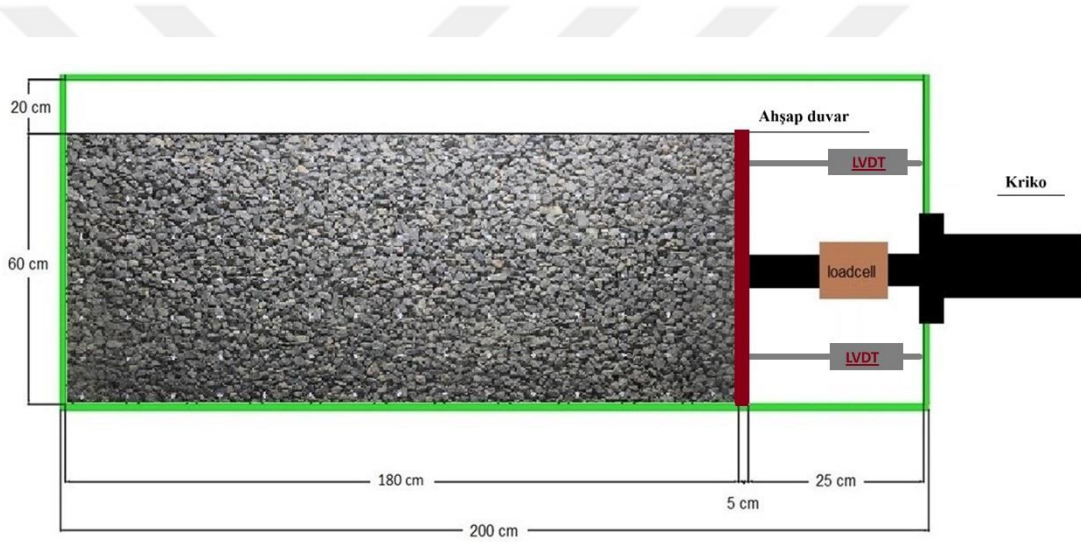
Bu çalışma kapsamında granüler zeminlerin dane şeklinin kayma mukavemetine ve kayma mukavemetine açısına etkisini belirlemek için orta ölçekte kesme kutusu aleti kullanılmıştır (Şekil 13). Kesme deneyi ASTM D 3080 ve AASHTO T 236'a göre yapılmış ve rezidüel kayma dayanımı elde edilinceye kadar devam edilmiştir.



Şekil 13. Deneylerde kullanılan kesme kutusu deney aleti

Deney Tankı ve Ekipmanları

Tez kapsamında model deneyler, 200 cm (uzunluk), 20 cm (genişlik) ve 80 cm (yükseklik) boyutlarında tankta gerçekleştirilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. Model deney tankı

Yükleme Sistemi: Deneylerde model istinat duvarın sabit bir hızla hareket etmesini sağlayan ve yükleme hızı ayarlanabilen 5000 kg kapasiteli hidrolik kriko kullanılmıştır.



Şekil 15. Yüklem Sistemi



Şekil 16. Hidrolik pompa kontrol ünitesi

Yük hücresi: Deneylerde, istinat duvarına gelen yük değerlerini belirlemek amacıyla CAS firması tarafından üretilen 5000 kg kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Şekil 17’de ve Tablo 2’de yük hücresinin şekli ve özellikleri görülmektedir.



Şekil 17. Deneylerde kullanılan yük hücresi

Tablo 2. Model Deneylerde Kullanılan Yük Hücresinin Özellikleri

Teknik Özellikler	Açıklama
Model	SBA-5T
Kapasite (kg)	5000
Toplam Hata (%)	<0,020
Minimum Ölçüm Aralığı (kg)	0,82
Malzeme Özelliği	Çelik

Deplasman ölçer (LVDT): Deneyler sırasında, istinat duvarın hareketi, 75 mm’lik dijital LVDT’ler ile ölçülmüştür (Şekil 18). İstinat duvarının hareketini kontrol etmek amacıyla diyagonal olarak istinat duvarın H/4 ve 3H/4 yüksekliklerine LVDT’ler yerleştirilmiştir. LVDT’lerin, çıkış uçları veri aktarım sistemine bağlanmıştır. Kullanılan LVDT’ler sayesinde 0,01 mm hassasiyetinde okuma yapmak mümkün olmuştur.



Şekil 18. Model deneylerde kullanılan deplasman Ölçer (LVDT)

Veri toplama sistemi: Deney sırasında, yük hücresi ve Doğrusal değişken diferansiyel transformatörlerden(LVDT) alınan değerler veri toplama cihazı kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu cihaz, sensörlerden gelen analog sinyalleri dijital veriye dönüştürür ve bilgisayar ortamına aktarır. Veri toplama sistemi TESTLAB Basic yazılımı ile kullanılabilir. Bu yazılım, verilerin kaydedilmesi, analiz edilmesi ve raporlanması için kullanılabilir (Şekil 19). Deneye başlamadan önce yük hücresi ve LVDT'lerin kalibrasyonu yapılmıştır.



Şekil 19. Deneylerde kullanılan veri toplama sistemi

Los Angeles aleti:

Los Angeles deney aleti agregaların parçalanma direncinin tayininde kullanılmaktadır (Şekil 20). Los Angeles deney aleti bilyesiz kullanılarak dane şeklini köşeliden yuvarlağa ve yuvarlağı da tam yuvarlağa getirmek için kullanılmıştır.



Şekil 20. Los Angeles cihazı (Deney aleti)

Kamera:

Model istinat duvarı deneylerinde aktif ve pasif durumda zeminin deplasmanını gözlemlemek için deney süresince belirli zaman aralıklarında fotoğraflar çekilmiştir. Deney sırasında kameranın sabit durmasını sağlamak için tripod kullanılmıştır.



Şekil 21. (a) Nikon D80 SLR fotoğraf makinesi (b) Tripod

Metot

Zeminlerin Deneye Hazırlanması

Aşkale Çimento fabrikasından getirilen kalker, Cox (1927), Power (1953) ve Arasan (2011)'a göre köşeli zemin sınıfına girdiği belirlenmiştir. Bu tez kapsamında daneleri yarı yuvarlak ve yuvarlak haline getirmek için Los Angeles deney aleti bilyesiz olarak kullanılmıştır [Arasan (2011)]. Los Angeles deney aleti köşeli zemini yarı yuvarlak hale getirmek için 50000 devir, yarı yuvarlak zemini yuvarlak zemine getirmek için ise aynı şekilde 50000 devir çalıştırılmıştır. Yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminlerin şekilsel parametrelerine bakılarak yuvarlaklıkları teyit edilmiştir. Köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminler yıkanmış açık havada kurutulmuş ve elek analizine (ASTM D 422) tabi tutularak 4 farklı granülometriye (2,0-3,35 mm, 3,35-4,75 mm, 4,75-6,30 mm, 6,30-8 mm) sahip köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminler elde edilmiştir.

Dört farklı granülometriye sahip köşeli, yuvarlak ve yarı yuvarlak zeminlerin maksimum ve minimum boşluk oranları belirlenmiş ve her bir granülometriye sahip zeminler üzerinde farklı rölatif (%30, %50 ve %70) sıklıklarda kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

Daha sonra köşeli, yuvarlak ve yarı yuvarlak zeminler %30, %50 ve %70 rölatif sıklıklarda model tankına yerleştirilmiş aktif-pasif durumlar ve oluşan kayma bantları incelenmiştir. Ayrıca deneyler sırasında fotoğraflar çekilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneyler ve analizler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Maksimum ve minimum boşluk oranları

Maksimum ve minimum boşluk oranlarının belirlenmesinde birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları ASTM D 4254 ve D 4253'te verilen yöntemlerdir. Bunun yanında maksimum boşluk oranının tespitinde Kolbuszewski (1948) yöntemi de sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında maksimum boşluk oranının belirlenmesinde Kolbuszewski (1948) yöntemi, minimum boşluk oranı için ise ASTM D 4253 Metot A kullanmıştır.

Kesme kutusu deneyleri

Tez kapsamında kullanılan zeminlerin kayma mukavemetleri ve kayma mukavemeti açıları için ASTM D 3080 ve ASSHTO T 236 yöntemlerine göre kesme kutusu deneyleri uygulanmıştır. Deneylerde orta ölçekli kesme kutusu deney aleti kullanılmıştır. Orta ölçekli kesme kutusunun hücresi 150 mm x 150 mm boyutlarında ve 50 mm yüksekliğindedir. Standartlarda kesme kutusu deneyine tabi tutulacak zeminin maksimum dane çapının kesme kutusu hücresinin kenar uzunluğuna oranının en az 1/10 olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca, yine standartlarda maksimum dane çapı ile numune yüksekliği arasında en az 1/6 oranının sağlanması gerektiği belirtilmektedir. Deneylerde kullandığımız maksimum dane çapı ve kesme kutusu hücre boyutları göze önüne alındığında standartlara uygun olduğu belirlenmiştir. Kesme hızı olarak ASSHTO T 236'da önerilen 0,25 mm/dakika kullanmıştır. Her bir numune için üç farklı normal gerilmede (σ) deneyler yapılmıştır. Normal gerilme seviyeleri 50 kPa, 100 kPa ve 150 kPa olarak seçilmiştir. Deneylerde göçmenin belirgin olduğu durumlarda maksimum kayma gerilmesi olarak pik değer alınmıştır. Pik gerilmenin belirgin olmadığı durumlarda ise kabul edilen bir yanal deformasyon anındaki kayma gerilmesi maksimum gerilme olarak alınır. Bazı zeminlerde göçmenin belirgin olmaması sebebiyle maksimum kayma dayanımı yanal deformasyonun %15-%20 durumundaki kayma gerilmesi olarak alınabilmektedir.

Parçacık görüntülü hız ölçüm yöntemi (PIVlab)

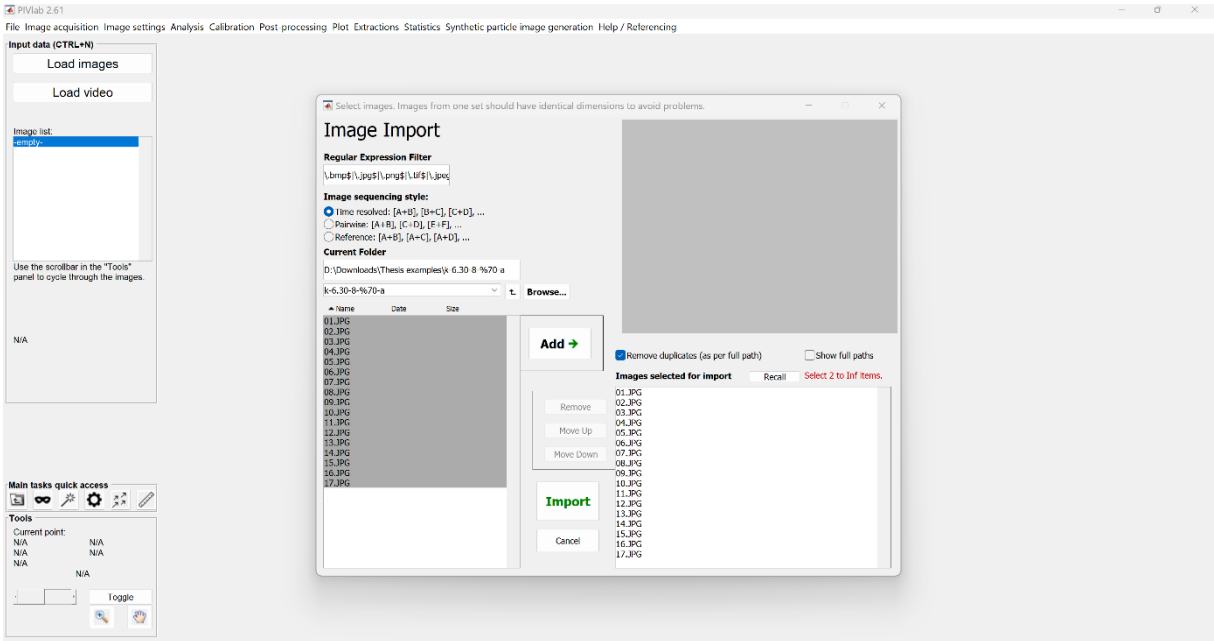
Model istinat duvarı arkasındaki zeminde oluşacak hareketi belirlemek için deneyler sırasında fotoğraflar çekilmiş ve fotoğraflar PIV yazılımı olan PIVlab programına tanıtılmıştır. Kullanıcı dostu bir grafik kullanıcı arabirimi (GUI), PIV analizini ve verileri işlemeyi hızlı ve verimli hale getirmektedir. PIVlab uygulaması eklenti olarak MATLAB üzerinde çalışmaktadır. PIVlab, yalnızca görüntü çiftleri içindeki hız dağılımını hesaplamakla kalmayıp, aynı zamanda akış modelinin birden çok parametresini türetmek, görüntülemek ve dışa aktarmak için de kullanılabilen açık kaynaklı bir partikül görüntülü hız ölçümü (PIV) yazılımıdır.



Şekil 22. PIVlab programının arayüzü

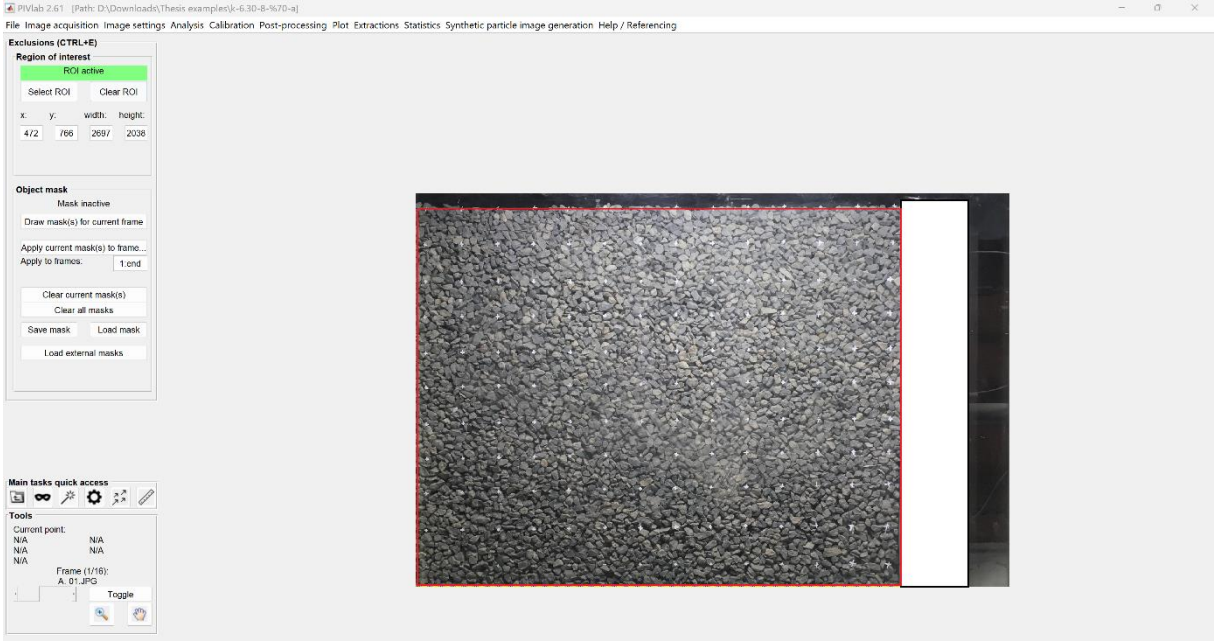
PIVlab program aşamaları

Görüntü Aktarma: Model deney sırasında çekilen fotoğraflar dosya panelinde görüntüleri yükle kısmından programa fotoğraflar yüklenir (Şekil 22) Sıralama stili 1-2, 2-3, 3-4, ... olarak ayarlanır ve ekle ardından içe aktarmaya tıklanır. Böylece Görüntüler PIVlab'a yüklenmiş olur. Sağ taraftaki panelde görüntü listesi görünmektedir. 'A' ve 'B' harfleri, bir fotoğraf çiftinin birinci ve ikinci görüntüsünü ifade eder.



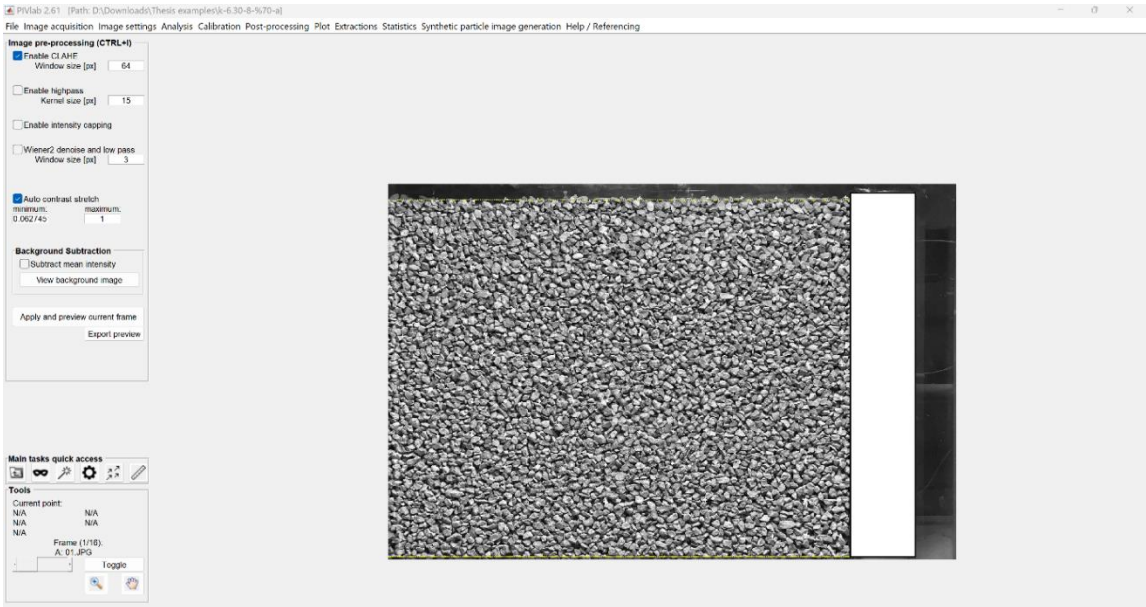
Şekil 23. PIVlab programında görüntü aktarma aşaması

İlgi Alanı ve Maske Belirleme: Analiz kısmında bulunan istisnalar seçilerek fotoğraftaki analiz edilecek kısım seçilir (Şekil 24).



Şekil 24. PIVlab programında görüntü ilgi alanı ve maske belirleme aşaması

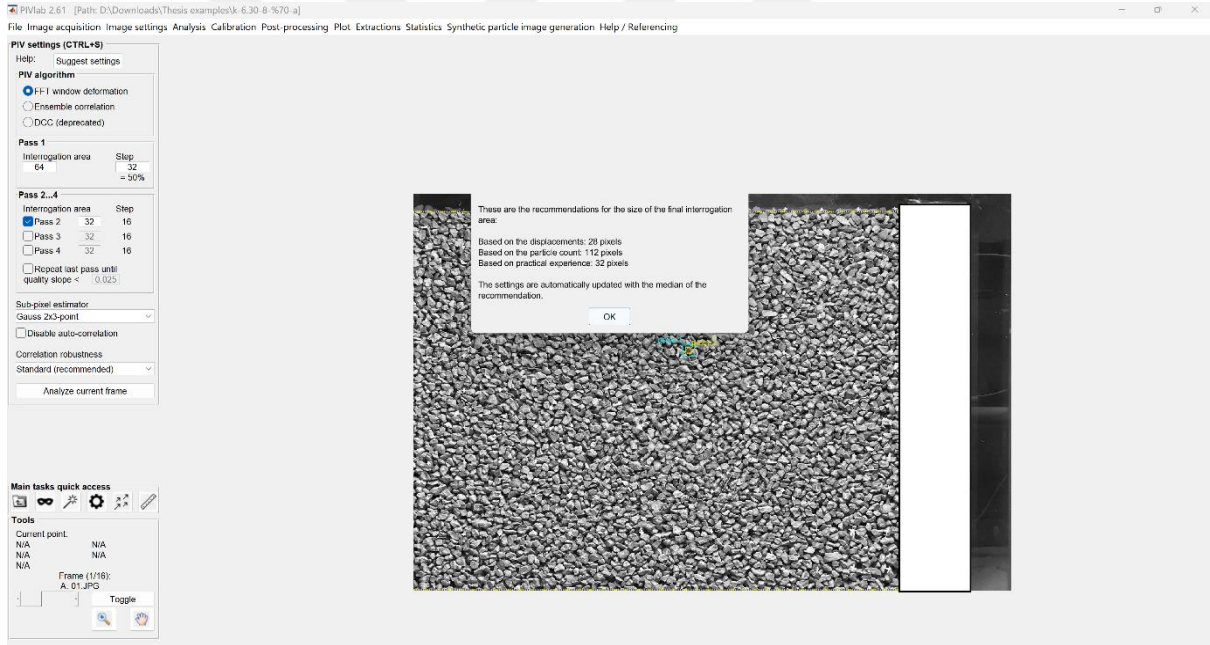
Görüntü Ön İşleme: PIVlab, analizlerin kalitesini önemli ölçüde artırabilecek bir dizi görüntü ön işleme tekniği sunmaktadır. Analiz ve sonra görüntü ön işleme seçeneğine tıklandığında çok sayıda görüntü ön işleme seçenekleri görülmektedir. Çalışmamızda elde ettiğimiz fotoğraflar görüntü ön işleme tekniği kullanılarak kontrastı artırılmıştır (Şekil 25).



Şekil 25. PIVlab programında görüntü ön işleme aşaması

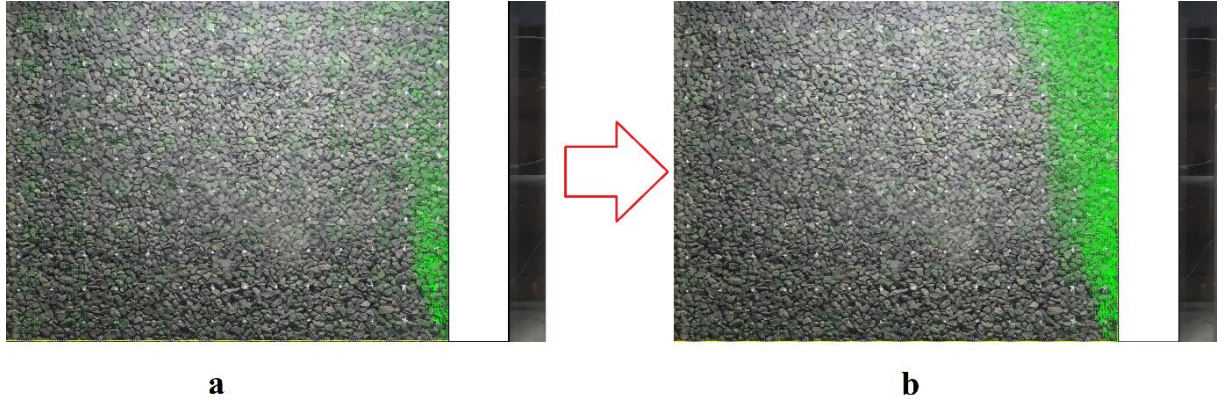
PIV Ayarları: PIVlab iki farklı korelasyon algoritmasına sahiptir. Bunlar, DCC (tek geçişli doğrudan çapraz korelasyon) ve FFT pencere deformasyonu (çoklu geçişler ve deforme

edici pencereler ile doğrudan Fourier dönüşümü) korelasyonu algoritmalarıdır. İkinci algoritma varsayılan olarak etkindir ve çoğu durumda daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu algoritma kullanılarak, veriler birkaç geçişte analiz edilmektedir. İlk geçiş, görüntü verilerinin yer değiştirmesini güvenilir bir şekilde hesaplamak için nispeten büyük sorgulama alanları kullanılmaktadır. Sorgulama alanları ne kadar büyük olursa, sinyal-parazit oranı o kadar iyi olur ve çapraz korelasyon o kadar güçlü olur. Ancak geniş sorgulama alanları, sonraki geçişlerde sorgulama pencerelerinin boyutunun küçülmesi nedeniyle yalnızca çok düşük bir vektör çözünürlüğü vermektedir. Birinci geçişin yer değiştirme bilgisi, ikinci geçişteki sorgulama alanlarını dengelemek için kullanılmaktadır ve bu böyle tekrarlanır. Bu prosedür, yüksek vektör çözünürlüğü, yüksek sinyal-parazit oranı ve yüksek dinamik hız aralığı sağlamaktadır. Daha sonraki geçişlerin sorgulama alanları yer değiştirme yanında, aynı zamanda deforme olmaktadır. Genel öneri, yaklaşık üç geçiş kullanılmasıdır. Çok geçiş kullanılması zaman alıcı olmasına rağmen daha iyi sonuçlar vermektedir. Büyük sorgulama alanlarıyla başlanması ve ardından kademeli olarak azaltılması önerilmektedir.



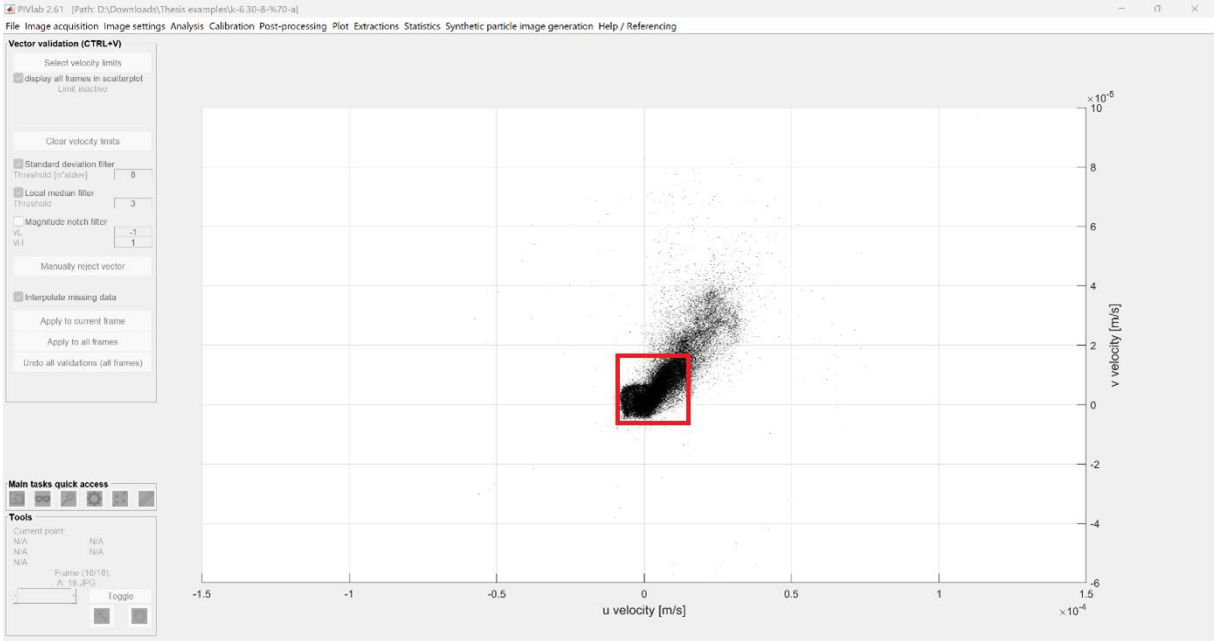
Şekil 26. PIVlab programında ayarlar aşaması

Analiz Aşaması: Analiz bölümünden tüm kareleri analiz edin düğmesine tıklanıldığında görüntülerin analizi başlar. Bu aşamada, her geçişte vektör çözünürlüğünün nasıl arttığı görülebilir (Şekil 27).



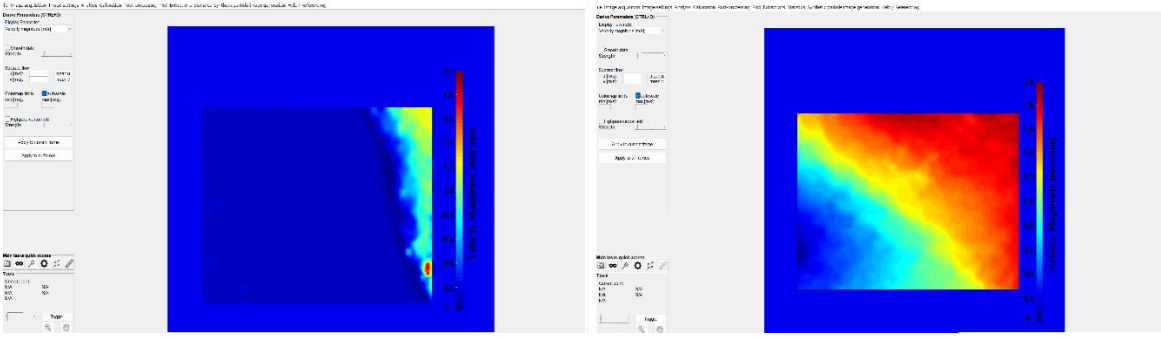
Şekil 27. PIVlab uygulamasında analiz aşaması: a) başlangıçtan 2 saniye sonra b) başlangıçtan 30 saniye sonra

Veri Doğrulama: Görüntüdeki yetersiz aydınlatılmış bölgeler veya düzlem dışı akış nedeniyle bazı hatalı vektörler görülebilir. Bu hatalı vektörler işlem sonrası panelinde bulunan vektör doğrulama kısmından kaldırılabilir. Verilerin filtrelemenin birkaç yolu vardır. Hız sınırlarını ayarlayarak, bu sınırların dışındaki vektörler çıkarabilmektedir. Bir sonraki adımda tüm çerçevelerinin tüm vektörleri tüm çerçeveleri göster ardından hız sınırları seçilerek görüntülenebilir.



Şekil 28. PIVlab programında veri doğrulama aşaması

Diyagram Görünüm Değişimi: PIVlab, bir dizi veri işleme seçeneğine sahiptir. Çizim panelinden Mekânsal: Parametreleri türetme/verileri değiştirme seçilir ve ardından parametreleri göster bölümünden hız büyüklüğü seçilip ve tüm çerçevelere uygulamaya tıklandığında, aktif veya pasif zemin basınç durumlarında zemin danelerinin hareketleri görüntülenebilir (Şekil 29).

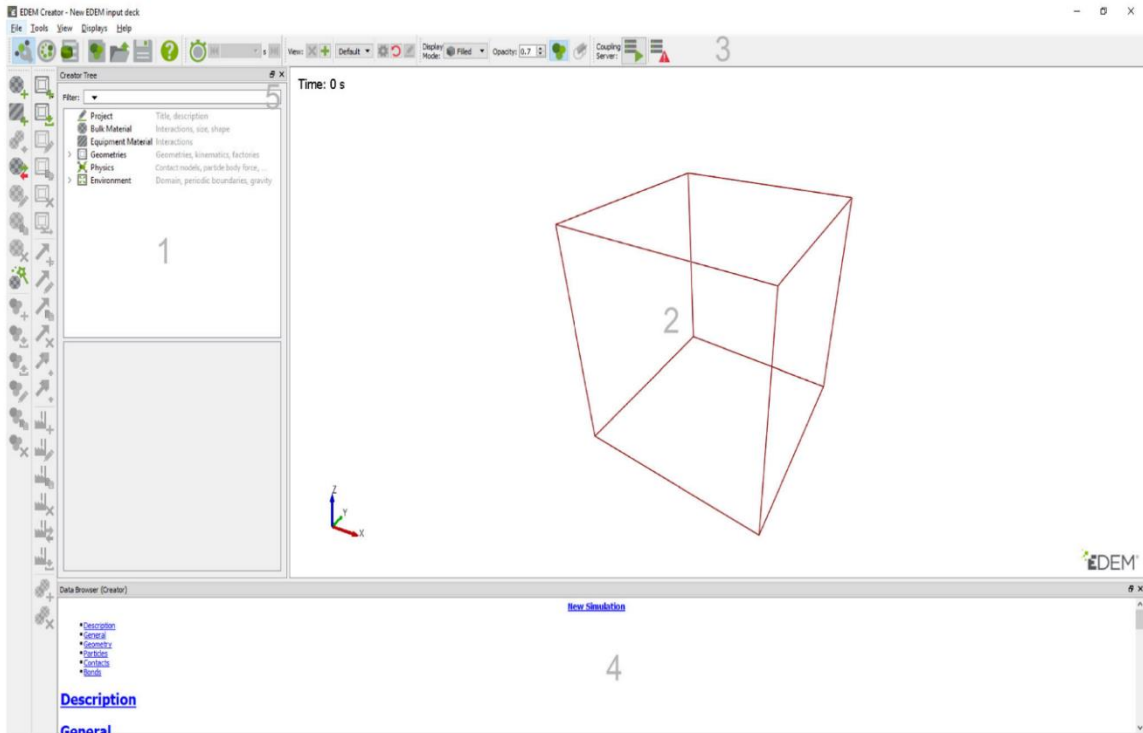


Şekil 29. PIVlab programında danelerin akış diyagramları (sol aktif ve sağ pasif durumlar)

Ayrık elemanlar yöntemi (Altair EDEM)

Zeminlerin simülasyonu için Altair Engineering şirketi tarafından geliştirilen kullanıcı dostu EDEM yazılımı kullanılmıştır. EDEM; kömürlerin, zeminlerin, liflerin, tahılların, tabletlerin, tozların ve daha fazlasının davranışını hızlı ve doğru bir şekilde modellemek ve analiz etme kabiliyetine sahiptir. EDEM simülasyonu, mühendislere bu malzemelerin bir dizi çalışma ve süreç koşulu sırasında ekipmanlarıyla nasıl etkileşime gireceğine dair önemli bilgiler sağlamaktadır. EDEM'in kullanıcı arabirimi, simülasyon bileşenlerinin her biri için üç simge içerir: Creator (oluşturucu), Simulator (Simülatör) ve Analyst (Analist).

- **Creator:** Modelleri oluşturmak etmek için kullanılır.
- **Simulator:** EDEM çözücü motorunu yapılandır ve kontrol eder.
- **Analyst:** EDEM veri analizi ve görselleştirme aracıdır.



Şekil 30. EDEM yazılımının arayüzü

1. **Creator Ağacı:** Oluşturucu Ağacı EDEM penceresinin sol tarafında görüntülenir. Proje, Dökme Malzeme, Ekipman Malzemesi, Geometriler, Fizik ve Ortam hakkında bilgiler içerir. EDEM Creator, model ve başlatmaya olanak tanır. Parçacıklar ve geometrilerin içe aktarıldığı ve diğer model parametrelerinin tanımlandığı yerdir.
2. **Viewer (Görüntüleyici):** Parçacıkları, geometrileri ve alanları (varsa) 3B temsillerini görüntüler.
3. **Simge Sistemi:** Simülasyonun kurulmasını sağlar, simülasyonun başlangıcında bazı simgeler aktiftir. Diğerleri yalnızca simülasyon kısmen kurulduğunda etkindir.
4. **Veri Tarayıcı:** *Viewer*'in içeriği hakkında ayrıntılı bilgileri görüntüleyen bir .html sayfasıdır.
5. **Ağaç Filtresi:** Filtre seçeneği, ağaçtaki öğelerin filtrelenmesi sağlar.

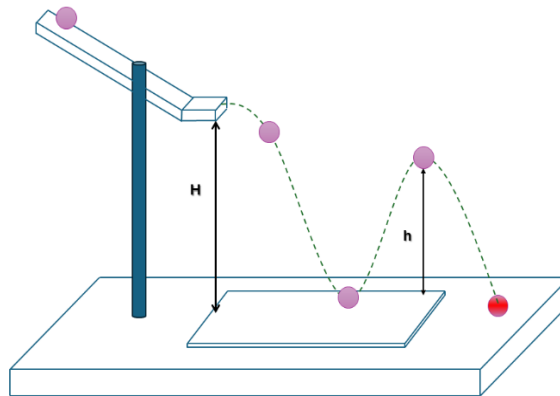
Malzeme kalibrasyonu

DEM'de bir malzemenin gerçek akışını temsil etmek için çeşitli parametrelerin deneysel olarak ölçülmesi gerekir. Bu parametreler, restitüsyon katsayısı, statik sürtünme katsayısı ve yuvarlanma sürtünme katsayısıdır.

Restitüsyon Katsayısını: Restitüsyon katsayısını, çarpışmadan önceki ve sonraki hız farklarının oranı olarak tanımlanır.

$$e = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \quad (20)$$

Burada v'_2 ve v'_1 çarpışan cisimlerin çarpışmadan sonraki rölatif hızları, v_1 ve v_2 çarpışan cisimlerin çarpışmadan önceki rölatif hızlarıdır (Teffo ve Naudé, 2013).



Şekil 31. Eğimli plaka düz atış deney sisteminin şematik diyagramı (Tang *et al.*, 2019)

Serbest düşüş yerine düz fırlatma hareketinin kullanılması, darbe plakasıyla temas halindeyken dikey hızın stabilitesini sağlamaktadır. Deney sürecinde yer alan deney

ekipmanları arasında kamera, demir çubuk, düz atma ve cam levha, ahşap levha malzemeler yer almaktadır. Restitüsyon katsayısı, DEM modellemelerde önemli bir parametredir. Ayrık elemanlar sayısal modelleme sürecinde sürtünme katsayısının değeri, numunenin gerinim lokalizasyonu ve partikül malzemelerinin mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Tang et al., 2019). Bireysel partiküler için hesaplamada

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (21)$$

Bağıntısı kullanılır.

Burada:

h: Zıplama yüksekliği

H: partikül fırlatma noktasından çarpışma plakasına olan düşey mesafedir.

Farklı dane çap ve şekil gruplarının her biri için 50 tekrar yapılarak ortalaması alınmış ve DEM girdisinde kullanmıştır (Ek. 2).



Şekil 32. 6,30 ile 8,00 mm arası köşeli dane ile ahşap duvar arası restitüsyon katsayısını hesaplama deney aşamaları

Statik Sürtünme Katsayısı: Statik sürtünme katsayısı (μ_s), statik sürtünme kuvvetinin (f_s) bir yüzey üzerindeki elemanın normal kuvvetine (F_N) oranı olarak tanımlanır:

$$\mu_s = \frac{f_s}{F_N} \quad (22)$$

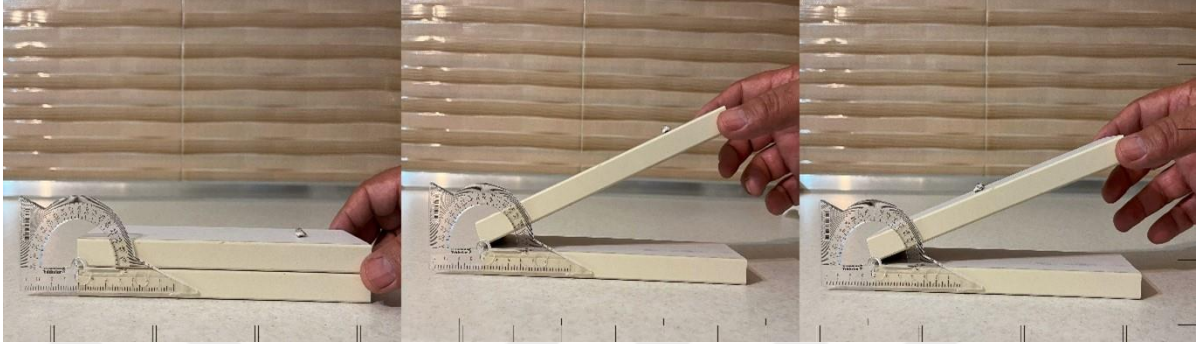
$$F_N \times \mu_s = f_s \quad (23)$$

$$Mg \cos \theta \times \mu_s = mg \sin \theta \quad (24)$$

$$\mu_s = \tan \theta \quad (25)$$

Statik sürtünme katsayısı DEM 'de önemli bir parametredir ve partikül akış davranışını büyük ölçüde etkilediği için doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir (Teffo ve Naudé, 2013). Statik sürtünme katsayısını ölçmek için granüler malzeme bir tarafı sabit ve diğer tarafı

yukarıya doğru hareket edebilen bir yüzey üzerine konulur ve yavaşça granüler malzeme olan taraf yukarıya doğru hareket ettirilir. Granüler malzemenin kaymaya başladığı andaki açı açı ölçer ile ölçülür. Farklı dane çapları ve şekil gruplarına sahip malzemeyle duvar (cam) ve istinat duvarına (ahşap) için arasında olan ortalama statik sürtünme açıları 50 tekrar yapılarak elde edilmiş ve DEM girdisinde kullanmıştır (EK-1).



Şekil 33. 6,30 ile 8,00 mm arası köşeli dane ile ahşap duvar arası için statik sürtünme katsayısının belirlenmesi

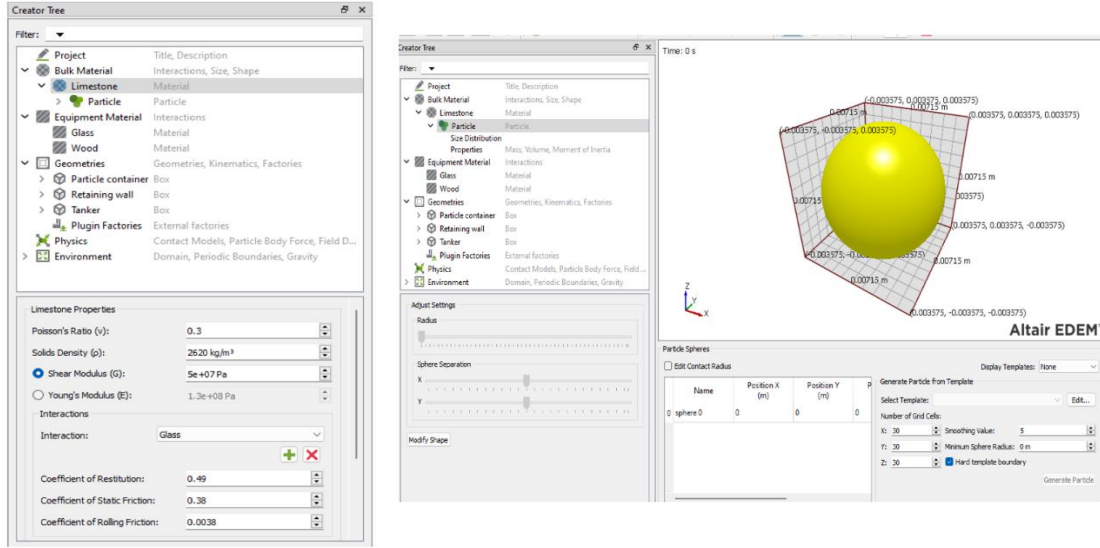
Yuvarlanma Sürtünme Katsayısı: Yuvarlanma sürtünme katsayısı, başlangıçta düz bir yüzey üzerinde duran bir nesneyi harekete geçirmek için gereken tork miktarını belirlemede kullanılır. Ampirik olarak şu şekilde tanımlanır:

$$\mu_r = \frac{f_r}{F_N} \quad (26)$$

Katterfeld ve Rössler (2017), kohezyonsuz malzemelerin DEM girdi parametreleri üzerinde yaptıkları kalibrasyon çalışmalarında, statik sürtünme katsayısının yuvarlanma sürtünme katsayısından daha yüksek olduğunu belirlemiş ve yuvarlanma sürtünme katsayısının statik sürtünme katsayısının %1 olarak alınabileceğini önermişlerdir.

Altair EDEM yazılım ile simülasyon adımları

EDEM yazılımında Oluşturma ağacı panelinden projenin adı ve tanıtımı yapılır. Daha sonra Yığın malzeme bölümünden deneyde kullandığımız malzemenin poisson oranı, özgül ağırlığı ve malzemeler arasındaki etkileşim özellikleri girilir (Şekil 34). Partikül ekleme bölümünden daneli malzemenin şekli, dağılım boyutlar vb. özellikleri tanımlanır.



Şekil 34. EDEM yazılımına daneli malzemenin özelliklerinin giriş ekranı

DEM simülasyonları, düzensiz dane şekli nedeniyle gerçek daneli malzeme davranışının nicel tahmininden yoksundur. Bununla birlikte, gerçek dane şeklinin modelde kullanılması durumunda, modellenme süresi küresel partiküllerin modellenmesinden yaklaşık 3 ila 5 kat daha uzun sürmektedir. (Nitka *et al.* 2015). Bunun için restitüsyon katsayısı, statik ve yuvarlanma sürtünme katsayıları, sayısal simülasyonların daha gerçekçi ve verimli sonuçlar gösterebilmesi için gerçek zemin partiküllerin parametrelerine yeterince yakın olmalıdır. Literatürde partikül özelliklerinin belirlenmesinde iki yöntemden bahsedilmektedir. Bunlardan birincisi doğrudan ölçüm ve kalibrasyon yaklaşımıdır. Literatürde, DEM giriş parametrelerinin kalibrasyonu için kum yığını kullanıldığı bildirilmiştir (Lommen et al. 2019, Cao et al. 2019, Marigo ve Stitt 2015, O'Sullivan *et al.* 2004, Salgado ve Paik 2003). DEM modellemesi için köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak dane şekline sahip 2,00 mm ila 8,00 mm arasındaki dört dane çapı aralığındaki zeminlerin restitüsyon katsayısı, statik ve yuvarlanma sürtünme katsayıları, bir dizi eğimli düz atış (Teffo ve Naude 2013, Tang *et al.* 2019), kayma deney sistemi (Teffo ve Naude 2013) ve geleneksel kesme kutusu deneylerinden elde edilmiştir.

Partiküllerin davranışı, aynı zamanda kumun kayma açısı üzerinde doğrudan etkisi olan statik sürtünme katsayısı ve yuvarlanma sürtünme katsayısı parametreleri ile belirlenmektedir. Partiküllerin etkileşim özellikleri, danelerin hareketi üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bu parametrelerin kum daneleri olması durumunda belirlenmesi kolay değildir (Abedi *et al.* 2010). Kum daneleri arasındaki sürtünme katsayısı, doğrudan kesme kutusu deney ile elde edilmiştir. Gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusal kısmının eğimi dikkate alınarak daneli malzemelerin Young modülü belirlenmiş ve poisson oranı literatürden elde edilmiştir. Simülasyon süresini azaltmak için, çapları ve temas parametreleri gerçek gerçek malzemelere

yakın üç boyutlu küresel daneler seçilmiştir. Kritik zaman adımı, Young modülünün kareköküyle ters orantılı olduğundan, ilk Young modülü 10^2 katı olarak azaltılmıştır.

Kapsamlı modellemeler, bu hızlandırma yönteminin rölatif sıklık ve ek sınırlayıcı kütle sürtünmesi üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını kanıtlanmıştır. Bu aşamada, malzeme arası, malzeme ve ahşap istinat duvarı ve malzeme ve cam tankın birbiriyle etkisini belirlemek için restitüsyon katsayısı, statik sürtünme katsayısı ve yuvarlanma sürtünme katsayıları çok sayıda tekrarlı deneylerden elde edilmiştir (Tablo 3-5).

Tablo 3. Köşeli danelerde, dane ile istinat duvarı ve kenar duvarlar arasındaki restitüsyon katsayıları- istinat duvarı ve kenar duvarların statik sürtünme katsayıları

Dane aralığı	e_{Cam}	u_s Dane-Cam	e_{Duvar}	u_s Dane-Duvar
2,00-3,35	0,41	0,53	0,42	0,51
3,35-4,75	0,41	0,42	0,44	0,53
4,75-6,30	0,48	0,46	0,48	0,52
6,30-8,00	0,44	0,32	0,57	0,51

Tablo 4. Yuvarlak danelerde, dane ile istinat duvarı ve kenar duvarlar arasındaki restitüsyon katsayıları- istinat duvarı ve kenar duvarların statik sürtünme katsayıları

Dane aralığı	e_{Cam}	u_s Dane-Cam	e_{Duvar}	u_s Dane-Duvar
2,00-3,35	0,38	0,54	0,43	0,61
3,35-4,75	0,44	0,42	0,55	0,65
4,75-6,30	0,46	0,44	0,51	0,64
6,30-8,00	0,49	0,40	0,54	0,67

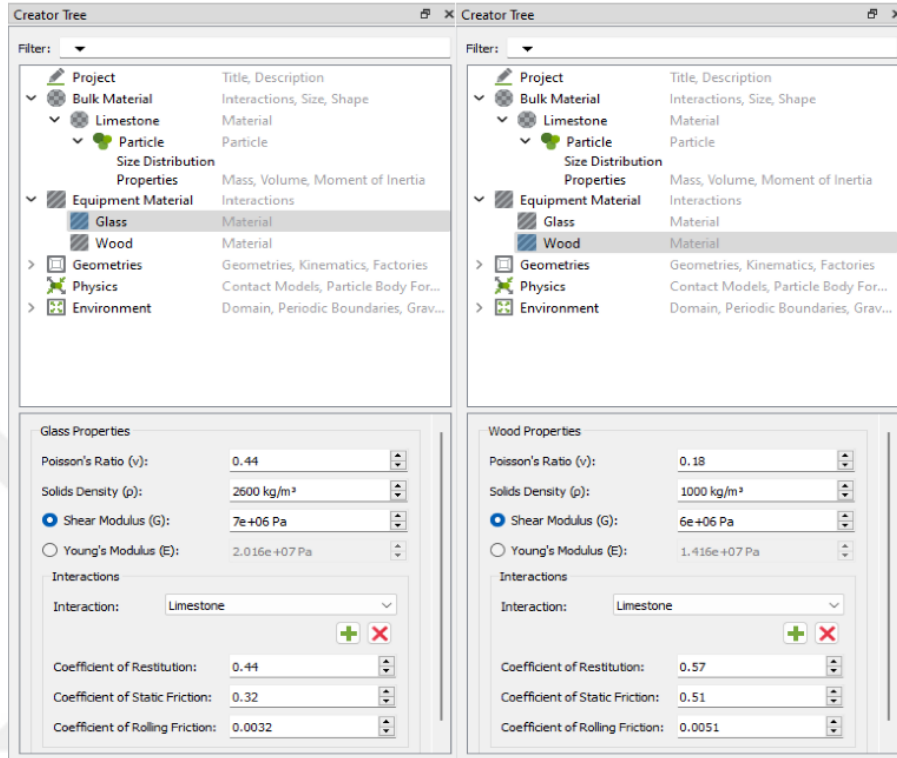
Tablo 5. Tam yuvarlak danelerde, dane ile istinat duvarı ve kenar duvarlar arasındaki restitüsyon katsayıları- istinat duvarı ve kenar duvarların statik sürtünme katsayıları

Dane aralığı	e_{Cam}	u_s Dane-Cam	e_{Duvar}	u_s Dane-Duvar
2,00-3,35	0,41	0,49	0,39	0,62
3,35-4,75	0,40	0,50	0,49	0,67
4,75-6,30	0,53	0,44	0,45	0,68
6,30-8,00	0,49	0,38	0,54	0,64

Ekipman malzemesi bölümünden duvarın özellikleri girilir. Cam ve ahşabın Poisson oranları ve Young modüllüleri literatürden alınmıştır.

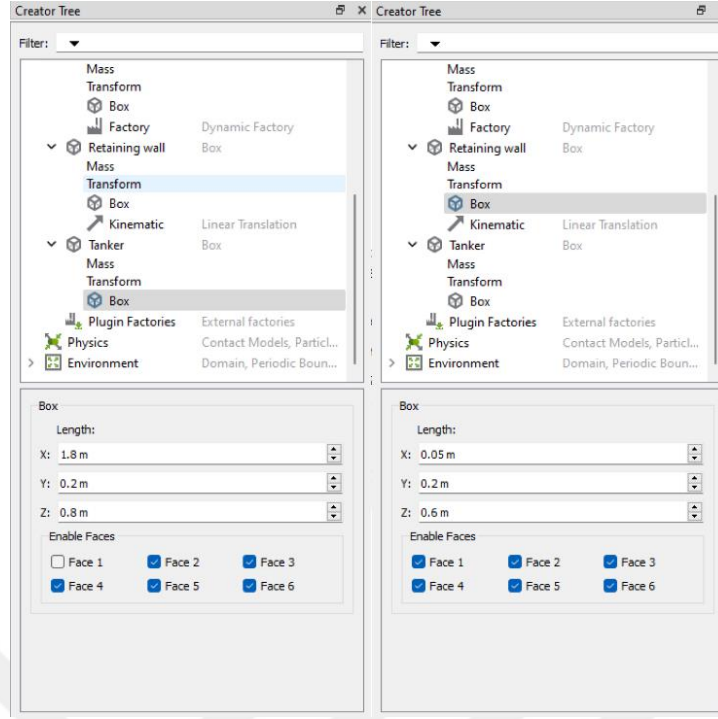
Tablo 6. Cam ve Ahşap Malzemenin Poisson Oranları ve Young Modülleri

Malzeme	Poisson oranı	Young modülü
Cam Çerçeve	0,44	20×10^6 Pa
Ahşap Duvar	0,18	6×10^6 Pa



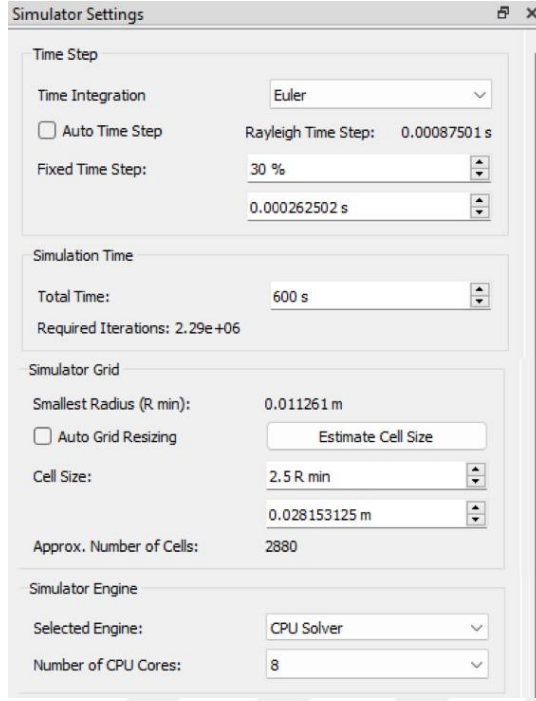
Şekil 35. EDEM yazılımında model tank ve istinat duvarı özelliklerinin giriş ekranı

Bu aşamadan sonra oluşturma ağacı panelindeki geometri sekmesinden tankın ve istinat duvarının geometrisi çizilir (Şekil 36).



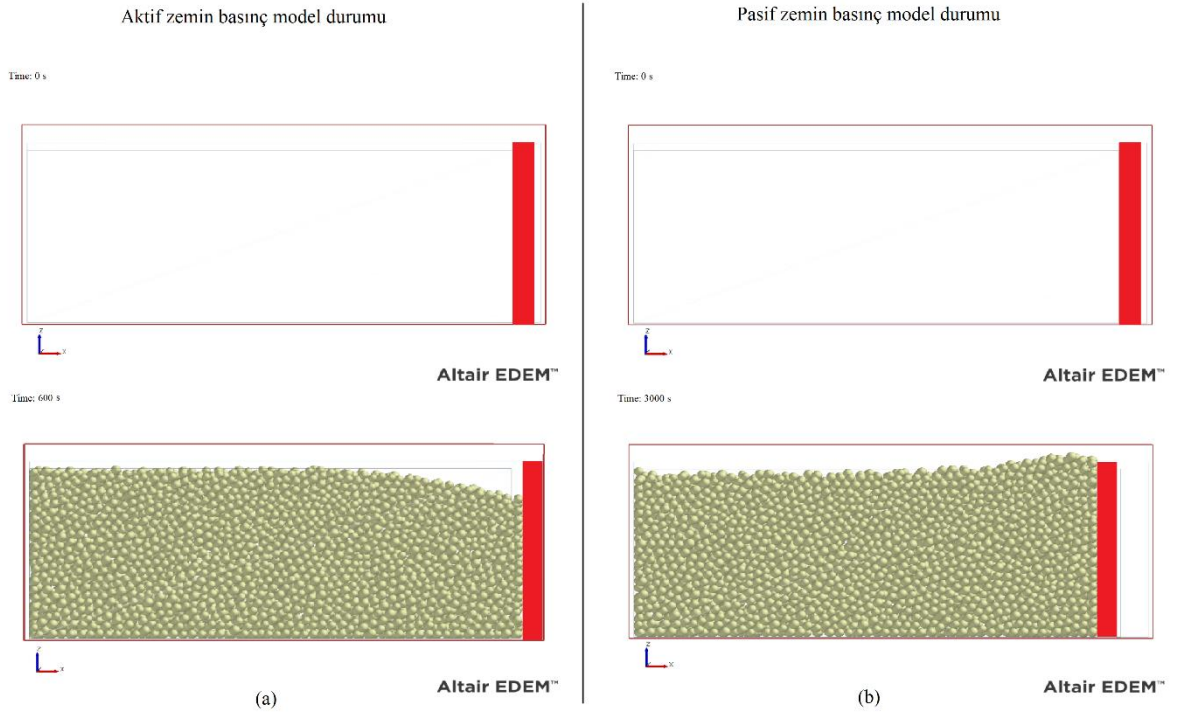
Şekil 36. EDEM yazılımında model tank ve istinat duvarı boyutlarının giriş ekranı

Bu işlem bitikten simülasyonun ikinci aşamasına geçilir. Simülasyon aşamasında zaman Entegrasyonu, Euler ve Sabit Zaman Adımı değeri % 30 seçilir. Hesaplama hızı ile doğruluk arasında denge sağlamak amacıyla tüm simülasyonlar için, kritik zaman adımı için % 30'u oranında bir çarpanı kullanılmıştır. Simülasyon zamanları aktif ve pasif zemin durumlarına bağlı olarak sırasıyla 600 s ve 3000 s olarak 1 cm ve 10 cm duvar hareketine eş değer seçilmiştir. EDEM uygulaması simülasyon motoru olarak hem CPU ve hem bilgisayarın GPU veya ikisi beraber çalışmasıyla mümkündür ancak beraber çalıştığında modellemeler daha hızlı yapılabilmektedir. Modellemeler Asus N580VD dizüstü bilgisayarı (i7 CPU, 16 GB ram ve 4 GB VGA özelliğine sahip) ile yapılmasına rağmen her simülasyon için 2,00 ile 3,35 mm arası dane arığına sahip modeller yaklaşık 29 gün, 3,35 ile 4,75 mm arası yaklaşık 24 gün, 4,75 ile 6,30 mm arası yaklaşık 10 gün ve 6,30 ile 8,00 mm arası yaklaşık 4 gün sürmüştür.



Şekil 37. EDEM yazılımında simülasyon aşamasında girilen veriler

Simülasyonun üçüncü aşaması sonuçların analizi ve görselleştirme işlemidir (Şekil 38).



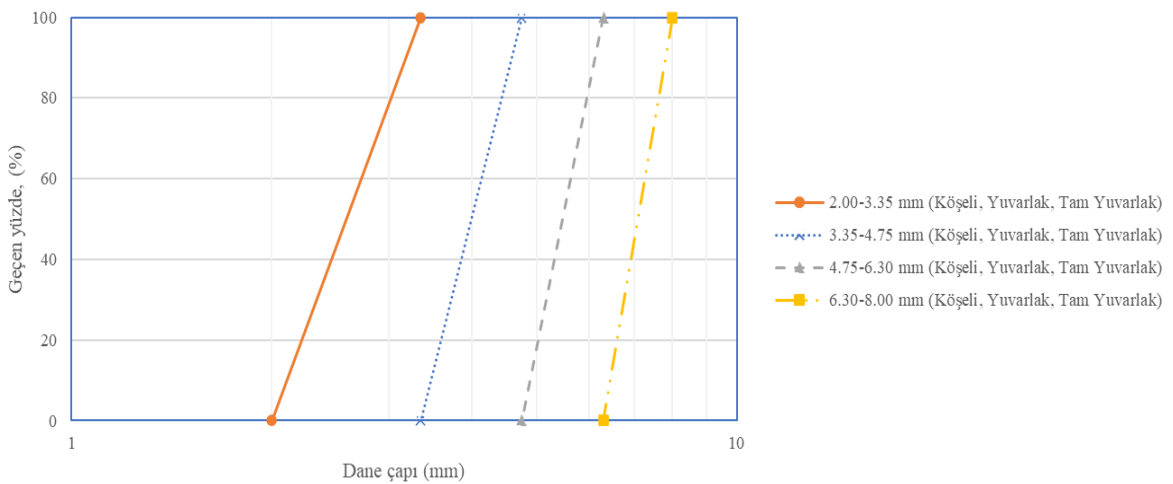
Şekil 38. Aktif ve pasif zemin basınçların simülasyonları a) aktif durum b) pasif durum

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

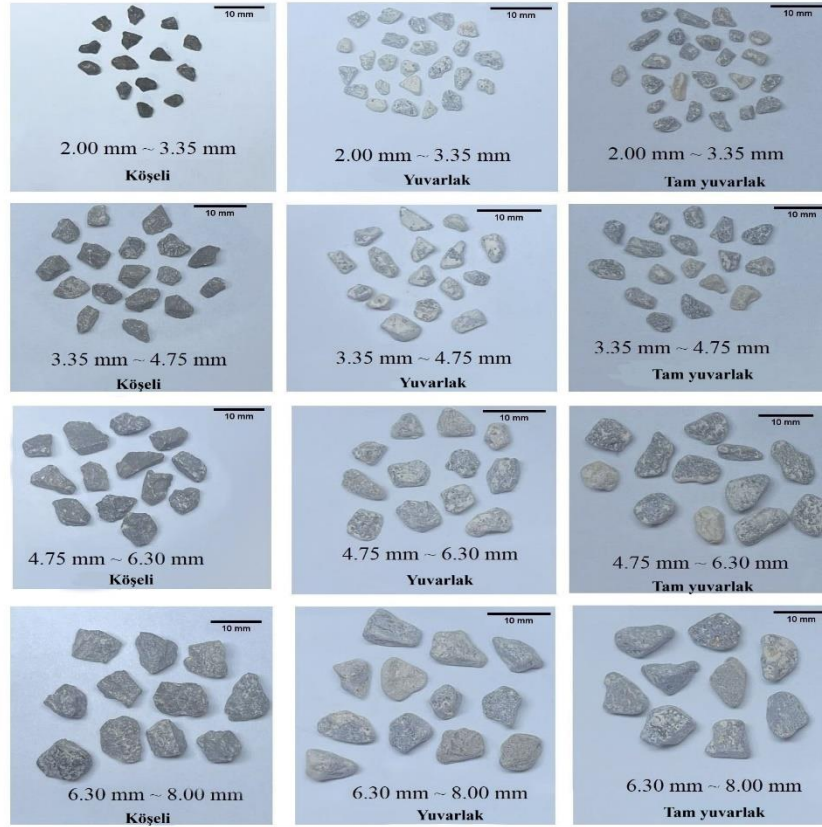
Kalker Zeminin Mekanik Özellikleri

Bu tez çalışmasında, kalker zemin malzemesi köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak olarak dört farklı granülometriye ayrılmıştır. Özgül ağırlık deneyi, ASTM D 854 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve elek analizi ASTM D 1140'a göre yapılmıştır. Kullanılan zeminin özgül ağırlığı 2,62 olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan zeminler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre sınıflandırılmıştır. 2,00-3,35 mm ve 3,35-4,75 mm aralığındaki zeminler kötü derecelenmiş kum, çakıllı kum (SP) ve 4,75-6,30 mm ve 6,30-8,00 mm aralığındaki zeminler ise kötü derecelenmiş çakıl, kumlu çakıl (GP) olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 38). Zeminlerin maksimum ve minimum boşluk oranları, sırasıyla Kolbuszewski (1948) ve ASTM D 4253 standartlarına göre köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak zeminler için belirlenmiştir (Tablo 7).

Çalışmada, dane şeklinin kayma mukavemetine ve kayma mukavemeti açısına etkisini belirlemek için kesme kutusu deneyleri ASTM D 3080 ve AASHTO T 236 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune 50, 100 ve 150 kPa normal gerilme seviyeleri altında 0,25 mm/dakika hızla kesmeye tabi tutularak kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Deneyler 3 farklı rölatif sıklıkta (%30, %50 ve %70), 4 farklı granülometride ve 3 farklı dane şeklinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin içsel sürtünme açıları Tablo 8'de gösterilmiştir.



Şekil 39. Deneylerde kullanılan zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri



Şekil 40. Deneysel olarak kullanılan zeminler ve partikül şekilleri

Tablo 7. Farklı Partikül Şekillerine Sahip Zeminlerin Granülometri Parametreleri

Dane aralığı (mm)	Köşeli ($G_s = 2.6$)				Yuvarlak ($G_s = 2.6$)				Tam Yuvarlak ($G_s = 2.6$)			
	e_{min}	e_{max}	C_c	C_u	e_{min}	e_{max}	C_c	C_u	e_{min}	e_{max}	C_c	C_u
2,00 – 3,35	0,63	0,92	0,97	1,3	0,51	0,94	0,97	1,3	0,55	0,90	0,97	1,3
3,35 – 4,75	0,64	0,93	0,97	1,2	0,52	0,95	0,97	1,2	0,56	0,91	0,97	1,2
4,75 – 6,30	0,65	0,94	0,98	1,16	0,53	0,96	0,98	1,16	0,57	0,92	0,98	1,16
6,30 – 8,00	0,66	0,95	0,98	1,13	0,54	0,97	0,98	1,13	0,58	0,93	0,98	1,13

Tablo 8. Farklı Partikül Şekillerinde ve Rölatif Sıkılıklarında Kesme Kutusu Deneyselinden Elde Edilen İçsel Sürtünme Açılı

Dane aralığı (mm)	Köşeli			Yuvarlak			Tam Yuvarlak		
	$D_r \%30$	$D_r \%50$	$D_r \%70$	$D_r \%30$	$D_r \%50$	$D_r \%70$	$D_r \%30$	$D_r \%50$	$D_r \%70$
2,00 – 3,35	34	36	39	32	35	37	33	35	39
3,35 – 4,75	35	38	41	33	37	41	35	36	41
4,75 – 6,30	36	41	44	34	39	42	37	39	44
6,30 – 8,00	37	43	47	36	42	45	38	41	46

Tablo 8 incelendiğinde, en yüksek kayma mukavemeti açısı $D_r=70\%$ rölatif sıklığa sahip ve dane çap aralığı 6,30-8,00 olan köşeli zeminlerden elde edilmiştir. Aynı rölatif sıklıkta dane çapı aralığı arttıkça kayma mukavemeti açısı da artmıştır. Ayrıca aynı çap aralığında rölatif sıklık arttıkça kayma mukavemeti açısı da artmıştır.

Model İstinat Duvarın Deney Aşamaları

Bu tez çalışmasında, istinat duvarının arkasına 3 farklı partikül şekline, 4 farklı granülometriye sahip zeminler üç farklı rölatif sıklıkta yerleştirilmiştir. Her bir dane çapı aralığı ve partikül şekli için zeminlerin maksimum ve minimum boşluk oranları belirlenmiştir. Her bir dane çapı aralığı, partikül şekli ve rölatif sıklıkta yapılan model deneylerde tankın hacminden hareketle gerekli zemin miktarı ağırlıkça belirlenmiştir. Model deneylerde zeminler tabaka tabaka serilerek istenilen rölatif sıklığa titreşim uygulayarak getirilmiş ve daha sonra yükleme deneylerine geçilmiştir. İstinat duvarının zemine uyguladığı dış kuvveti ölçmek için zemin içine üç adet itme-çekme yük hücresi yerleştirilmiş ve duvarın yatay yönde 2,00 mm/dakika sabit hızla hareketiyle pasif, 1,00 mm/dakika sabit hızla hareketiyle ise aktif zemin yanal basınçları incelenmiştir. Deney esnasında duvarın hareketi iki adet LVDT ile ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen kırılma yüzeyleri PIV yöntemiyle analiz edilmiştir. Deneylerde karşılaşılan basınç aralığının, kullanılan yük hücrelerinin sensörlerinin ölçebileceği basınçlardan daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 41).



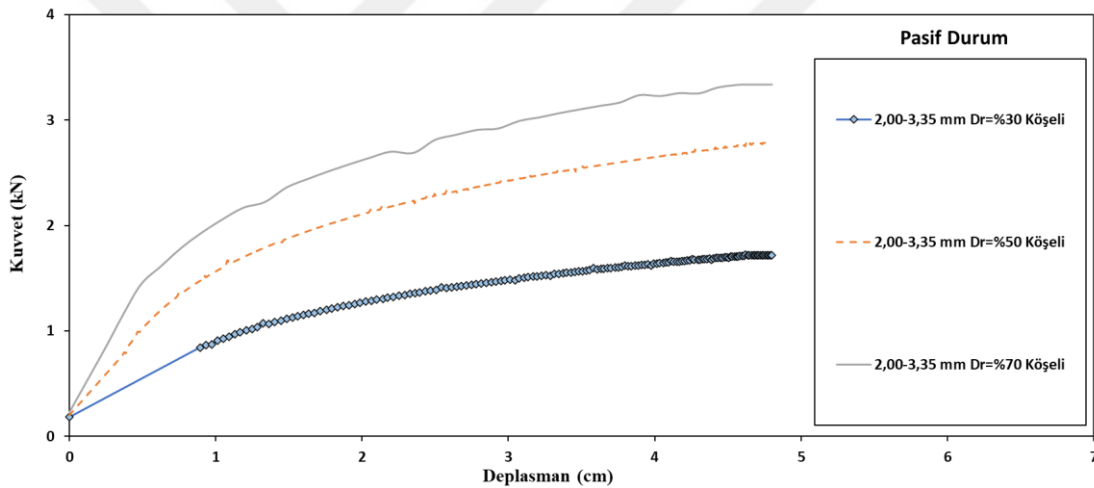
Şekil 41. Model deney sistemi

Model Yükleme Deneyleri

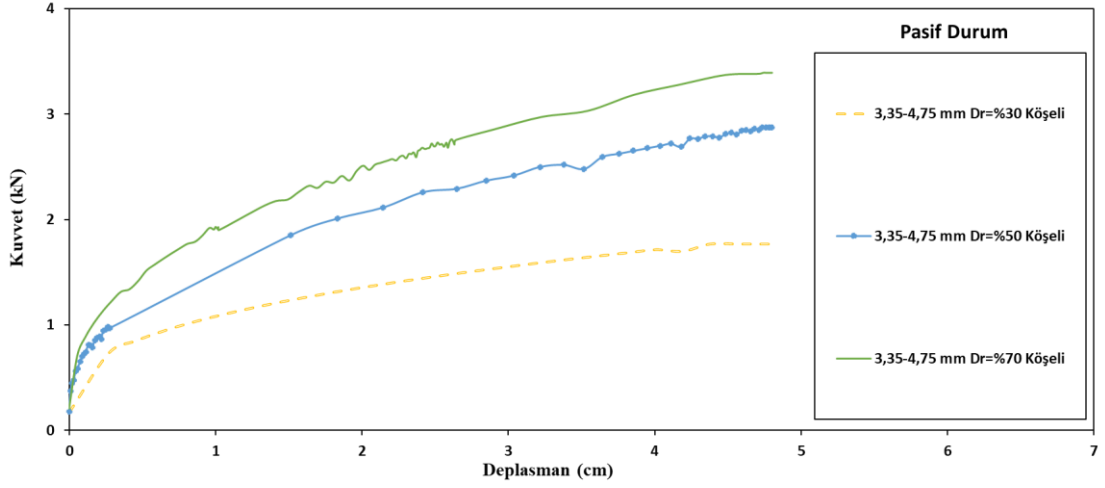
4 farklı dane çapı aralığına sahip köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak zeminler önceden belirlenen rölatif sıklıkta model tanka yerleştirilmiştir. Pasif durumda duvarın itme sabit hızı 2 mm/dakika, aktif durumda ise duvarın çekme hızı 2 mm/dakika olarak ayarlanmış ve deneyler sırasında, istinat duvarının hareketi dijital LVDT'lerle sürekli olarak ölçülmüştür. İstinat duvarının ön yüzüne H/4 ve 3H/4 mesafelerde diyagonal olarak iki adet LVDT yerleştirilmiştir.

Köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deney sonuçları

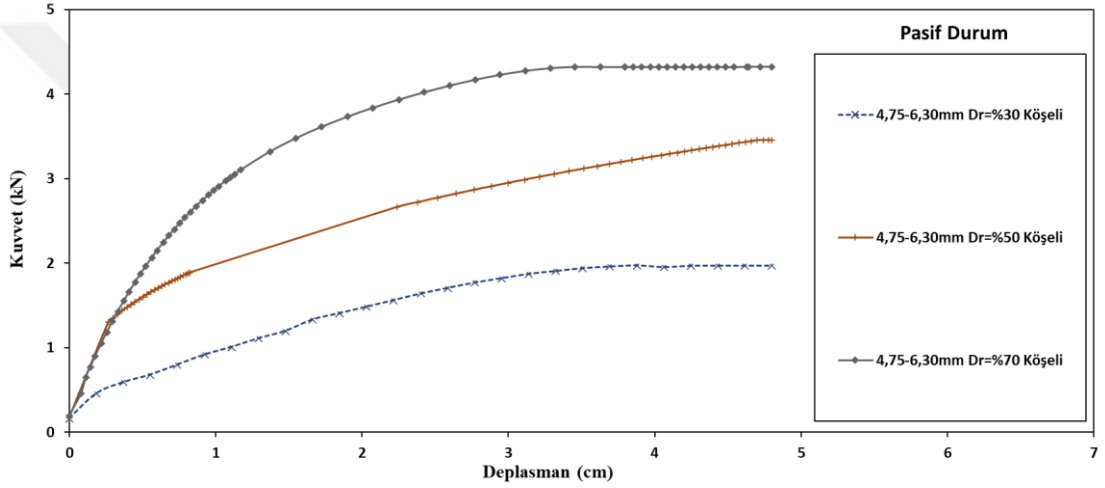
Köşeli daneli zeminlerde pasif durumda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri kullanılarak, istinat duvarının davranışı, pasif bileşke kuvvet ve pasif durumdaki deplasman miktarları belirlenmiştir. Şekil 42-45'de farklı çaplara ve rölatif sıklıklara sahip köşeli zeminlerin kuvvet-deplasman eğrileri sunulmaktadır. Deplasman artmaya devam ettiğinde kuvvetin artık artmadığı yaklaşık sabit kaldığı değer pasif bileşke kuvvet olarak alınmıştır.



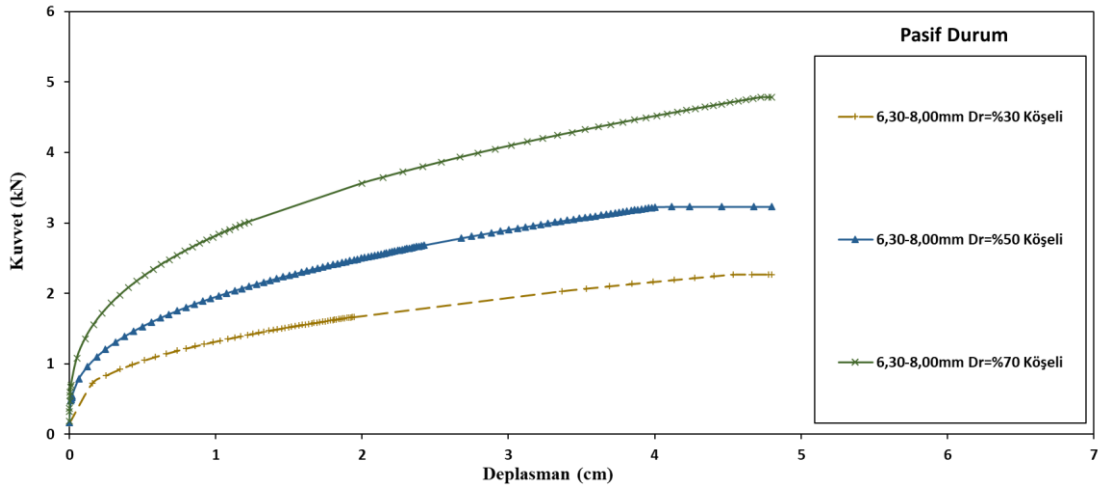
Şekil 42. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 43. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 44. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



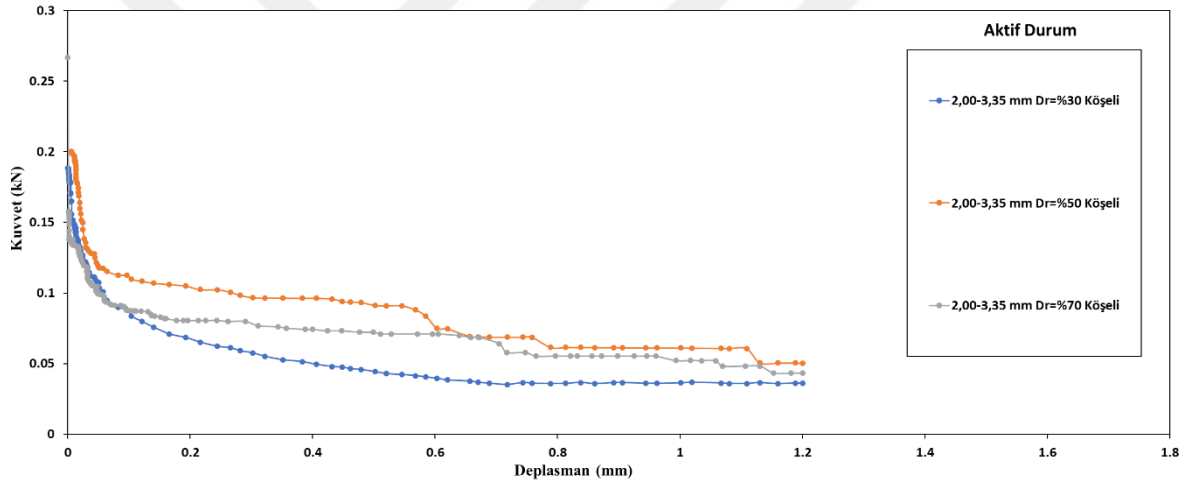
Şekil 45. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil 42-45 arasındaki grafikler incelendiğinde, istinat duvarının 2 mm/dk hızla zemine doğru itildiğinde başlangıçta kuvvetin arttığı daha sonra duvarın deplasmanının 4-5 cm

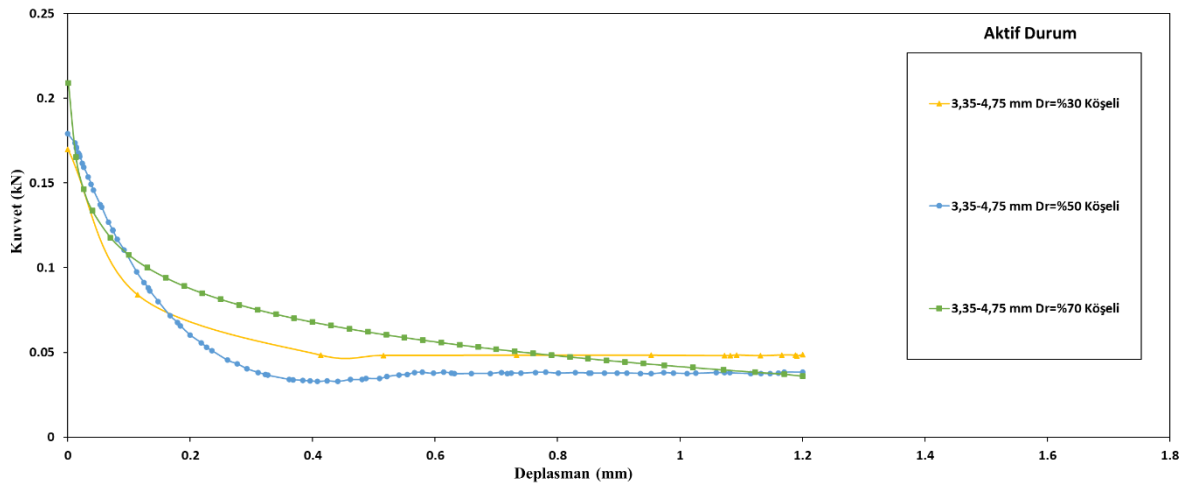
vardığında ise artık kuvvetin artmadığı yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Aynı rölatif sıklıkta köşeli daneli zeminlerde pasif durum oluşması için istinat duvarı hareket miktarının dane çapı aralığı artıkcça arttığı görülmüştür. Köşeli zeminlerde dane çapı ve rölatif sıklık artıkcça pasif kuvvetin arttığı belirlenmiştir. Köşeli zeminlerde şekilsel özelliklerden dolayı pasif kuvvetin tam olarak sabit kalmadığı duvar hareketi devam ettikçe pasif kuvvetin çok yavaş bir hızla arttığı belirlenmiştir.

Köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deney sonuçları

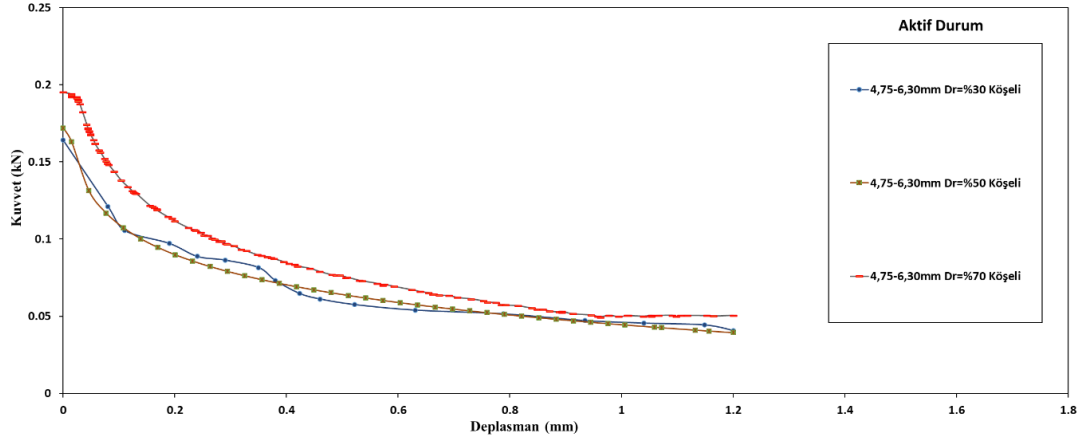
Köşeli daneli zeminlerde aktif durumda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri kullanılarak, istinat duvarının davranışı, aktif bileşke kuvvet ve aktif durumdaki deplasman miktarları belirlenmiştir. Şekil 46-49'da farklı çaplara ve rölatif sıklıklara sahip köşeli zeminlerin kuvvet-deplasman eğrileri sunulmaktadır. Deplasman artmaya devam ettiğinde kuvvetin artık azalmadığı yaklaşık sabit kaldığı değer aktif bileşke kuvvet olarak alınmıştır.



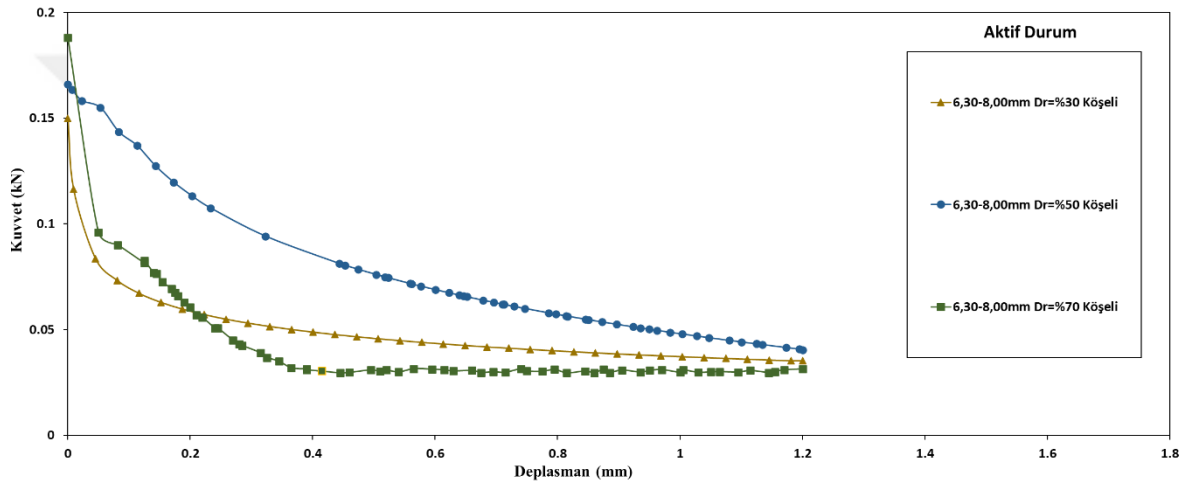
Şekil 46. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 47. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 48. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

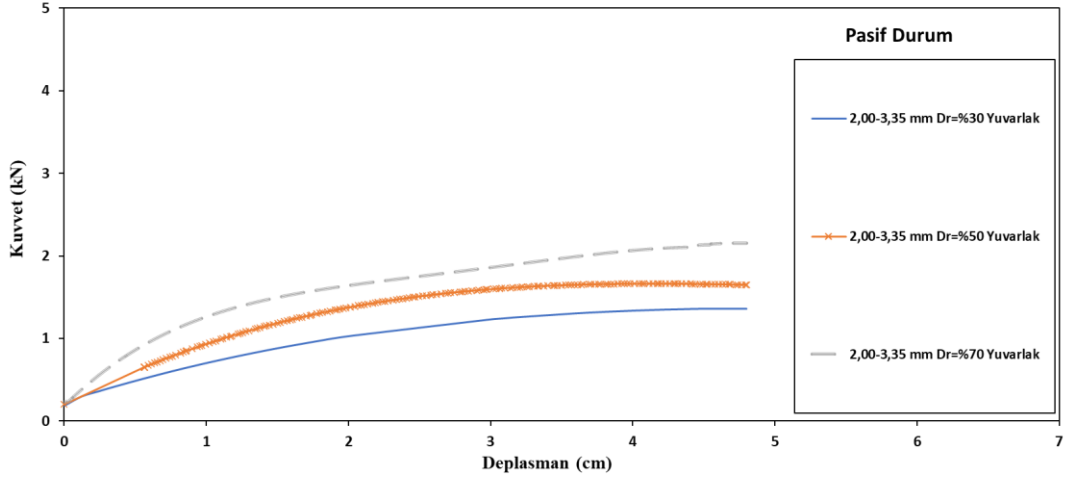


Şekil 49. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

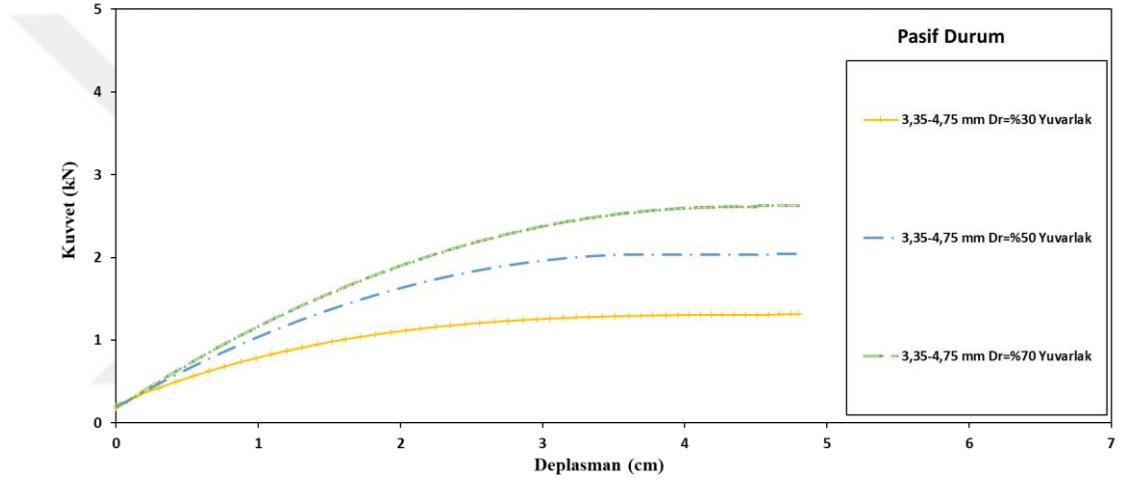
Şekil 46-49 arasındaki grafikler incelendiğinde, istinat duvarının 1 mm/dk hızla zeminden uzağa doğru çekildiğinde başlangıçta kuvvetin azaldığı daha sonra duvarın deplasmanın yaklaşık 1 cm vardığında ise artık kuvvetin azalmadığı yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Köşeli zeminlerde rölatif sıkılık arttıkça aktif kuvvetin azaldığı belirlenmiştir.

Yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deney sonuçları

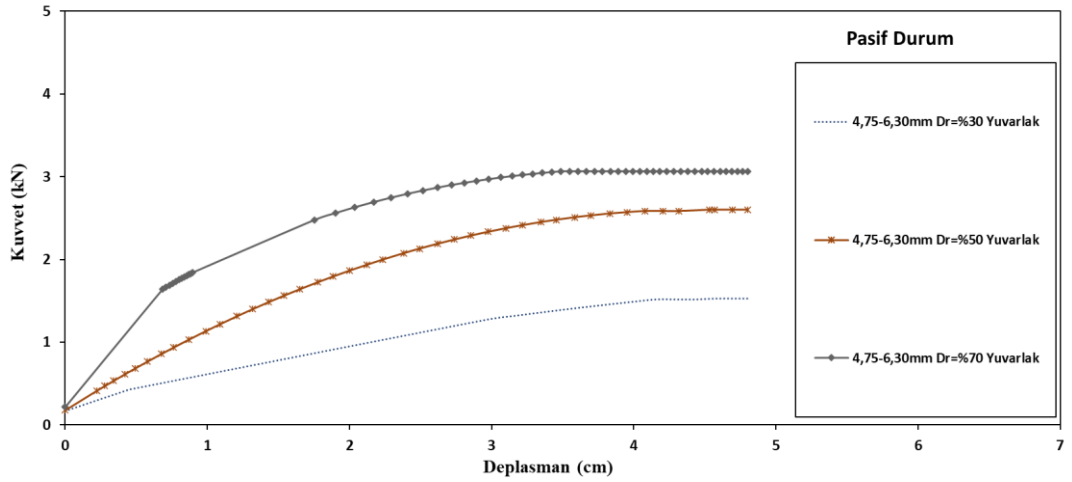
Yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri kullanılarak, istinat duvarının davranışı, pasif bileşke kuvvet ve pasif durumdaki deplasman miktarları belirlenmiştir. Şekil 50-53'de farklı çaplara ve rölatif sıkılıklara sahip yuvarlak daneli zeminlerin kuvvet-deplasman eğrileri sunulmaktadır. Deplasman artmaya devam ettiğinde kuvvetin artık artmadığı yaklaşık sabit kaldığı değer pasif bileşke kuvvet olarak alınmıştır.



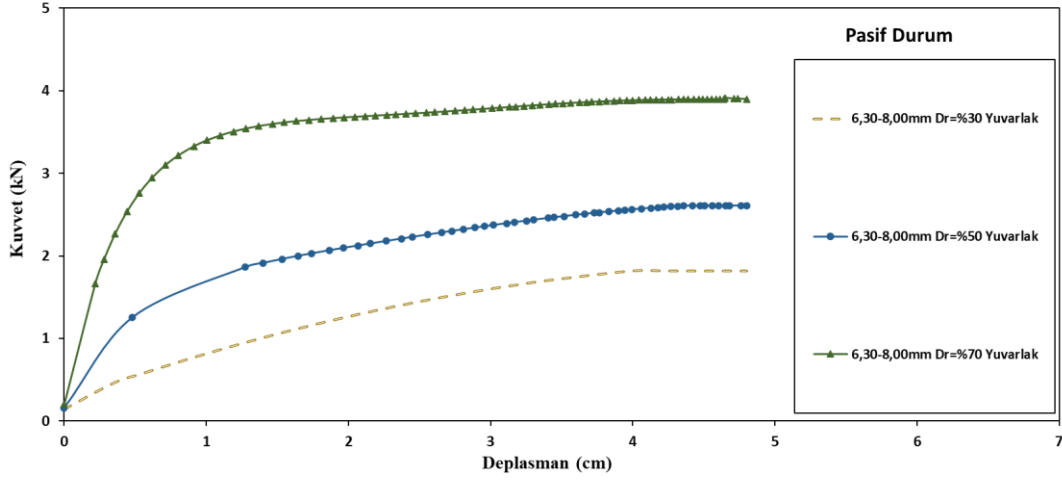
Şekil 50. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 51. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 52. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

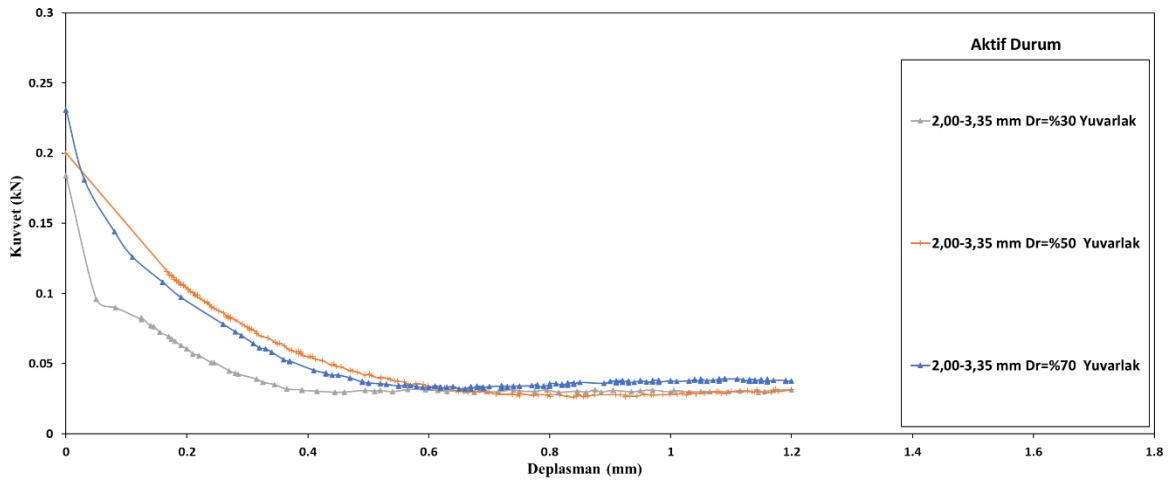


Şekil 53. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

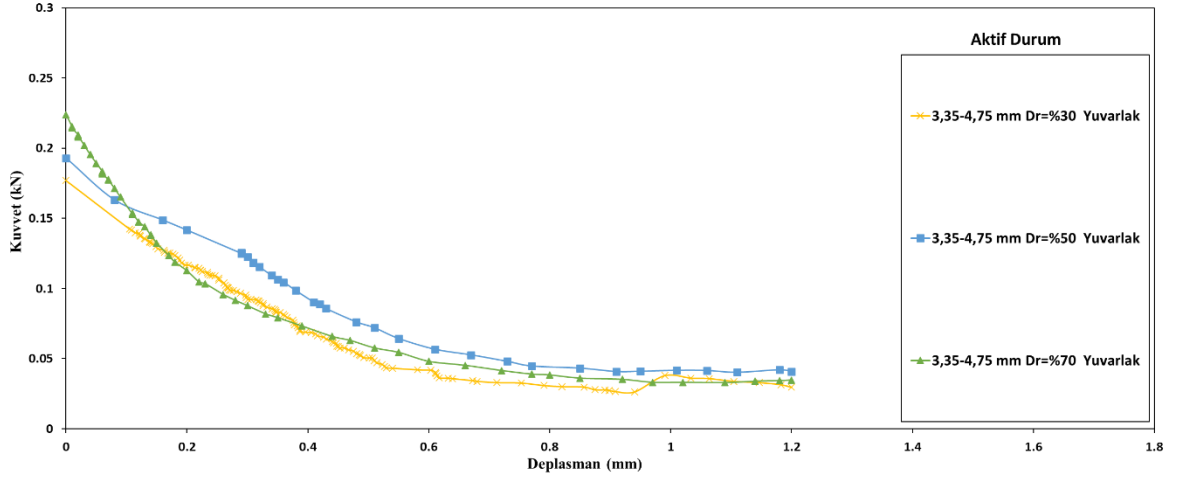
Şekil 50-53 arasındaki grafikler incelendiğinde, istinat duvarının 2 mm/dk hızla zemine doğru itildiğinde başlangıçta kuvvetin arttığı daha sonra duvarın deplasmanının yaklaşık 4 cm'ye vardığında ise artık kuvvetin artmadığı yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Yuvarlak zeminlerde dane çapı ve rölatif sıkılık arttıkça pasif kuvvetin arttığı belirlenmiştir.

Yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deney sonuçları

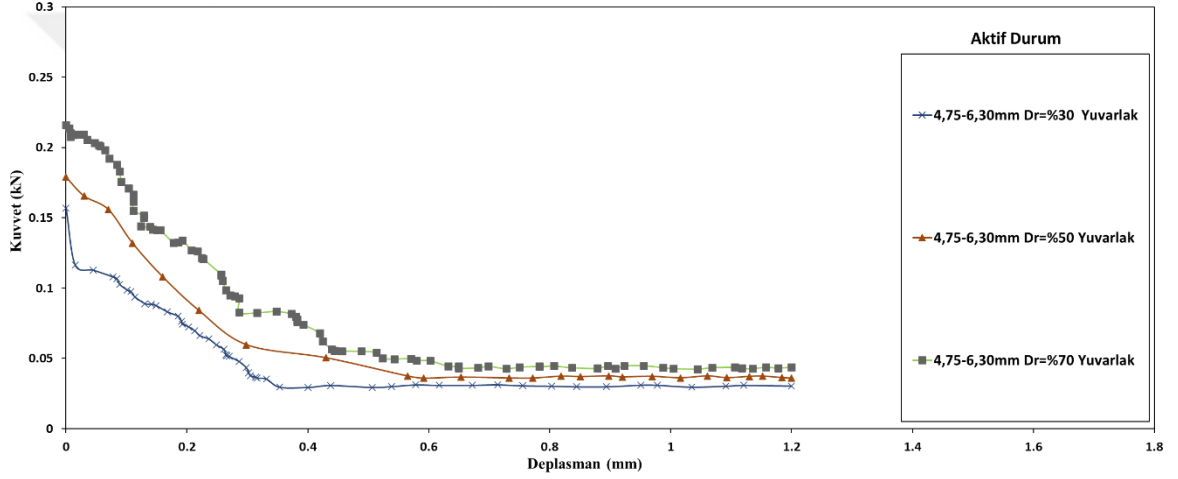
Yuvarlak daneli zeminlerde aktif durumda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri kullanılarak, istinat duvarının davranışı, aktif bileşke kuvvet ve aktif durumdaki deplasman miktarları belirlenmiştir. Şekil 54-57'de farklı çaplara ve rölatif sıkılıklara sahip yuvarlak zeminlerin kuvvet-deplasman eğrileri sunulmaktadır. Deplasman artmaya devam ettiğinde kuvvetin artık azalmadığı yaklaşık sabit kaldığı değer aktif bileşke kuvvet olarak alınmıştır.



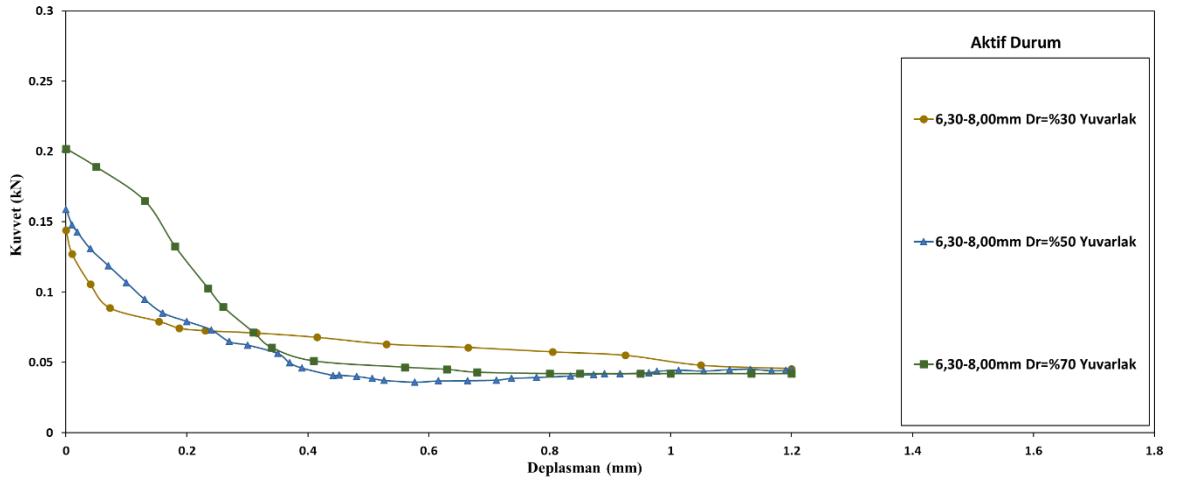
Şekil 54. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 55. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 56. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



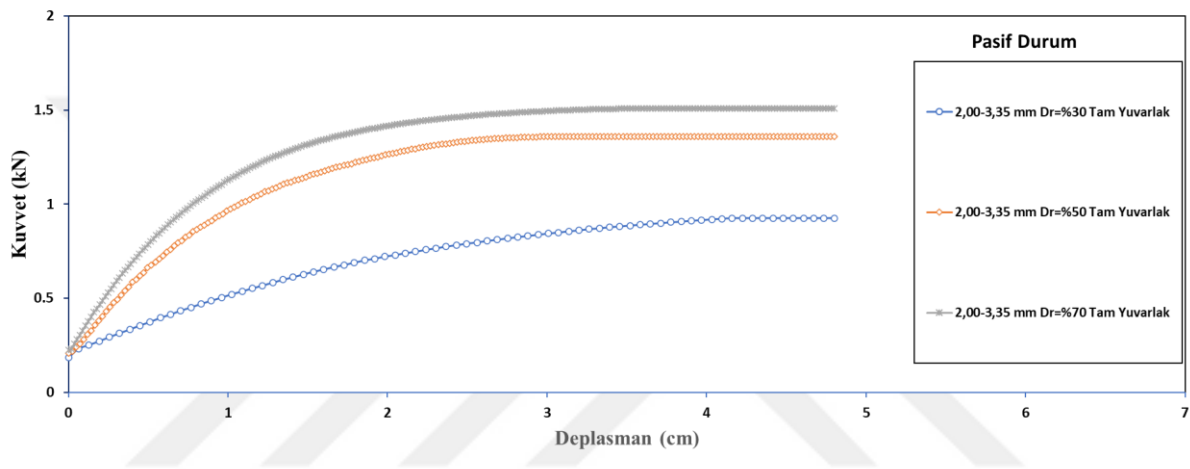
Şekil 57. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil 54-57 arasındaki grafikler incelendiğinde, istinat duvarının 1 mm/dk hızla zeminden uzağa doğru çekildiğinde başlangıçta kuvvetin azaldığı daha sonra duvarın

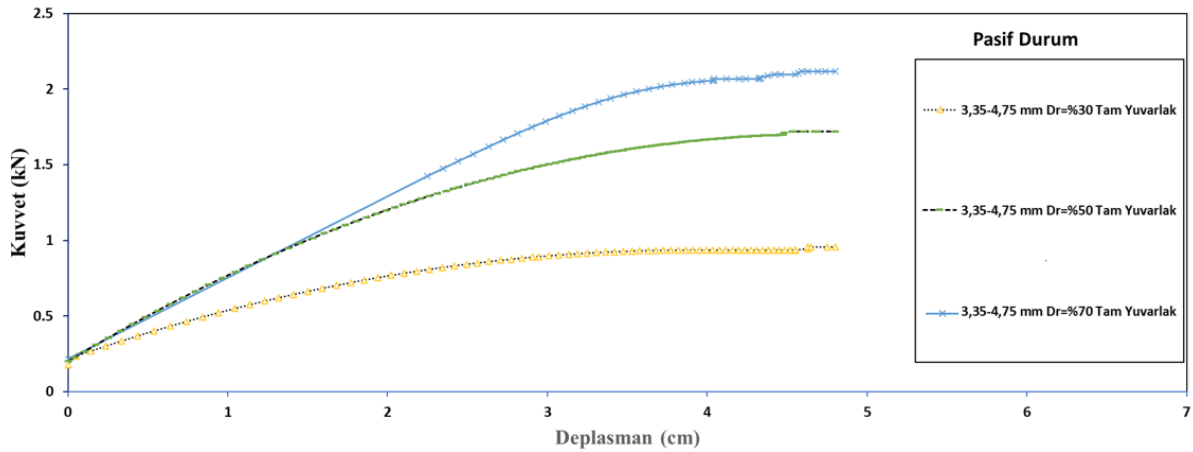
deplasmanın yaklaşık 1 cm vardığında ise artık kuvvetin azalmadığı yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Yuvarlak zeminlerde rölatif sıklık artıkça aktif kuvvetin azaldığı belirlenmiştir.

Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deney sonuçları

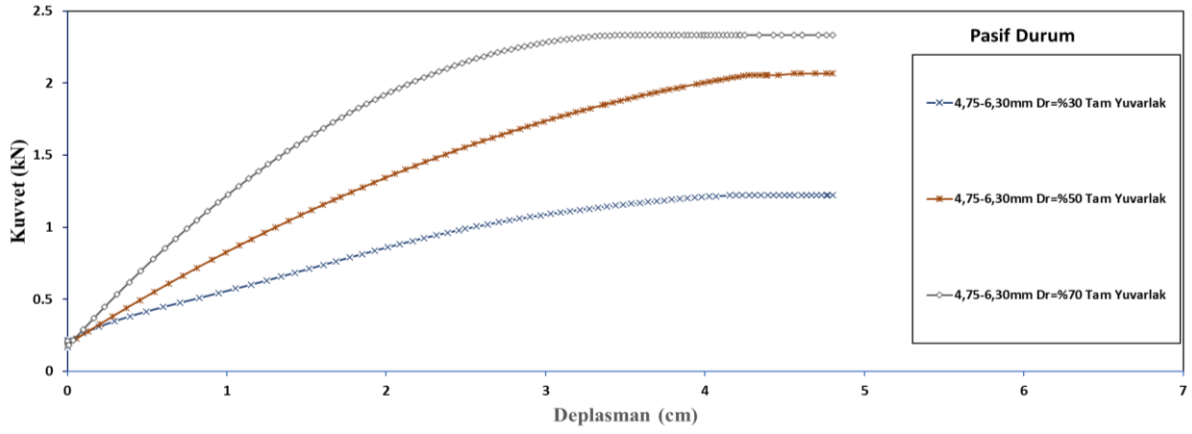
Tam yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri kullanılarak, istinat duvarının davranışı, pasif bileşke kuvvet ve pasif durumdaki deplasman miktarları belirlenmiştir. Şekil 58-61'de farklı çaplara ve rölatif sıklıklara sahip tam yuvarlak daneli zeminlerin kuvvet-deplasman eğrileri sunulmaktadır. Deplasman artmaya devam ettiğinde kuvvetin artık artmadığı yaklaşık sabit kaldığı değer pasif bileşke kuvvet olarak alınmıştır.



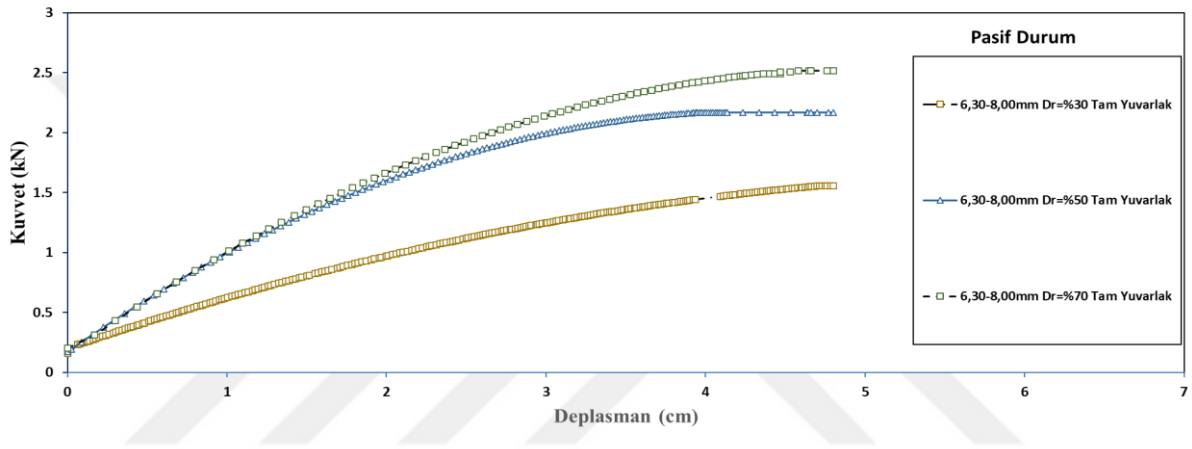
Şekil 58. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 59. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 60. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

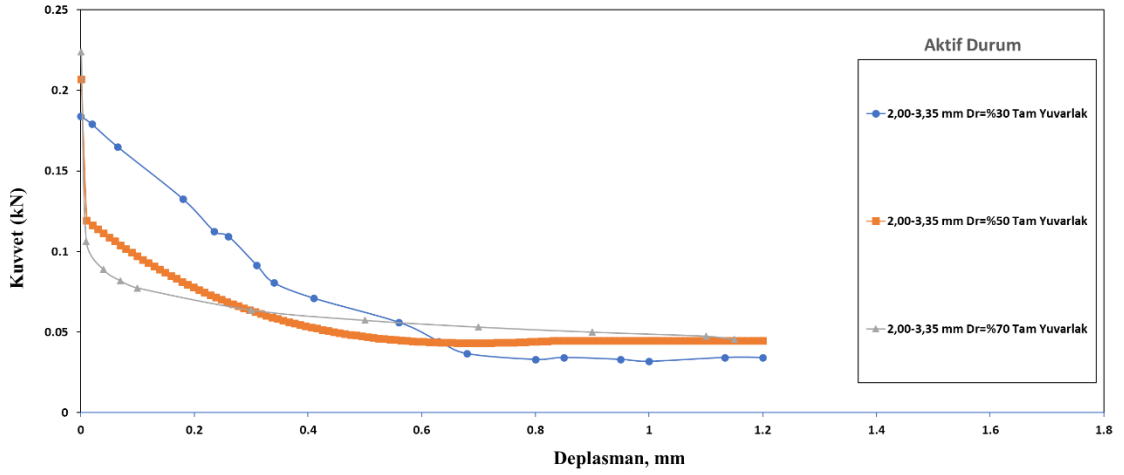


Şekil 61. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

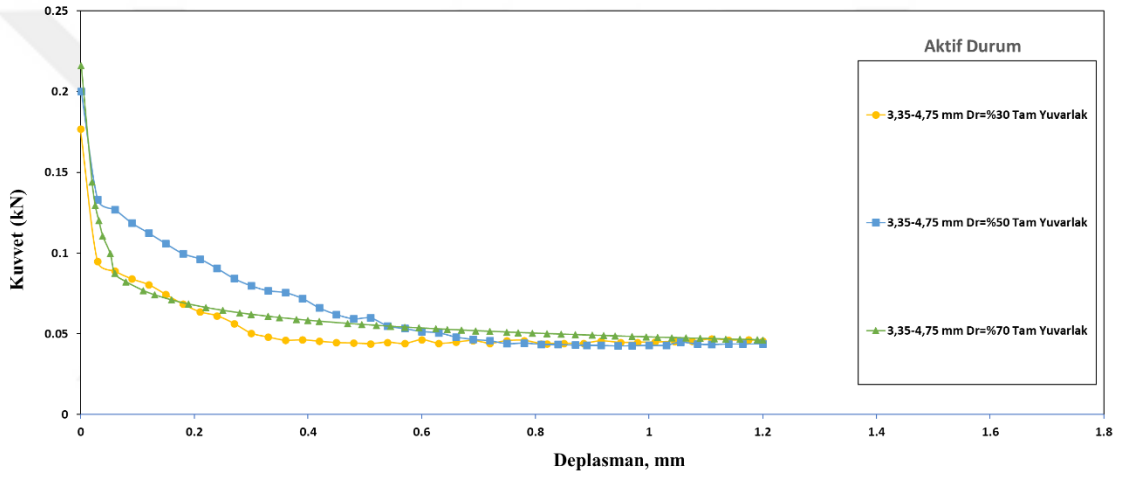
Şekil 58-61 arasındaki grafikler incelendiğinde, istinat duvarının 2 mm/dk hızla zemine doğru itildiğinde başlangıçta kuvvetin arttığı daha sonra duvarın deplasmanının yaklaşık 4 cm'ye vardığında ise artık kuvvetin artmadığı yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Tam yuvarlak zeminlerde dane çapı ve rölatif sıklık arttıkça pasif kuvvetin arttığı belirlenmiştir. Bütün rölatif sıklıklarda en yüksek pasif kuvvetin $D_r = \%70$ rölatif sıklıkta ve köşeli daneli zeminlerde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, aynı rölatif sıklık ve şekilsel özelliklere sahip zeminde dane çapı arttıkça pasif itkinin de arttığı görülmüştür.

Tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deney sonuçları

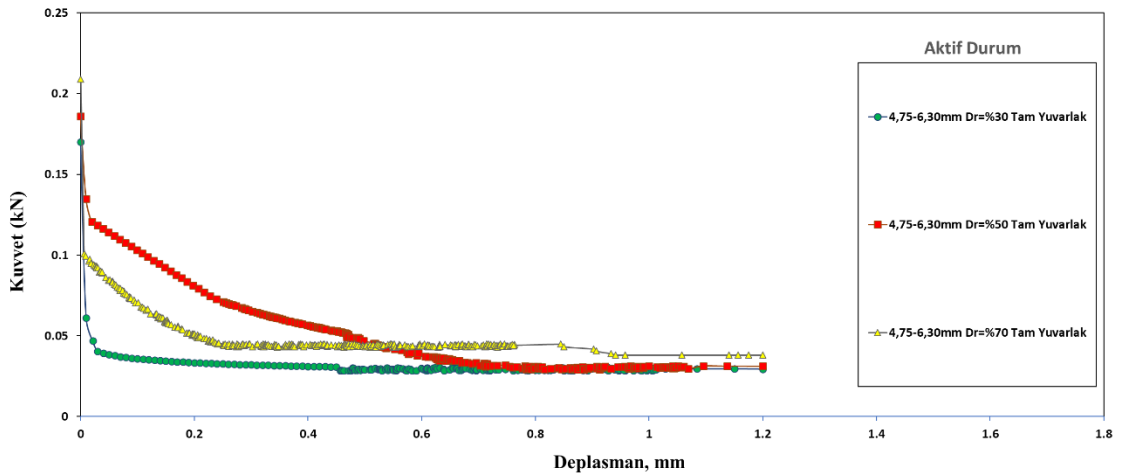
Yuvarlak daneli zeminlerde aktif durumda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri kullanılarak, istinat duvarının davranışı, aktif bileşke kuvvet ve aktif durumdaki deplasman miktarları belirlenmiştir. Şekil 62-65'de farklı çaplara ve rölatif sıklıklara sahip yuvarlak zeminlerin kuvvet-deplasman eğrileri sunulmaktadır. Deplasman artmaya devam ettiğinde kuvvetin artık azalmadığı yaklaşık sabit kaldığı değer aktif bileşke kuvvet olarak alınmıştır.



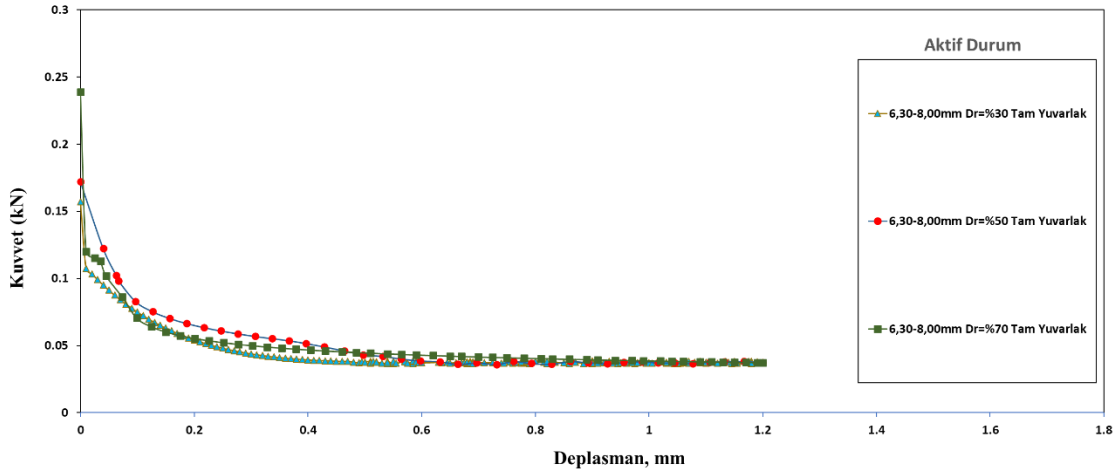
Şekil 62. Dane çapı aralığı 2,00-3,35 mm olan tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 63. Dane çapı aralığı 3,35-4,75 mm olan tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 64. Dane çapı aralığı 4,75-6,30 mm olan tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



Şekil 65. Dane çapı aralığı 6,30-8,00 mm olan köşeli zeminlerde aktif durumda model yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

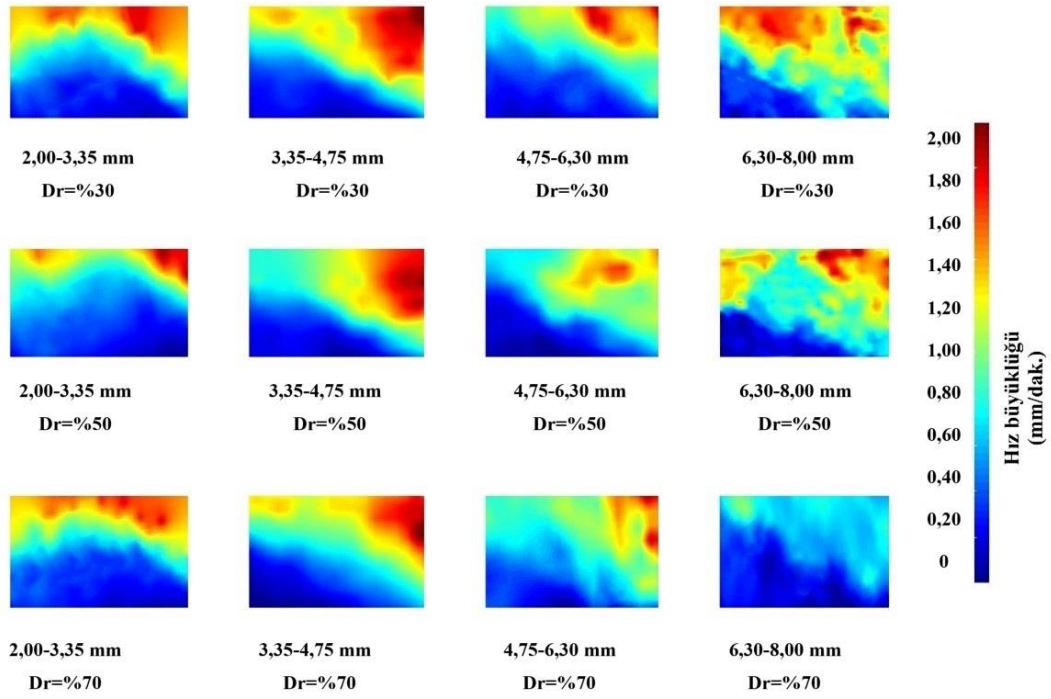
Şekil 62-65 arasındaki grafikler incelendiğinde, istinat duvarının 1 mm/dk hızla zeminden uzağa doğru çekildiğinde başlangıçta kuvvetin azaldığı daha sonra duvarın deplasmanının yaklaşık 1 cm vardığında ise artık kuvvetin azalmadığı yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Yuvarlak zeminlerde rölatif sıklık artıka aktif kuvvetin azaldığı belirlenmiştir.

PIVlab Yazılımı ile Model İstinat Duvarının Arkasındaki Zeminlerin Yer Değiştirmeleri

4 farklı granülometriye sahip köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak zeminler üç farklı rölatif sıklıkta model tanka yerleştirilmiş aktif ve pasif durumlar incelenmiştir. Deneyler sırasında 30 saniyede bir fotoğraf çekilmiş ve PIVlab yazılımı kullanılarak aktif ve pasif durumda zeminlerde oluşan yer değiştirmeler gözlenmiş ve aşağıda verilmiştir.

Köşeli zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler

Köşeli zeminlerde pasif durumda duvarın arkasındaki zeminlerde oluşan yer değiştirmeler Şekil 66' da ve kayma yüzeylerinden hareketle elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 9'da verilmiştir.



Şekil 66. Köşeli zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)

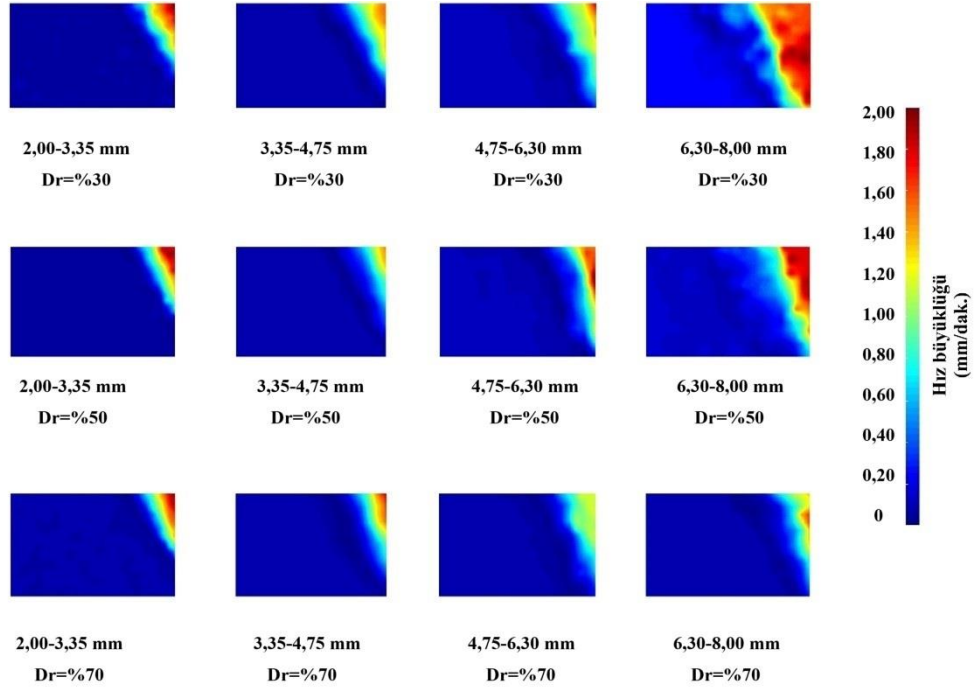
Tablo 9. Köşeli Zeminlerde Pasif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açıları (PIV)

Dane aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
D_r %30	34°	36°	38°	39°
D_r %50	38°	41°	42°	43°
D_r %70	41°	43°	44°	46°

Tablo 9 incelendiğinde, köşeli zeminlerde pasif durumunda dane boyutu ve rölatif sıklık arttıkça kayma mukavemeti açılarında artış gözlenmiştir. Köşeli zeminlerde pasif durumda en yüksek kayma mukavemeti açısı, %70 rölatif sıklığa sahip 6,30-8,00 mm dane aralığındaki zeminlerde, en düşük kayma mukavemeti açısı ise %30 rölatif sıklığa sahip 2,00-3,35 mm dane aralığındaki zeminlerde tespit edilmiştir. Dane çapı arttıkça yer değiştirme alanının büyüdüğü gözlenmiştir.

Köşeli zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler

Köşeli zeminlerde aktif durumda duvarın arkasındaki zeminlerde oluşan yer değiştirmeler Şekil 67' de ve kayma yüzeylerinden hareketle elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 67. Köşeli zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)

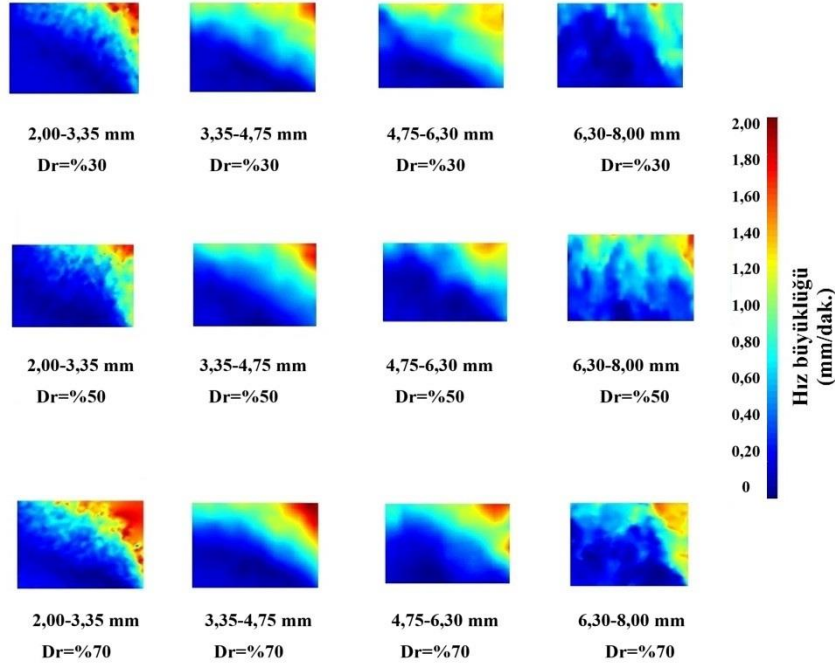
Tablo 10. Köşeli Zeminlerde Aktif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılıları (PIV)

Dane Aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
$D_r \%30$	32°	34°	35°	36°
$D_r \%50$	34°	39°	41°	42°
$D_r \%70$	36°	42°	44°	45°

Tablo 10'a göre, aktif durumda köşeli zeminlerde dane boyutu ve rölatif sıklık arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı gözlemlenmiştir. Köşeli zeminlerde aktif durumda en yüksek kayma mukavemeti açısı, %70 rölatif sıklığa sahip 6,30-8,00 mm dane çapı aralığındaki zeminlerde, en düşük kayma mukavemeti açısı ise %30 rölatif sıklığa sahip 2,00-3,35 mm dane çapı aralığındaki zeminlerde tespit edilmiştir. Aynı rölatif sıklıkta dane çapı arttıkça yer değiştirmelerin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca aynı dane çapında rölatif sıklık arttıkça yer değiştirme alanının azaldığı görülmüştür.

Yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler

Yuvarlak zeminlerde pasif durumda duvarın arkasındaki zeminlerde oluşan yer değiştirmeler Şekil 68'de ve kayma yüzeylerinden hareketle elde edilen kayma mukavemeti açılıları Tablo 11'de verilmiştir. Deneyler, duvarın itme etkisi altında oluşan pasif duruma göre kayma mukavemeti açılıları ve kırılma yüzeylerini incelemek üzere gerçekleştirilmiştir.



Şekil 68. Yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)

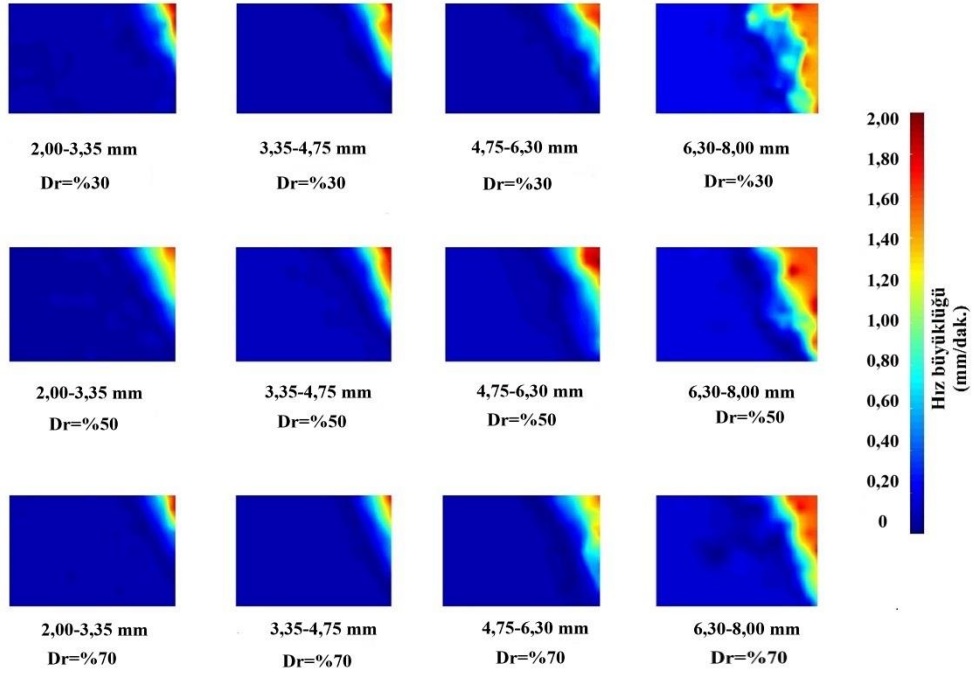
Tablo 11. Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılıları (PIV)

Dane Aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
D_r %30	33°	34°	35°	37°
D_r %50	37°	39°	41°	44°
D_r %70	41°	42°	45°	47°

Tablo 11 incelendiğinde, yuvarlak zeminlerde pasif durumunda dane boyutu ve rölatif sıklık arttıkça kayma mukavemeti açılarında artış meydana gelmiştir. Yuvarlak zeminlerde pasif durumda en yüksek kayma mukavemeti açısı, %70 rölatif sıklığa sahip 6,30-8,00 mm dane aralığındaki zeminlerden (47°), en düşük kayma mukavemeti açısı ise %30 rölatif sıklığa sahip 2,00-3,35 mm dane aralığındaki zeminlerden (33°) elde edilmiştir. Dane çapı arttıkça yer değiştirme alanının büyüdüğü gözlenmiştir.

Yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler

Yuvarlak zeminlerde aktif durumda duvarın arkasındaki zeminlerde oluşan yer değiştirmeler Şekil 69' de ve kayma yüzeylerinden hareketle elde edilen kayma mukavemeti açılıları Tablo 12'de verilmiştir. Bu çalışmalarda, duvarın çekme etkisi altında oluşan aktif duruma göre kayma mukavemeti açılıları hesaplanmış ve kayma yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 69. Yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)

Tablo 12. Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılırları (PIV)

Dane aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
D_r %30	31°	32°	33°	35°
D_r %50	34°	36°	37°	38°
D_r %70	36°	38°	39°	42°

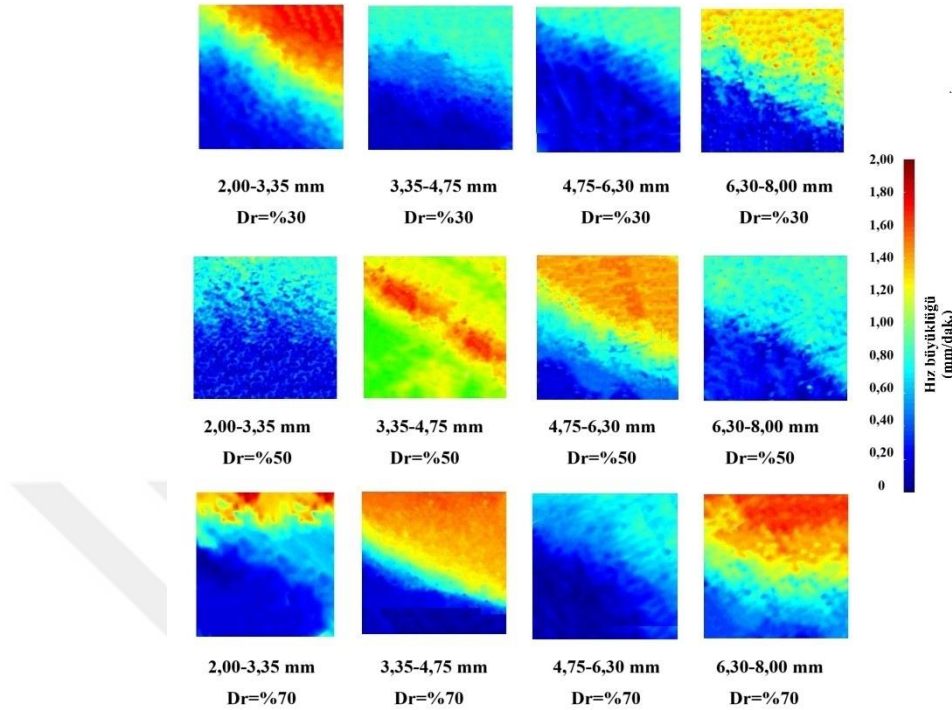
Tablo 12 incelendiğinde, aktif durumda yuvarlak zeminlerde dane boyutu ve rölatif sıklığın artmasıyla kayma mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Maksimum ve minimum kayma mukavemeti açıları sırasıyla, %70 rölatif sıklığa sahip 6,30-8,00 mm ve %30 rölatif sıklığa sahip 2,00-3,35 mm dane çapı aralığındaki zeminlerden elde edilmiştir. Ayrıca aynı dane çapı aralığında rölatif sıklık arttıkça yer değiştirme alanının azaldığı belirlenmiştir. Aynı rölatif sıklıkta dane çapı arttıkça yer değiştirme alanının arttığı gözlenmiştir.

Yuvarlak zeminlerde aktif ve pasif durumda kayma yüzeylerinden hareketle elde edilen kayma mukavemeti açıları karşılaştırıldığında, pasif durumda elde edilen kayma mukavemeti açıları aktif durumda elde edilenden birkaç derece daha büyük çıkmıştır.

Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler

Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda duvarın arkasındaki zeminlerde oluşan yer değiştirmeler Şekil 70'de ve kayma yüzeylerinden hareketle elde edilen kayma mukavemeti

açıları Tablo 13’de verilmiştir. Deneyler, duvarın itme etkisi altında oluşan pasif duruma göre kayma mukavemeti açıları ve kırılma yüzeylerini incelemek üzere gerçekleştirilmiştir.



Şekil 70. Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)

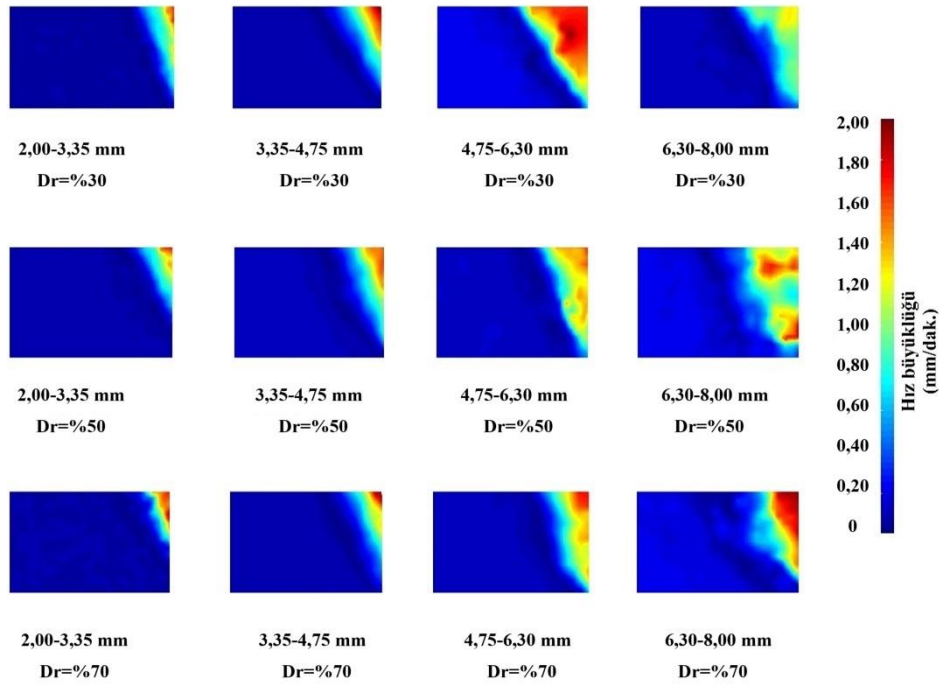
Tablo 13. Tam Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılıları (PIV)

Dane Aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
$D_r \ 30\%$	34°	35°	36°	37°
$D_r \ 50\%$	37°	38°	40°	42°
$D_r \ 70\%$	41°	42°	43°	45°

Tablo 13 incelendiğinde, tam yuvarlak zeminde pasif durumda dane çapı ve rölatif sıklılığın artmasıyla birlikte, kayma mukavemeti açısının da arttığı gözlenmiştir. Maksimum ve minimum kayma mukavemeti açıları sırasıyla, %70 rölatif sıklılığa sahip 6,30-8,00 mm ve %30 rölatif sıklılığa sahip 2,00-3,35 mm dane çapı aralığındaki zeminlerden elde edilmiştir.

Tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler

Tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda duvarın arkasındaki zeminlerde oluşan yer değiştirmeler Şekil 71’ de ve kayma yüzeylerinden hareketle elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 14’de verilmiştir. Bu çalışmalarda, duvarın çekme etkisi altında oluşan aktif duruma göre kayma mukavemeti açıları hesaplanmış ve kayma yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 71. Tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda oluşan yer değiştirmeler (PIV)

Tablo 14. Tam Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda Kayma Yüzeylerinden Hareketle Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açıları (PIV)

Dane Aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
D_r %30	32°	34°	35°	36°
D_r %50	34°	37°	38°	40°
D_r %70	37°	39°	42°	43°

Tablo 14 incelendiğinde, aktif zemin koşullarında dane boyutu ve rölatif sıklığın artmasıyla birlikte, kayma mukavemeti açısından bir artış görülmüştür. Maksimum ve minimum iç sürtünme açıları sırasıyla, %70 rölatif sıklığa sahip 6,30-8,00 mm ve %30 rölatif sıklığa sahip 2,00-3,35 mm dane aralığındaki zeminlerden elde edilmiştir. Şekil 71’den dane çapı artıkça yer değiştirme alanının arttığı görülmektedir.

Dört farklı dane çapı aralığına sahip köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak zeminler model tanka üç farklı rölatif sıklıkta yerleştirilmiş ve model deneyler yapılarak aktif ve pasif durumlar incelenmiştir. Deneyler süresince fotoğraflar çekilmiş ve PIVlab yazılımı kullanılarak yer değiştirmeler belirlenmiş ve kayma yüzeylerinden hareketle kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Yapılan PIV analizleri sonucunda zeminin köşeliden tam yuvarlağa doğru gittikçe kayma mukavemeti açılarının azaldığı ve rölatif sıklık arttıkça da kayma mukavemeti açılarının arttığı gözlenmiştir. Bunun köşeli daneler arasındaki pürüzlülüğün ve sürtünme alanının yuvarlak ve tam yuvarlak danelerden daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca dane çapları büyüdükçe yer değiştirme alanları da büyümektedir.

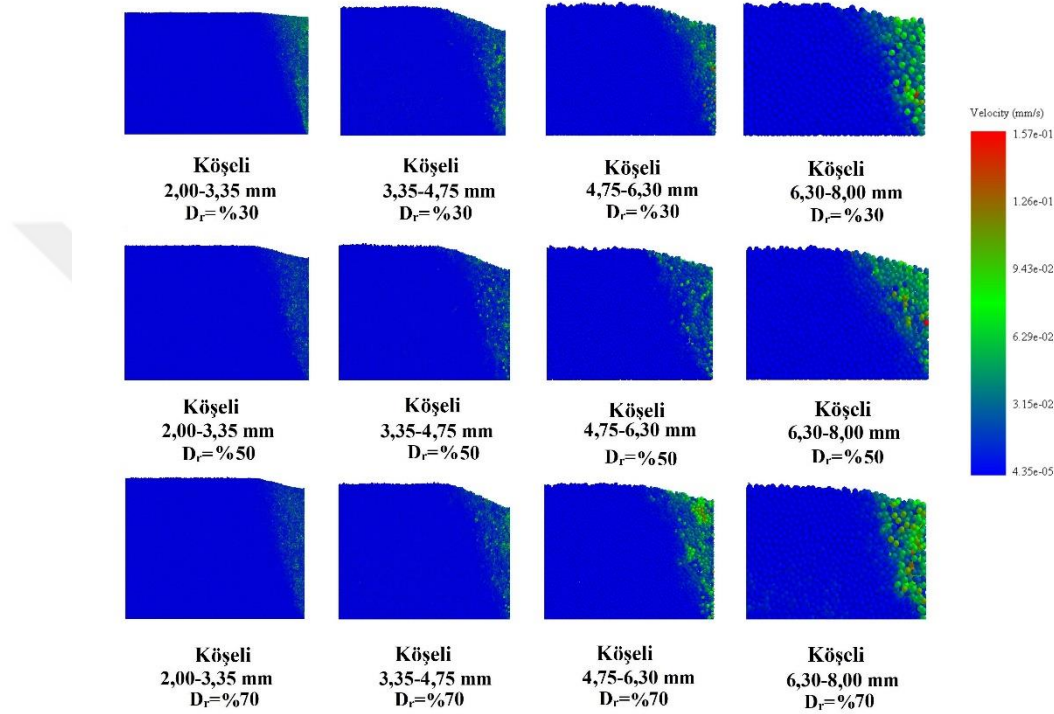
Model Deneilerin DEM ile Modellenmesi

Altair EDEM yazılımı (akademik versiyon) kullanılarak, aktif ve pasif zemin basınç dağılımları ile rijit duvarın arkasındaki dane akışı modellenerek analiz edilmiştir. Tüm modellemeler için, hesaplama hızı ile doğruluk arasında denge sağlamak için kritik zaman adımının %30'u oranında bir zaman adımı çarpanı kullanılmıştır. Bu çalışmada, kayma mukavemeti açısı, rölatif sıklık, dane boyutu ve şeklinin aktif ve pasif zemin basınç dağılımları üzerindeki etkisi araştırılmış ve DEM simülasyonu ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. DEM simülasyonları, gerçek daneli malzemelerin davranışını düzensiz dane şekilleri nedeniyle doğru bir şekilde tahmin etme yeteneğinden yoksundur. Ancak, gerçek dane şeklinin modellenmesi, küresel danelere göre yaklaşık 3 ila 5 kat daha yavaş bir hesaplama süresi gerektirir. Böylece, simülasyon sonuçları, uygun üç boyutlu küresel dane modelinin düzensiz dane şekillerini gerçekçi bir şekilde tahmin edebileceğini göstermiştir. Sayısal simülasyonların daha gerçekçi, doğru ve verimli sonuçlar elde etmesi için ilk girdi parametreleri gerçek dane parametrelerine yakın olmalıdır. Dane özelliklerini DEM giriş parametrelerine yansıtan literatürde iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar doğrudan ölçüm ve kalibrasyon yaklaşımıdır. Köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak dört dane çapı aralığına sahip zeminler DEM ile modellenmiştir. Restitüsyon, statik ve yuvarlanma sürtünme katsayıları, bir dizi eğimli düz atış, dane kayma deney sistemi ve kesme kutusu deneyleri kullanılarak belirlenmiştir. Danelerin davranışı, kumun kayma mukavemeti açısı üzerinde doğrudan etkisi olan statik sürtünme katsayısı ve yuvarlanma sürtünmesi katsayısı parametreleri tarafından kontrol edilir. Danelerin etkileşim özellikleri, danelerin hareketi üzerinde en büyük etkiye sahiptir ve bu parametrelerin belirlenmesi kolay değildir. Bu parametrelerin çeşitli simülasyonlara dayalı olarak belirlenmesi gerekir. Granüler daneler arasındaki sürtünme katsayısı, kesme kutusu deneyleri ile elde edilmiştir. Gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusal kısmının eğimi dikkate alınarak daneli malzemelerin Young modülü ölçülmüş ve Poisson oranı literatürdeki ilgili veriler sorgulanarak elde edilmiştir. Her simülasyon için hesaplama süresini azaltmak için, gerçek malzemelere yakın temas parametreler, çap ve özelliklerine sahip olan üç boyutlu küresel daneler seçilmiştir. Kritik zaman adımı, Young modülünün karekökü ile ters orantılı olduğundan, ilk kayma modülü 102 kat azaltılmış ve kapsamlı modellemeler, bu hızlandırma yönteminin kütle yoğunluğu ve sürtünme üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını kanıtlamıştır. DEM modellenmesi, doldurma ve yükleme olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Modellenen tankın boyutları (180 cm × 60 cm × 20 cm) uygun miktarda rastgele o üç boyutlu küresel daneler ile doldurulmuştur. Danelerin yerleştirilmesinden sonra, istinat duvarı aktif zemin basınç modunda 1 mm/dak, pasif zemin basınç modunda ise 2 mm/dak sabit hızla hareket ettirilmiştir.

kayma mukavemeti açısının $D_r = \%70$ rölaf sıklıkta hazırlanmış 6,30-8,00 mm dane çapı aralığına sahip zeminlerden elde edilmiştir.

Köşeli zeminlerde aktif durumda DEM simülasyon sonuçları

İstinat duvarının arkasındaki köşeli daneli zeminlerde pasif durumda oluşan hız alanları Şekil 73’de ve elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 16’da verilmiştir. Duvarın çekme etkisiyle oluşturulan aktif duruma göre içsel sürtünme açıları ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 73. DEM simülasyonu ile köşeli zeminlerde aktif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları

Tablo 16. Köşeli Zeminlerde Aktif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açıları

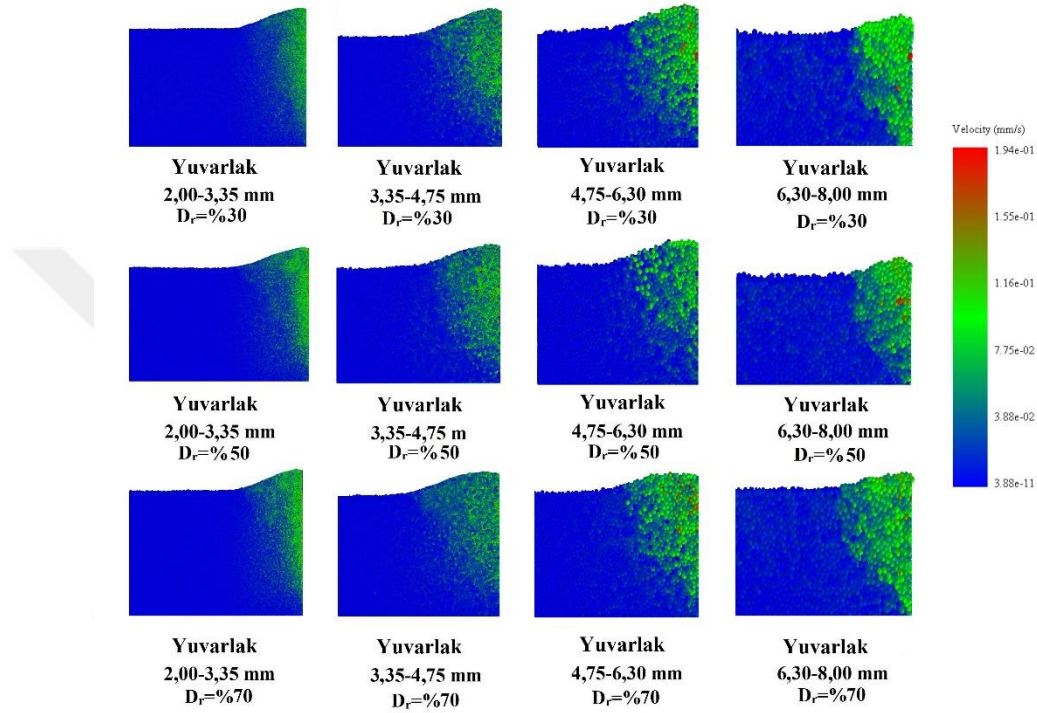
Dane aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
$D_r \%30$	33°	34°	36°	38°
$D_r \%50$	36°	37°	38°	41°
$D_r \%70$	37°	39°	41°	43°

Şekil 73 incelendiğinde, köşeli zeminlerde aktif durumda küçük dane çaplarına sahip zeminlerde hızların çok az olduğu dane çapı arttıkça hızlarında arttığı görülmektedir. Dane çapı ve arttıkça yer değiştirmelerin arttığı rölaf sıklık arttıkça yer değiştirmelerin azaldığı belirlenmiştir. Aktif durumda istinat duvarının arkasındaki zemin istinat duvarı ile birlikte hareket ettiği DEM simülasyonlarında görülmektedir. Tablo 16 incelendiğinde rölaf sıklık ve dane çapı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı en yüksek kayma mukavemeti açısının

$D_r = \%70$ rölâtif sıklıkta hazırlanmış 6,30-8,00 mm dane çapı aralığına sahip zeminlerden elde edilmiştir.

EDEM model istinat duvarına etkiyen pasif zemin basınçlarının gözlemi (yuvarlak zemin)

İstinat duvarının arkasındaki yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda oluşan hız alanları Şekil 74’de ve elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 17’de verilmiştir.



Şekil 74. DEM simülasyonu ile yuvarlak zeminlerde pasif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları

Tablo 17. Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılımları

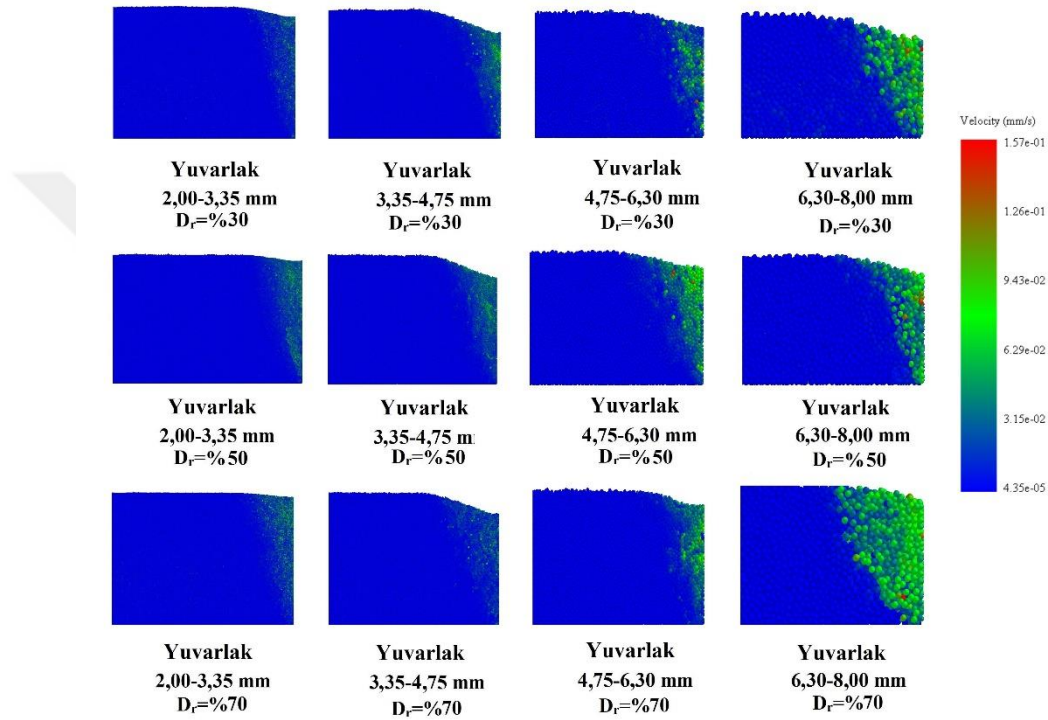
Dane Aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
$D_r \%30$	32°	33°	35°	37°
$D_r \%50$	36°	37°	38°	40°
$D_r \%70$	38°	40°	41°	43°

Şekil 74’de yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda hız alanları gösterilmektedir. Şekil 74 incelendiğinde, yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda dane çapı ve rölâtif sıklık arttıkça hızların arttığı ve istinat duvarının arkasında kabarma meydana geldiği görülmektedir. Rölâtif sıklık ve dane çapı arttıkça kabarma genişliklerinin ve yer değiştirmelerin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum literatür ve teori ile uyum içerisindedir. Tablo 17’de, pasif zemin koşullarında, dane çapı ve rölâtif sıklığının artmasıyla birlikte, kayma mukavemeti

açısının da arttığı gözlenmiştir. En büyük kayma mukavemeti açısının %70 rölatif sıklılığa sahip 6,30-8,00 mm dane çapı aralığındaki zeminlerde 43° olarak belirlenmiştir.

Yuvarlak zeminlerde aktif durumda DEM simülasyonu sonuçları

İstinat duvarının arkasındaki yuvarlak daneli zeminlerde aktif durumda oluşan hız alanları Şekil 75’de ve elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 18’de verilmiştir. Duvarın çekme etkisiyle oluşturulan aktif duruma göre içsel sürtünme açıları ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 75. DEM simülasyonu ile yuvarlak zeminlerde aktif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları

Tablo 18. Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açılımları

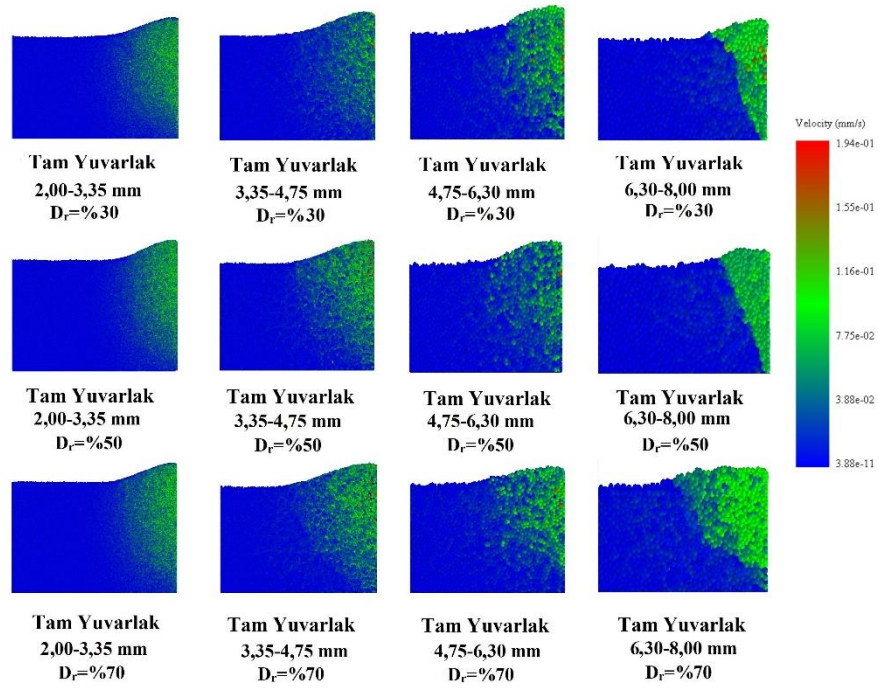
Dane Aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
D_r %30	30°	32°	33°	35°
D_r %50	34°	36°	37°	40°
D_r %70	37°	38°	39°	43°

Tablo 18'e göre, aktif zemin durumunda, dane boyu ve rölatif sıklılığın artmasıyla birlikte, dane arası iç sürtünme açısında artışlar gözlenmiştir. Maksimum ve minimum iç sürtünme açıları sırasıyla, %70 rölatif sıklılığa sahip 6,30-8,00 mm ve %30 rölatif sıklılığa sahip 2,00-3,35 mm aralığındaki numunelerde bulunmuştur.

Şekil 75 incelendiğinde, yuvarlak zeminlerde aktif durumda küçük dane çaplarına sahip zeminlerde hızların çok az olduğu dane çapı arttıkça hızlarında arttığı görülmektedir. Dane çapı arttıkça hızların da arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte aynı dane çapı aralığında rölatif sıklık arttıkça istinat duvarı arkasındaki kayan zemin kitlesinin azaldığı görülmektedir. Aktif durumda istinat duvarının arkasındaki zemin istinat duvarı ile birlikte hareket ettiği ve istinat duvarının hemen arkasında çökme meydana geldiği görülmektedir. Tablo 16 incelendiğinde rölatif sıklık ve dane çapı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı en yüksek kayma mukavemeti açısının $D_r=70$ rölatif sıklıkta hazırlanmış 6,30-8,00 mm dane çapı aralığına sahip zeminlerden 43^0 olarak elde edilmiştir.

Tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda DEM simülasyonu sonuçları

İstinat duvarının arkasındaki tam yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda oluşan hız alanları Şekil 76'da ve elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 19'da verilmiştir. Şekil 76'da tam yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda hız alanları gösterilmektedir. Şekil 76 incelendiğinde, tam yuvarlak daneli zeminlerde pasif durumda dane çapı ve rölatif sıklık arttıkça danelerin yer değiştirme arttığı ve istinat duvarının arkasında kabarma meydana geldiği görülmektedir. Rölatif sıklık ve dane çapı arttıkça kabarma genişliklerinin ve yer değiştirmelerin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum literatür ve teori ile uyum içerisindedir. Tablo 17'de, pasif zemin koşullarında, dane çapı ve rölatif sıklığın artmasıyla birlikte, kayma mukavemeti açısının da arttığı gözlenmiştir. En büyük kayma mukavemeti açısının 70 rölatif sıklığa sahip 6,30-8,00 mm dane çapı aralığındaki zeminlerden elde edilmiştir.



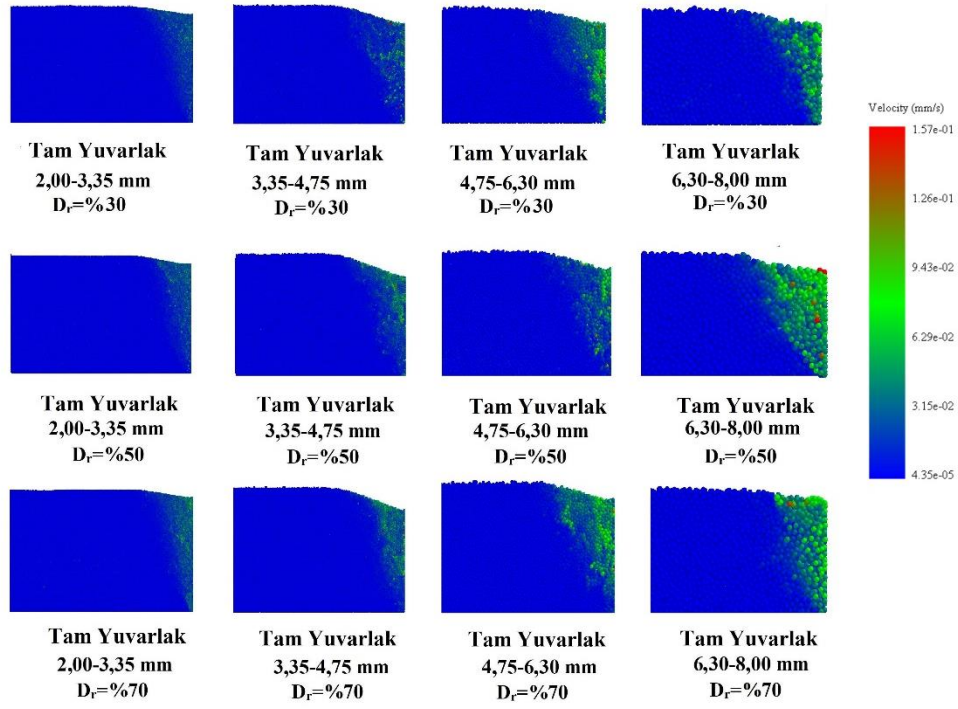
Şekil 76. DEM simülasyonu ile tam yuvarlak zeminlerde pasif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları

Tablo 19. Tam Yuvarlak Zeminlerde Pasif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açıları

Dane aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
D_r %30	33°	35°	36°	38°
D_r %50	39°	40°	41°	43°
D_r %70	42°	45°	46°	47°

Tam Yuvarlak zeminlerde aktif durumda DEM simülasyon sonuçları

İstinat duvarının arkasındaki tam yuvarlak daneli zeminlerde aktif durumda oluşan hız alanları Şekil 77’de ve elde edilen kayma mukavemeti açıları Tablo 20’de verilmiştir. Duvarın çekme etkisiyle oluşturulan aktif duruma göre içsel sürtünme açıları ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 77. DEM simülasyonu ile tam yuvarlak zeminlerde aktif durumda (plastik denge) oluşan hız alanları

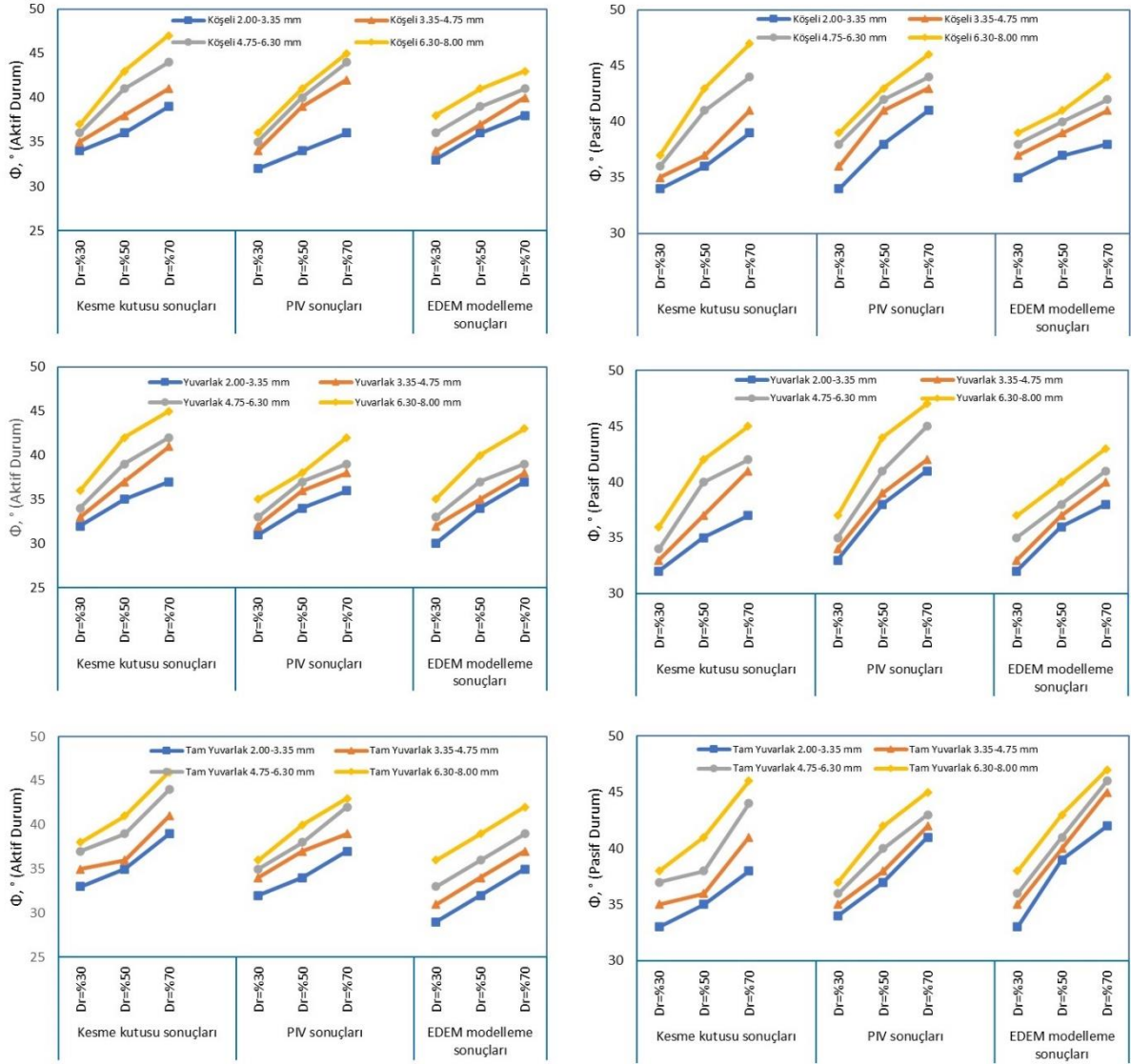
Tablo 20. Tam Yuvarlak Zeminlerde Aktif Durumda DEM Simülasyonu ile Elde Edilen Kayma Mukavemeti Açıları

Dane Aralığı	2,00-3,35 mm	3,35-4,75 mm	4,75-6,30 mm	6,30-8,00 mm
D_r %30	29°	31°	33°	36°
D_r %50	32°	34°	36°	39°
D_r %70	35°	37°	39°	43°

Şekil 77 incelendiğinde, yuvarlak zeminlerde aktif durumda küçük dane çaplarına sahip zeminlerde hızların çok az olduğu dane çapı arttıkça hızlarında arttığı görülmektedir. Bununla birlikte aynı dane çapı aralığında rölatif sıklık arttıkça istinat duvarı arkasındaki kayan zemin kitlesinin azaldığı belirlenmiştir. Aktif durumda istinat duvarının arkasındaki zemin istinat duvarı ile birlikte hareket ettiği ve istinat duvarının hemen arkasında çökme meydana geldiği görülmektedir. Tablo 16 incelendiğinde rölatif sıklık ve dane çapı arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı en yüksek kayma mukavemeti açısının D_r =%70 rölatif sıklıkta hazırlanmış 6,30-8,00 mm dane çapı aralığına sahip zeminlerden 43° olarak elde edilmiştir.

Kesme Kutusu, Model Deney, PIV ve DEM Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kesme kutusu, Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü ve Ayrık Elemanlar Yönteminden elde edilen kayma mukavemeti açıları toplu olarak Şekil 78’de gösterilmiştir.

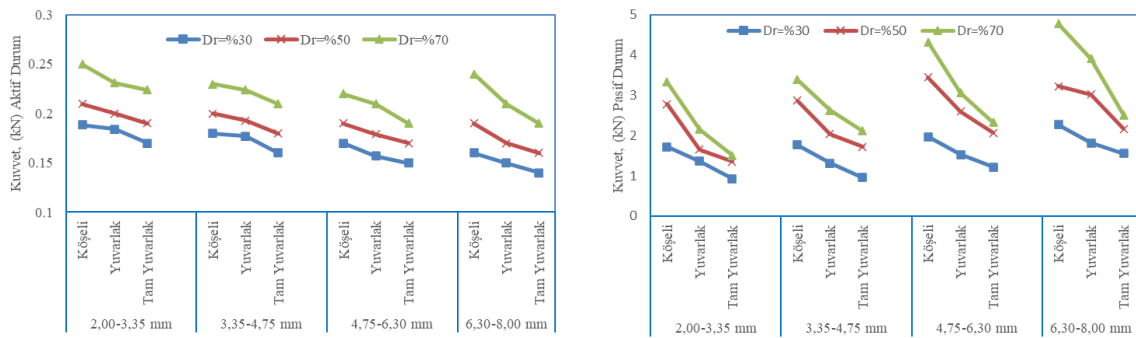


Şekil 78. Farklı dane çap aralıklarında, şekillerinde ve rölatif sıklıklarda hazırlanmış zeminlerin aktif ve pasif durumları için PIV ve DEM simülasyonlarından elde edilen kayma mukavemeti Açıları

Aktif ve pasif zemin basınç durumlarında rölatif sıklık, dane boyutu ve dane şeklinin kayma mukavemeti açısı üzerindeki etkileri Şekil 78'de gösterilmektedir. Dane boyutu ve şeklinin köşelilikten tam yuvarlaklığa doğru değişmesi yanal zemin basınçlarını ve kayma mukavemeti açısını doğrudan etkilemiştir. Rölatif sıklık arttıkça, kayma yenilmesi eğimi ile yatay çizgi arasındaki açı büyür ve bu da aktif durumda rölatif sıklık arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığını gösterir. Pasif durumda ise, rölatif sıklığın %30'dan %70'e değişmesiyle birlikte kayma mukavemeti açısı artar sonucunda kayma yenilme eğimi ile yatay hat arasındaki açı azalır. Yapılan tez çalışması, numunelerin kayma mukavemeti açısının, DEM

kalibrasyonunda kullanılan partiküllerin statik sürtünme katsayısı ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Zeminin köşeliliği, boyutu ve rölatif sıklığı arttıkça kayma mukavemeti açısının da arttığı belirlenmiştir. Kesme kutusu deneylerinde elde edilen kayma mukavemeti açıları DEM ve PIV'den elde edilen kayma mukavemeti açıları ile karşılaştırıldığında birkaç derece farklılık olduğu bunun partiküller arasındaki sürtünmeden kaynaklanan kemerlenme etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca model çalışmalarda kayma yüzeyinin tam doğrusal olmadığı gösterilmiştir.

Aktif ve pasif durumda model istinat duvarına etki eden bileşke kuvvetin rölatif sıklık, dane şekli ve dane boyutlarına bağlı olarak değişimi Şekil 79'da verilmiştir.



Şekil 79. Aktif ve pasif durumda model istinat duvarına etki eden bileşke kuvvetin rölatif sıklık, dane şekli ve dane boyutlarına bağlı olarak değişimi

Köşeli zeminden yuvarlak ve tam yuvarlak zeminlere geçildiğinde, yanal zemin basınçlarının, aktif ve pasif zemin basınç durumlarında azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, dane boyutları ve zeminlerin rölatif sıklıklarının artmasıyla birlikte yanal zemin basınçlarının arttığı belirlenmiştir. Köşeliden tam yuvarlak zemin danelerine geçişte, istinat duvarındaki yanal zemin basınçlarının, %30'luk rölatif sıklıkta sırasıyla aktif ve pasif zemin basıncında yaklaşık %57 ve %56 azaldığı gözlemlenmiştir. Yanal zemin basıncının büyüklüğü, istinat duvarının yer değiştirmesinin miktarı ve türü, zeminin birim ağırlığı, kayma mukavemeti parametreleri, zemin kohezyonu ve dolgudaki drenaj koşulları gibi faktörlere bağlıdır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kalker zemin malzemesi köşeli, yuvarlak ve tam yuvarlak olarak dört farklı granülometriye ayrılmış ve zeminlerin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. İkinci olarak 3 farklı partikül şekline, 4 farklı granülometriye sahip zeminler 3 farklı rölatif sıklıkta model tanka yerleştirilmiş ve model deneyler yapılmıştır. Daha sonra model deneyler sırasında çekilen fotoğraflar PIVlab yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve zeminde oluşan yer değiştirmeler gözlenmiştir. Son olarak Altair EDEM yazılımı (akademik versiyon) kullanılarak, aktif ve pasif zemin basınç durumlarında rijit duvarın arkasındaki danelerin akışı modellenerek analiz edilmiştir. Çalışmada PIV ve DEM'den elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, istinat duvarının arkasındaki kayma gerilmesinin dağılımına, partikül yuvarlaklığı ve rölatif sıklığının etkisini analiz etme imkanı sağlamıştır. Tez çalışması, DEM'in istinat duvarlarını analiz etmede sunduğu avantajları göstermiştir. DEM ve PIV sonuçları deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sergilemiştir. Ayrıca, DEM ve PIV kullanılarak belirlenen kayma mukavemeti açıları deneylerden elde edilenlerle oldukça uyumlu çıkmıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Partikül köşeliliğinin, boyutunun ve rölatif sıklığın artmasının, zeminin kayma dayanımını ve kayma mukavemeti açısını arttırdığı belirlenmiştir.
- DEM modelinden elde edilen kayma bölgeleri ile model deneylerden elde edilen kayma bölgelerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.
- Dane boyutu arttıkça model tank içindeki zeminlerde daha fazla yer değiştirme görülmüştür.
- Rölatif sıklığın artması ile pasif durumda daha fazla yer değiştirme alanı aktif durumda ise daha az yer değiştirme alanı oluşmuştur.
- Daha büyük danelerde daha şiddetli zemin akışı meydana gelmiştir.
- Yuvarlaklıktaki değişiklikler, kayma gerilmesi dağılımını ve istinat duvarı hareketini değiştirmiştir.
- PIV analizi, rijit duvara karşı aktif zemin basıncı gerilme dağılımının, dolgudaki kemerlenme etkileri nedeniyle doğrusal olmadığını göstermiştir. Partiküller arasındaki sürtünme azaldıkça daha belirgin eğri oluşturmuştur.
- Kayma bölgesi kalınlığı, ortalama dane çapı, dane pürüzlülüğü, dane boyutu dağılımı, deformasyon yönü ve başlangıç boşluk oranı gibi faktörlerden etkilenmiştir.

- Rölatif sıklık arttıkça aktif durumda kırılma zarfı daha dikey pasif durumda daha yatay hale gelmiş, danelerin yuvarlaklığı arttıkça göçme hattının eğimli olmasından dolayı daha fazla yatay yer değiştirme meydana gelmiştir.
- Düzensiz dane şekilleri nedeniyle DEM modellemelerinin, gerçek granüler malzemelerin davranışını tam olarak yansıtamayabileceği belirtilmelidir. Hesaplama verimliliği için, bu çalışmada kalibre edilmiş parametrelere dayalı küresel partiküller kullanılmıştır ve bu durumun kabul edilmesi gereken bir basitleştirme olduğu vurgulanmaktadır.
- Kesme kutusu deneyleri ile PIV sonuçları arasındaki kayma mukavemeti açılarındaki birkaç derece fark çıkmıştır. Bunun sebepleri:
 - Kesme kutusu deneylerinde kayma, örneğin içinde yatay bir düzlemde gerçekleşir. Bu, PIV’de gözlemlenen karmaşık üç boyutlu akış desenlerinden farklıdır.
 - Kesme kutusu deneyleri sınırlı geometrileri nedeniyle sınır etkilerine sahiptir. Bu etkiler ölçülen içsel sürtünme açılarını etkileyebilir.
 - PIV, sınırlardan uzakta olan hız profillerini yakalar ve parçacık davranışının daha kapsamlı bir görünümünü sunar.
 - Zemin doğal olarak heterojendir bundan dolayı yerel değişimler kayma davranışını etkiler. PIV bu varyasyonları yakalar, oysa kesme kutusu deneyleri zemin tepkisini basitleştirebilir.

Özetle, kesme kutusu deneyleri zemin kayma konusunda değerli bilgiler sağlarken, PIV parçacık etkileşimlerinin daha ayrıntılı bir anlayışını sunar. Farklılıklar deney metodolojilerinden, örnek hazırlamadan ve zemin davranışının içsel karmaşıklığından kaynaklanır.

Bu çalışma, istinat duvarlarının arkasındaki zemin hareketiyle ilgili felaketleri önleme ve azaltma konusunda yardımcı olarak, mühendislik yapı tasarımı için değerli bilgiler sunmaktadır.

DEM granüler malzemelerin davranışlarının modellenmesinde kullanılan ve gerçekçi sonuçlar veren bir metottur. Ancak analizlerinde girdi parametrelerin ve modelin doğru seçilmesinin çok önemli olduğu ve sonuçların bu parametrelere etkilendiği bilinmektedir. Bundan dolayı DEM analizlerinde malzemenin mikro ve makro boyutta davranışını doğru şekilde belirlemek çok önemlidir. Yapılacak DEM analizlerinde şekil parametrelerinin gereğe yakın bir şekilde belirlenmesi ve modelde kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- AASHTO T 236, A. T. (2018). Method of Test for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- Abdeli, M., Miedema, S., Schott, D., & Alvarez Grima, M. (2010). *Discrete Element Method Modelling of Sand Cutting*.
- Ahn, I.-S., & Cheng, L. (2014, 2014/04/30/). Tire derived aggregate for retaining wall backfill under earthquake loading. *Construction and Building Materials*, 57, 105-116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.091>
- Altunbas, A., Soltanbeigi, B., & Cinicioglu, O. (2019, 01/01). DEM analysis of passive failure state behind a rigid retaining wall: effect of boundary conditions. *E3S Web of Conferences*, 92, 14012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199214012>
- Arda, Ç., & ÇİNİCİOĞLU, Ö. (2019, September). Kohezyonsuz Zeminlerin Tane Dağılım ve Şekil Özelliklerinin Aktif Göçme Yüzeyi Geometrisine Etkileri. *Teknik Dergi*, 30(5), 9399-9420. <https://doi.org/10.18400/tekderg.397658>
- Bharadwaj, R. (2014). Prediction of Flow Patterns in a Transfer Chute Handling Iron Ore. *Jenike & Johanson Inc.* <https://www.powderbulksolids.com/what-discrete-element-method>
- BLOTT, S. J., & PYE, K. (2008). Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55(1), 31-63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x>
- Cao, W., Liu, T., & Xu, Z. (2019, 05/01). Calculation of passive earth pressure using the simplified principal stress trajectory method on rigid retaining walls. *Computers and Geotechnics*, 109, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.01.021>
- Cinicioglu, O., & Abadkon, A. (2015). Dilatancy and Friction Angles Based on In Situ Soil Conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 06014019.
- Coetzee, C. J. (2018, 12/01). Particle upscaling: Calibration and validation of the discrete element method. *Powder Technology*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.022>
- Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles de maximis et minimis quelques problemes de statique, relatits a l'architecture. *Memoires de Mathematique de l'Academie Royale de Science* 7, Paris.
- Ertugrul, O., & Trandafir, A. (2013, 05/01). Seismic earth pressures on flexible cantilever retaining walls with deformable inclusions. *Engineering Geology*, 158, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.001>
- Fukumoto, Y., Yoshida, J., Sakaguchi, H., & Murakami, A. (2014, 12/23). The effects of block shape on the seismic behavior of dry-stone masonry retaining walls: A numerical investigation by discrete element modeling. *Soils and Foundations*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.11.007>
- Gade, V. K., & Dasaka, S. M. (2022, 2022/10/01/). Short- and long-term behavior of EPS geofoam in reduction of lateral earth pressure on rigid retaining wall subjected to surcharge loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5), 868-880. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.002>

- He, J., Wang, J., Liu, F., & Zhang, W. (2014, 10/01). Distinct simulation of earth pressure against a rigid retaining wall considering inter-particle rolling resistance in sandy backfill. *Granular Matter*, 16, 797-814. <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0515-3>
- Hlosta, J., Jezerská, L., Rozbroj, J., Žurovec, D., Necas, J., & Zegzulka, J. (2020, 02/14). DEM Investigation of the Influence of Particulate Properties and Operating Conditions on the Mixing Process in Rotary Drums: Part 1—Determination of the DEM Parameters and Calibration Process. *Processes*, 8, 222. <https://doi.org/10.3390/pr8020222>
- Holst, J. M. F. G., Rotter, J. M., Ooi, J. Y., & Rong, G. H. (1999). Numerical Modeling of Silo Filling. II: Discrete Element Analyses. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(1), 104-110. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1999\)125:1\(104\)](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:1(104))
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- Jiang, M., Niu, M., & Zhang, W. (2022, 2022/04/15). DEM analysis of passive failure in structured sand ground behind a retaining wall. *Granular Matter*, 24(2), 61. <https://doi.org/10.1007/s10035-022-01220-y>
- Jung, S., Kim, J. S., Park, J., Won, J., & Kim, M. K. (2013, 01/01). Distinct element method analysis of a retaining wall using a steel frame and fill materials. *Multimedia Tools and Applications*, 74. <https://doi.org/10.1007/s11042-013-1534-5>
- Kamiloğlu, H., & Sadoglu, E. (2017, 02/14). Active Earth Thrust Theory for Horizontal Granular Backfill on a Cantilever Wall with a Short Heel. *International Journal of Geomechanics*, 17, 04017018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000886](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000886)
- Karaca, D., Durmaz, O., Özen, G., Kasnakoğlu, C., & Kurtulus, D. (2011). *Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümlerine Uygun Dikgen Ayrışımı ve Sistem Tanılama Uygulayarak bir Çırpan Kanat Üzerindeki Değişken Akışın Dinamik Modellemesi*.
- Karimi Ghalehjough, B., Akbulut, S., & Çelik, S. (2017, 10/01). Experimental and numerical investigation on bearing capacity of granular soil affected by particle roundness. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 46, 2137-2145.
- Karimi Ghalehjough, B., Akbulut, S., & Çelik, S. (2018, 07/10). Effect of particle roundness and morphology on the shear failure mechanism of granular soil under strip footing. *Acta geotechnica Slovenica*, 15, 43-53. <https://doi.org/10.18690/actageotechslov.15.1.43-53.2018>
- Katterfeld, A., & Roessler, T. (2019). *STANDARD PROCEDURE FOR THE CALIBRATION OF DEM PARAMETERS OF COHESIONLESS BULK MATERIALS*.
- Keshavarz, A., & Ebrahimi, M. (2017, 07/01). Axisymmetric passive lateral earth pressure of retaining walls. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 1706–1716. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0502-9>
- Khosravi, M. H., Pipatpongsa, T., & Takemura, J. (2016, 2016/08/01/). Theoretical analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode. *Soils and Foundations*, 56(4), 664-675. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.07.007>
- Kolbuszewski, J. J. (1948). An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sand. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 21-30 June 1948, 158-165.
- Kotrocz, K., & Kerenyi, G. (2017). *Numerical Discrete Element Simulation Of Soil Direct Shear Test*. <https://doi.org/10.7148/2017-0510>

- Li, J., Yu, B., & Su, J. (2017). Active earth pressure with consideration of displacement effect of retaining wall [Article]. *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*, 62(1), 43-53. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85028606352&partnerID=40&md5=b00560f38443879017b00b69e9e0deeb>
- Li, T., Peng, Y., Zhu, Z., Zou, S., & Yin, Z. (2017, 05/11). Discrete Element Method Simulations of the Inter-Particle Contact Parameters for the Mono-Sized Iron Ore Particles. *Materials*, 10, 520. <https://doi.org/10.3390/ma10050520>
- Liu, M., Chen, X., Hu, Z., & Liu, S. (2020). Active earth pressure of limited $c-\phi$ soil based on improved soil arching effect [Article]. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(9), Article 3243. <https://doi.org/10.3390/app10093243>
- Liu, W., Li, L., Tian, B., Liu, F., & Yongzhen, C. (2016, 03/01). Evaluation Indices of an Asphalt-Mixture Digital Specimen Based on the Discrete-Element Method. *Journal of Testing and Evaluation*, 44, 20150152. <https://doi.org/10.1520/JTE20150152>
- Lommen, S., Mohajeri, M. J., Schott, D., & Lodewijks, G. (2019, 04/01). DEM particle upscaling for large-scale bulk handling equipment and material interaction. *Powder Technology*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.034>
- Ma, G., Sun, Z., Ma, H., & Li, P. (2022). Calibration of Contact Parameters for Moist Bulk of Shotcrete Based on EDEM [Article]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article 6072303. <https://doi.org/10.1155/2022/6072303>
- Marigo, M., & Stitt, E. (2015, 02/28). Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets. *KONA Powder and Particle Journal*, 32, 236-252. <https://doi.org/10.14356/kona.2015016>
- Medina, J., Sau Soto, N., & Acuña, Q. (2018, 12/28). Lateral Earth Pressure Coefficient and Lateral Earth Pressure against Retaining Walls. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 6. <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2018.06.003>
- Mirghasemi, A., & Maleki Javan, M. r. (2006, 02/01). Discrete element method analysis of retaining wall earth pressure in static and pseudo-static conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering*, 30.
- Nakach, M., Authelin, J.-R., Chamayou, A., & Dodds, J. (2004, 2004/12/10). Comparison of various milling technologies for grinding pharmaceutical powders. *International Journal of Mineral Processing*, 74, S173-S181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.07.039>
- Nguyen, T. X., Le, L. M., Nguyen, T. C., Nguyen, N. T. H., Le, T.-T., Pham, B. T., Le, V. M., & Ly, H.-B. (2021, 2021/07/04). Characterization of soybeans and calibration of their DEM input parameters. *Particulate Science and Technology*, 39(5), 530-548. <https://doi.org/10.1080/02726351.2020.1775739>
- Nitka, M., Tejchman, J., Kozicki, J., & Leśniewska, D. (2015, 06/01). DEM analysis of microstructural events within granular shear zones under passive earth pressure conditions. *Granular Matter*, 17. <https://doi.org/10.1007/s10035-015-0558-0>
- O'Sullivan, C., Cui, L., & Bray, J. D. (2004). Three-dimensional discrete element simulations of direct shear test. In (Vol. 2004, pp. 373-382). <https://doi.org/10.1201/b17007-55>
- Rankine, W. J. M. (1857). II. On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 147, 9-27. <https://doi.org/doi:10.1098/rstl.1857.0003>

- Roessler, T., & Katterfeld, A. (2018, 05/01). Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using upscaled particles. *Powder Technology*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.044>
- Rui, R., Ye, Y.-Q., Han, J., Zhang, L., & Zhai, Y.-X. (2020, 07/21). Experimental and Theoretical Investigations on Active Earth Pressure Distributions behind Rigid Retaining Walls with Narrow Backfill under a Translational Mode. *International Journal of Geomechanics*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001832](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001832)
- Salgado, R., & Paik, K. (2003, 01/09). Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects. *Geotechnique*, 53, 643-653. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.7.643>
- Shackelford, C. (2005, 10/17). James K. Mitchell and Kenichi Soga, Fundamentals of Soil Behavior (third ed.), John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ (2005) 577 pp., US\$ 130.00, ISBN 0-471-46302-7. *Journal of Hazardous Materials - J HAZARD MATER*, 125, 275-276. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.06.004>
- Smith, I. (2014). Smith's Elements of Soil Mechanics 9th Edition. *John Wiley & Sons Inc*, 0470673397(9780470673393).
- Soltanbeigi, B., Altunbas, A., Gezgin, A. T., & Cinicioglu, O. (2020). Determination of passive failure surface geometry for cohesionless backfills [Article]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(4), 1100-1110. <https://doi.org/10.3311/PPci.14241>
- Song, F., Liu, H., Ma, L., & Hu, H. (2018, 2018/06/01/). Numerical analysis of geocell-reinforced retaining wall failure modes. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(3), 284-296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.01.004>
- Tang, H., Song, R., Dong, Y., & Song, X. (2019, 09/27). Measurement of Restitution and Friction Coefficients for Granular Particles and Discrete Element Simulation for the Tests of Glass Beads. *Materials*, 12, 3170. <https://doi.org/10.3390/ma12193170>
- Teffo, V., & Naudé, N. (2013, 04/01). Determination of the coefficients of restitution, static and rolling friction of Eskom-grade coal for discrete element modelling. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113, 351-356.
- Tejchman, J., Kozicki, J., & Leśniewska, D. (2011). Discrete simulations of shear zone patterning in sand in earth pressure problems of a retaining wall. *International Journal of Solids and Structures*, 48(7-8), 1191-1209.
- Thakur, S. (2016, 05/20). Scaling of discrete element model parameters for cohesionless and cohesive solid. *Powder Technology*, 293, 130-137.
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014, 10/16). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2. <https://doi.org/10.5334/jors.bl>
- Wei, D., Wang, J., & Zhao, B. (2018, 02/07). A simple method for particle shape generation with spherical harmonics. *Powder Technology*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.006>
- White, D., & Take, W. (2002, 01/01). Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in Geotechnical testing. *CUED/D-Soils/TR322*, 5. <https://doi.org/10.7710/1093-7374.1624>
- Wu, F., Fan, Y., Liang, L., & Wang, C. (2016, 08/11). Numerical Simulation of Dry Granular Flow Impacting a Rigid Wall Using the Discrete Element Method. *PloS one*, 11, e0160756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160756>

- Xu, S. Y., Kannangara, K. K. P. M., & Taciroglu, E. (2018). Analysis of the stress distribution across a retaining wall backfill [Article]. *Computers and Geotechnics*, 103, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.07.001>
- Yan, Z., Wilkinson, S. K., Stitt, E. H., & Marigo, M. (2015, 2015/09/01). Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Computational Particle Mechanics*, 2(3), 283-299. <https://doi.org/10.1007/s40571-015-0056-5>
- Yang, M., & Deng, B. (2019, 04/04). Simplified Method for Calculating the Active Earth Pressure on Retaining Walls of Narrow Backfill Width Based on DEM Analysis. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/1507825>
- Zhou, J., Zhang, L., Hu, C., Li, Z., Tang, J., Mao, K., & Wang, X. (2022, 2022/01/01/). Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model. *Powder Technology*, 397, 117005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.049>
- Zhou, L., Chu, X., & Xu, Y. (2017). *DEM investigation on characteristics of rolling resistance for modelling particle shape* (Vol. 140). <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714005005>
- Zhou, Q.-Y., Zhou, Y. T., Wang, X.-M., & Yang, P.-Z. (2017, 07/14). Estimation of Active Earth Pressure on a Translating Rigid Retaining Wall Considering Soil Arching Effect. *Indian Geotechnical Journal*, 48. <https://doi.org/10.1007/s40098-017-0252-8>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Omid NASIRPUR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Mevlâna Lisesi
Lisans:	URUMİYE Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2014)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	
Farsça:	
Azerice:	
Diğer	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1.Modeling the Behavior of Granular Soils with Different Shape Characteristics Behind A Retaining Wall with Discrete Element and PIV Methods, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, Springer Nature Journal.	