

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK BİLİM DALI**

**AYRIK ELEMAN MODELİ İLE FARKLI DANE
ŞEKİLLERİ İÇİN ZEMİNLERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ NÜMERİK SİMÜLASYONLARI**

Burak ERDÖL

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI**



MANİSA-2025

Burak
ERDÖL

AYRIK ELEMAN MODELİ İLE FARKLI DANE ŞEKİLLERİ İÇİN
ZEMİNLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ NÜMERİK
SİMÜLASYONLARI

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği.Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Burak ERDÖL

Particle Flow Code (PFC)



İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLO DİZİNİ	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 İnce Daneli Zeminlerin Mekanik Özellikleri	3
2.2 İri Daneli Zeminlerin Mekanik Özellikleri.....	5
2.2.1 Küresellik.....	7
2.2.2 Köşelilik.....	8
2.2.3 Pürüzlülük.....	8
2.3 İri Daneli Zeminlerde Farklı Şekillere Sahip Parçacıkların Dane Ölçeğine Olan Etkisi.....	9
2.4 Bilgisayar Programları Yardımıyla Daneli Yapıların Mühendislik Parametrelerinin İncelenmesi	10
2.4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sonlu Farklar Yöntemi	11
2.5 Ayırık Elemanlar Metodu.....	11
2.6 Ayırık Elemanlar Metodunun Kullanıldığı Alanlar.....	12
2.7 Ayırık Elemanlar Metodunda Kullanılan Bilgisayar Programları.....	12
2.7.1 YADE	13
2.7.2 LİGGGHTS.....	13
2.7.3 EDEM	13
2.8 Particle Flow Code (PFC)	14
2.9 Programın Çalışma Algoritması	15
2.10 PFC Model Objelerinin Tanımlanması	17
2.11 Ayırık Elemanlar Metodunda Kullanılan Temas Modelleri.....	19
2.11.1 Doğrusal Temas Modeli.....	19
2.11.2 Hertz Mindlin Temas Modeli	21
2.10.3 Dönme Dirençli Temas Model	22
2.10.4 Doğrusal Paralel Bağlı Model.....	24
2.10.5 Doğrusal Temas Bağ Modeli	25
3. LİTERATÜR TARAMASI	26

3.1	Ayrık Elemanlar Metodu İle Deneyin Hazırlanma Aşamaları.....	26
3.2	Makro ve Mikro Parametrelerin Tanımlanması ve Etkisinin İncelenmesi	28
3.3	Kalibrasyon Metodolojisi.....	31
4.	MATERYAL	34
4.1	Kalibrasyon İçin Referans Alınacak Numunenin ve Çalışmanın İncelenmesi	34
4.2	Particle Flow Code Kullanılarak Deneyin Yapılması	36
5.	YÖNTEM	42
5.1	Farklı Efektif Modüllerle Yapılan Deneylerin İncelenmesi	42
5.1.1	8e6 Efektif Modül İle Yapılan Deneylerin İncelenmesi	42
5.1.2	1e7 Efektif Modül İle Yapılan Deneylerin İncelenmesi	44
5.1.3	2e7 Efektif Modül İle Yapılan Deneylerin İncelenmesi	46
6.	ANALİZLERİN SONUÇLARI.....	48
7.	TARTIŞMA VE SONUÇ	58
	KAYNAKLAR	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Daneciğin Alanı
ASTM	American Society for Testing Materials
β	Dönme rijitlik katsayısı
β_n	Normal sönümleyici katsayısı
β_s	Kesme sönümleyici katsayısı
Cm	Santimetre
D	Çap
δ_n	Dane merkezleri arası mesafe
δ_s	Dane merkezleri arası mesafe
ΔU_s	Rölatif yer değiştirme
E	Elastisite Modülü
E^*	Efektif Modül
F^{bp}	Doğrusal paralel bağ kuvveti
F^c	Temas kuvveti
F^d	Sönümleyici kuvvet
F^l	Doğrusal kuvvet
F_n^{bp}	Normal doğrusal paralel bağ model
F_n^d	Normal Sönümleyici kuvveti
F_s^{bp}	Kesme doğrusal paralel bağ model
F_s^d	Kesme sönümleyici kuvveti
G	Kesme modülünü
g	Gram
H	Yükseklik

η^r	Plastik moment direnç katsayısı
θ_L^r	Dönme eksenindeki açısal vektör
k^*	Rijitlik oranı
k^n	Normal Rijitlik
k^s	Daneciğin kesme rijitliği
k_1^n	1 no'lu parçacığın normal rijitliği
k_1^s	1 no'lu parçacığın kesme rijitliği
k_2^n	2 no'lu parçacığın normal rijitliği
k_2^s	2 no'lu parçacığın kesme rijitliği
kN	Kilo Newton
kPa	Kilo paskal
L	Danelerin uzunlukları
M	Metre
Mm	Milimetre
M^{bp}	Danecikler arası bağ momenti
m_c	İki kütlenin çarpıma göre tersinin toplamı
M_L^{elast}	Elastik momentin
M_L^{plast}	Plastik momentin bulunması
M^r	Dönme momentinin bulunması
μ	Sürtünme katsayısı
μ^1	1 no'lu sürtünme katsayısı
μ^2	2 no'lu sürtünme katsayısı
N	Newton
ν	Poisson oranını
PFC	Particle Flow Code

Pa	Paskal
R_{ort}	Ortalama yarıçap
R_1	1. Danenin yarıçapı
R_2	2. Danenin yarıçapı
S_F	Kesme kuvveti
S_σ	Kesme gerilmesi
σ	Normal gerilme
σ_1	Pik Gerilme
σ_3	Hücre basıncı
T_F	Çekme kuvveti
T_σ	Çekme gerilmesi
TS	Turkish Standard (Türk Standartları)
τ	Kesme gerilmesi
U_n	Dane merkezleri arası mesafe
USCS	Unified Soil Classification System
3D	3 boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kilin görüntülenmesi [8].....	4
Şekil 2.2 a) Parçacık düzensizliği b) parçacığın şekline göre sınıflandırılması [17], [18].....	9
Şekil 2.3 PFC'de program algoritmasının şeması [34]	16
Şekil 2.4 PFC'de döngü dizisinin tanımlanması [34].....	17
Şekil 3.1 Rijit elemanlarla cidar oluşumu [39]	26
Şekil 3.2 Membran tabakasının daneciklerle yapılması [44].....	27
Şekil 3.3 Deneysel chande kumu üç eksenli deney sonucu [53]	33
Şekil 3.4 Ayrık elemanlar metodu sonucunda üç eksenli deney sonucu [53]	33
Şekil 4.1 Şekil 9 %1.5 mika içeriği için monotonik üç eksenli deneylerin sonuçları [20].....	35
Şekil 4.2 %10 mika içeriği için monotonik üç eksenli deneylerin sonuçları [20]	35
Şekil 4.3 %20 mika içeriği için monotonik üç eksenli deneylerin sonuçları [20].....	35
Şekil 4.4 Etki Sınırların Oluşturulması.....	36
Şekil 4.5 Cidarın geometrisinin oluşturulması.....	37
Şekil 4.6 Oluşturulan geometrinin duvara çevrilmesi.....	37
Şekil 4.7 Alt ve üst sıkıştırma üst ve alt sınır düzlemleri eklenmesi	38
Şekil 4.8 Rijit blok kalıbının oluşturulması	39
Şekil 4.9 Top komutu ile danenin oluşturulması.....	39
Şekil 4.10 Numunenin Son Hali	40
Şekil 5.1 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $8e6$, Rijitlik Oranı = 1.20, Sürtünme Katsayısı =0.40)	42
Şekil 5.2 15 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $8e6$, Rijitlik Oranı = 1.20, Sürtünme Katsayısı =0.40)	43

Şekil 5.3 20 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =8e6, Rijitlik Oranı = 1.20, Sürtünme Katsayısı =0.40)	43
Şekil 5.4 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =1e7, Rijitlik Oranı = 1.23, Sürtünme Katsayısı =0.30)	44
Şekil 5.5 15 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =1e7, Rijitlik Oranı = 1.23, Sürtünme Katsayısı =0.30)	45
Şekil 5.6 20 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =1e7, Rijitlik Oranı = 1.23, Sürtünme Katsayısı =0.30)	45
Şekil 5.7 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.00, Sürtünme Katsayısı =0.30)	46
Şekil 5.8 15 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.00, Sürtünme Katsayısı =0.30)	47
Şekil 5.9 20 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.00, Sürtünme Katsayısı =0.30)	47
Şekil 6.1 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)	48
Şekil 6.2 15 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)	49
Şekil 6.3 20 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)	49
Şekil 6.4 Mika Daneciklerinin 45° Elevation ve Tilt Açılarını İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)	50
Şekil 6.5 60° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	51
Şekil 6.6 60° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 15 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	51

Şekil 6.7 60° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 20 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	52
Şekil 6.8 Mika Daneciklerinin 60° Elevation ve Tilt Açıları İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)	52
Şekil 6.9 220° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	53
Şekil 6.10 220° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	53
Şekil 6.11 220° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	54
Şekil 6.12 Mika Daneciklerinin 220° Elevation ve Tilt Açıları İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)	54
Şekil 6.13 340° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	55
Şekil 6.14 340° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	55
Şekil 6.15 340° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30).....	56
Şekil 6.16 Mika Daneciklerinin 340° Elevation ve Tilt Açıları İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)	56

TABLO DİZİNİ

Tablo 6.1 Farklı Yönelimlerde Bulunan Mika Daneciklerinin Deney Sonuçlarına Olan Etkisi.....	57
---	----



TEŞEKKÜR

Zorlu tez çalışmamda verdiği bilgi ve gösterdiği yöntemlerle ilk defa adım attığım lisans üstü eğitim sürecinde ilgi ve desteğini esirgemeyip yapmış olduğu yönlendirmelerle tezimin bilimsel anlamda şekillenmesini sağlayan danışman hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI'ya

Yüksek lisan ders döneminde tanıştığım ve tecrübelerinden fazlasıyla faydalandığım arkadaşlarım Yük. İnş. Müh. Mesut ASLAN'a ve Yük. İnş. Müh. Abdinafi MOHAMED ADAN'a

Hayatım boyunca hep yanımda olan ve verdikleri desteklerle bugünlere gelebildiğim zorlu tez çalışmam boyunca da yardımlarını esirgemeyen babam Şevket ERDÖL ve annem Fatma ERDÖL ile kardeşim Dilara ERDÖL'e teşekkürlerimi sunarım.

Burak ERDÖL

Manisa, 2025

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AYRIK ELEMAN MODELİ İLE FARKLI DANE ŞEKİLLERİ İÇİN ZEMİNLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ NÜMERİK SİMÜLASYONLARI

Burak ERDÖL

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI

Granüler kumlu zeminlerde mikro ölçekteki dane şekli, dane yönelimi gibi özellikler makro ölçekte zemin davranışına etki etmektedir. Mikro özelliklerin makro ölçekli zemin özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen literatürde çok değerli deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, bu deneysel çalışmalar sınırlı olup belirli koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapraksı ve küresel şekilli danelerin bir arada bulunduğu bir üç eksenli deney numunesi ayırık elemanlar metodu kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Oluşturulan üç eksenli sayısal model ile yapraksı danelerin yöneliminin makro düzeydeki zemin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Modelde yer alan yapraksı daneler ile küre şekilli danelerin çap oranları 4 tür. İlk olarak ayırık elemanlarda oluşturulan sayısal model parametreleri gerçek deneysel sonuçlar ile uyumlu olacak şekilde Efektif modül (E), rijitlik oranı (k_r) ve sürtünme katsayısı (μ) değerleri kalibre edilmiştir. Efektif modül (E), rijitlik oranı (k_r) ve sürtünme katsayısı (μ) değerleri sırası ile 2×10^7 , 1.08 ve 0.30 olarak belirlenmiştir. Belirlenen kalibrasyon parametreleri kullanılarak yapraksı danelerin 45° , 60° , 220° ve 340° yönelim açıları (elevation ve tilt açıları) ile makro davranışa etkileri incelenmiştir. Ayırık elemanlarda oluşturulan sayısal modeller ile yapılan analizler sonucunda yapraksı dane yönelimlerinin makro düzeydeki içsel sürtünme açısında 9-10 derecelik bir değişime neden olabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ayırık elemanlar metodu, monotonik üç eksenli deney, yapraksı dane, küresel dane, dayanım parametreleri

2025, 60 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NUMERICAL SIMULATIONS OF MECHANICAL BEHAVIOR OF SOILS FOR DIFFERENT GRAIN SHAPES WITH DISCRETE ELEMENT MODEL

Burak ERDÖL

Manisa Celal Bayar University

Graduate Education Institute

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ender BAŞARI

In granular sandy soils, micro-scale properties such as grain shape and grain inclination have an effect on soil behavior at the macro scale. There are very valuable experimental studies in the literature on the effects of micro properties on macro-scale soil properties. However, these experimental studies are limited and have been conducted under specific conditions. In this study, a monotonic triaxial test sample containing platy and spherical grains was numerically modeled using the discrete element method. The effects of platy grain orientation on macro-scale soil properties were investigated through the numerically modeled triaxial test. The diameter ratio of platy and spherical grains in the model was set to 4. Initially, numerical model parameters such as the effective modulus (E), stiffness ratio (k_r), and friction coefficient (μ) were calibrated to match the laboratory test results. The effective modulus (E), stiffness ratio (k_r), and friction coefficient (μ) values were determined as 2×10^7 , 1.08, and 0.30, respectively. The effects of platy grain orientation at 45° , 60° , 220° , and 340° (elevation and tilt angles) on macro-scale behavior were investigated using the determined calibration parameters. As a result of the analyses conducted using discrete element numerical models, it was observed that platy grain orientations could cause a 9–10-degree variation in the internal friction angle at the macro scale.

Keywords: Discrete element methods, monotonic tri-axial test, calibration, platy grain, spherical grain strength parameters

2025, 60 sayfa

1. GİRİŞ

Kayaç yapıda bir gezegen olan dünyamız da farklı fiziksel, kimyasal ve jeolojik süreçler meydana gelmektedir. Bu süreçlerin sonucunda kayanın aşınması ve parçalanmasıyla birlikte bugün üzerinde bulunduğumuz mineralli zemin yapısı meydana gelmiştir. [1]. Bu zemin yapısı üzerinde yaşamımızı devam ettirir, besin ihtiyaçlarımız için tarımsal üretimde bulunur, medeniyetimizin kalkınması için önemli hammadde kaynağı olan madenlerin zeminden çıkartılması gibi insanlığa faydalı yerlerde kullanırken hayatımızı devam ettireceğimiz yapıların üretimi ve temeli içinde zeminden faydalanırız. İnşaat mühendisliğinin bir dalı olan geoteknik mühendisliği zemin yapısının üzerinde yapılacak herhangi bir yapının yapılması için zeminin uygun olup olmadığını inceler ve uygun değilse uygun hale getirmek için gerekli çalışmaları yaparlar. Bu sebeple zeminin yapısı ve nelerden oluştuğu çok önemlidir.

Zemin daneli bir yapıda olup birbirinden farklı boyutlarda ve şekillerde bulunabilmektedir. Bu yapının incelenebilmesi için standartlaşmaya gidilmiş olup bu standartlaşma zeminin sınıflandırılması şeklinde yapılmıştır.

Sınıflandırma farklı bilim dallarında farklı şekillerde yapılmaktadır. Geoteknik mühendisleri zemini parçacığın boyut ve şekilleri gibi mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre incelemektedir. İncelemeyi kolaylaştırdıkları için standartlaşmalar ülkeler tarafından farklı şekilde konulmuştur. Bunlara Türkiye’de TS 1500 ve TS 1900 standartları ve Amerika’da ASTM E11-04 standartları örnek olarak verilebilir. Bu sınıflandırmalarda zeminler boyutlarına göre sınıflandırılmaktadır. 200 no’lu elekten geçen zemin elemanlarına ince daneli zemin isimlendirilmesi yapılmaktadır 200 no’lu eleğin üzerinde kalan zemin elemanlarına ise iri daneli zemin isimlendirilmesi yapılır.

Zeminlerin farklı farklı boyutlarda olmasının sebebi ise daneciklerin fiziksel ve kimyasal olarak ayrışmaları olup örnek olarak büyük kaya parçalarının güneş ve diğer dış kuvvetler tarafından aşınmasıyla ufalanıp küçülmesi gösterilebilir. Bu ufalanan ve küçülen danecikler öyle bir boyuta gelirler ki bu boyuttan sonra artık bu yapılar fiziksel-mekanik etkilerden çok kimyasal süreçlerden etkilenmeye başlar. Aynı zamanda bu süreçler danenin şekillenmesinde de önemli bir işlev görürler. Şekillenmede fiziksel-mekanik süreçlerin asıl şekillendirici olduğu danecik

boyutundan kimyasal süreçlerin asıl etken olduğu danecik boyutuna geçiş aralığı 40 mm-400 mm değerleri arasındır [1].

Zeminin davranışını incelemek için laboratuvar deneyleri ve arazide yerinde deneyler yapılır. Bu deneylere örnek olarak üç eksenli deney, kesme kutusu deneyi, konsolidasyon deneyi, Standart Penetrasyon Testi, Parafinle özgül yoğunluğu bulma deneyi gibi birçok farklı deney örnek olarak verilebilir.

Gerçek deneylerin yapılması zaman ve kaynak bakımından çok masraflı olup tüm deneylerin yapılması her zaman mümkün olmayabilmektedir. Çünkü bu deneylerin yapıldığı aletlerin alınması ve laboratuvar koşullarının oluşturulması için belli bir maddi kaynak gerekmektedir. Bu deneyler teknik deneyler olduğundan dolayı ve kullanılan cihazların hassas ve karmaşık bir yapısı olduğu için profesyonel kişi veya ekipler tarafından deneylerin yapılması gerekmektedir. [2]. Bu gibi sebeplerden dolayı yeterli tecrübeye sahip insana ulaşmak veya kaynak oluşturmak her zaman mümkün olmayabilir.

Bu tez kapsamında, Başarı, 2012 tarafından gerçekleştirilen üç eksenli deneyin referans alınarak bu deneyin bilgisayar programı ile sanal ortamda yapılması ve çıkan sonuçlardan alınan veriler ışığında kalibrasyonunun yapılp danecik şekillerinin yön değiştirmesinin numune üzerine olan etkisi incelenecektir [3].

2. GENEL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

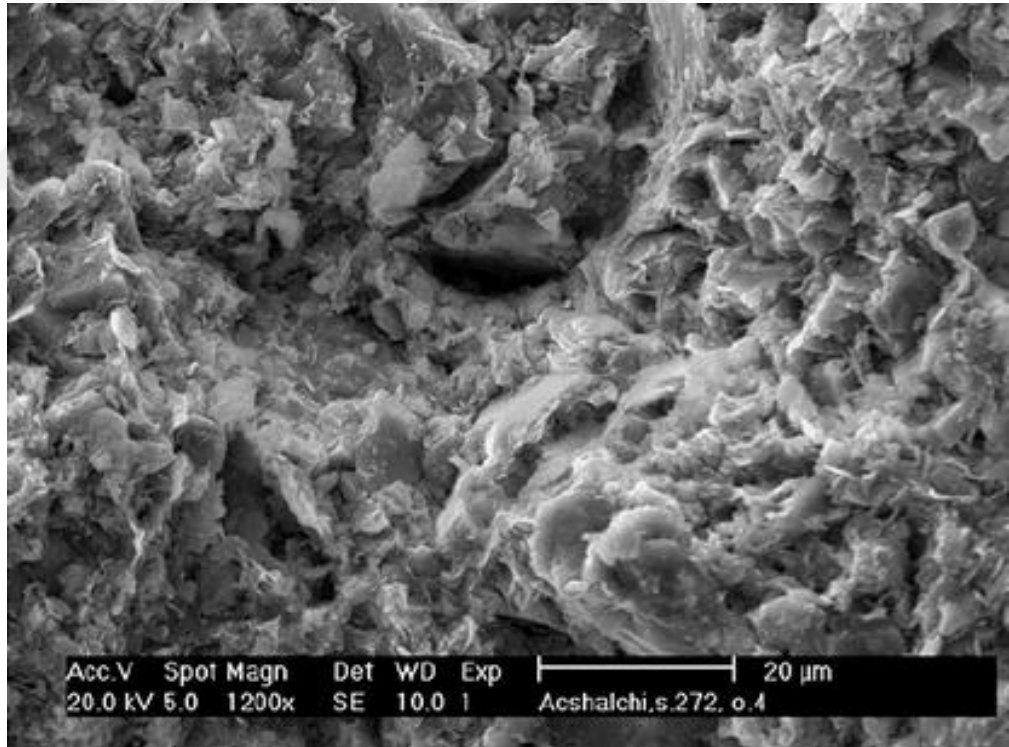
2.1 İnce Daneli Zeminlerin Mekanik Özellikleri

İnce daneli zeminler 200 no'lu elekten geçen zemin yapıları olup kil ve silt olarak ikiye ayrılmaktadır. İnce daneli zeminlerin davranışı iri daneli zeminlerin göre farklı davranış göstermektedirler. Kil mineralleri kayaçların kimyasal tepkimeler sonucu aşınması ile meydana gelmekte iken siltli yapılar mekanik çözünmenin son aşaması olarak düşünebilir. Killi zeminler kohezyon özelliği gösterirken siltli zeminler granüler özellik gösterip plastik davranışlarda bulunmazlar. Killi zeminlerde davranışı belirleyen su varlığıdır ve dane boyutu önemsizdir bununla birlikte granüler zeminlerde dane boyutu dağılımı iri daneli zemin yapılanmasının davranışı için çok önemlidir [4].

İnce daneciklerin ağırlıkça %50'den fazla olduğu durumlarda o zemine ince daneli zemin isimlendirilmesi verilir [4].

Siltler 75 mikron ile 2 mikron arası boyuta sahip danecikler olup plastik olmayan bir yapıdır [4][5]. Kil zeminler ise atomik olarak kristal levhalardan oluşan bir yapı olup farklı şekillerde birbirleri ile bağlanır ve farklı davranışlar gösterirler. Bu kristal levhalar 4'lü ve 8'li yapılardan oluşur. Bu 4'lü ve 8'li kristal yapıların (silika ve alümina yapılarının) birlikte yapmış oldukları 1:1 ve 2:1 gibi yerleşmeler ile farklı kil danecikleri ortaya çıkmaktadırlar [4].

Mühendislik uygulamalarında önemli bir kil yapısı olan kaolin kili, bir silika ve 1 alümina kristalinin 1:1 şeklinde oluşması ve diğer kaolin mineralleri ile hidrojen bağıyla bağlanan mineral yapıdır. Diğer kil minerallerine göre güçlü bir bağla bağlanan bu kil yapısı 100 katmana kadar ulaşan büyük bir kristal yapısı oluştururlar [4]. Kaolinin çeşitleri olarak kaolinit, halloysit, dikit ve nakrit çeşitleri örnek olarak verilebilir [6]. Geoteknik mühendisliğinde kaolinler stabilizasyon problemlerinde kullanılır [7]. İllit ve montmorillonit ise kaolin grubu killerden farklı olarak 2 silika 1 alümina grubundan 2:1 şeklinde oluşur. İllit ve montmorillonit killeri arasındaki fark, illit kilinin katmanları arasındaki bağ potasyum iyonu sağlanırken montmorillonit kilinin katmanları arasındaki bağ van der Waals bağları ile meydana gelir. Montmorillonitin bir türü olan bentonit kili geoteknik mühendisliğinde sondaj çukurlarının göçmemesi için kullanılır. [4].



Şekil 2.1 Kilin görüntülenmesi [8]

Killi zeminlerin belirlenmesinde ve kil daneciklerinin mineral özelliklerinin belirlenmesinde X-ışını kullanımı, diferansiyel termal analizi, kıvam limitleri kullanılabilir [4].

USCS sınıflandırma sisteminde ince daneli zeminlerin özelliklerinin belirlenmesinde kıvam limitlerinden likit analiz ve plastik analiz kullanılmaktadır. Bu iki deney sonucunda zemin kıvamı ve ince daneli zeminin sınıflandırılmasını yapılabilir ve zeminlerin mühendislik davranış özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilir [4].

2.2 İri Daneli Zeminlerin Mekanik Özellikleri

İri daneli zeminler elek analizi yardımıyla USCS zemin sınıflandırmasına göre sınıflandırılabilir. İri daneli zemin dokusunda bu deney sonucunda ortaya çıkan parçacık dağılım eğrisi onun fiziksel mekanik davranışı hakkında önemli bilgiler vermektedir[4]. Elek analizi danenin kaya, çakıl ve kum içeriği hakkında bilgi verir. Bu tez kapsamında daha çok kumlu zemin dokusu ve mika daneciklerinin zemin davranışına olan etkisi incelenecektir.

Mika minerali granitin fiziksel koşullar altında ayrışması ile oluşan plak şekilli bir mineral olarak tanımlanabilir. Mika daneciği ince pullara sahip, kırılkan özellikli ve zemin yapısında istenmeyen şartlara sebep olabilen bir mineral daneciği olduğu ve zeminin davranışını etkilediği için dikkatlice incelenmelidir [9].

Kil olmayan zemin daneciklerinden çakıl, kum ve plastik olmayan silt danecikleri kohezyonsuz daneler olarak tanımlandığını yukarıda belirtilmişti. Bu yapıların davranış-karakteristik özelliklerini belirleyen parametrelere danelerin parçacık şekilleri, dane boyu dağılımı, dane yüzeyinin pürüzlülük özelliği ve danelerin dağılımı örnek olarak verilebilir. Bütün bu özellikler zemin yapısının sertliği, parçalanması gibi fiziksel etkilere ve kimyasal tepkimelere karşı direnci de göstermektedir. Bu danelerin davranış parametrelerini, kimyasal özelliklerden ziyade fiziksel koşullar belirlemektir [10].

Ana kaya ve büyük kayaçların fiziksel parçalanması sonucu oluşan kaya blokları, kum ve silt parçacıkları büyük parçacıklardan küçük parçacıklara doğru aşınır. Siltlerin kayaçların fiziksel olarak aşındığı son kısımda meydana gelen danecik yapısıdır. Bu yapıların isimlendirmesi ve sınıflandırılması ise bu parçacıkların boyutlarına göre olmaktadır. Kil olmayan bu danecikli yapıların oluşturan mineralleri içerisinde feldspatlar, kuvarslar ve mika gibi mineraller bulunmaktadır [10].

Aynı parçacık dağılım eğrisine sahip iri daneli zeminlerden ayda bulunan siltli ince kum daneli zemin ile dünya üzerindeki bir bölgede bulunan daneli zeminin dağılımının mühendislik parametrelerinin aynı olduğunu gözlemlenmiştir. İri daneli parçacıkların mühendislik parametreleri birçok faktörden etkilenmekte olup bu faktörleri iki sınıfta toplamak mümkündür. Bunlardan birincisi çevresel faktörler olup bu numunenin su içeriği, yoğunluk durumu, hücre basıncı gibi içerisinde bulunduğu fiziksel ortamla yaptığı etkileşimle ilgilidir. Diğer faktör ise numunenin kendi içerisindeki özellikleri olup bunlara da mineral tipi, her bir mineralin numune içerisindeki oranı, katyon emme özelliği, parçacıkların boyutu, boşluk suyu gibi özellikler söylenebilmektedir [10].

Kum daneciklerinin fiziksel özelliklerine içsel sürtünme açısı, yığın açısı, kaynama özelliği, sıvılaşma, zeminin sıkı ve gevşek olma durumu, daneciklerin şekilleri ve yönleri gibi birçok parametre etki eder ve bu parametreler kumlu numunenin nasıl davranış göstereceği hakkında mühendislik çalışmalarında öngörü sağlayarak önem arz eder [4].

Daneciklerin yerleşmesi ve granülometri eğrisinin oluşması dane boyut ve şekilleri ile fazlasıyla ilgilidir. Bu da mühendislik parametrelerinden permeabilite, dilatasyon açısı, sıkışma gibi özelliklerine etki etmektedir. Lim ve ark., 2012 yaptıkları çalışmada permeabiliteyle kumun boşluk oranının birlikte arttığını, dane boyutunun büyümesi ile permeabilite katsayısının iyi derecelenmiş kumlarda arttığını, dilatasyon açısının küresel ve yuvarlak danelerinin artmasıyla azaldığını, sürtünme açısı ve kritik sürtünme açısının dane granülometrisinden etkilendiğini ve boşluk oranının uniformluk katsayısıyla ilişkili olduğunu göstermişlerdir [11].

Mika daneleri zeminlerde genellikle %0-%20 oranı arasında bulunurken bazı zeminlerde bu oran çok daha yüksek de olabilmektedir [12], [13], [14]. Mika minerali zeminin birçok mühendislik parametresini etkilemektedir. Lee ve ark., 2007 mika danelerinin zemin davranışına olan etkilerini incelerken kum danelerini plak şeklinde olan mika daneleri ile bir arada bulundukları uzay konumu incelemiştir. Bu incelemeyi yapmak için 2 boyutlu bir modelleme sistemi oluşturmuşlar ve modelleme için kullanılan elemanları da disk ve çubuk şeklinde seçmişlerdir. Mika daneciğini uzay düzlemde farklı açılarda yerleştirerek elemanların davranışlarını modellemişlerdir. Deneyin sonucunda disklerin çubuk üzerinde tetrahedral şeklinde yerleştiğini ve aynı zamanda çubukların yerleşme koşulların disklerin yerleşme sınırlarını belirlediklerini bulmuşlardır. Disklerin içerisindeki mika plak tabakalarının karışımın gözenekliliğini artırabildiğini bununda mika boyutuyla disk çapı arasındaki oran ile ilişkili olduğunu ve disklerin model içindeki konumlanmasını etkilediğini söylemişlerdir. Mika daneleri yuvarlak daneli parçacıkların yerleşmesini etkilediği, mika boyutu/kum çapının boşluk doldurma, köprülemeyi etkilediği, mika danelerinin kırılmadan bükülebildiğini, mika dane içeriğinin kesme dalga hızıyla ters orantılı bir şekilde değiştiği, mika dane varlığının pik gerilmeyi azaltma eğiliminde olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır [14].

İri daneli zeminlerin parçacık boyutları mekanik davranışı etkilendiğinden bahsedilmiştir. İri daneli zeminlerin sadece parçacık boyutları ile sınıflandırmanın birçok dezavantajı vardır ve bu sınıflandırma biçimi yetersizdir. Çünkü iri daneli yapıları ince danelilere göre ağırlıkça daha fazla barındıran zeminlerin davranışı dane mineralojisi ve dane şeklinden de etkilenmektedir [15]. Bu sebeple farklı dane şekilleri için bir sınıflandırma sistemi oluşturulmuştur. Bu zemin sınıflandırma sisteminin elemanları ise küresellik, köşelilik ve pürüzlülüktür. Aşağıda bunlar sırasıyla incelenecektir.

2.2.1 Küresellik

Dane içerisine çizilebilecek en büyük dairenin yarıçapının, dışına çizilebilecek en küçük daire çapına oranı olarak tanımlanan küresellik, tüm boyutlardaki yarıçapların (3 boyutlu için x, y, z 2 boyutlu olarak x ve y) birbirine yakınlık derecesi olarak tanımlanabilir [16]. Danenin genel şekil yapısı ile bulunur.

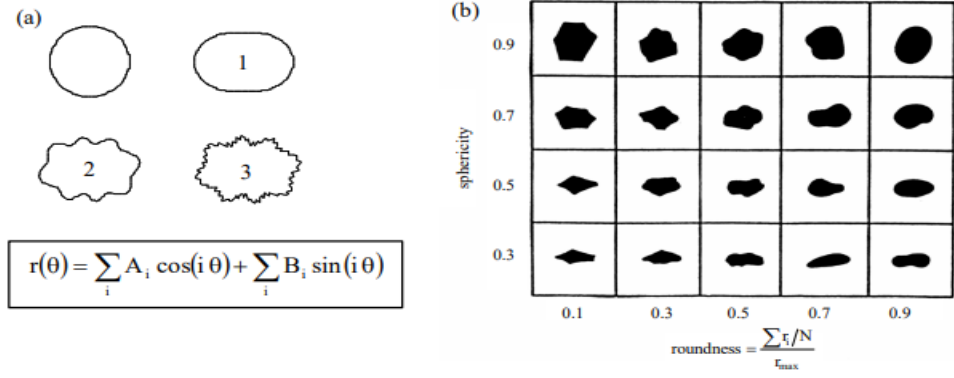
2.2.2 Köşelilik

Her bir köşe noktasına çizilen dairelerin yarıçaplarının, dane içerisine çizilebilen en büyük yarıçap oranına köşelilik ismi verilir [16]. Danenin keskin bölgeleri ile bulunur.

2.2.3 Pürüzlülük

Pürüzlülük dane yüzeyinin girinti ve çıkıntılarının bir göstergesidir [16]. Pürüzsüzlüğe masa tenisi topu ile tenis topu arasındaki fark örnek gösterilebilir. Masa tenisi topunun dışı neredeyse pürüzsüz bir materyalken tenis topu yapıldığı malzemeden kaynaklı üzerinde birçok pürüz bulundurabilmektedir. Pürüzlülüğün anlaşılması için taş gülle ve demir gülle de bir diğer örnek olarak verilebilir. Taş güllenin etrafı yapım aşamasından kaynaklı olarak pürüzlü bir yapıda olup, demir gülle ise pürüzsüz bir şekilde yapılmıştır.

Dane şekilleri danenin geçirmiş olduğu fiziksel aşınma hakkında da bilgi vermektedir. Kimyasal etkilerin ve aşınmaların artmasıyla birlikte danenin yuvarlaklığı artmaktadır. Parçacık boyutunun büyümesi ile daneciğin kırılması doğru orantılı olarak değişmektedir [1]. Bu fiziksel ve kimyasal değişikliklerle farklı şekiller meydana gelmektedir. Bu şekillerden köşeli ve yuvarlak olan danecikler önce Krumbein ve Sloss (1963)'un önerdiği ve daha sonra Cho ve ark., 2006 üzerinde çalıştığı parçacık çizelgelerinde aşağıda bulunan Şekil 2.2'deki gibi sınıflandırılabilir. Bu çizelge şekilde gösterildiği gibi 5 satıra ve 4 sütuna ayrılmıştır. Çizelgedeki her satırda aynı küreselliğe fakat farklı köşeliliğe sahip danecikler gösterilir. Her sütunda ise aynı köşeliliğe fakat farklı küreselliğe sahip danecikler konumlandırılmış ve buna göre sınıflandırılmıştır [17], [18].



Şekil 2.2 a) Parçacık düzensizliği b) parçacığın şekline göre sınıflandırılması [17], [18]

2.3 İri Daneli Zeminlerde Farklı Şekillere Sahip Parçacıkların Dane Ölçeğine Olan Etkisi

Farklı parçacık şekillerine sahip zemin dokuları farklı davranışlar göstermektedir. Zemin yapısı mikro ve makro ölçekler altında incelenir. Zeminin mikro ölçekteki, yani parçacık yapısı ile ilgili özellikleri için sürtünme açısı, genleşme açısı, parçacık dağılım eğrisi, boşluk oranı, dane yoğunluğu örnek olarak verilebilirken makro ölçekli, yani parçacıkların bütününe etkileyen özelliklerine ise normal ve kesme gerilmeleri, üç eksenli deney şartlarında hücre basıncı ve eksenel kuvvet hazırlanan numunenin çapı ile yüksekliği gibi özellikler örnek olarak verilebilir. Dane parçacıklarının şekil farklılıkları zemin numunesinin bu mikro ve makro özelliklerinin oluşmasında ve çıktısında önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple USCS'deki zemin sınıflandırması granüler yapıları zeminlerin mekanik özelliklerini tanımlamak için yeterli olmamaktadır. Yang & Luo, 2015'nun yaptıkları çalışmada danecik şeklinin kritik durumda zeminin sıvılaşması, sürtünme açısı, genleşme açısı üzerine olan etkileri incelemişlerdir. Bunu yapmak için fujian kumuna, köşeli ve yuvarlak cam boncukları numune içindeki oranları aynı olmak şartıyla belli oranlarda ekledi ve karıştırdılar. Küresel parçacıklı karışımın köşeli parçacıklı karışıma göre sıvılaşmaya daha fazla meyilli olduğunu ve kum yapısının mukavemetin azaldığını görmüşlerdir. Saf Fujian kumu ile karıştırılmış numune arasında ise kritik durum çizgisinin azaldığını görmüşlerdir [19].

Basari & Ozden, 2013 yapmış olduğu çalışmada, mika danelerinin zeminin mühendislik davranışlarına olan etkisini incelemek için bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada bol alüvyonlu Gediz deltasından 8 adet araştırma sondajı yardımıyla 25 m derinlikten numune alınmıştır. Kum ve mika danelerini fiziksel olarak ayırmak için Geredeli ve ark. (1995) yöntemini kullanmışlardır. Ayırdıkları kum ve mika danelerinden yapay kum ve mika karışımını yapmışlardır. Oluşturdukları deney numunelerindeki mika ağırlıklarını sırasıyla %1.5, %10, ve %20 oranında olacak şekilde hazırlamışlardır. Bu oluşturulan numunelerle dinamik drenajsız üç eksenli deneyleri yapmışlardır. Eksenel uzamanın yüzde 8'i aşması durumunda ve tam sıvılaşma gerçekleştiğinde deney sona erdirildi. Yapılan çalışmanın sonucunda Mika daneciklerinin belli bir yoğunluğu ulaşmıca kadar sıvılaşma hacimsel deformasyonları arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca mika danelerinin köprüleme yaptığı ve köprülemenin sonucunda boşluk oranının arttırdığını gözlemlemişlerdir. İnce danenin oransal olarak artması kum danelerinin temas sayılarını azaltmasından kaynaklı bu tür zeminlerin daha fazla sıkılaşmaya meyilli oldukları gözlemlenmiştir. Yoğunluğun artmasıyla mika danelerinin numune üzerindeki etkilerinin azaldığını gözlemlemişlerdir [21].

2.4 Bilgisayar Programları Yardımıyla Daneli Yapıların Mühendislik Parametrelerinin İncelenmesi

Daneli elemanların mekanik hareketlerinin incelenmesi için sık sık başvuru alan yöntemlerden birisi bilgisayar programları olup bu programlara girilen girdiler sonucunda programların kullanmış olduğu yöntemlere göre çıktılar alınmaktadır. Farklı problem tarzları için farklı farklı modeller oluşturulmuş ve bu modeller için çeşitli bilgisayar programları oluşturulmuştur.

İnşaat mühendisliğinde ve onun bir dalı olan geoteknik alanında kullanılan hesaplama yöntemleri arasında sonlu elemanlar ve sonlu farklar kullanımı yaygın olup bu hesaplama yöntemlerini kullanan bilgisayar programları ile problemlerin çözümlenmesi (statik problemler, dinamik analizler vs.) yapılır. Bunlarla birlikte son zamanlarda geliştirilen ve kullanım alanı hakkında detaylı bilgiler verilecek olan ayırık elemanlar metodu da çalışmalarda kullanılmaktadır. Burada öncelikle geleneksel

olarak kullanılan yöntemler olan sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerini incelenecektir.

2.4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminin çalışma prensibi incelenen bölgeyi üçgen parçalara ayırarak gerekli işlemlerin yapıp çözüme ulaştırılmasıyla sonlu farklar yönteminin çalışma prensibi ise incelenen bölgeyi dikdörtgenlere ayırarak problemin çözümüne ulaştırılmasıdır. Bu olaylara ağ oluşturma (mesh) işlemi denir. Bu yöntemlerde ağların birleşme bölgeleri nokta olarak tanımlanır ve bu noktalar birbirlerine bağımlıymiş gibi varsayılarak hesaplamalar bunlara göre yapılır [22].

Sürekli yaklaşımlar yani sonlu elemanlar ve sonlu farklar birçok mühendislik çalışmasında kullanılmaktadır. Fakat bu sayısal analiz yöntemleri danecikli yapıların davranışlarını çözümlemede zayıf kalmaktadırlar. Bu durumlara örnek olarak anizotropinin tanımlanamaması, dane şekli gibi parametreleri tanımlanamaması verilebilir. Bu parametrelerin uygun bir şekilde incelenebilmesi için ayrık elemanlar metodunun kullanılması daha uygun olmaktadır. Zeminin içerisindeki dane şekli, rijitlik, danelerin uzaydaki konumları, daneler arası sürtünme, poisson oranı gibi mikro parametreler tanımlanabilmektedir [23].

2.5 Ayrık Elemanlar Metodu

Süreklilik yöntemleri yani sonlu elemanlar ve sonlu farklar metodunda incelenen zemin yapısını oluşturan danelerin dane şekli, dane rijitliği, danelerin uzaydaki konumları, danelerin birbirleri arasındaki sürtünme açıları, poisson oranı gibi parçacık özellikleri ile ilgilenmemesi numune içindeki daneciklerin fiziksel özelliklerinin birçoğunu görmezden gelme durumu olduğu için bu tarz daneli yapılarda süreklilik yöntemlerinin kullanımı yeterli ve tatmin edici sonuçlar veremez. Bu parametrelerin uygun bir şekilde incelenebilmesi için ayrık elemanlar metodu kullanılmaktadır [23]. Bu metotta daneciklerin her biri için ayrı ayrı modelleme yapılarak matematiksel işlemler yapılır ve bunların sonuçlarına göre daneciklerin uzay düzlemindeki hareketleri, dönmeleri gibi davranışlarda bulunur.

Ayrık elemanlar metodu danelerin hareketleri ile ilgilendiği için tüm daneler modellenerek matematiksel hesaplara tabi tutulur ve buna göre sonuçlar alınır. Bu sebeple daneli yapılarda ayrık elemanlar metodu diğer iki metoda göre daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Bununla ilgili O'Donovan et al. yaptıkları çalışmada numune olarak kübik bir numuneyi ayrık elemanlar metodu ve sürekli modelde simüle ederek nokta kaynaklı bir aktarıcıdan dalga hızı gönderdiler. Deneyde ortaya çıkan dinamik sonuçların incelenmesiyle ayrık elemanlar metodunun daha doğru sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [24].

Ayrık elemanlar metodunun en büyük dezavantajı ise çok küçük daneli yapıların simüle edilmesindeki zorluktur. Çünkü dane sayısı arttıkça bilgisayarın işlem yükü artmakta ve istenilen sonuçlara ulaşmakta zorlanılmaktadır. Aynı şekilde ayrık elemanlar metodunda birçok farklı parametrelere de bağlı olarak işlem yapılmaktadır. Bu parametrelere örnek olarak daneciklerin birbirleri ile teması, parçacık sayısı, dışarıdan verilen kuvvet, parçacıkların boyutları, sınır koşulları, numune boyutları gibi birçok örnek verilebilir [25]. Özellikle kum danesi gibi çok küçük bir alanda bile yüz binlerce danecik olarak bulunabilen yapıların modellenmesi bu metodun en büyük zorluklarından biridir.

2.6 Ayrık Elemanlar Metodunun Kullanıldığı Alanlar

Ayrık elemanlar metodunun kullanıldığı alanlardan biri olan inşaat mühendisliğinin geoteknik bilim dalında inceleme alanı olarak süreksizlik gösteren daneli yapıların hareketlerinin davranışları danelerin birbirleri ile etkileşimi, kaya cisimlerinin etkileşimi, daneli yapıların birbirleri ile temas sayısı, dane hızlarını, temas yönlerini, moment ve kuvvet aktarımını stabilite analizleri olarak söylenebilir [26][27]. Ayrık elemanlar metodunun kullanıldığı diğer meslek dallarına örnek olarak jeoloji, tarımsal alanda toprak işleme, kozmetik alanı, toz mekaniği, demiryolu mühendisliği gibi mühendislik alanları örnek olarak verilebilir [28],[29].

2.7 Ayrık Elemanlar Metodunda Kullanılan Bilgisayar Programları

Ayrık elemanlar metodunda literatürde farklı farklı birçok bilgisayar programı kullanıcılar ve firmalar tarafından oluşturulmuş ve kullanılmıştır. Bu programlar arasından en çok bilinenlere örnek olarak ise YADE, LİGGGHTS, EDEM ve Particle

Flow Code (PFC) programları örnek olarak verilebilir. Bu programları hakkında detaylı inceleme detaylı olarak aşağıdaki bölümlerde yapılacaktır.

2.7.1 YADE

YADE programı ayrık elemanlar metodunu kullanan, danecikli malzemeleri analiz etmek için kullanılan bir sayısal analiz programıdır. Bu program da arayüzün oluşturulması Python yazılım dili ile oluşturulmuşken programın yazılımı C++ yazılım dili kullanılarak yazılmıştır. Bu program açık kaynak kodlu programdır. Bu programda farklı malzeme modellerini küme (clump) kodu ile oluşturulabilir ve sınırlar belirlenerek kesme kutusu deneyi gibi birçok farklı deney yapılabilir.

YADE'nin kullanım alanlarına ayrık elemanlar metodunun kullanılabildiği mühendislik alanları, madencilik, tarım gibi alanlar örnek olarak verilebilir.

YADE programında temas modelleri, olan gerilme, numune boyutları, danecik [küre veya küme (clump) danecikleri gibi], danecik boyutları, sınırın belirlenmesi, porozite, yoğunluk gibi makro ve mikro ölçekleri kullanarak analiz yapar [30].

2.7.2 LİGGHTS

LİGGHTS programı ayrık elemanlar metodunu kullanarak granüler malzemelerin simülasyonunu gerilme-uzama, sıkışma gibi daneciklerin fiziksel durumlarını incelemeye yarayan bir bilgisayar programıdır. 3 boyutlu olarak çalışılabilen LİGGHTS programı açık kaynak kodlu bir programdır. LAMMPS adlı klasik moleküler dinamik simülatörün üzerine geliştirilerek oluşturulmuştur. Aynı zamanda danelerin ısı transferi, çarpışma modellemesi için de simülasyon yapabilme özelliğine sahiptir [31].

2.7.3 EDEM

Ayrık elemanlar metodunun kullanıldığı bir diğer program olan Altair EDEM programı madencilik, zemin, kablo, kayaç, toz gibi danecikli yapıların simülasyonunu doğru ve hızlı bir şekilde yapmak için oluşturulan bir programdır. Bu program malzeme akış simülasyonlarını, herhangi bir taşıt veya bir depodan malzemenin yükleme ve boşaltma simülasyonlarını fiziksel-mekanik olarak yapar.

EDEM programı diğer programlar gibi ayırık elemanlar metodunun kullanıldığı tarım, kozmetik, inşaat sektörü gibi sektörlerde kullanılır.

Programda kullanılan girdi parametreleri olarak malzemenin geometrisi ve malzeme özellikleri, yerçekimi gibi çevresel faktörler, temas modelleri, simülasyon zaman adımları, kuvvetler ve sınır koşulları örnek olarak gösterilebilirken çıktı parametreleri olarak da gerilme-uzama grafiği, parçacığın yer değiştirme kuvvet gibi hareket parametreleri alınabilir [32].

Tez kapsamında kullanılacak olan Particle Flow Code adlı program ayrı bir başlık altında detaylı olarak incelenecektir.

2.8 Particle Flow Code (PFC)

PFC (Particle flow code) Itasca firması tarafından geliştirilen 2 ve 3 boyutlu olarak hesaplama yapabilen ayırık elemanlar metodu ile çalışan bilgisayar programıdır. Daneli ve katı bir blok olarak tasarım yapılabilir. Daneciklerin birbirleri ile etkileşimini dane hızlarını iç kuvvet ve moment temel alınarak hesaplar. Parçacık şekilleri olarak 2 boyutta daire ve 3 boyutta küre şeklinde tanımlama yapılırken 2 boyutta dış bükey çokgen (poligon) ve 3 boyutta çok yüzlü (polihedra) olarak küme (clump) veya rijit blok (rigid block) şeklinde tanımlanır.

PFC'nin kullanım alanı madencilik ve cevher işleme, malzeme bilimi, geoteknik mühendisliği gibi bilim dalları örnek olarak verilebilir. Geoteknik mühendisliğindeki kullanım alanları olarak zemin stabilite analizi, temel taşıma kapasitesi ve zemin mekaniği deneylerinden 3 eksenli deney gibi zemin mekaniği deneylerinde kullanılmaktadır [33].

PFC'de girdi parametreleri olarak ise dane özelliklerinden yoğunluk, dane hacmi, efektif modül, rijitlik oranı, normal ve kesme rijitliği, moment direnci gibi parametreler uygun temas modellerine göre verilebilir. Aynı zamanda gerilme, deney adımları için zaman adım süresi, yerçekimi ve dane sınırları verilebilir.

PFC'de verilen bu girdi parametrelerinden parçacıkların hareketi, gerilme-uzama grafikleri, malzemenin akış modelleri bulunabilmektedir.

PFC’de danelerin simüle edilmesi kendi içinde barındırdığı 3 tip rijit model ile olmaktadır. Bunlardan bir tanesi küre danecikleridir. Bu danecikler üretimi ayrı ayrı tek daneler şeklinde, bir sınır belirterek toplu olarak belli sayıda veya bir sınır belirterek istenen porozite oranında oluşturulacak şekilde üretilebilmektedir. Bu küre daneciklerine başlangıç hızı, yoğunluk, moment gibi danenin fiziksel özelliklerinden parametreler girdi olarak tanımlanabilmektedir.

Bir diğer rijit danecik ise kümedir (clump). Farklı şekillere sahip rijit danelerin oluşturulmasında kullanılan bu yöntem şeklin içerisine istenen oran ve büyüklükte küre danelerinin yerleştirilmesi ile oluşur. Bu küre daneleri küçüldükçe ve sıkılaştıkça hesaplama sonuçlarının doğruluğu artar fakat bu aynı zamanda büyük bir matematiksel hesaplamayı ve çözüm süresinin uzamasını da yanında getirir.

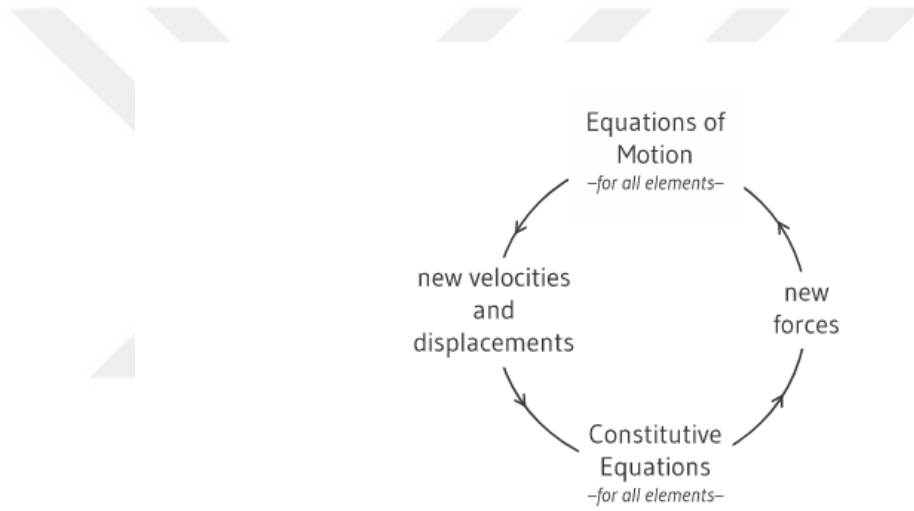
Bu dezavantajın üstünden gelmek için rijit blok isimli rijit bir yapı da PFC’de tanımlanmıştır. Tek parça şeklinde çalışan bu yapı ile istenen şekilde danecikler tasarlanabilmektedir. Küme ve rijit bloklarda kütle, başlangıç hızı ve dane momenti gibi özellikler top danelerinde olduğu gibi fiziksel parametreler olarak tanımlanabilir. Bunların üretimi de küre danelerinde olduğu gibi tek tek veya belli bir sınır içerisinde istenen sayıda veya belli bir sınır içerisinde istenen porozitede üretimi yapılabilir. Programda malzemenin oluşturulması materyal kısmında daha detaylı bir şekilde incelenecektir.

PFC aynı zamanda kendi içerisinde barındırdığı fish yazılım dilini de kullanmaktadır. Bu dil sayesinde program büyük bir esnekliğe kavuşur ve eğer (İF) komutu, döngü komutları (loops) kolayca yazılabilir. Bu konu hakkında daha detaylı bilgiler programın kullanım kılavuzu kısmından bulunabilir.

2.9 Programın Çalışma Algoritması

İtasca PFC’de sayısal modelleme Newton’un hareket yasalarına dayanan itasca tarafından açık çözüm isimlendirmesi verilen çözümleme ile yapılır. Bu çözümlemeyle termal çözümler veya dinamik hareketlerin çözümleri de yapılabilir. Modelleme ileri doğru giden zaman adımları ile bir döngü oluşturarak hesaplama yapılır. Programda döngü (cycle) olarak adlandırılan her bir adım için kullanılması gereken döngü için şunlar söylenebilir: Öncelikle her bir element için hız eşitlikleri oluşturulur ve her bir

eleman için bu değerler atanır. Bu değerlerden yeni hız ve yer değiştirmeler hesaplanır. Kurucu yasa adı verilen Newton'un ikinci yasası her bir eleman için uygulanır ve bu elemanlara yeni kuvvetler atanır. Bu yeni kuvvetler sonucunda tekrardan tüm elemanlar için hız eşitliği uygulanarak birinci döngü tamamlanmış olur ve ikinci döngü başlamış olur. Bu döngünün bir defa yapılması ile bir cycle tamamlanır. Döngü içerisindeki elemanlar için hareket yasaları tanımlanırken kuvvetler tüm elemanlar için sabit bir değer olarak alınır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus bu zaman adımlarının tamamlanması için gereken süre, malzemenin yoğunluğu, temas sayısı, boyutları gibi özelliklere bağlı olma durumudur. Anlatılan parametre değerleri programın uygun süre zarfında cevap verebilmesi için dikkatlice seçilmesi gerekmektedir [34].



Şekil 2.3 PFC'de program algoritmasının şeması [34]

Cycle Point	Cycle Operation
-10.0	Validate data structures
0.0	Timestep determination
10.0	Law of motion (or update thermal bodies)
15.0	Body coupling between processes
20.0	Advance time
30.0	Update spatial searching data structures
35.0	Create/delete contacts
40.0	Force-displacement law (or thermal contact update)
42.0	Accumulate deterministic quantities
45.0	Contact coupling between processes
60.0	Second pass of equations of motion (not used in PFC)
70.0	Thermal calculations (not used in PFC)
80.0	Fluid calculations (not used in PFC)

Şekil 2.4 PFC'de döngü dizisinin tanımlanması [34]

2.10 PFC Model Objelerinin Tanımlanması

PFC’de temel olarak 3 tane eleman bulunmaktadır. Bu elemanlar sırasıyla ‘top (ball)’, ‘duvar (wall)’ ve ‘yığın (clump)’tır. Bu elemanlardan top bir tek daneden oluşan temel eleman olurken yığın (clump) birden fazla top daneciğinin birleşmesinden meydana gelmiş yapı parçasıdır. Bu yapılar temas modellerine uygun matematiksel hesaplamalarına göre birbirleri ile etkileşime girerler [34].

Duvar yapısı Newton’un ikinci yasasına uygun olarak çalışmaz. Duvar elemanı yalnızca statik durumlarda durgun olarak değil aynı zamanda hareket edebilen veya moment özelliğine sahip dinamik bir yapı olarak da çalışabilir. Gerilmelere karşı sınır durumunu muhafaza edebilecek bir servo kuvvet tanımlaması da duvar elemanı için ihtiyaca binaen yapılabilir.

Rijit blok kapalı, köşeli ve farklı şekillerdeki malzemelerin modellenmesinde kullanılabilecek bir diğer PFC objesidir ve parçacık şeklinde PFC’de oluşturulur. Diğer elemanlar ile temas kanunları çerçevesinde etkileşime girebilme yeteneğine sahiptir. Rijit blokun en önemli özelliği kendisi dışındaki tüm elemanlarla yalnızca bir temas modeli kanunlarını kullanarak etkileşime girebilmesidir. Yani rijit blok elemanı

bir top parçacığı ile düzgün doğrusal temas modelini kullanırken bir başka top parçacığı, yığın parçacığı veya bir başka rijit blok ile hertz temas modeli ile etkileşime giremez bu sebeple rijit blok kullanılacağı zaman programdan istenen çıktılar göz önüne alınarak işlem yapılmalıdır. Bu noktada küresel olmayan parçacıkların tanımlanmasında yardımcı olan diğer temel eleman yığından ayrılmaktadır. Rijit Blokun sağladığı en büyük avantajı rijit blokların kullanıldığı durumlarda programın matematiksel hesaplamalarında önemli bir zaman avantajı elde edilmesi olarak söylenebilir [34].

Rijit blok elemanın top ve yığın elemanla etkileşime girme prensibi için ise PFC’de G. Nezami ve ark. [35] yaptığı çalışma kullanılmıştır. Bu çalışmada özetle rijit bloğun bir başka danecikle yapmış olduğu etkileşimde ağırlık merkezinin rijit blok içerisinde kalmamasına dikkat edecek şekilde en yakın noktadan itibaren temas formüllerinin çalışacağını ifade etmiştir ve PFC’de bu şekilde bu rijit bloğun diğer elemanlarla temasını çözümlenmiştir. Bu konu hakkında detaylı bilgi almak için PFC kullanım kılavuzuna bakılabilir [34].

PFC’de elastik sabitlerden elastisite modülü ve poisson oranı kullanılmaz. Bunun yerine efektif modül ve rijitlik oranı kullanılır. Efektif modül elastisite modülü ile ilişkili olup elastisite modülünün efektif modül ile doğru orantılı bir ilişkisi vardır. Efektif modülün birimi kuvvet/alan’dır ve E^* ile gösterilir. Normal rijitliğin tanımlanmadığı durumlarda normal rijitlik efektif modül yardımıyla PFC’de aşağıdaki formülle bulunur:

$$k^n = \frac{A \cdot E^*}{L} \quad 2.9.1$$

Burada A alan daneciklerden büyük olanın alanı olarak alınırken L uzunluk ise daneciklerin merkezlerinin birbirleri arasındaki mesafe olarak alınır [34].

Rijitlik oranı PFC’de $\frac{k^n}{k^s}$ olarak hesaplanır ve k^* şeklinde gösterilen birimsiz bir tanımdır. Rijitlik oranının poisson oranı ile ilişkisi, rijitlik oranının artmasıyla poisson oranının belli bir değere kadar artar. O sınırdan sonra rijitlik oranının artışı poisson oranını etkilememektedir.

PFC’de parçacıkların etkileşime girdiği bölgeye-etki alanına alan (domain) bölgesi denir ve bu alanda cisimlerin hızlanması, topların ve yığınların oluşması, daneciklerin yerçekimine maruz kalması gibi temas hesaplamaları bu alanda olur [34].

2.11 Ayırık Elemanlar Metodunda Kullanılan Temas Modelleri

Ayrık elemanlar metodunda birçok temas modeli kullanılmaktadır. Bu temas modellerini doğrusal modeller, elastoplastik modeller, sürtünme modeli, kırılma ve çatlama modelleri olarak sınıflandırabiliriz. Bu modellerden doğrusal modelleri kendi aralarında doğrusal model [36], doğrusal temas bağ modeli, doğrusal paralel bağ modeli [37], ve dönme dirençli bağ modeli [38] şeklinde sınıflandırabiliriz. Daneli yapılarda doğrusal olmayan davranışları incelemek için mindlin modelden türetilen hertz-mindlin temas modeli kullanılabilir [34].

2.11.1 Doğrusal Temas Modeli

Doğrusal temas modeli Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979) tarafından oluşturulan bir temas modelidir [36]. Doğrusal temas modeli Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979) tarafından oluşturulmuştur. Doğrusal temas modeli bir çift yay ve sönümleyiciden oluşmaktadır. Yay ve sönümleyicilerinden biri normal yönde kuvvetleri taşıırken diğeri kesme yöndeki kuvvetlere mukavemet göstermektedir. Doğrusal temas modelinde dönmeye karşı direnç gösterme olayı olmaz. Bu sebeple daneler birbirleri ile etkileşime girdiği zaman o danelere kuvvet ve moment aktarımında bulunur. Doğrusal temas modeli elastik bölgedeki davranışları inceler. Bu modelde doğrusal kuvvetlerin bulunması aşağıdaki şekilde olur [36].

$$F^c = F^l + F^d \quad 2.11.1.1$$

Formülde F^l doğrusal yayın kuvvetini temsil ederken F^d sönümleyici kuvveti tanımlar. Doğrusal kuvvetler normal ve kesme rijitliklerinin, dane merkezleri arası mesafe ile çarpılmasıyla bulunur. Sönümleyici kuvvet ise sönümleyici katsayısı, kütle, rijitlik ve dane merkezleri arası mesafe ile bulunmaktadır. Doğrusal normal kuvvetin bulunması ise aşağıdaki gibidir:

$$F_n^l = k_n * U_n \quad 2.11.1.2$$

k normal rijitliği U_n ise dane merkezleri arası mesafe olarak tanımlanır. Doğrusal kesme kuvvetinin tanımlanması ise:

$$F_s^l = k_s * \Delta U_s \quad 2.11.1.3$$

k_s kesme rijitliği ΔU_s ise rölatif yer değiştirme olarak tanımlanır.

Sönümleyicilerden kaynaklı kuvvetlerin bulunması ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$F^d = F_n^d + F_s^d \quad 2.11.1.4$$

Formülde F_n^d normal yöndeki sönümleyici katsayısını ifade ederken F_s^d ise kesme sönümleyici katsayısını ifade eder. Bu iki kuvvet PFC'de aşağıdaki formülle bulunur.

$$F_n^d = (2\beta_n \sqrt{m_c k_n}) \delta_n \quad 2.11.1.5$$

$$F_s^d = (2\beta_s \sqrt{m_c k_s}) \delta_s \quad 2.11.1.6$$

β_n normal sönümleyici katsayısı, β_s kesme sönümleyici katsayısı, m_c ise iki kütlelerin çarpıma göre tersinin toplamına eşittir.

Doğrusal temas modelinde daneciğin kayma hareketinin belli bir sınır değerini geçmesine izin verilmez gösterir. Buradaki sınırlandırmaya Coulomb sınırlaması denir ve hesaplanması aşağıdaki formülle olur:

$$F_s^\mu = -\mu F_n' \delta_s \quad 2.11.1.7$$

F_s^μ maksimum kayma kuvvetini gösterirken μ sürtünme katsayısını ifade eder. F_n' ise zaman adımıda ki ilk normal yöndeki kuvvettir.

2.11.1.1 Doğrusal Temas Modelinin Avantajları

Doğrusal temas modeli; dönme dirençli temas modeli, doğrusal bağ temas modeli, doğrusal paralel temas modeli gibi birçok farklı modelin türetilmesinde referans görevi görmüştür. Doğrusal temas modeli birçok temas modeline göre daha az parametre içerdiği için kullanışı yeni başlayanlar için çok daha kolaydır.

2.11.1.2 Doğrusal Temas Modelinin Dezavantajları

Moment aktarımından kaynaklı kum danelerinin dönüşü programın çözümlenmesinde ciddi yükler getirmektedir. Programın hızlı bir şekilde çalışabilmesi için doğrusal temas modeli yerine dönme dirençli temas modeli kullanılır. Elastoplastik ve plastik bölgede davranışların hareketleri incelemek için uygun bir temas modeli olmayıp çekme kuvvetine karşı direnç göstermediği için parçacıkların birbirini tuttuğu kılcal problemler, kohezyonlu problemlerde kullanılması da mümkün olmamaktadır [23], [39].

2.11.2 Hertz Mindlin Temas Modeli

Hertz model ayırık elemanlar metodunda kullanılan hertz-mindlin teorisine dayanan bir temas modeli olup bu model temas-tepki davranışlarının doğrusal olmayan yöntemle hesaplar [40], [41]. Hertz model daneli yapılarda için doğrusal analiz yöntemlerinde daha doğru cevap vermektedir. Fakat doğrusal analiz yönteminin kolaylığından kaynaklı birçok çalışmada doğrusal analiz yöntemi kullanılmıştır. Hertz yöntemle normal rijitlik k_n ve kesme rijitliğinin k_s bulunması ise aşağıdaki gibidir:

$$k_n = \frac{2Ga}{1-\nu} \quad 2.11.2.1$$

$$k_s = \frac{4Ga}{2-\nu} \quad 2.11.2.2$$

Burada G kesme modülü, ν poisson oranı, a ise temas alanlarının yarıçapıyla değişen parametre için kullanılır [27].

Normal ve kesme kuvvetinin bulunması ise doğrusal temas yöntemindeki gibi rijitlik modeline uygun olarak aşağıdaki formüllerle bulunur.

$$F^n = k_n * U_n \quad 2.11.2.3$$

$$\Delta F^s = k_s * \Delta U_s \quad 2.11.2.4$$

2.10.3 Dönme Dirençli Temas Model

Ayrık elemanlar metodunda kullanılan bir diğer temas modeli dönme dirençli temas modelidir. Deneyin en kısa sürede yapılabilmesi için kalibrasyonu yapılacak numunenin içindeki danecikler çoğu deneyde olduğundan daha büyük seçilirken danecik şekilleri olarak küre danecikleri olarak seçilebilir. Fakat bu durumda kesme yer değiştirmesine maruz kalan daneciğin momenti normalden fazla olacak ve sürtünme açısı gerçek modelden uzaklaşmaya başlayacaktır. Bu durumdan kurtulmak için daneciklerin dönmesini engelleyecek komutlar vermek malzeme gerilmesinde yalnızca yerel sürtünme açılarının etkili olmasını sağlayacaktır. Bunu sağlamak için dönme dirençli moment temas modeli kullanılır [39], [42].

Dönme dirençli temas modelinin matematiksel çözümlemesi normal ve kesme kuvvetlerinin bir sönümleyici ve bir yay tarafından tarif edilmesiyle oluşur. Yay tarafından oluşturulan dönme dirençli temas modeli aşağıdaki formülde gösterildiği gibi normal ve kesme kuvvetlerinin toplamıdır.

$$F_n = k^n u^n \quad 2.11.3.1$$

$$\Delta F_i^s = k^s \Delta u^s \quad 2.11.3.2$$

$$F^s = \sum \Delta F_i^s \quad 2.11.3.3$$

$$F^c = F^n + F^s \quad 2.11.3.4$$

Yukarıdaki formüllerde k^n daneciğin normal rijitliği, k^s daneciğin kesme rijitliği, F bileşke kuvvetidir [39].

k^n normal rijitlik değerinin bulunması ise temasa başlayan iki parçacığın normal rijitlikleri ile aşağıda ki formülde gösterildiği gibi bulunur:

$$\frac{1}{k^n} = \frac{1}{k_1^n} + \frac{1}{k_2^n} \quad 2.11.3.5$$

Kesme rijitliği temas eden iki parçacığın kesme rijitlikleri yardımıyla aşağıdaki formülle bulunur:

$$\frac{1}{k^s} = \frac{1}{k_1^s} + \frac{1}{k_2^s} \quad 2.11.3.6$$

Doğrusal temas modelinde olduğu gibi kayma sınırlaması bu temas modelinde de geçerli olup aşağıdaki formülde gösterilmiştir.

$$|F^s| \leq |F^n| * \tan\mu \quad 2.11.3.7$$

Sürtünme katsayısı μ değeri daneciklerden sürtünme katsayısı minimum olanına göre işlem yapılır.

$$\mu = \min(\mu^1, \mu^2) \quad 2.11.3.8$$

Dönme rijitliği k^r ile momentlerin bulunma işlemi yapılabilir. Dönme momentinin bulunması için elastik ve plastik momentin bulunması gerekmektedir. Elastik momentin bulunması için aşağıdaki matematiksel formül kullanılır.

$$M_L^{elast} = k^r * \theta_L^r \quad 2.11.3.9$$

Burada θ_L^r dönme eksenindeki açısal vektördür. Dönme rijitliğinin bulunması kesme rijitliği ile bulunmaktadır. Bunun daneciklerin ortalama yarıçapının bulunması gerekmektedir. Ortalama yarıçapın bulunması aşağıdaki formülle yapılmaktadır.

$$\frac{1}{R_{ort}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad 2.11.3.10$$

Dönme rijitliğinin bulunması ise aşağıdaki formülle yapılmaktadır.

$$k^r = k^s * R_{ort}^2 \quad 2.11.3.11$$

Plastik momentin bulunması ise aşağıdaki formülle yapılmaktadır.

$$M_L^{plast} = \eta^r * R_{ort} * |F^n| \quad 2.11.3.12$$

Dönme momentinin bulunması aşağıdaki formülle bulunmaktadır.

$$M^r = m_{L-G} \min(|M_L^{elast}|, |M_L^{plast}|) * \frac{M_L^{elast}}{|M_L^{elast}|} \quad 2.11.3.5$$

[39]

2.10.4 Doğrusal Paralel Bağlı Model

Birbirlerine herhangi bir bağlayıcı ile bağlanmış kayaç yapıların incelenmesinin yapılması için kullanılan doğrusal paralel bağlı model iki farklı daneciğin birbirlerine bir bağlayıcı madde ile bağlandığını varsayarak işlemlerini o bağlı maddenin davranışını göz önüne alarak yapar. Bu aradaki bağ belli bir kesme veya normal kuvveti aştığı zaman kopar. O bağ kopuncaya kadar hesaplamalar doğrusal paralel bağlı modelin hesaplama parametrelerine göre devam ederken bağ koştuktan sonra doğrusal temas modelinin hesaplama parametreleri devreye girer. Bu bağ temas modelinde diğer doğrusal modellerden farklı olarak sönümleyici hesaplama katılmaz. Modelimizdeki temas kuvvetin hesaplanması için oluşturulan matematiksel formül aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$F_c = F^l + F^{bp} \quad 2.11.4.1$$

Burada F_c toplam temas kuvvetini ifade ederken F^l doğrusal yaydan kaynaklı normal ve kesme kuvvetin bileşkesini ve F^{bp} ise normal ve kesme sönümleyiciden kaynaklı kuvvetin bileşkesi olarak gösterilmektedir. Bunların hesaplanması doğrusal temas modelindeki gibi hesaplanmaktadır. Bağlı kuvvetin hesaplanması ise aşağıdaki formülde gösterilmiştir.

$$F^{bp} = F_n^{bp} + F_s^{bp} \quad 2.11.4.2$$

F_n^{bp} normal yöndeki bağ modelini göstermekte iken F_s^{bp} kesme yönündeki bağ kuvvetini temsil etmektedir. Bu temas modelinde danecikler arasındaki bağdan kaynaklı olarak doğrusal temas modelinin aksine çekmeye karşı mukavemet göstermektedir. Moment kuvvetinin bulunması ise temas momenti danecikler arasındaki bağ momentine eşittir.

$$M_c = M^{bp} \quad 2.11.4.3$$

M_c Temas momenti, M^{bp} danecikler arası bağ momentidir [37].

2.10.5 Doğrusal Temas Bağ Modeli

Bir diğer bağlı model olan doğrusal temas bağ modeli de doğrusal paralel bağlı model gibi çimento gibi bir bağlayıcı ile birbirine bağlanmış ve sinterlenmiş elemanları incelemek için kullanılan bir temas yöntemidir [43]. Normal ve kesme yönlerinde çalışan bir çift yay ile matematiksel modellemesi yapılan bu modelde çekme kuvvetine karşı doğrusal paralel bağ modelde olduğu gibi mukavemet gösterir.

Bu modelde doğrusal temastan farklı olarak bağlı olmayan yaylardaki aktivasyon mesafesi ve kesme kuvveti için sürtünme katsayısı yerine sırasıyla T_F ve S_F değerleri gelir. Bu değerler sırasıyla çekme gerilmesi ve kesme kuvvetleri olup bu temas modelinde aşağıdaki gibi hesaplanırlar.

$$T_F = T_\sigma * A \quad 2.11.5.1$$

$$S_F = S_\sigma * A \quad 2.11.5.2$$

T_σ çekme gerilmesi olarak ve S_σ kesme gerilmesi olarak tanımlanmıştır.

Bağ koptuktan sonra ise doğrusal temas modelindeki matematiksel hesaplamalara göre işlem devam eder.

$$F_C = F^l + F^d \quad 2.11.5.3$$

$$F_n^l = k_n * \Delta\delta_n \quad 2.11.5.4$$

$$F_s^l = k_s * \Delta\delta_s \quad 2.11.5.5$$

$$F_n^d = (2\beta_n\sqrt{m_ck_n})\delta_n \quad 2.11.5.6$$

$$F_s^d = (2\beta_s\sqrt{m_ck_s})\delta_s \quad 2.11.5.7$$

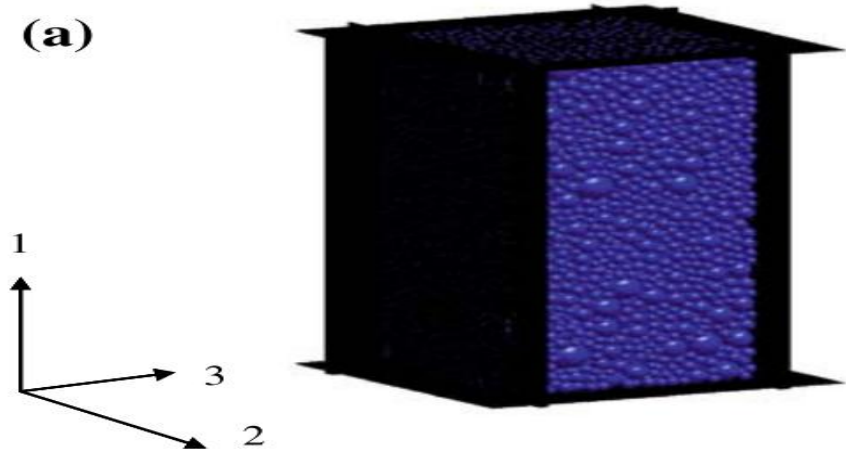
3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1 Ayırık Elemanlar Metodu İle Deneyin Hazırlanma Aşamaları

Ayrık elemanlar metodunda üç eksenli deneyin hazırlık aşamalarını anlatırken belli bir algoritma üzerinden gitmek faydalı olacaktır. Bunun için öncelikle yapılacak deneyin sınırları belirlenir. Sınır belirlenmesi yapıldıktan sonra numunenin uygun bir şekilde hazırlanması gerekmektedir.

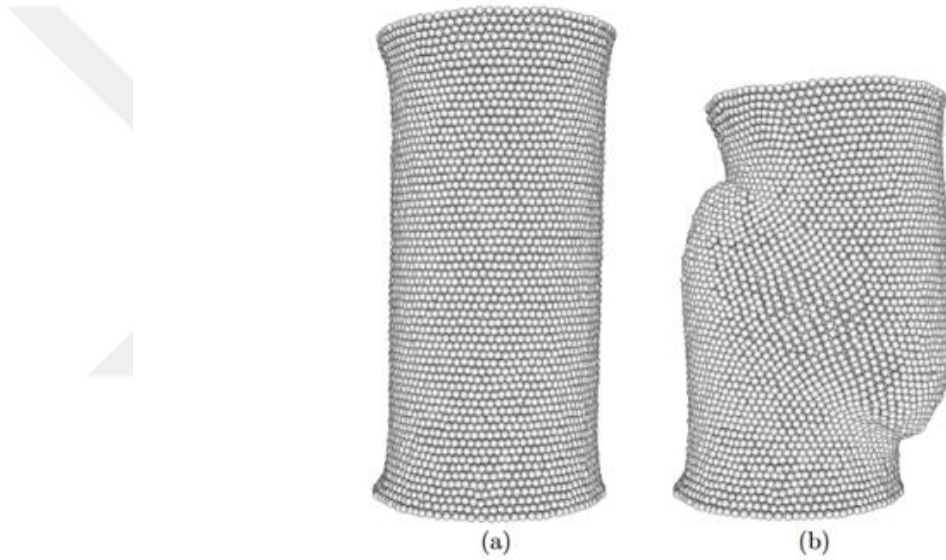
Numune hazırlamak için dış katmanı sarmalayacak cidarların belirlenmesi yapılır. Cidarlar ayırık elemanlar metodunda farklı şekillerde yapılabilmektedir. Bazı çalışmalarda cidarlar rijit duvar olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmalarda cidarlar sürtünmesiz olarak tasarlanmışlardır, bu sayede duvar ve dane arasındaki sürtünmeden kaynaklı gerilme kaybı meydana gelmemiştir. Hücre basıncı yan duvarlar ile üst duvarlara verilir, sabit bir hızla üst ve alt cidarlar hareket ettirilir. Bu süre zarfında yanal duvarlar sabit bir kuvvet altındaki servo mekanizma ile kontrol altında tutulur.

(a)



Şekil 3.1 Rijit elemanlarla cidar oluşumu [39]

Bu deney yöntemi üç eksenli deneyi tam olarak yansıtmadığı için araştırmacılar başka alternatifler aramışlardır. Bu alternatiflerden biri membran katmanının ball (küre) danecikleri ile yapılmasıdır[26], [44]. Kawamoto ve ark., 2018 yaptıkları çalışmada 5760 parça danecik kullandılar. Danelerin her birisinin yarıçapı 0.22 mm, membran çapını ise 10 mm olarak hazırlamışlardır. Bu daneciklerin her birini doğrusal paralel bağlı model temas modelini kullanarak tasarlamışlardır. Bu temas modelinin parametrelerinden normal rijitlik katsayısını $3 \cdot 10^4$ N/m ve normal ve kesme bağ rijitlikleri 100 N/m almışlardır.



Şekil 3.2 Membran tabakasının daneciklerle yapılması [44]

Bir diğer cidar hazırlama yöntem ise sonlu farklar yöntemi ile cidarı ayırık elemanlar metodu programında oluşturmak veya sonlu farklar metodundan ayırık elemanlar metodunu kullanan programa göndermek şeklinde yapılabilir [45]. Bu metot PFC’de bir geometri tanımlanması ve tanımlanan geometriye kabuk yapısı eklenerek yapılmaktadır.

Numune hazırlanması için kullanılacak olan dane türü çok önemlidir. Danelerin küre danesi seçilmesi zaman tasarrufu açısından yığın ve rijit bloklara göre çok daha avantajlı olacaktır. Dane şekli seçildikten sonra bu danenin boyutları belirlenmeli ve üretim tarzı planlanmalıdır. Eğer porozite belli ise buna göre bir üretim yapılabilir. Eğer belli başlı danelerin konumu çok önemli ise daneler tek tek tasarlanarak üretimi belki bir döngü yardımıyla yapılmalıdır. Deney danelerinin yoğunlukları girilmeli başlangıç şartları arasında dönme, hareket gibi fiziksel parametreler varsa bunlar girilmelidir. Bütün bu şartlar belirlendikten sonra istenilen şekilde numune hazırlanmalıdır [34].

Numune hazırlanırken numune boyutu ve dane sayısı gerçek dane sayıları ve numune boyutuna uygun olarak her zaman eşit olarak tasarlanamaz, özellikle zemin mekaniğinde kum daneleri gibi nispeten küçük ve yüzbinlerce danenin bir arada bulunduğundan gerçek şartlar altında tasarlanamaz. Bu sebeple yapılan çalışmalarda dane boyutu daha büyük alınmıştır. Dane boyutu ve dane sayısı içinde kalibrasyonlar yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır [23], [46], [47].

Numunenin cidarlarıyla birlikte hazırlanmasından sonra temas modeli girilir. Daha önce detaylıca açıklanan temas modellerinden, dane türünün kayaç veya kum, mika gibi daneli yapılar veya kohezyonlu yapı olup olmadığı göz önüne alınarak uygun olan temas modeli seçilir ve temas modeli parametreleri girilerek matematiksel temel referanslar belirtilmiş olur.

3.2 Makro ve Mikro Parametrelerin Tanımlanması ve Etkisinin İncelenmesi

Mikro ve makro parametreler, numunenin davranışını belirleyen önemli fiziksel ve çevresel özellikler olup istenen şartların sağlanması için dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerden mikro parametreler normal ve kesme rijitliği, rijitlik oranı, sürtünme katsayısı, moment direnci katsayısı gibi danelerin bizzat kendisi ile ilgili parametrelerdir. Makro parametreler ise young modülü, rijitlik oranı, genleşme açısı, pik gerilme gibi danelerin dış etkenlerle ilişkili parametrelerdir.

Mikro ve makro parametrelerin etkisini inceleyen Belheine ve ark., 2009 yapmış oldukları bir dizi üç eksenli deneyde birçok sonuca ulaşmışlardır. Öncelikle bu deneyde elastisite modülü, young modülü, rijitlik oranı (k_s/k_n), parçacıklar arası sürtünme katsayısı (μ), dönme rijitlik katsayısı (β) ve moment katsayısı (η) parametrelerini kullanmışlardır. Temas modeli olarak dönme dirençli temas modelini kullanmışlardır.

Deneyleri 100, 200 ve 300 kPa'lık hücre basıncı altında yapmışlardır. 100 kPa hücre basıncı altında yaptıkları deneyde elastisite modülü ile normal rijitlik arasında doğru orantılı bir ilişki bulmuşlardır. Rijitlik oranı ile poisson oranı arasında ise ters orantılı bir oranın ortaya çıktığını göstermişlerdir. Elastik bölgenin asıl olarak elastik mikro parametrelerden etkilendiğini söylemişlerdir. Normal rijitliği ve rijitlik oranını sırasıyla $9.6 \cdot 10^6$ N/m ve 0.04 seçerek deneyleri yapmışlardır. Sonuçların, deneysel sonuçların değerleri ile uyumlu olarak çıktığını gösterdiler.

Yapılan çalışmalar ışığında genleşme açısı üzerinde sürtünme katsayısının etkisinin çok önemli olduğunu fakat dönme direnç katsayısı ve plastik moment katsayısının sürtünme katsayısına istinaden daha az anlamlı olduğunu, pik kuvvetin sürtünme katsayısına, dönme direnç katsayısına ve plastik moment katsayısına bağlı olduğunu söylediler. Bu değerlerin sırasıyla sürtünme katsayısı (μ) 30° , dönme rijitlik katsayısını (β) 0.12 ve plastik moment katsayısı (η) 1 olarak alındığında gerekli kalibrasyonun sağlandığını ifade etmişlerdir [23].

Mikro ve makro parametrelerin etkisini inceleyen Marczewska, I., Rojek, J., & Kačianauskas, R. (2016) [48] numune hazırlama işleminde gerçek laboratuvar deneyinde kullanılan yükseklik-çap oranını (H/D) kullanmışlardır. Bu deneyde yerçekimi etkisi göz ardı edilmiş, temas modeli olarak hertz temas modeli kullanılmış ve viskoz hareket için Sönümleyici katsayısını (ξ) 0.7 olarak almışlardır. Temas rijitliğinin malzeme davranışı üzerine olan etkilerini incelerken normal rijitlik değerini $9 \cdot 10^3$ N/m ile $7.5 \cdot 10^6$ N/m değerleri arasında rijitlik oranını ise (k_s/k_n) olarak 0.35 değerini alarak farklı deneyler yapmışlardır. Elastisite modülünün artmasıyla temas rijitliğinin arttığını fakat yüksek değerli temas rijitliğinin başlangıç eğimi üzerindeki etkisinin az bir miktar olduğunu gözlemlemişlerdir. Hacimsel uzama ile normal rijitlik arasındaki ilişki hakkında ise eksenel uzama hacimsel uzama grafiği

üzerinde göstermişlerdir. Temas rijitliğinin artmasıyla hacimsel uzama-eksenel uzama grafiğindeki büzülmenin kısaldığını ve hacimsel büzülme eşiğinin de kısaldığını gözlemlemişlerdir. Temas rijitliğinin elastisite modülü ile olan ilişkilerinde temas rijitliğinin düşük değerleri için elastisite modülünün sonuçlarının gerçek değerlere yakın çıktığını ama temas rijitliğinin büyüdükçe elastisite modülünün doğruluktan uzaklaştığını gözlemlemişlerdir.

Rijitlik oranının malzeme davranışına etkisini incelemek amacıyla normal rijitlik için 9 kN/m, 15 kN/m ve 34 kN/m ve rijitlik oranını da 0.04-1.0 arasında ki değerlerle 100 kPa altında üç eksenli deney yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda koordinasyon sayısı ile temas rijitliği arasında ters bir ilişki olduğunu söylemişlerdir. Rijitlik oranının sıfıra yaklaşmasıyla bulk modülünün, rijitlik oranı ile değiştiğini gözlemlemişlerdir.

25, 50, 100, 200 ve 300 kPa'lık farklı kuvvetler altında normal rijitlik katsayısını 15 kN/m olarak, rijitlik oranını 0,35 olarak yaptıkları deneylerde koordinasyon sayısının, poisson oranının ve elastisite modülünün hücre basınçlarına bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir [48].

Membran yapısının numune davranışına olan etkisini inceleyen Qu ve ark., 2019, membran elemanını bağlı küre danecikleri yardımıyla modellemiştir. Bu daneciklerde her bir parçacığı 6 yerel serbestlik derecesine sahip şekilde tasarladılar. Sürekli bir yapı gösteren membranın bağlı küresel parçacıklar ile oluşturulması için iki farklı yöntem olduğunu ve bunların tek katmanlı altıgen şeklinde yapılması veya numune için oluşturulan dane parçacıklarından daha küçük yarıçaplı bağlı küre daneleri ile membran yapılması olarak bu iki yöntemi ifade ettiler. Yaptıkları çalışmada bilgisayarın hesaplama süreç maliyetlerini de göz önüne alarak membran parçacıklarının boyutlarını numuneyi oluşturan numunenin boyutlarının üçte biri olacak şekilde tasarladılar. Membranın temas modeli olarak çekme kuvvetine karşı direnç gösterebilecek şekilde ama momenti aktarmayacak şekilde bağlı temas model seçtiler. Membran rijitliğinin zaman adımları için önemli bir parametre olduğunu ifade etmişlerdir ve bu değeri 541 N/m olarak almışlardır. Elastik bölgedeki numuneler için membranın rijit duvardan daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlediler. Yaptıkları deneylerde 50 kPa hücre basıncı altında yaptıkları çalışmada membranın sıkı

durumunu koruduğunu fakat 100 kPa hücre basıncı altında yapılan deneyde membranın yumuşamaya başladığını fark etmişlerdir.

Hacimsel uzama değeri için yaptıkları karşılaştırmada, sınırlandırılmış hücre basıncı altında esnek membranlı numunenin rijit numuneye kıyasla hacimsel uzama değerinin iki kat daha fazla olduğunu gözlemlediler.

Membran kalınlığının etkisi için 0.3 mm, 0.6 mm ve 1 mm kalınlıkta, elastisite modülü ile poisson oranını ise sırasıyla 1.25 ve 0.2 olarak aldıkları deneylerde membran kalınlığının önemli etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Kalınlık ile yanal gerilme arasında doğrusal bir ilişki bulmuşlardır. Aynı şekilde membran rijitliği ile membran katsayısı arasında da benzer bir ilişki olduğunu gözlemlemişlerdir [49].

Köşeliliğin numune davranışı üzerine etkilerini inceleyen Salot ve ark., 2009, yaptıkları çalışmada köşelilik değerlerini 0, 0.2, 0.6, 1 ve 1.4 alarak inceledikleri deneyde deviator gerilmelerdeki pik gerilmelerin arttığını göstermişler ve bu sonucun kilitlenme (interlocking) olayından kaynaklandığını ve köşeliliğin arttıkça kilitlenme (interlocking) olayının da arttığını ifade etmişlerdir. Köşelilik hacimsel uzama için incelediklerinde ise 0.6 değerinden büyük değerler için hacimsel uzama üzerinde etkisinin düşük olduğunu göstermişlerdir [46].

3.3 Kalibrasyon Metodolojisi

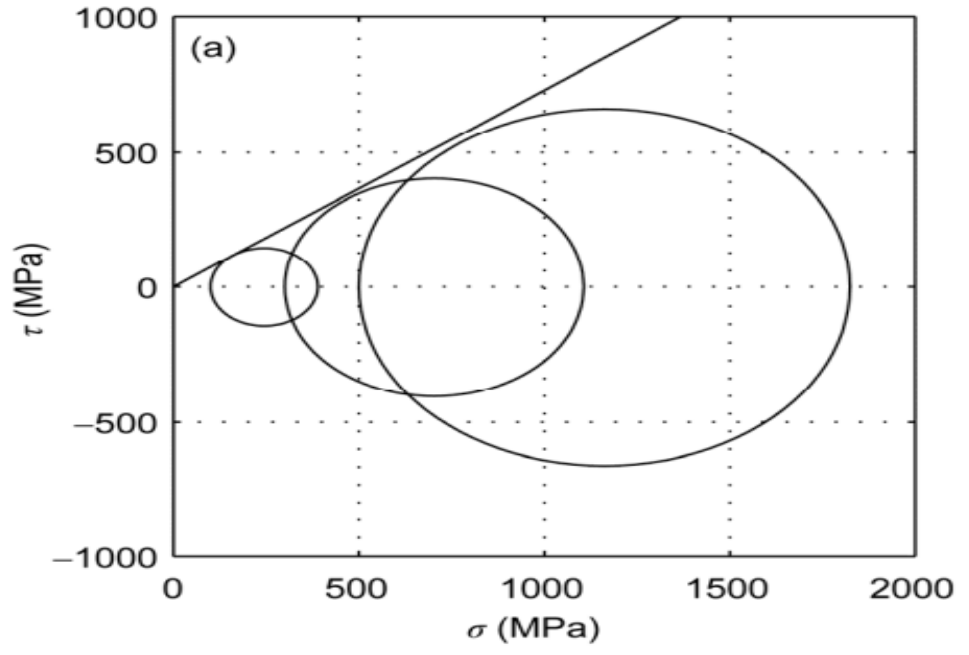
Gerçek deneylerden sayısal analizlerde kullanılabilecek değerler her durumda alınamadığından dolayı kalibrasyon yapılması gerekmekte olup bunun için kalibrasyon prosedürlerine ihtiyaç vardır [50]. Bu tez kapsamında kalibrasyon yöntemlerinden deneme-yanılma yöntemi incelenecektir. Literatürdeki kalibrasyon prosedürleri bu bölümde incelenecektir.

Hazzar ve ark. 2020 yaptıkları nümerik üç eksenli deney çalışmasında numune olarak cam boncukları kullanmışlardır. Rijitlik oranının mikro parametreleri etkilediğini, makro parametrelerin ise elastisite modülünden, poisson oranından, sürtünme açısından ve genleşme açısından etkilendiğini söylemişlerdir. Kalibrasyon prosedürü olarak normal rijitliği veya rijitlik oranını numunenin deformasyon modülüne ve poisson oranına ulaşıncaya kadar farklı değerler vererek denemişler, daha

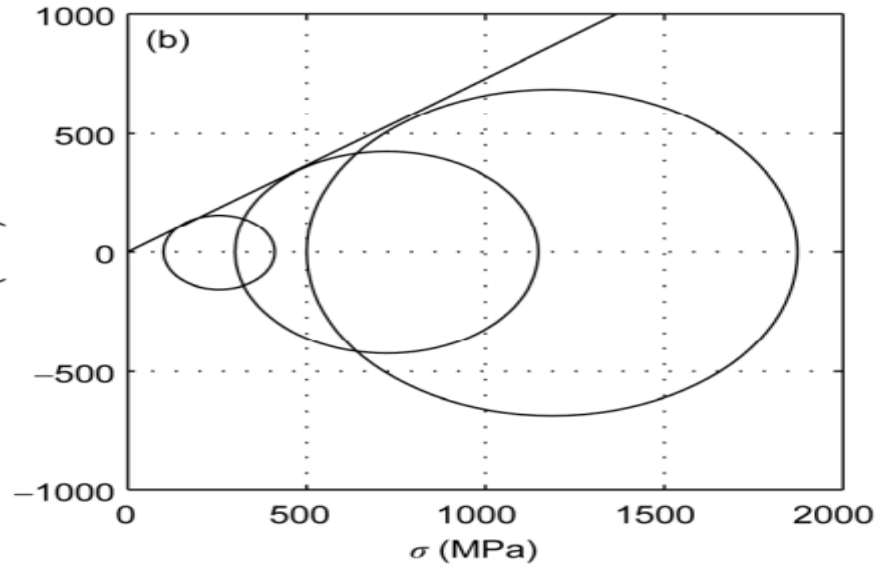
sonra parçacıklar arası sürtünme katsayısını numunenin genişleme açısına ulaşınca kadar farklı değerler vererek kalibrasyon yapmışlardır [51].

S. J. Lee ve ark., 2012 yaptıkları çalışmada önermiş oldukları kalibrasyon prosedürü başta normal ve kesme temas rijitliklerinin sabit tutularak sürtünme katsayısını değiştirilmesi olmuştur. Sürtünme katsayısı daneciklerin yüzey yapısı ile ilgili olduğundan dolayı bu yöntemi önermişlerdir. Gerçek deneye uygun bir sürtünme katsayısı seçildikten sonra normal ve kesme rijitliklerini incelemişlerdir. Bu değerlerden normal temas rijitliğini kesme temas rijitliğinden daha büyük bir değer olarak almışlardır. Normal ve kesme temas rijitliği deneme yanılma şeklinde, deney sonucunda aranan değerlere yakın değerler gelinceye kadar değiştirilmeye devam edilmiştir [52].

Wang & Li, 2014, yaptıkları çalışmada numune olarak chande kumunu kullanarak daha önce yapmış oldukları üç eksenli deneyin ayrıık elemanlar metodunda simülasyonunu yapmışlardır. Deney için takip edilecek kalibrasyon prosedürü olarak önerdikleri yöntemde öncelikle rijitlik oranını belirlemişlerdir. Bunun yapmalarının sebebi istenen poisson oranının elde edilmesidir. Rijitlik oranının seçilmesiyle, temas modülünün istenen young modülüne ulaşması için deneyler yapmışlardır. Kalibrasyon çalışmaları için YADE 3D bilgisayar programını kullanmışlardır. Efektif modülü belirledikten sonra genişleme açısının ayarlanması için sürtünme katsayısının ayarlanmasını yapmışlardır. Temas modeli olarak dönme dirençli temas modelini kullanmışlar ve en son dönme rijitliğini ayarlamışlardır. İstenen sonuca ulaşınca kadar bu son iki adımı döngü olacak şekilde tekrarlamışlardır. Kalibrasyon sonucu ulaştıkları sonuçlar Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de bulunan mohr grafiklerinde gösterilmiştir [53].



Şekil 3.3 Deneysel chande kumu üç eksenli deney sonucu [53]



Şekil 3.4 Ayrık elemanlar metodu sonucunda üç eksenli deney sonucu [53]

4. MATERYAL

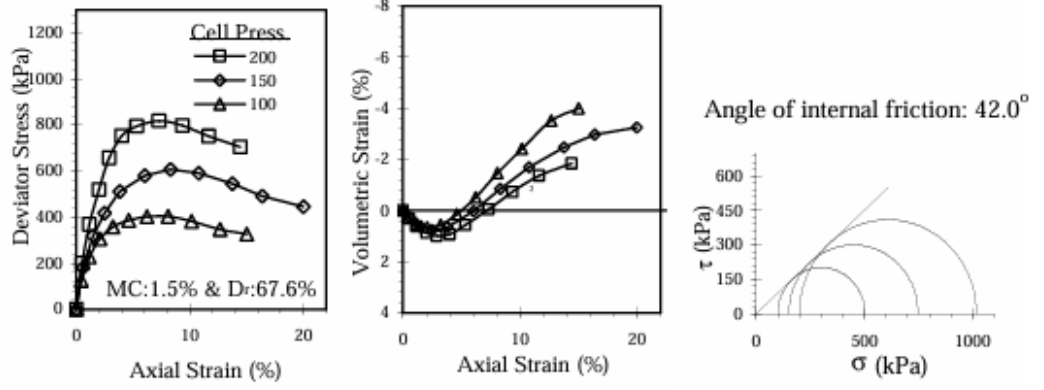
4.1 Kalibrasyon İçin Referans Alınacak Numunenin ve Çalışmanın İncelenmesi

Basari, 2012 yapmış olduğu çalışmada, mika danelerinin zeminin mühendislik davranışlarına olan etkisini incelemek için bir araştırma yapmıştır. Bol alüvyonlu Gediz deltasından 8 adet mühendislik araştırma sondajı yardımıyla 25m'den numuneler almıştır. Araştırılan zeminden elde edilen numuneleri monotonik, dinamik ve bender eleman deneyleri ile incelemiştir.

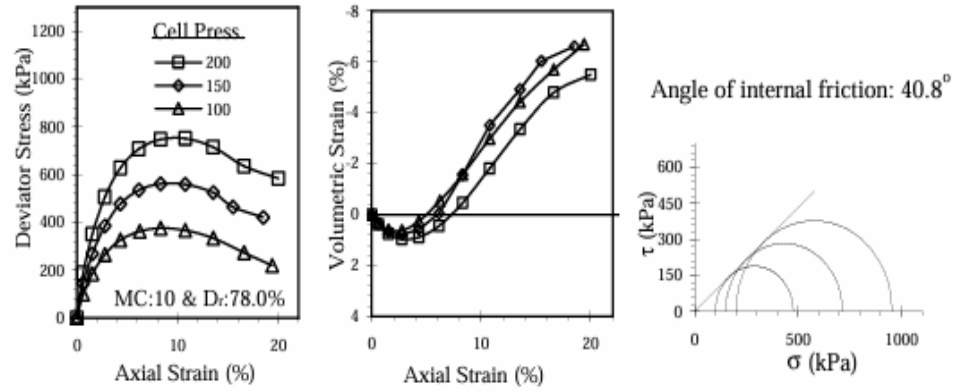
Üç eksenli deney için farklı iki test aparatı kullanmışlardır. Bu aparatlardan biri Seiken markasının DTC-367S modeliyken diğer aparat yazılım içerikli Controls-Wykeham Farrance aparatıdır. DTC-367S Seiken modeli yardımıyla yapılacak deneyin test numunesi 50 mm çap ve 100 mm yükseklik olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu platform yük kontrollü dinamik üç eksenli deneyi yapabilirken uzama kontrolü altında da monotonik üç eksenli deneyi de yapabilmektedir. Controls–Wykeham Farrance platformu yardımıyla yapılacak deneyin numune boyutları 70 mm ve 140 mm olacak şekilde tasarlanmıştır.

Monotonik yükleme için kullanılan numune boyutları 70 mm çap 140 mm yükseklik olacak şekilde hazırlanmıştır. Dinamik yükleme için ise iki farklı deney yapılmış ve bu deneylerden 50 mm çap 100 mm yükseklik ve 70 mm çap 140 mm yükseklik şeklinde hazırlanmıştır.

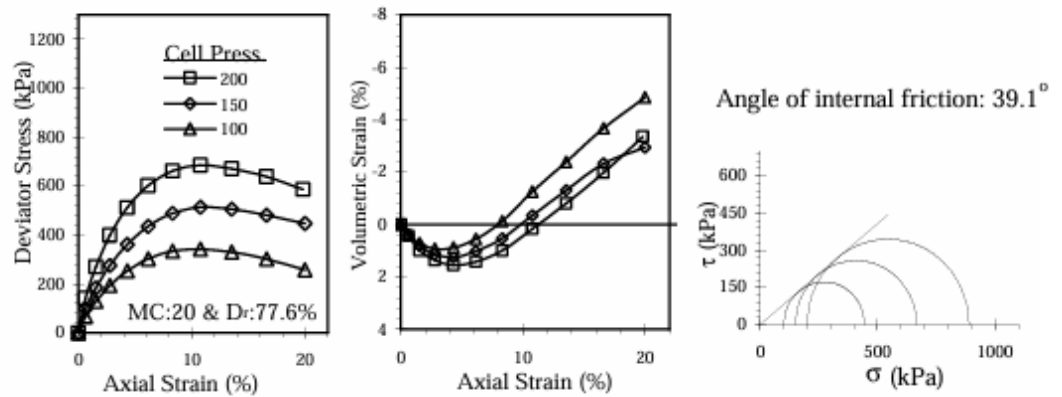
Monotonik olarak yapılan üç eksenli deney için hazırlanan numunelerde mika içerikleri yüzde olarak sırasıyla %1.5, %10 ve %20 değerleri kullanılmıştır. Bu deneyler farklı sıklıklarda hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 100, 150 ve 200 kPa'lık hücre basınçları altında üç eksenli deneye tabi tutulmuştur. Bu deneylerden bu tez kapsamında kalibrasyon için referans olarak kullanılacak sonuçlar Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir [20].



Şekil 4.1 %1.5 mika içeriği için monotonic üç eksenli deneylerin sonuçları [20]



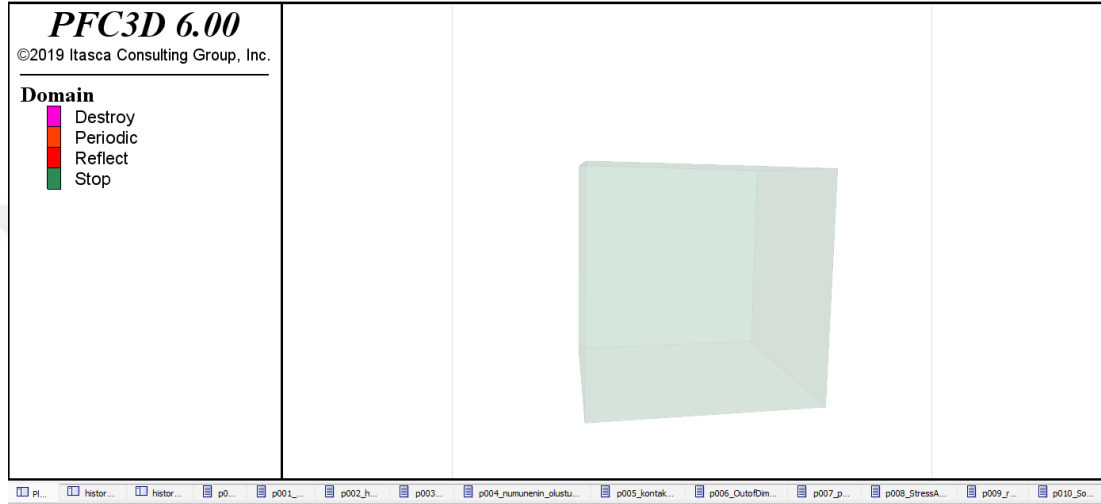
Şekil 4.2 %10 mika içeriği için monotonic üç eksenli deneylerin sonuçları [20]



Şekil 4.3 %20 mika içeriği için monotonic üç eksenli deneylerin sonuçları [20]

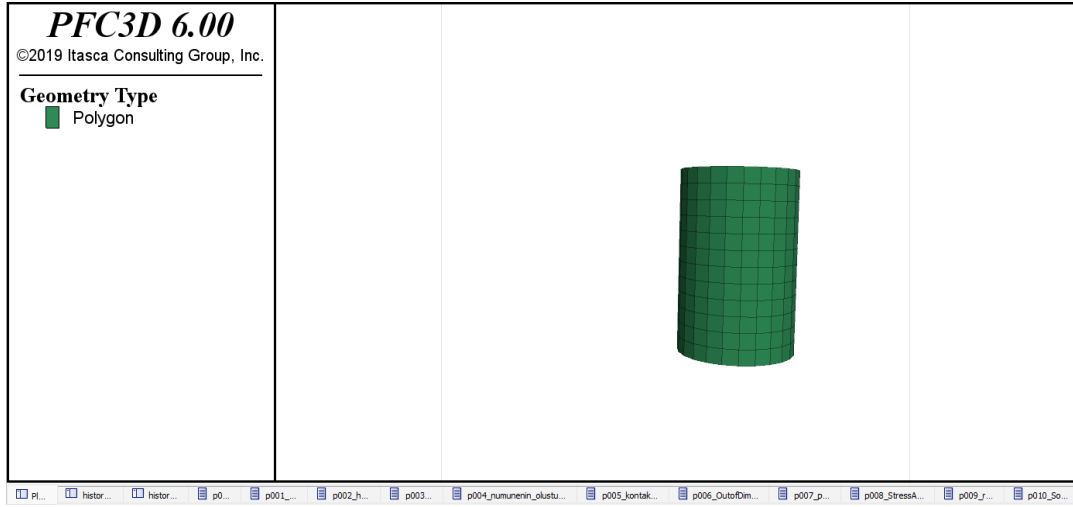
4.2 Particle Flow Code Kullanılarak Deneyin Yapılması

Tez kapsamında yapılan çalışmada numune hazırlama işlemi için kullanılan üç eksenli deneyin çapı 14 cm yüksekliği ise 28 cm olarak seçilmiştir. Danecik sayısının 10000 adetten fazla olması ve çap/boy oranının $\frac{1}{2}$ oranını sağlaması için bu değerler seçilmiştir. Deneyin yapılacağı ve programın işlem yapacağı sınır alanı her bir koordinat düzlemi için -70 cm ile 70 cm arasında girildi. Bu domain alan Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



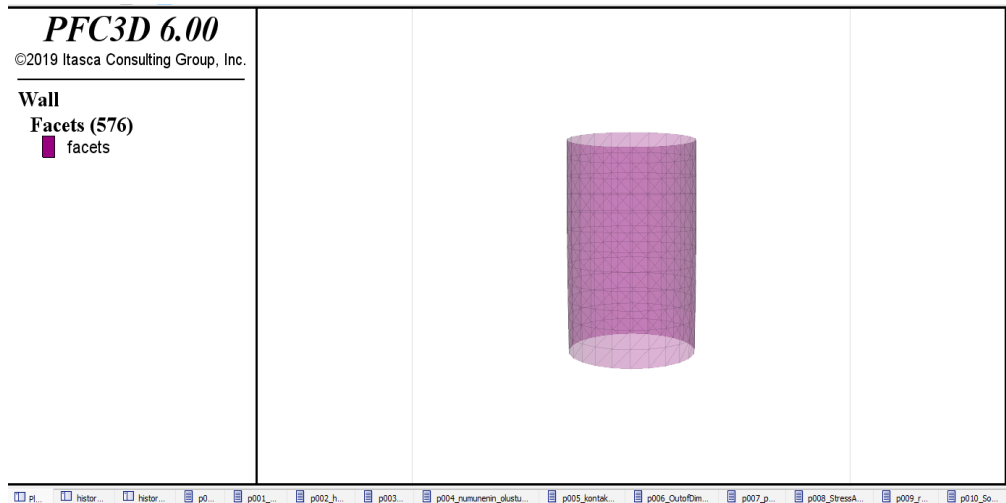
Şekil 4.4 Etki Sınırların Oluşturulması

Numunenin dış cidarı için sonlu farklar yönteminden faydalanılmıştır. Bunun için PFC’de bulunan FLAC 3D plugin aracı kullanıldı. Bu araç sonlu farklar metoduyla çalışan FLAC programındaki parametrelerin PFC içerisinde de kullanılmasına olanak sağlıyor. Dış cidarın hazırlanması için önce dış cidarın geometrisini belirlendi. Bir yay yardımıyla alt daire kısmı belirlenip geometri (geometry) komutu kullanılarak bu daire uzatılıp silindirik bir geometri elde edilmiştir. Daha sonra sonlu farklar yöntemi için ihtiyaç duyulan noktaların belirlenmesi yapıldı. Bunun için yapı (structure) komutu kullanıldı ve yapı kabuk (structure shell) komutu ile bu membranın elastisite modülü $3e6$, poisson oranı 0.495, kalınlığı 5.6 mm ve yoğunluğu 930 g/cm^3 olarak tanımlandı.

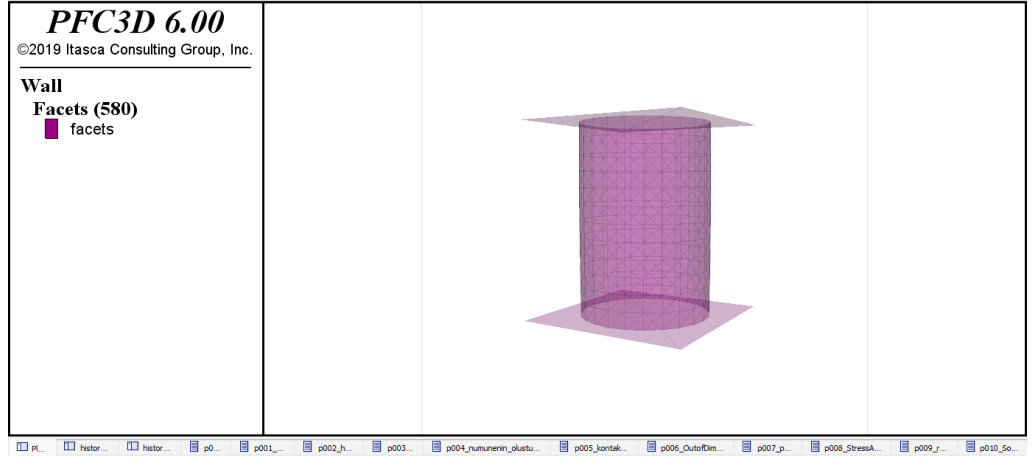


Şekil 4.5 Cidarın geometrisinin oluşturulması

Cidar geometrisi hazırlandıktan sonra wall komutu ile cidarın oluşturulması yapıldı. Cidar hazırlandıktan sonra alt ve üst plakların tasarımı yapıldı. Bu plaklar dikdörtgen şeklinde bir poligon olarak tasarlanmıştır. Bir kenarı çapın 1.3 katı olarak seçilmiş olup üst ve alt plaklar yardımıyla üç eksenli deneyde kuvvet aktarımı eksenel yönlerde sağlanmıştır.

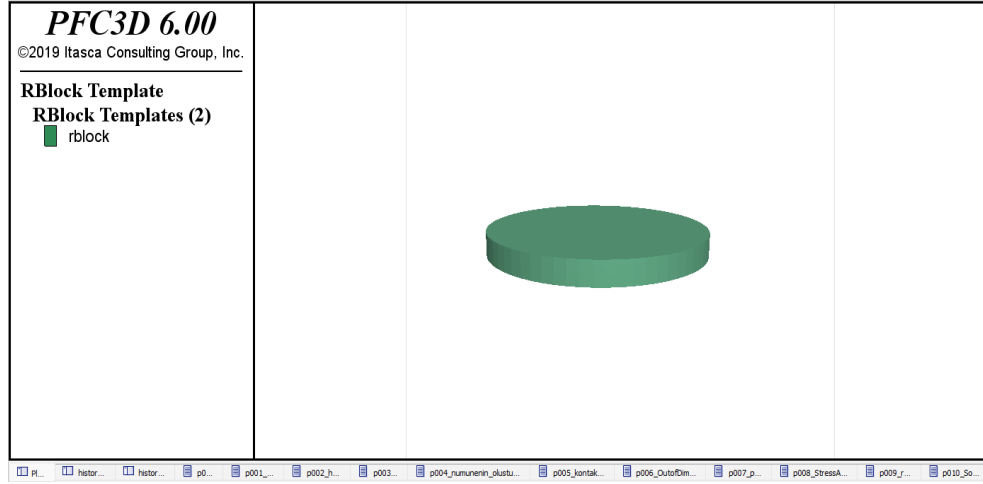


Şekil 4.6 Oluşturulan geometrinin duvara çevrilmesi



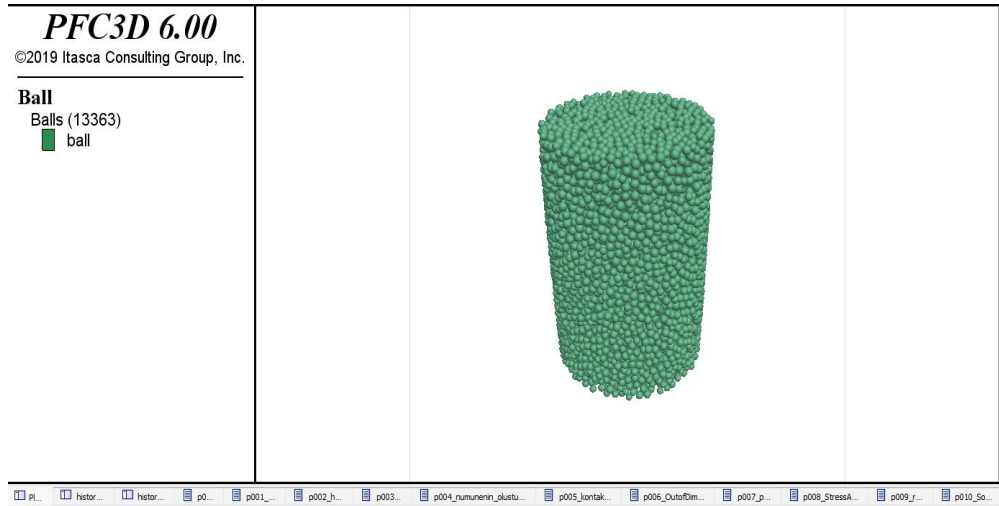
Şekil 4.7 Alt ve üst sıkıştırma üst ve alt sınır düzlemleri eklenmesi

Numune oluşumu için öncelikle özel geometrili mika daneciklerinin tasarımı yapıldı. Mika daneleri için disk şeklinde bir geometri oluşturuldu. Daha sonra geometrisi tasarlanan mika daneciklerinin kalıbı için rijit blok kalıp (rigid block template) komutu ile bu geometriden referans alınarak rijit blok kalıbı oluşturuldu. Şekil 4.8’de gösterilen kalıp referans alınarak daha sonra rijit bloklar oluşturuldu. Mika daneciklerini belli koordinatlarda oluşturabilmek için fish komutu yardımıyla bir döngü komutu yazıldı. Bu şekilde istenilen koordinatlarda istenilen sayıda mika danecikleri numune içerisine yerleştirildi. Mika daneciklerinin yoğunluğu 3000 g/cm^3 sönümlleme katsayısını ise 0.3 olarak alındı.



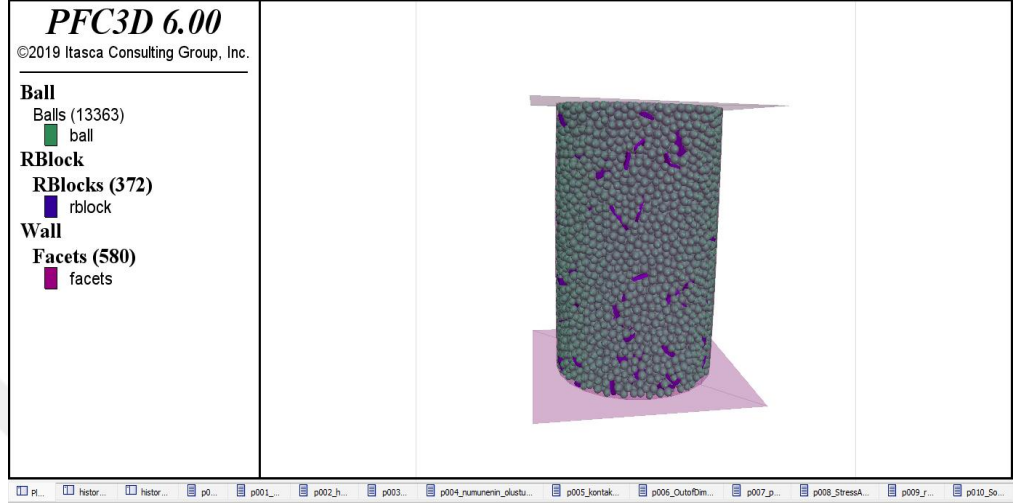
Şekil 4.8 Rijit blok kalıbının oluşturulması

Top (ball) komutu kullanılarak kum daneleri küre danecikleri şeklinde tasarlandı. Kalibrasyonlardaki zaman faktörü çalışmanın verimli bir şekilde devam edebilmesi için çok önemli bir faktör olduğundan dolayı danelerin geometrileri bu şekilde tasarlanmıştır. Dane şekilleri karmaşıktıkça ve özellikle farklı dane şekilleri için küme (clump) veya rijit blok kullanılmasıyla deneyin sonuca ulaşması daha fazla zaman alır. Seçilen kum daneciklerinin yoğunluğu ise 2650 g/cm^3 olarak sönümlene katsayısı ise 0.8 olarak alınmıştır.



Şekil 4.9 Top komutu ile danenin oluşturulması

Oluşturulan kum ve mika danelerinin numune sınırları dışında kalanları oluşturulan fish kodları ile kaldırılmıştır. Bu sayede numune istenilen sınırlarda hazırlanmıştır.



Şekil 4.10 Numunenin Son Hali

Numune hazırlanması işleminden sonra temas modelini seçilmesi gerekmektedir. Temas modelinde bulunan parametreler yardımıyla yapılan deneyler sonucunda kalibrasyon değerine ulaşılabacaktır. Kolaylık olması bakımından ve zaman tasarrufundan dolayı doğrusal temas modelinin tercih edilmiştir. Kalibrasyon deneyleri için kullanılan parametreler efektif modülü, rijitlik oranı ve sürtünme katsayısıdır. Bu katsayılarla yapılan değişiklikler ve kalibrasyonlar, yöntem bölümünde detaylı olarak aktarılacaktır. Literatürde gözlemlenene göre yarı statik durumlar için sönüm katsayısı 0.7 olarak alınmaktadır [48].

Temas modelinden sonra artık hücre basınçları oluşturulabilir. Gerilmeleri sıfırdan başlayacak şekilde hücre basıncına ulaşınca kadar arttırılır. Bu tez kapsamında 3 farklı hücre gerilmesi koşulu altında yapılan deneyler incelenmiştir. Bunlar sırasıyla 10 kPa, 15 kPa, 20 kPa değerleridir. Hücre basınçlarının artışı 1 kPa olacak şekilde ayarlandıktan sonra hedef gerilmeye ulaştığı anda alt ve üst cidarlardan sabit bir hızda 0,000003 cm/s olacak şekilde servo kuvvet vererek sıkıştırma yapıldı.

Farklı şartlar altındaki bu deneyler için gerilme ve zaman adım (time step) grafikleri elde edilmiş olup detaylı bilgiler yöntem kısmında verilecektir.

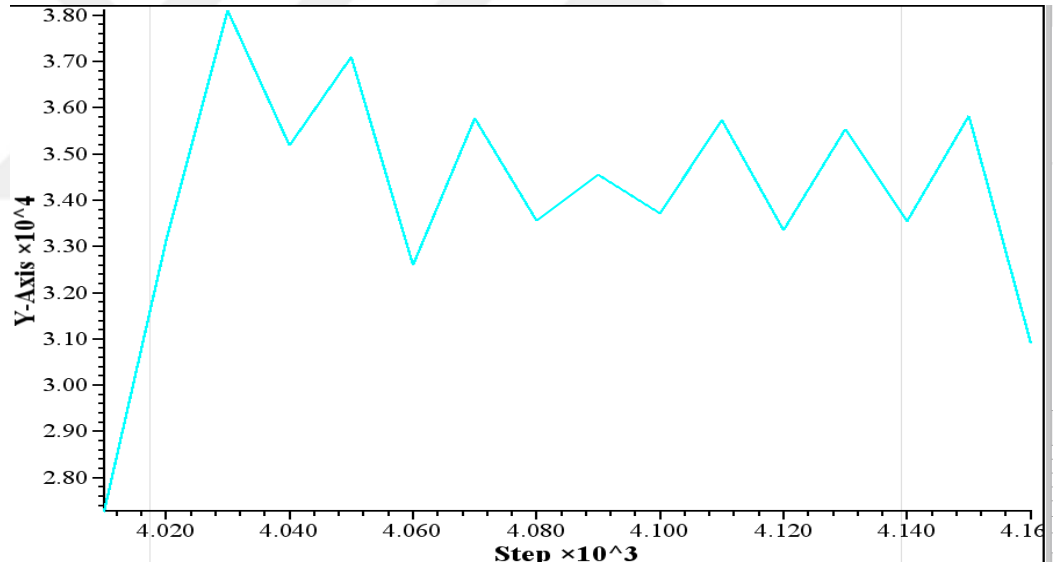


5. YÖNTEM

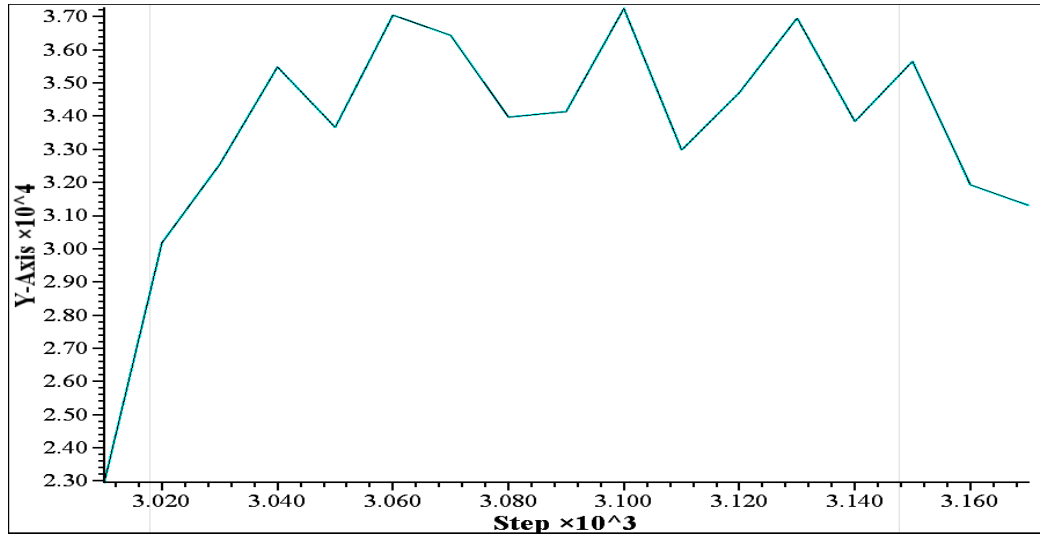
5.1 Farklı Efektif Modüllerle Yapılan Deneylerin İncelenmesi

5.1.1 8e6 Efektif Modül İle Yapılan Deneylerin İncelenmesi

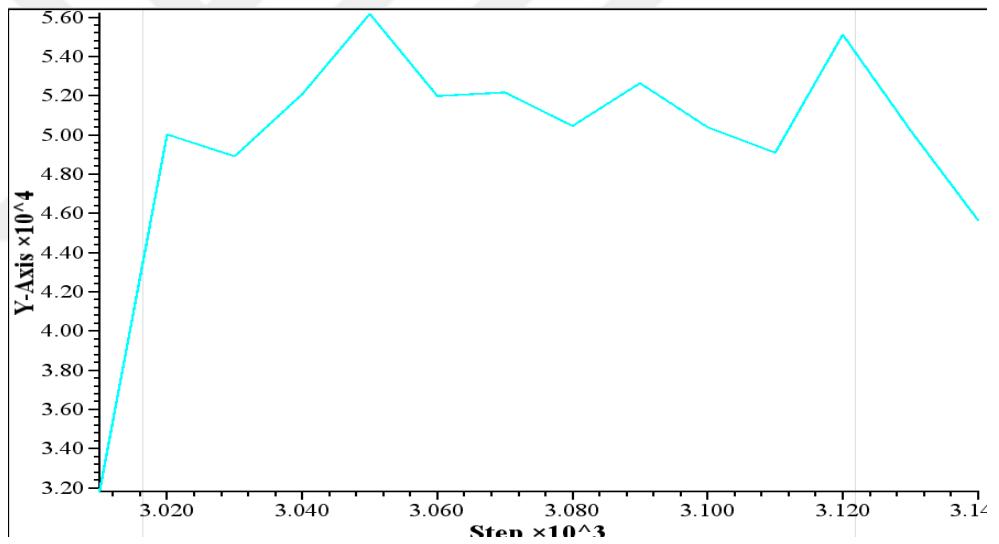
8e6 efektif modül kullanılarak yapılan deneylerde kullanılan rijitlik oranı aralığı 1.20 ile 1.60 arası seçilmiş, sürtünme katsayısı olarak da 0.20 ile 0.50 değer aralığı seçilmiştir. Sürtünme katsayısının 0.40'ı geçmesiyle birlikte yapılan deneyler sonuçlara ulaşamamaya başladığı gözlemlenmiştir. Buna karşın 0.20-0.40 sürtünme katsayısı aralığında yapılan deneylerde, aynı rijitlik oranı altında sürtünme katsayısındaki değişimin deney sonuçları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. 8e6 ile yapılan deneylerden birinin örnek olarak incelenmesi aşağıdaki Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de yapılmıştır.



Şekil 5.1 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =8e6, Rijitlik Oranı = 1.20, Sürtünme Katsayısı =0.40)



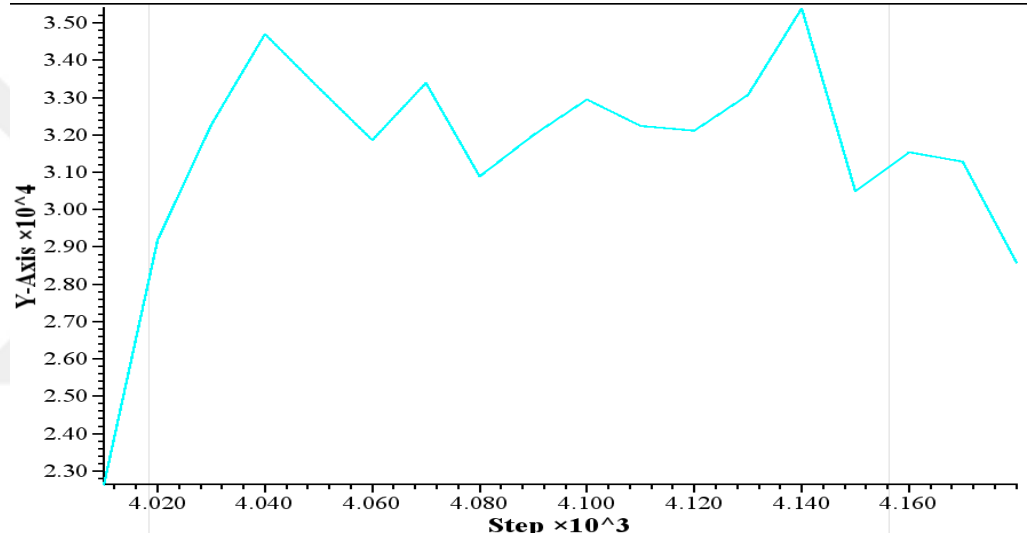
Şekil 5.2 15 kPa HÜCRE BASINCI İÇİN DEVIATÖR GERİLME (Efektif Modül = $8e6$, Rijitlik Oranı = 1.20, Sürtünme Katsayısı = 0.40)



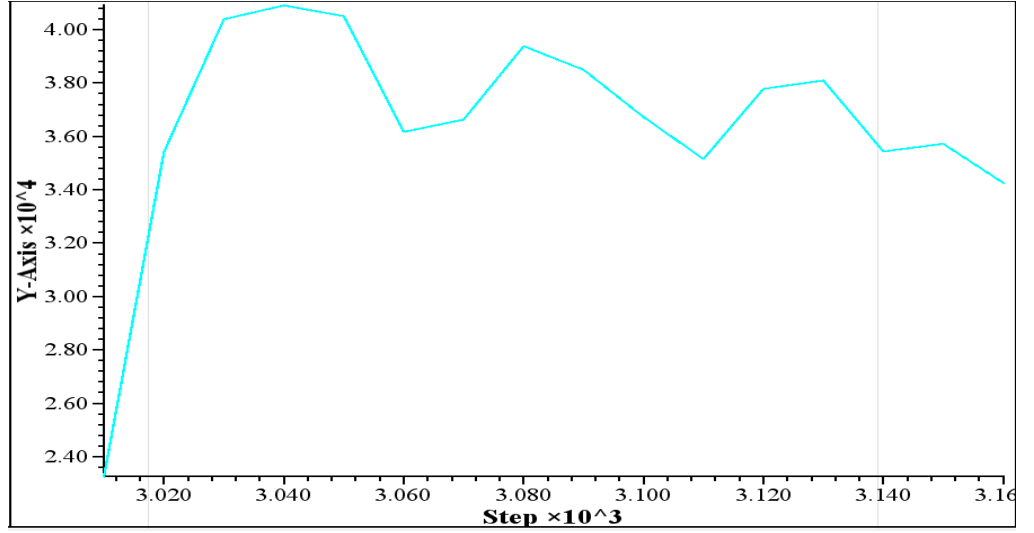
Şekil 5.3 20 kPa HÜCRE BASINCI İÇİN DEVIATÖR GERİLME (Efektif Modül = $8e6$, Rijitlik Oranı = 1.20, Sürtünme Katsayısı = 0.40)

5.1.2 1e7 Efektif Modül İle Yapılan Deneylerin İncelenmesi

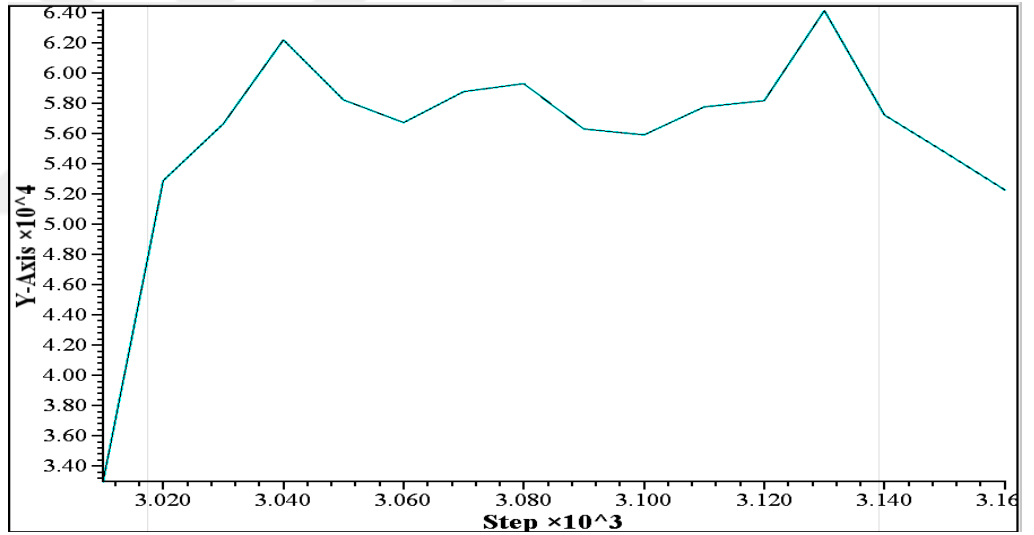
8e6 efektif modül kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen tecrübeler ışığında 1e7 efektif modül için yapılan deneylerde rijitlik oranı 1.0 ile 1.30 arası değerler seçilmiş, sürtünme katsayısı 0.2 ile 0.45 arasında seçilmiştir. 1.20 ve 1.30 rijitlik oran aralıkları kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar beklenen değerlere yakın olsa da deney sonucu ortaya çıkan grafikler genel olarak aranan formu sağlamamış veya uygun görülen grafiklerde ise mohr daireleri çizdirilememiştir. Yapılan deneylerden biri örnek olarak aşağıdaki Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da incelenmiştir.



Şekil 5.4 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =1e7, Rijitlik Oranı = 1.23, Sürtünme Katsayısı =0.30)



Şekil 5.5 15 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $1e7$, Rijitlik Oranı = 1.23, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



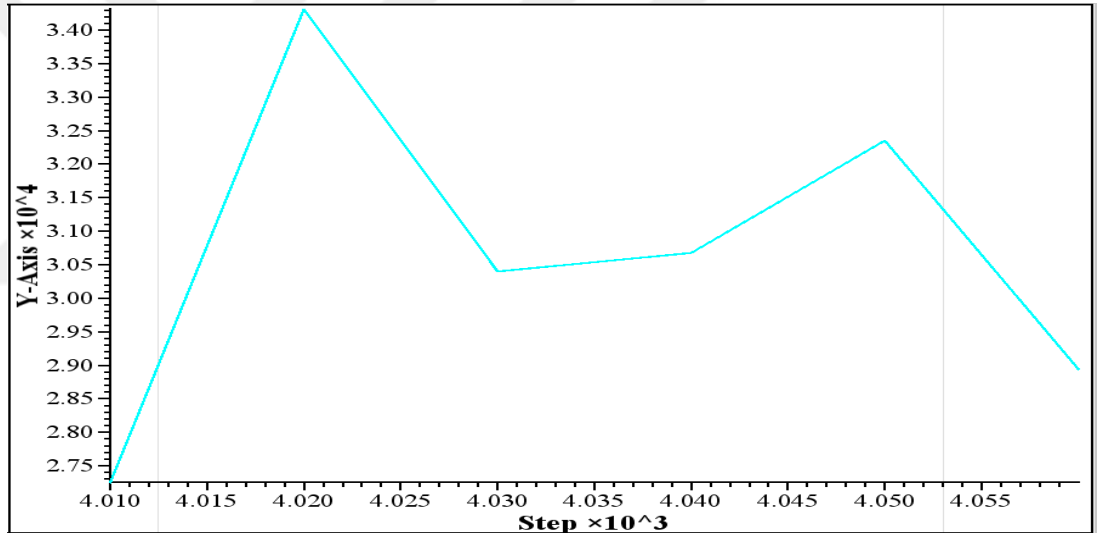
Şekil 5.6 20 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $1e7$, Rijitlik Oranı = 1.23, Sürtünme Katsayısı = 0.30)

$1e7$ efektif modül ile aranan dayanım parametresine ulaşamadığı için $2e7$ efektif modül değeri kullanılarak deneylere devam edilmiştir.

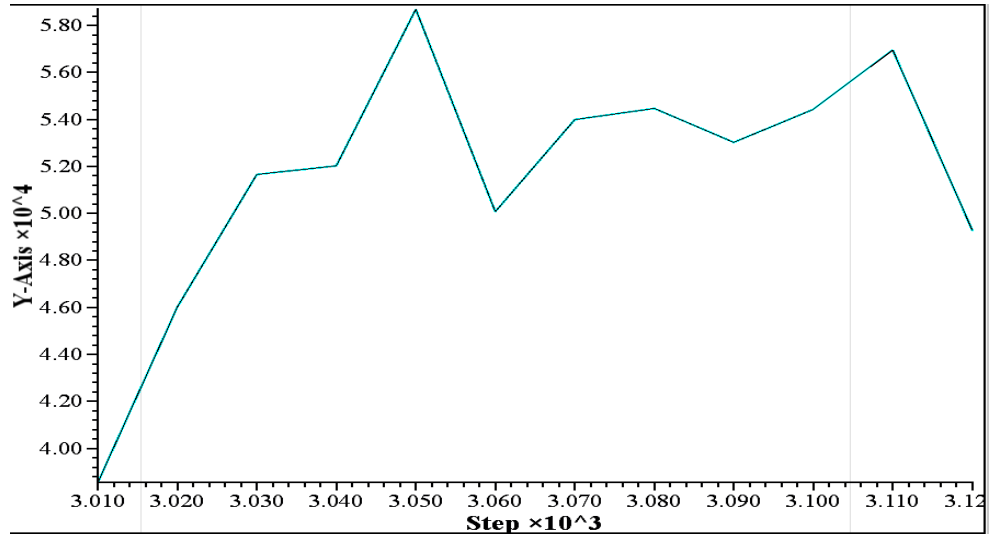
5.1.3 2e7 Efektif Modül İle Yapılan Deneylerin İncelenmesi

2e7 efektif modül kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, sürtünme katsayısı 0.20 ile 0.30 aralığında, rijitlik oranı ise 1.00 ile 1.40 aralığında seçilmiştir.

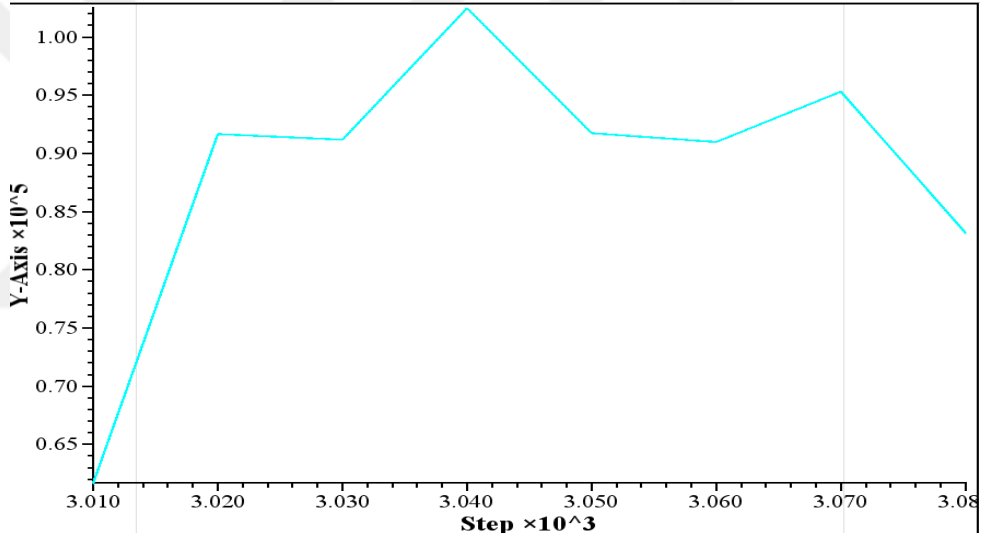
2e7 efektif modül kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde sürtünme katsayısı 0.20 ile 0.30 aralığında seçilmiş, rijitlik oranı olarak da 1.00-1.40 değer aralığı kullanılmıştır. Bu efektif modül için yapılan deneylerin sonucunda 1.15 rijitlik oranı değerinden büyük değerler için anlamlı sonuçlara ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aranan dayanım parametrelerine 0.3 sürtünme katsayısı 1.08 ve 1.10 rijitlik oranı değerlerinde ulaşılmış olup analiz sonuçları kısmında detaylıca incelenmesi yapılacaktır. Yapılan diğer deneylerden seçilen örnek deney aşağıdaki Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.7 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.00, Sürtünme Katsayısı =0.30)



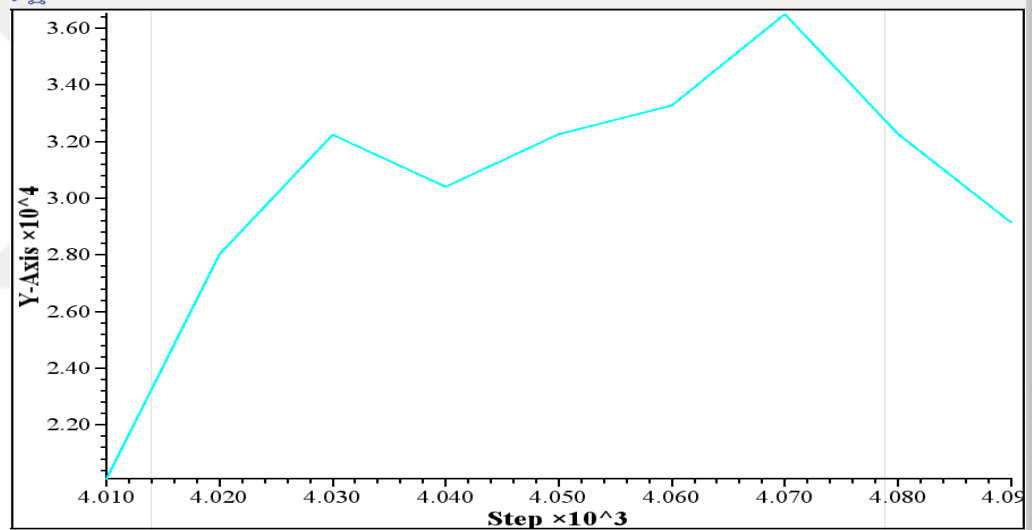
Şekil 5.8 15 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.00, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



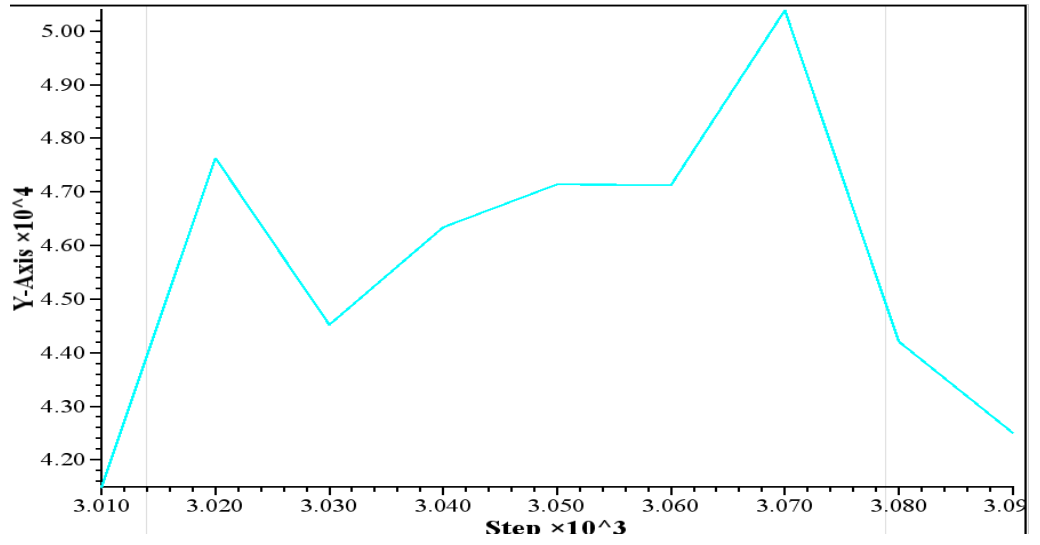
Şekil 5.9 20 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.00, Sürtünme Katsayısı = 0.30)

6. ANALİZLERİN SONUÇLARI

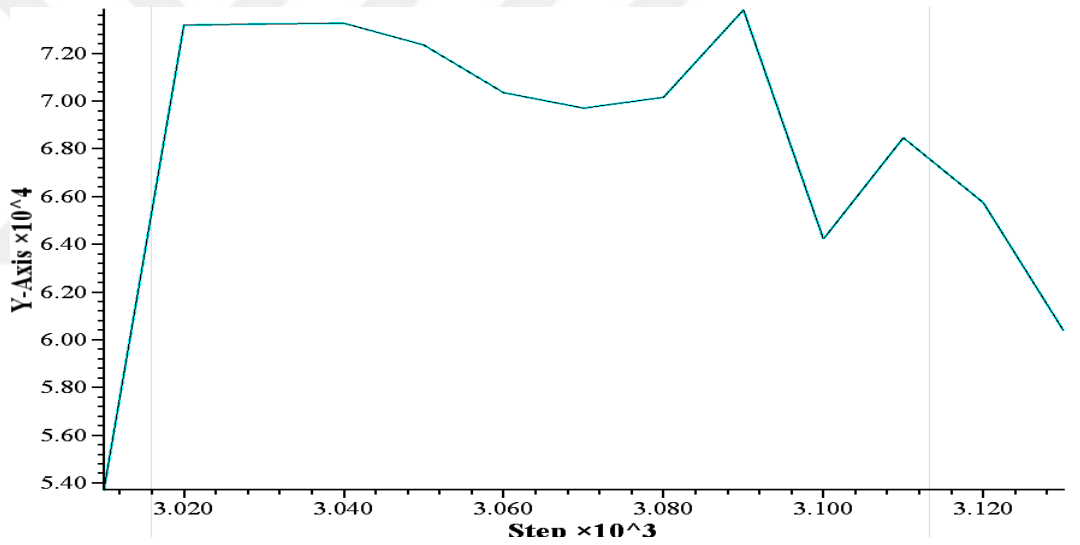
2e7 efektif modül 1.08 rijitlik oranı ve 0.30 sürtünme katsayısı kullanarak gerçekleştirilen deneylerde, 10, 15 ve 20 kPa hücre basınçları altında elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de gösterilmiştir. Bu deneyler sonucunda ölçülen deviatör gerilme değerleri sırasıyla 36 kPa, 50 kPa ve 73.2 kPa değerlerine ulaşılmıştır. Bu verilerle çizdirilen mohr dairesi ile içsel sürtünme açısı ise 40.20° olarak bulunmuştur. İlgili Mohr dairesi Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Deney sonuçları, mika taneciklerinin düzlemde 45° ’lik elevation ve tilt açısıyla yerleşmesi sonucu oluşan yapısal düzen ile ortaya çıkmıştır.



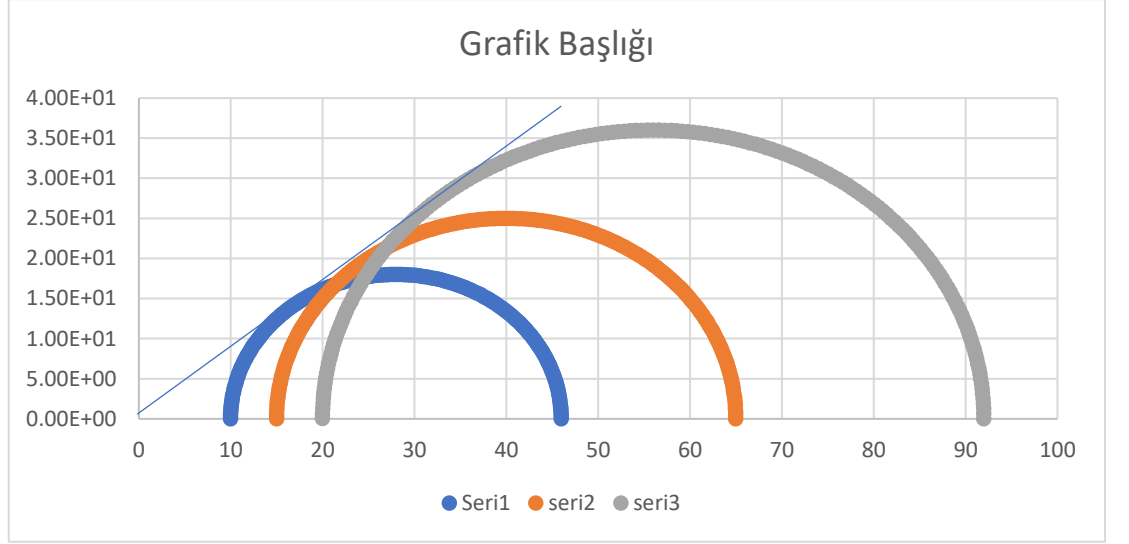
Şekil 6.1 10 kPa Hücre Basıncı İçin Deviatör Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)



Şekil 6.2 15 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)

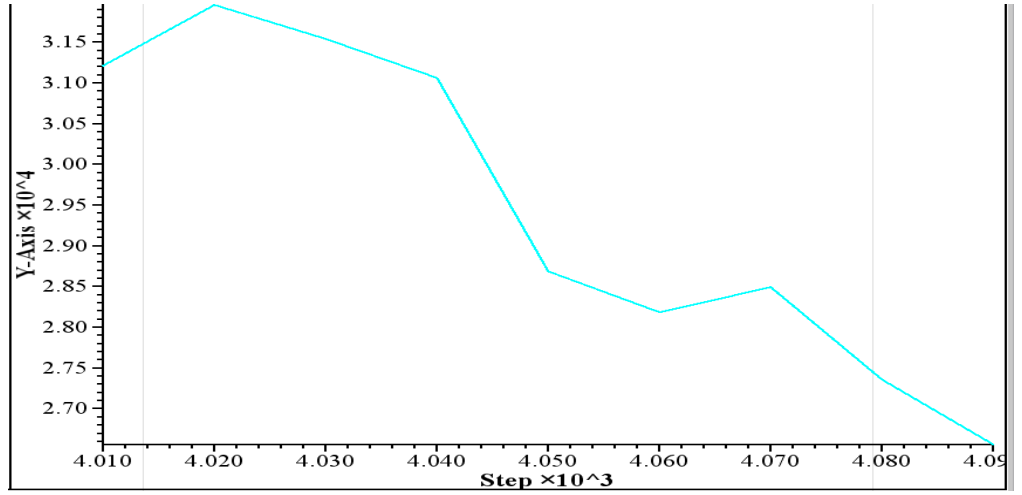


Şekil 6.3 20 kPa Hücre Basıncı İçin Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)

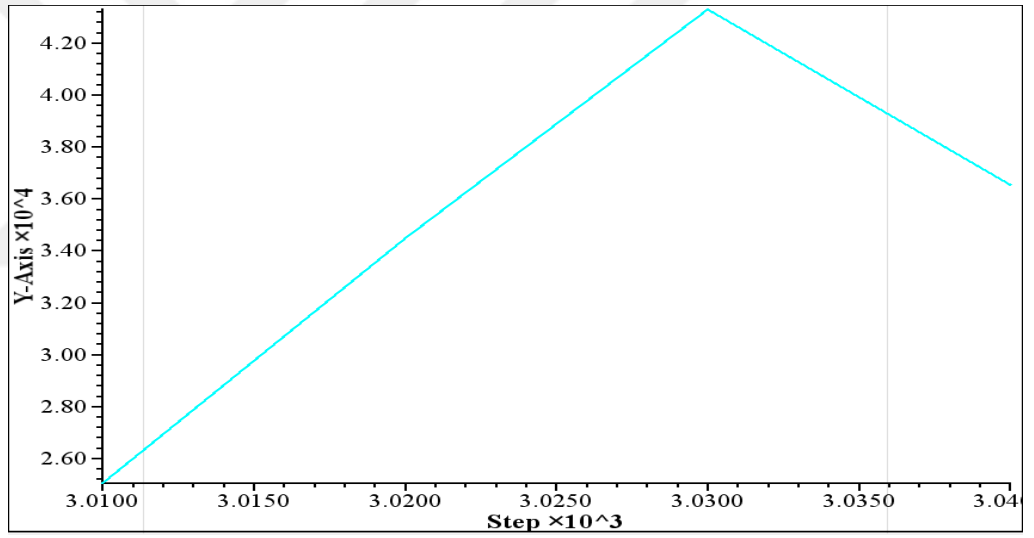


Şekil 6.4 Mika Daneciklerinin 45° Elevation ve Tilt Açıları İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)

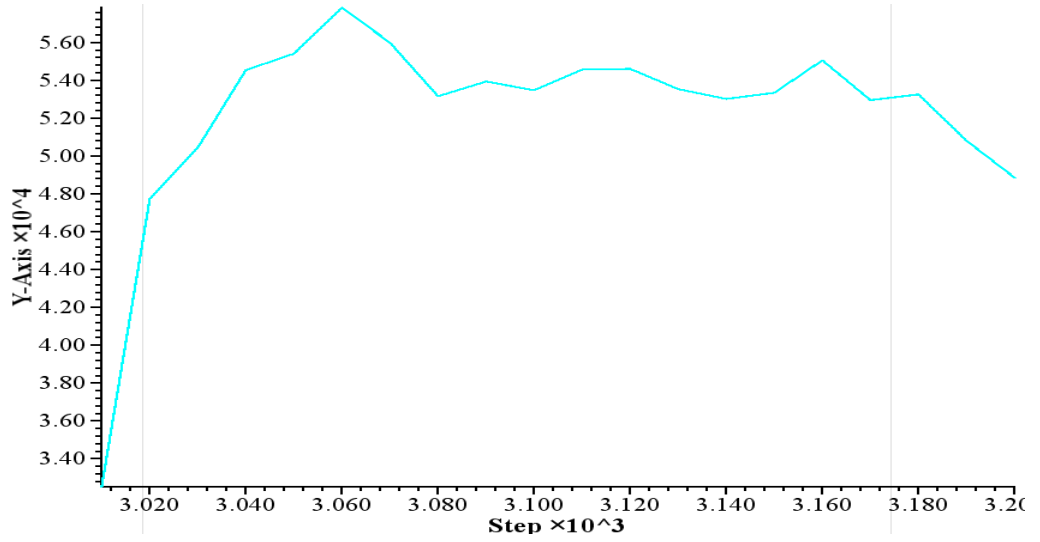
Aynı şartlar altında fakat 60°'lik elevation ve tilt açıları ile gerçekleştirilen deneylerden 10, 15 ve 20 kPa hücre basınçları altında deviatör gerilmeler sırasıyla 31.9, 43.2 ve 57.6 kPa değerleri olarak ölçülmüştür. Deney sonuçları Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Çizilen mohr dairesi ise Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



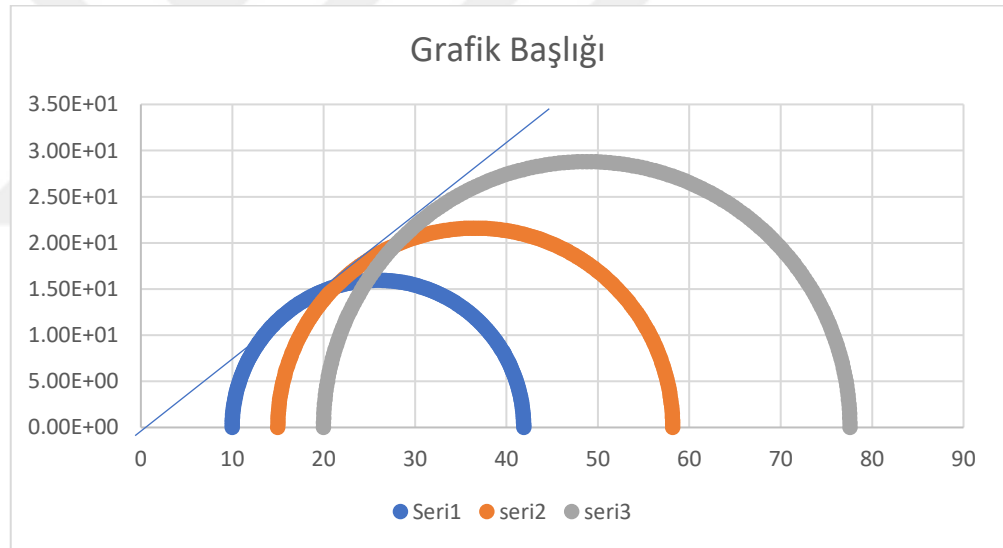
Şekil 6.5 60° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



Şekil 6.6 60° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 15 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



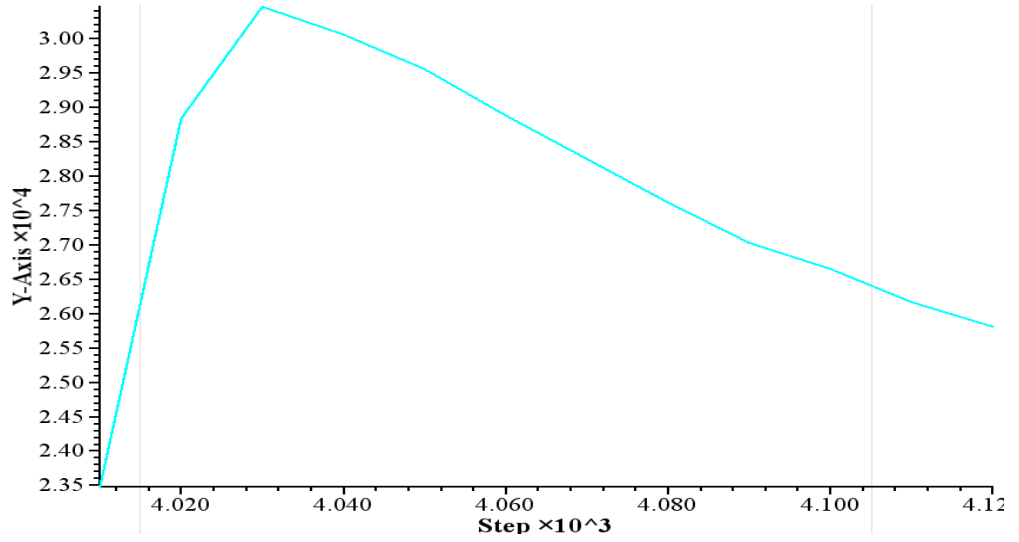
Şekil 6.7 60° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 20 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)



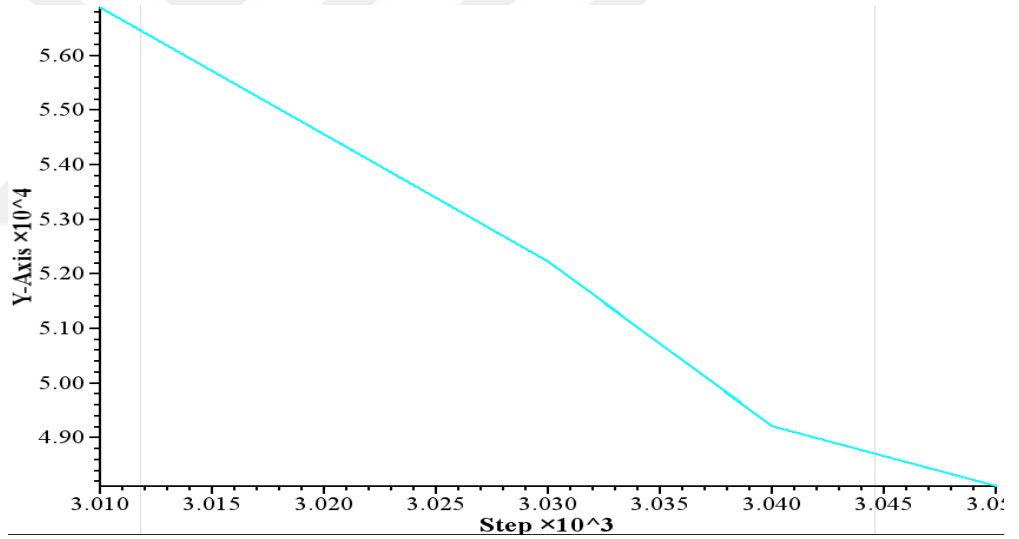
Şekil 6.8 Mika Daneciklerinin 60° Elevation ve Tilt Açıları İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül =2e7, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı =0.30)

Yapılan deneyler sonucunda içsel sürtünme açısının 37.92° olarak gözlemlenmiştir

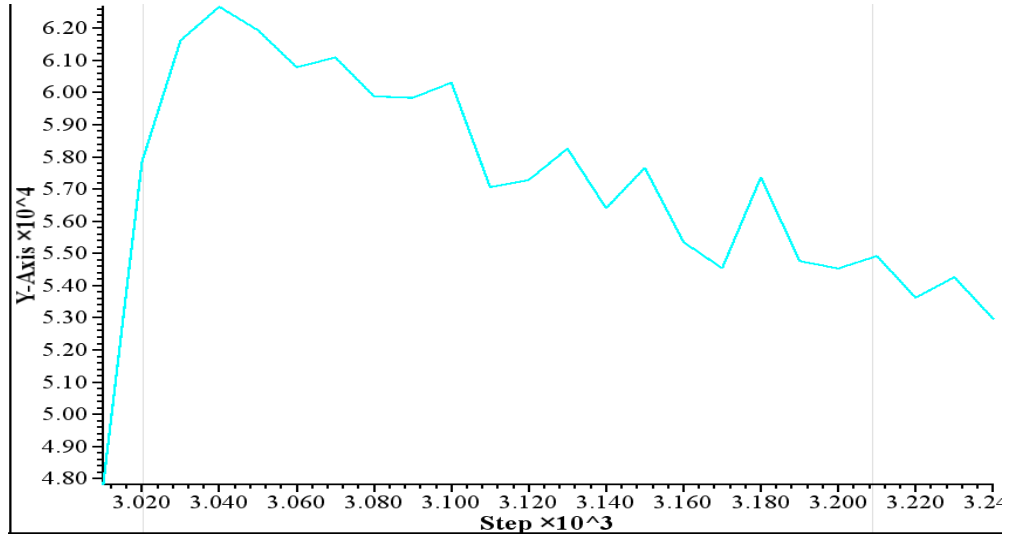
220°'lik elevation ve tilt açıları ile yerleştirilen mika danecikleri sonucunda 10,15 ve 20 kPa hücre basınçları altında çıkan deviator gerilmeler Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.9 220° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)

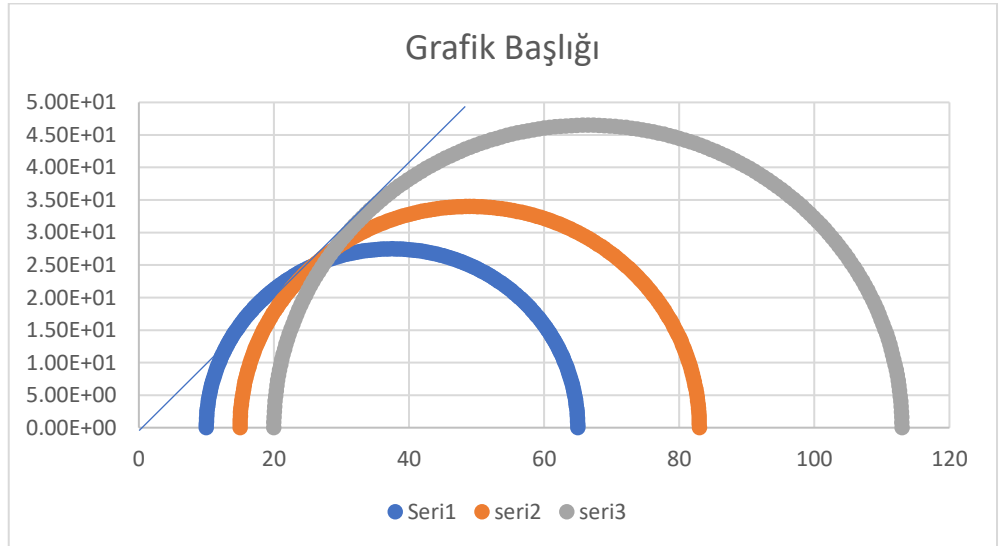


Şekil 6.10 220° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



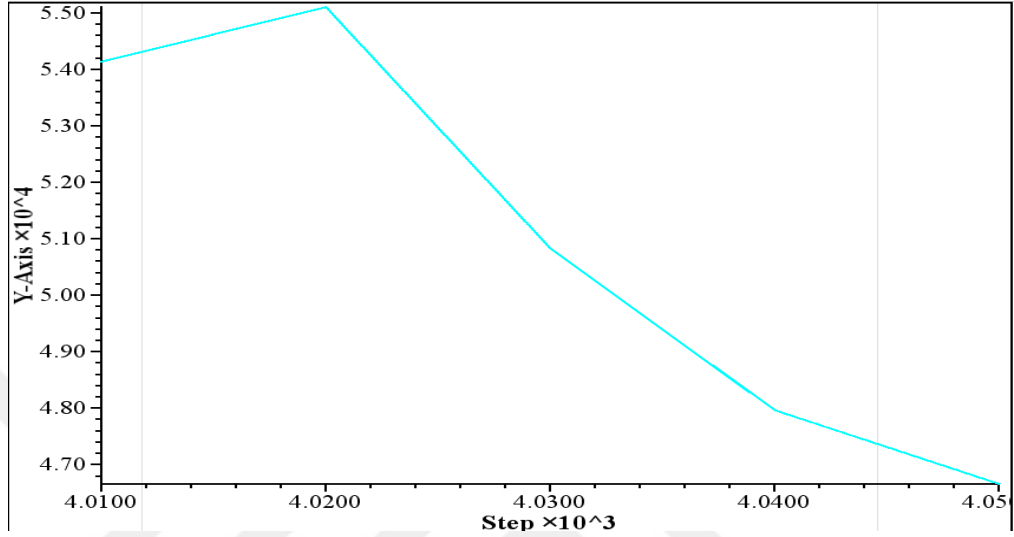
Şekil 6.11 220° Elevation ve Tilt Açısı Yöneline Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)

Çıkan deviator gerilmeler sırasıyla 37 kPa, 66 kPa ve 102 kPa olarak gözlemlenmiştir. Bu değerler sonucunda içsel sürtünme açısı 40.47° olarak gözlemlenmiştir. Mika Daneciklerinin 220° Elevation ve Tilt Açıları İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

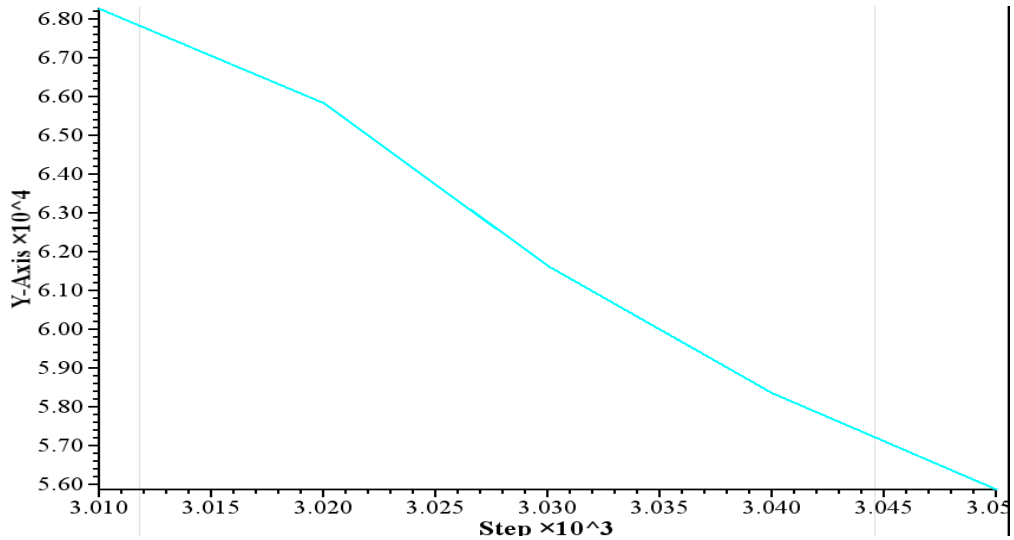


Şekil 6.12 Mika Daneciklerinin 220° Elevation ve Tilt Açıları İle Yönelimi Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)

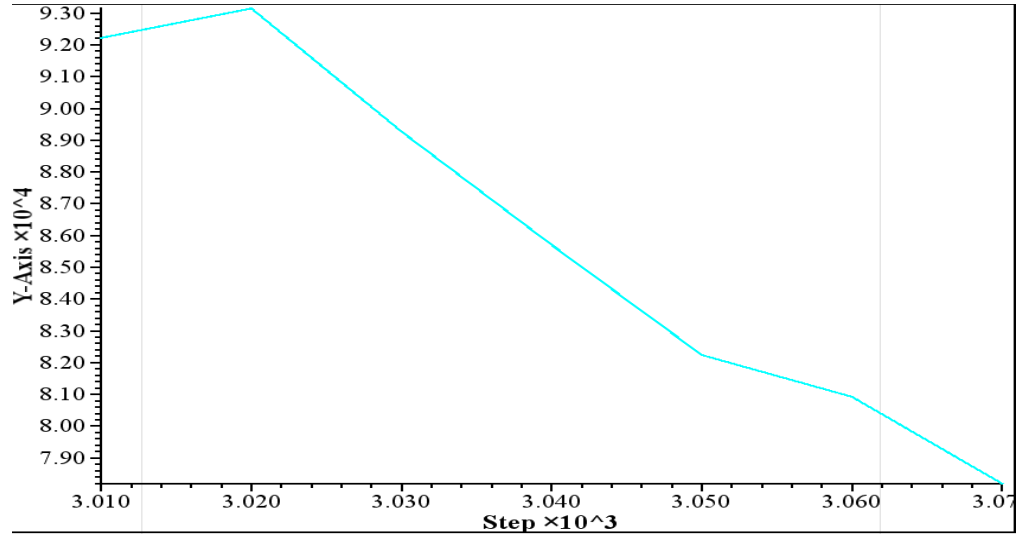
340°'lik elevation ve tilt açıları ile yerleştirilen mika danecikleri sonucunda 10,15 ve 20 kPa hücre basınçları altında çıkan deviatör gerilmeler Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de gösterilmiş olup Şekil 6.16'da deneyler sonucu çizdirilen mohr dairesi bulunmaktadır.



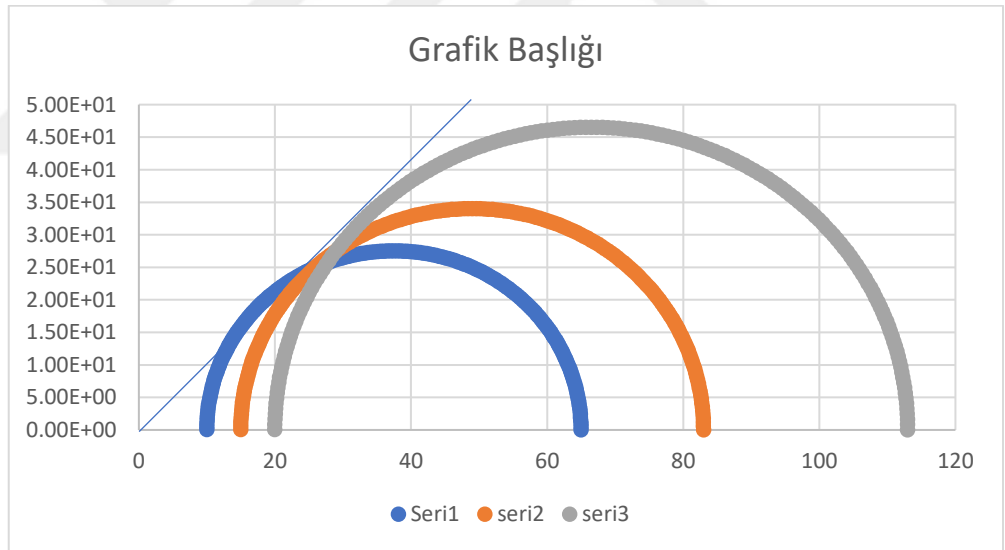
Şekil 6.13 340° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



Şekil 6.14 340° Elevation ve Tilt Açısı Yönelimine Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviatör Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



Şekil 6.15 340° Elevation ve Tilt Açısı Yöneline Sahip Mika Danecikleri Kullanılarak 10 kPa Hücre Basıncı Altında Yapılan Deney Sonucu Deviator Gerilme (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)



Şekil 6.16 Mika Daneciklerinin 340° Elevation ve Tilt Açıları İle Yöneline Sonucu Çıkan Mohr Dairesi Grafiği (Efektif Modül = $2e7$, Rijitlik Oranı = 1.08, Sürtünme Katsayısı = 0.30)

Yukarıdaki grafikler ve Mohr dairesinde de görüldüğü gibi, 10, 15 ve 20 kPa hücre basınçları ile yapılan deneyler sonucunda deviatör gerilmeler sırasıyla 55 kPa, 68 kPa ve 93 kPa olarak ölçülmüş, pik gerilmeler ise 65 kPa, 83 kPa ve 113 kPa olarak bulunmuştur. Elde edilen içsel sürtünme açısı ise 47.17° olarak hesaplanmıştır.

$2e7$ efektif modül, 0.3 sürtünme katsayısı ve 1.08 rijitlik oranı kullanılarak hazırlanan zemin numunelerinde, mika danelerinin farklı elevation ve tilt açılarıyla yeniden düzenlenmesiyle gerçekleştirilen deneylerin deviatör gerilmeleri ve içsel sürtünme açıları Tablo 6.1’de sunulmuştur.

Tablo 6.1 Farklı Yönelimlerde Bulunan Mika Daneciklerinin Deney Sonuçlarına Olan Etkisi

Efektif Modül	2.00E+07			
Sürtünme Katsayısı	0.3			
Rijitlik Oranı	1.08			
Elevation ve Tilt Açıları	10 kPa için Deviatör Gerilme	15 kPa için Deviatör Gerilme	20 kPa için Deviatör Gerilme	İçsel Sürtünme Açısı
45	36.4	50.2	73.2	40.19
60	31.9	43.2	57.6	37.93
220	37	66	102	40.47
340	55	68	93	47.17

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada kum danecikleri içerisinde bulunan mika minerallerinin zemin içinde bulunduğu yönelimlerinin, zeminin davranışına olan etkisini incelendi. Bu inceleme sanal ortamda ayırık elemanlar metodu kullanılarak yapıldı. Bunun için referans olarak kullanılması gereken bir deneye ihtiyaç duyulmuştur.

Başarı, 2012 mika daneciklerinin zemin yapısına olan etkisini üç eksenli deney yardımıyla incelemiştir. Çalışmasında kullandığı zeminler alüvyonlu Gediz deltasından, 25 m derinlikten alınan numunelerdir. Farklı mika ağırlık oranlarıyla yapılan deneylerden elde ettikleri sonuçlar bu tez çalışması için referans değer olarak kullanılmıştır. %10 mika ağırlık oranıyla oluşturulan deney numunesi 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa hücre basıncı değerleriyle yapılmış olup çıkan deviator gerilmeler sırasıyla 381.4 kPa, 572.7 kPa ve 762.8 kPa'dır. İçsel sürtünme açısı ise 40.8 derece olarak çıkmıştır. Bu değerler kalibrasyon yapılırken ulaşılmaya çalışılacak referans değerler olacaktır.

Çalışmada kullanılan ayırık elemanlar metodu, her bir danenin tanımlanıp işleme alınmasıyla sonuca ulaşır. Bu sebeple daneciklerin şekilleri, boyutları gibi mikro parametre değerleri önemlidir. Kum danelerinin çapının mika danelerinin çapına oranı $\frac{1}{4}$ olarak alınmıştır. Kum daneleri küre danecikleri şeklinde yazılımda tanımlanmıştır. Kum danelerinin yoğunluğu 2650 g/cm^3 ve sönümlleme katsayısı 0.8 olarak alındı. Mika daneciklerinin geometrik olarak tanımlanması disk şeklinde olmuştur. Mika daneciklerinin yoğunluğu 3000 gr/cm^3 , sönümlleme katsayısı ise 0.3 olarak alındı. Temas modeli olarak doğrusal temas modeli kullanılmıştır. Bu metot danecikleri bir yay olarak varsayar, gerekli hesaplamalarla sonuca ulaşır.

Oluşturulacak deneylerde hücre basıncı değerleri olarak 10 kPa, 15 kPa ve 20 kPa alarak deneyleri gerçekleştirildi. Deneylerin referans deneydeki değerlerle uyumlu sonuçlar vermesi amacıyla kalibrasyon çalışması yapılmıştır. Yöntem olarak deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Bu kalibrasyon sürecinde değiştirilen parametreler, numunenin porozitesi, efektif modülü, rijitlik oranı ve sürtünme katsayısı değerleri olmuştur.

Farklı efektif modül kullanılarak yapılan deneylerde kullanılan değerler, $8e6$ ile $9e7$ arasında olup bu değerlerde rijitlik oranı 1.0-1.8 arasında ve sürtünme katsayısı olarak 0.2-0.5 arasında seçilmiştir. efektif modül aralığı $2e7$ 'den daha

büyük değerlere çıktığında, özellikle 20 kPa hücre basıncı için elde edilen sonuçlar beklenen değerlerden oldukça küçük çıkmıştır. Bu sebeple, çalışmalar 8e6 ile 2e7 arasında yoğunlaştırılmıştır.

8e6 efektif modül için yapılan deneylerde sürtünme katsayısı için 0.20 ve 0.50 değerleri incelenmiş ve rijitlik katsayısı olarak da 1.20 ile 1.60 aralığı seçilmiştir. Sürtünme katsayısının 0.40'ı geçmesiyle birlikte yapılan deneyler, anlamlı sonuçlara ulaşamamaya başlamıştır. Buna karşın, 0.20-0.40 sürtünme katsayısı aralığında yapılan deneylerde, aynı rijitlik oranı altında sürtünme katsayısındaki değişimin deney sonuçları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda aradığımız değerlere ulaşamamış veya ulaşılan değerlerden istenilen grafikler elde edilememiş, çıkan sonuçlarla ise Mohr daireleri çizdirilememiştir.

1e7 efektif modül için yapılan deneylerde, 8e6 değeri ile yapılan deneylerde çıkan sonuçlar göz önüne alınarak rijitlik oranı 1.0 ile 1.30 arası değerler, sürtünme katsayısı ise 0.2 ile 0.45 arasında seçilmiştir. 1.20 ve 1.30 rijitlik oran aralıkları kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar beklenen değerlere yakın olsa da, deney sonucu ortaya çıkan grafikler genel olarak aranan formu sağlamamış veya uygun görülen grafiklerde Mohr daireleri çizdirilememiştir.

2e7 efektif modül ile yapılan deneyler sonucunda aranan sonuçlara uygun değer veren iki deney gözlemlenmiştir. Bu deneylerde, sürtünme katsayısı 0.30 altında rijitlik katsayıları için 1.08 ve 1.10 değerleri aranan değerlere en yakın şekilde kalibre olmuşlardır. Bu deneyler sonucunda, kalibrasyon parametresi olarak mika taneciklerinin düzlemde dönmesi ile en fazla sonuca ulaşabildiğimiz 1.08 rijitlik oranı kalibrasyon değeri olarak seçilmiştir.

45°'lik elevation ve tilt açılarıyla yerleşmiş mika danecikleri ile yapılan deney sonucunda içsel sürtünme açısı 40.19° olarak çıkmış ve aranan 40.8° dereceye oldukça yakın bir değer elde edilmiştir. Mika daneciklerinin düzlemdeki yönelimlerinin 30°, 60°, 75°, 90°, 135°, 150°, 180°, 220°, 240°, 315° ve 340° olarak değişmesiyle yapılan deneyler incelenmiş ve deneylerden Mohr dairesi yalnızca 60°, 220° ve 340° yönelimli mika danecikleri ile elde edilebilmiştir. Bu deneylerin sonuçları incelendiğinde, içsel sürtünme açıları sırasıyla 37.93°, 40.47° ve 47.17° olarak bulunmuştur.

Ayrık Elemanlar Metodu ile yapılan çalışmalarda yapraksı danelerin yatay düzlemdeki her iki açısının da (tilt ve elevation) deney sonuçları üzerinde etkisi olmuştur. Kalibrasyon değeri için seçilen değerde mika daneciklerinin elevation ve tilt açılarının değişmesinin dayanım parametrelerinde önemli bir değişikliğe sebep olabileceği mika danelerinin farklı tilt ve elevation açıları ile yaklaşık 10 derecelik bir fark oluşturduğu görülmüştür. Ayrık Elemanlar Metodunda yapraksı mika danelerinin yöneliminin malzemenin kayma dayanımı üzerinde 9-10 derecelik bir fark oluşturabileceği görülmüştür.

Yukarıdaki değerlerden görüldüğü gibi aynı numune içerisinde; ağırlık, şekil, boyut gibi mika daneciğinin fiziksel parametreleri aynı olmasına rağmen sadece numune içerisindeki mika daneciklerinin yönelimlerinin değişmesiyle numunenin davranışı değişmiştir. Mika danecikleri kum danecikleri arasında köprü görevi görerek temas sayılarının değişmesine sebebiyet vermiş, temas alanını değiştirmiştir.

Ayrık elemanlar metodunun her bir daneciği modelleyerek sonuca ulaşmaya çalışmasından dolayı çıkan sonuçlar danenin boyutu, şekli, kütlesi, rijitliği, efektif modül gibi onlarca parametreye bağlı olduğunu yapılmış olan deneyler göstermiştir. Daha hassas çalışmalar için kum danelerinin küre danecikleri yerine numune hangi şekil özelliklerini taşıyorsa ona göre modellenmesi, istenen deneye göre temas modelinin değiştirilmesi gerekli olabilmektedir. Bütün bu sebeplerden dolayı deneme yanılma yöntemi çok zaman alan ve çok fazla parametreye bağlı olan yöntemdir. Bu dezavantajların etkisini azaltmak için makine öğrenmesi ve yapay zekâ gibi çeşitli yardımcı yöntemlerle bu çalışmaların yapılması önem kazanmaktadır. Bu konular, makale ve tezlerde detaylıca incelenebilir ve bu çalışmalar, alandaki literatüre katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] J. C. Santamarina and G. C. Cho, "Soil behaviour: The role of particle shape," *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference - Proceedings of a Three Day Conference on Advances in Geotechnical Engineering, organised by the Institution of Civil Engineers*, pp. 604–617, 2004.
- [2] W. H. Goetz and J. H. Schaub, "Triaxial Testing of Bituminous Mixtures: Technical Report," 1959.
- [3] E. Başarı, "Effect of granular waste glass on soil properties," in *3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, proceedings book*, 2012, pp. 479–484.
- [4] R. D. Holtz, W. D. Kovacs, and T. C. Sheahan, *An introduction to geotechnical engineering*, vol. 733. Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1981.
- [5] TS-1900, "TS1900," 2006.
- [6] N. Muhammad, I. Zakaria, and A. Namdar, "Modification of kaolin mineralogy and morphology by heat treatment and possibility of use in geotechnical engineering," *GEOMATE Journal*, vol. 5, no. 10, pp. 685–689, 2013.
- [7] K. C. Onyelowe, "Kaolin soil and its stabilization potentials as nanostructured cementitious admixture for geotechnics purposes," *Int. J. Pavement Res. Technol*, vol. 11, no. 7, pp. 717–724, 2018.
- [8] R. R. Gazizulin *et al.*, "NMR of liquid ^3He in pores of a clay sample," *Appl Magn Reson*, vol. 38, no. 3, pp. 271–278, 2010, doi: 10.1007/s00723-010-0118-z.
- [9] P. Seethalakshmi and A. Sachan, "Effect of successive impact loading on compactability, microstructure, and compressibility behavior of micaceous sand," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 5, pp. 114–128, 2018.

- [10] K. Mitchell, James K; Soga, *Fundamentals of Soil Behavior*, vol. 40, no. 4. 1976. doi: 10.2136/sssaj1976.03615995004000040003x.
- [11] M. S. Lim, D. C. Wijeyesekera, A. Zainorabidin, and I. Bakar, “The Effects of Particle Morphology (Shape and Sizes) Characteristics on its Engineering Behaviour and Sustainable Engineering Performance of Sand,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 27–37, 2012.
- [12] M. D. Gidigas, “Developments in Geotechnical Engineering-9, Laterite Soil Engineering,” 1976, *Elsevier Scientific Publishing Company, New York*.
- [13] J. W. De Graft-Johnson, H. S. Bhatia, and D. M. Gidigas, “The engineering characteristics of the laterite gravels of Ghana,” in *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/*, 1969.
- [14] J.-S. Lee, M. Guimaraes, and J. C. Santamarina, “Micaceous Sands: Microscale Mechanisms and Macroscale Response,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, no. 9, pp. 1136–1143, 2007, doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:9(1136).
- [15] J. Yang and X. D. Luo, “Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials,” *J Mech Phys Solids*, vol. 84, pp. 196–213, 2015, doi: 10.1016/j.jmps.2015.08.001.
- [16] G.-C. Cho, J. Dodds, and J. C. Santamarina, “Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands,” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 133, no. 11, p. 1474, 2007.
- [17] G.-C. Cho, J. Dodds, and J. C. Santamarina, “Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, no. 5, pp. 591–602, 2006, doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:5(591).
- [18] W. C. Krumbein and L. L. Sloss, *Stratigraphy and sedimentation*, vol. 71, no. 5. LWW, 1951.

- [19] J. Yang and X. D. Luo, "Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials," *J Mech Phys Solids*, vol. 84, pp. 196–213, 2015.
- [20] E. Basari and G. Ozden, "Post-liquefaction volume change in micaceous sandy soils of old gediz river delta," *Acta Geotechnica Slovenica*, vol. 10, no. 1, pp. 33–40, 2013.
- [21] E. Basari and G. Ozden, "Post-liquefaction volume change in micaceous sandy of Old Gediz River Delta," *Acta Geotechnica Slovenica*, vol. 10, no. 1, pp. 33–40, 2013.
- [22] A. E. Tekkaya and C. Soyarslan, "Finite element method," *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, pp. 508–514, 2014.
- [23] N. Belheine, J. P. Plassiard, F. V. Donzé, F. Darve, and A. Seridi, "Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling," *Comput Geotech*, vol. 36, no. 1–2, pp. 320–331, 2009, doi: 10.1016/j.compgeo.2008.02.003.
- [24] J. O'Donovan, E. Ibraim, C. O'Sullivan, S. Hamlin, D. Muir Wood, and G. Marketos, "Micromechanics of seismic wave propagation in granular materials," *Granul Matter*, vol. 18, no. 3, pp. 1–18, 2016, doi: 10.1007/s10035-015-0599-4.
- [25] X. D. Luo, X. Tang, J. Yang, H. B. K. Nguyen, M. M. Rahman, and A. B. Fourie, "Discussion on 'how particle shape affects the critical state, triggering of instability and dilatancy of granular materials results from a DEM study,'" *Geotechnique*, no. 2014, 2022, doi: 10.1680/jgeot.20.D.005.
- [26] J. Zhang, X. Wang, Z.-Y. Yin, and Z. Liang, "DEM modeling of large-scale triaxial test of rock clasts considering realistic particle shapes and flexible membrane boundary," *Eng Geol*, vol. 279, p. 105871, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105871>.
- [27] T.-T. Ng, "Input Parameters of Discrete Element Methods," *J Eng Mech*, vol. 132, no. 7, pp. 723–729, 2006, doi: 10.1061/(asce)0733-9399(2006)132:7(723).

- [28] S. Chehrehghani, M. Noaparast, B. Rezai, and S. Z. Shafaei, “Bonded-particle model calibration using response surface methodology,” *Particuology*, vol. 32, pp. 141–152, 2017, doi: 10.1016/j.partic.2016.07.012.
- [29] M. Ucgul, J. M. Fielke, and C. Saunders, “Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil,” *Biosyst Eng*, vol. 121, pp. 105–117, 2014, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.02.005.
- [30] (<https://www.yade-dem.org>), “YADE,” 2023.
- [31] <https://www.cfdem.com/media/DEM/docu/Manual.html>, “LIGGGHTS,” 2023.
- [32] (<https://altair.com/edemi>), “EDEM,” 2023.
- [33] M. Wu, F. Zhou, and J. Wang, “DEM modeling of mini-triaxial test on soil-rock mixture considering particle shape effect,” *Comput Geotech*, vol. 153, no. November 2022, p. 105110, 2023, doi: 10.1016/j.compgeo.2022.105110.
- [34] docs.itascacg.com/pfc600/pfc/docproject/index.html, “PFC,” 2023.
- [35] E. G. Nezami, Y. MA Hashash, D. Zhao, and J. Ghaboussi, “Shortest link method for contact detection in discrete element method,” *Int J Numer Anal Methods Geomech*, vol. 30, no. 8, pp. 783–801, 2006.
- [36] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” *geotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979.
- [37] D. O. Potyondy and P. A. Cundall, “A bonded-particle model for rock,” *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol. 41, no. 8, pp. 1329–1364, 2004.
- [38] K. Iwashita and M. Oda, “Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM,” *J Eng Mech*, vol. 124, no. 3, pp. 285–292, 1998.

- [39] J. P. Plassiard, N. Belheine, and F. V. Donzé, “A spherical discrete element model: Calibration procedure and incremental response,” *Granul Matter*, vol. 11, no. 5, pp. 293–306, 2009, doi: 10.1007/s10035-009-0130-x.
- [40] S. Yimsiri and K. Soga, “Dem analysis of soil fabric effects on behaviour of sand,” *Geotechnique*, vol. 60, no. 6, pp. 483–495, 2010, doi: 10.1680/geot.2010.60.6.483.
- [41] R. D. Mindlin and H. Deresiewicz, “Elastic spheres in contact under varying oblique forces,” 1953.
- [42] F. Calvetti, G. Viggiani, and C. Tamagnini, “A numerical investigation of the incremental behavior of granular soils,” *Rivista italiana di geotecnica*, vol. 37, no. 3, pp. 11–29, 2003.
- [43] X. Chen, D. Peng, J. P. Morrissey, and J. Y. Ooi, “A comparative assessment and unification of bond models in DEM simulations,” *Granul Matter*, vol. 24, no. 1, pp. 1–20, 2022, doi: 10.1007/s10035-021-01187-2.
- [44] R. Kawamoto, E. Andò, G. Viggiani, and J. E. Andrade, “All you need is shape: Predicting shear banding in sand with LS-DEM,” *J Mech Phys Solids*, vol. 111, pp. 375–392, 2018.
- [45] Z.-H. Zhu, J.-H. Yin, J.-Q. Qin, and D.-Y. Tan, “A new discrete element model for simulating a flexible ring net barrier under rockfall impact comparing with large-scale physical model test data,” *Comput Geotech*, vol. 116, p. 103208, 2019.
- [46] C. Salot, P. Gotteland, and P. Villard, “Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests,” *Granul Matter*, vol. 11, no. 4, pp. 221–236, 2009.
- [47] M. Wu, F. Zhou, and J. Wang, “DEM modeling of mini-triaxial test on soil-rock mixture considering particle shape effect,” *Comput Geotech*, vol. 153, no. November 2022, p. 105110, 2023, doi: 10.1016/j.compgeo.2022.105110.
- [48] I. Marczewska, J. Rojek, and R. Kačianauskas, “Investigation of the effective elastic parameters in the discrete element model of granular material by the triaxial compression test,” *Archives of Civil and Mechanical*

- Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 64–75, 2016, doi: 10.1016/j.acme.2015.09.010.
- [49] T. Qu, Y. T. Feng, Y. Wang, and M. Wang, “Discrete element modelling of flexible membrane boundaries for triaxial tests,” *Comput Geotech*, vol. 115, no. February, p. 103154, 2019, doi: 10.1016/j.compgeo.2019.103154.
 - [50] T. Koyama and L. Jing, “Effects of model scale and particle size on micro-mechanical properties and failure processes of rocks—a particle mechanics approach,” *Eng Anal Bound Elem*, vol. 31, no. 5, pp. 458–472, 2007.
 - [51] L. Hazzar, M. Nuth, and M. Chekired, “DEM simulation of drained triaxial tests for glass-beads,” *Powder Technol*, vol. 364, pp. 123–134, 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2019.09.095.
 - [52] S. J. Lee, Y. M. A. Hashash, and E. G. Nezami, “Simulation of triaxial compression tests with polyhedral discrete elements,” *Comput Geotech*, vol. 43, pp. 92–100, 2012, doi: 10.1016/j.compgeo.2012.02.011.
 - [53] X. L. Wang and J. C. Li, “Simulation of triaxial response of granular materials by modified DEM,” *Sci China Phys Mech Astron*, vol. 57, no. 12, pp. 2297–2308, 2014, doi: 10.1007/s11433-014-5605-z.
 - [54] R. D. Holtz, W. D. Kovacs, and T. C. Sheahan, *An introduction to geotechnical engineering*, vol. 733. Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1981.