

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

**MİKRO ÖLÇEKTE DANE YÖNELİMİNİN MAKRO ÖLÇEKTE
ZEMİN DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Nooragha NEJAT

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



Manisa-2021

**Nooragha
NEJAT**

**MİKRO ÖLÇEKTE DANE YÖNELİMİNİN MAKRO ÖLÇEKTE
ZEMİN DAVRANIŞINA ETKİSİ**

2021

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Nooragha NEJAT



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VIII
TEŞEKKÜR.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT	XI
1. GİRİŞ	1
2. GENEL TANIM VE BİLGİLER.....	3
2.1. Granüler Zeminler ve Özellikleri	4
2.4. Zeminlerin Anizotropi Tanımı ve Geçmişi	8
2.4.1. Doğal/İçsel (İnherent) Anizotropi.....	9
2.4.2. İndüklenmiş (İnduced) Anizotropi.....	9
2.4.3. Başlangıç (İnitial) Anizotropi	9
3. LİTERATÜR BİLGİSİ	10
3.1. Yapırsız Mika İçeren Kumlu Zeminlerin Davranışları.....	10
Harris ve ark. (1984).....	11
Georgiannou (2006).....	13
Lee ve ark (2007).....	14
Çabalar (2010).....	17
Ebrahimzadeh (2015)	20
Le ve ark. (2020)	22
Başarı (2011)	24
Zhang ve ark. (2019)	27
3.2. Killi Zeminlerin Anizotropisi	29
İspir (2011)	31
Zarei ve ark. (2018).....	31
Aziz ve ark. (2019).....	34
Attom ve Al-Akhras (2008).....	37
Al-Neami (2020)	39
Khan ve ark. (2020).....	41
Rowshanzamir ve Askari (2010)	42
3.3. Kumlu Zeminlerin Anizotropisi	44
Guo (2008).....	44
Le ve ark. (2020)	46
Shahnazari ve ark. (2017).....	48
4. MATERYAL VE YÖNTEM	51
4.1. Materyal.....	51
4.2 Yöntem	54
4.2.1. Malzemelerin Dane Çapı Dağılımının Belirlenmesi (Elek Analizi).....	56
4.2.2. Maksimum ve Minimum Boşluk Oranlarının Belirlenmesi	56
4.2.3. Özgül Ağırlık Belirlenme Deneyi (G_s)	56
4.2.4. Direkt Kesme Kutusu Deneyleri.....	56
4.2.5. Tek Yönlü Sıkışma Deneyleri.....	57

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	58
5.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	63
6. TARTIŞMA	65
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
8. KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	73



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
c_c	Sıkışma indisi
c_u	Üniform kat sayısı
c'	Efektif kohezyon
CBR	Kalifornia taşıma oranı
Dr	Rölatif sıklık
D_{mak}	En büyük dane boyutu (çapı)
e	Boşluk oranı
e_{mak}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
e_s	Daneler arası boşluk oranı
E₀	Tanjant deformasyon modülü
F_m	Her 100 dane için mika dane sayısı
FC	İnce malzeme içeriği
G_s	Özgül ağırlık
I_p	Plastisite İndeksi
MDUW	Kuru Birim Ağırlık
OMC	Optimum su İçeriği
p	Basınç
PPL	Düzlem Polarize Işık
SPT	Standart Penetrasyon Testi
UU	Drenajsız konsolidasyonsuz üç eksenli basınç deneyi
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
U	Boşluk suyu basıncı
w_L	Likit Limit
Δp	Basınç Değişimi
Δe	Boşluk oranı değişimi
Δe_{elastik}	Elastik deformasyon
σ₁-σ₃	Deviatör gerilme
σ₃	Hücre basıncı
σ	Toplam gerilme
σ'	Efektif gerilme

ϕ	İçsel sürtünme açısı
ϕ_p	Pik içsel sürtünme açısı
ϕ_r	Rezidüel içsel sürtünme açısı
ϕ_s	Büyük deformasyonlarda içsel sürtünme açısı
ρ_{min}	Minimum yoğunluk
γ_{min}	Minimum birim hacim ağırlık
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık
γ_w	Suyun birim hacim ağırlığı
α	Yağmurlama (air pluviation) açısı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. Mohr-Coulomb kayma dayanım doğrusu.....	5
Şekil 2. Ölçeğe bağlı dane şekil tanımlaması [9].....	6
Şekil 3. Niteliksel küresellik-yuvarlaklık şeması [13]	6
Şekil 4. Parçacık yuvarlaklığı- küresellik tablosu [14].....	7
Şekil 5. Dane şekilsel özelliklerinin boşluk oranlarına etkisi [15]	7
Şekil 6. Köşellilik ve pürüzlülüğün kayma dayanımına etkisi [16].....	8
Şekil 7. Kayma dalgası hızı üzerinde yuvarlaklık etkisi [15]	8
Şekil 8. Dayanım parametrelerinin mika içeriği ile değişimi [24].....	12
Şekil 9. Mika içeriği ile 100 zemin danesi başına mika frekansının değişimi [24]..	12
Şekil 10. Dayanım parametreleri ile mika-kum karışımların 100 zemin danesinde görülen mika frekansının değişimi [24]	13
Şekil 11. Farklı çevre basınçları altında, başlangıç tanjant deformasyon modülünün 100 danede görülen mika frekansı ile değişimi [24].....	13
Şekil 12. Mika-kum danelerinin oryantasyon açısına(α) bağlı mümkün olan dizilim modelleri [26]	16
Şekil 13. Mika danelerinin köprüleme ve L_{mika}/D_{kum} boşluk oranına etkisi [26].....	16
Şekil 14. Mika içeriği ile sıkışma indisi, farklı L_{mika}/D_{kum} oranı için değişimi (a) Ottawa 20-30 ve (b) Ottawa 50-70 kumu ile karışımları [26]	16
Şekil 15. Mika içeriği ile boşluk oranı değişimi (a) Ottawa 20-30 ve (b) Ottawa 50-70 kumu ile karışımları [26].....	16
Şekil 16. Mika içeriği ile içsel sürtünme açısının değişimi (a) pik içsel sürtünme açısı (b) rezidüel içsel sürtünme açısı (c) büyük deformasyonlarda sürtünme açısı [26] ..	17
Şekil 17. Mika içeriği ve ödometre basıncı ile boşluk oranının değişimi [27]	18
Şekil 18. Mika içeriği ile sıkışabilirlik indisinin değişimi [27]	18
Şekil 19. Basınç altında danelerin konumlanması (a) %10 Mika içeren dane matrisinin düşük basınç altında durumu (b) Malzemenin daha yüksek basınç altında güçlü temas noktalarının oluşması ve boşluk oranlarının değişimi [27].....	19
Şekil 20. Mika içeriği ile deviator gerilme değişimi [27].....	19
Şekil 21. Mika içeriği ile G/G_{mak} ve D/D_{min} eğrilerinin değişimi [27]	20
Şekil 22. Mika içeriği ile nihai boşluk oranı değişimi S1 ve S2 kumu için [28].....	21
Şekil 23. Mika içeriği ile daneler arası boşluk oranı değişimi [28].....	21
Şekil 24. Farklı basınç altında mika içeriği ile gerilme değişimi [28].....	22
Şekil 25. Farklı çökelme açıları numune hazırlanması [31]	23
Şekil 26. Mika içeriği ile başlangıç kayma modülü etkisi (a) doymuş (b) doymamış numune [31]	24
Şekil 27. Drenajlı kayma dayanımı özellikleri [31].....	24
Şekil 28. Kum–mika karışımlarının içsel sürtünme açılarının rölatif sıklık ile değişimi [1]	25
Şekil 29. İçsel sürtünme açısının (ϕ) mika içeriği ile değişimi [1].....	25
Şekil 30. Mika içeriği ile sıvılaşma sonrası hacimsel deformasyon ilişkisi [1].....	26
Şekil 31. Mika içeriği ile maksimum ve minimum boşluk oranlarının değişimi [1] ..	26
Şekil 32. Kıvam limitlerinin mika içeriği ile değişimi [32].....	27
Şekil 33. Mika içeriğine karşı optimum su içeriği (OWC) ve maksimum kuru birim ağırlık (MDUW) değişimleri [32].....	28
Şekil 34. kayma dayanımının mika içeriği ile değişimi [32].....	28
Şekil 35. Kayma dayanım parametrelerinin mika içeriği ile değişimi [32].....	29
Şekil 36. Farklı yönlerde Mucking kilinden alınan numuneler üzerinde yapılan monotonik üç eksenli basınç deney sonuçları [37]	30

Şekil 37. Göçme yüzeyi ile yataklanma (tabakalanma) yönünün birbirine göre konumu [38].....	32
Şekil 38. Değişik yönlerde örselenmemiş numune alma aparatı [38]	32
Şekil 39. Anizotropi oranının belirlenme şeması [38].....	33
Şekil 40. (a) kayma dayanımı (b) Kayma dayanımı için anizotropi oranı [38].....	33
Şekil 41. Yükleme yönünün kayma dayanımı parametresi üzerindeki etkisi: (a) içsel sürtünme açısı, (b) kohezyon [38].....	34
Şekil 42. Boşluk suyu basıncı gelişiminin anizotropik özelliği (a) maksimum boşluk suyu basıncı (b) boşluk suyu basıncı anizotropi oranı [38]	34
Şekil 43. (a) Farklı numuneler için sıkışma basıncı ve boşluk oranı değişimi, (b ve c) sıkışma, şişme indislerinin ve oturma değerlerinin örselenmemiş numune alma yönü ile değişimi [38]	35
Şekil 44. Çökme düzlemlerine göre numune alma açıları [39].....	36
Şekil 45. S1 ve S2 zeminlerin kayma dayanım parametrelerin değişimi (a) Kohezyon (b) Sürtünme açısı değerleri [39]	36
Şekil 46. Deneyde kullanılan numunelerin göçme sonrası görüntüsü [39]	37
Şekil 47. Serbest basınç dayanımının numunelerin hazırlanma eğim açısı ile değişimi [40]	38
Şekil 48. Farklı yönlerde alınan numunelerin serbest basınç dayanımlarının derinlik ile değişimi [40]	38
Şekil 49. Aşırı konsolidasyon oranının zemin anizotropisine etkisi [40]	38
Şekil 50. (a) Numune alma aparatı (b) Numune alma açılarının temsili [41].....	40
Şekil 51. Anizotropi açısı ile birim ağırlığı değişimi [41]	40
Şekil 52. Drenajsız kayma dayanımının (S_u) numune alma açısı ile değişimi [41]... 40	40
Şekil 53. Numune alma açısı ile (a) Sıkışma indisi ve (b) oturmanın değişimi [41]. 41	41
Şekil 54. Farklı çökme yönlerindeki a) killi ve (b) siltli malzemelerin yenilme anandaki deviatör gerilme oranlarının konsolidasyon (çevre) basıncı ile değişimi [42]	42
Şekil 55. Anizotropi oranının (R) kuru birim ağırlık ile değişimi [43]	43
Şekil 56. Anizotropi oranının (R) malzemenin doymamlığı ile ilişkisi [43]	43
Şekil 57. Modifiye edilmiş kesme kutusu görüntüsü [46]	45
Şekil 58. Farklı düzlemlerde dane oryantasyonu ile numune hazırlanması (a) kum malzemenin kesme kutusu hücrelerine yerleştirilmesi (b) kesme kutusu hücrelerinin yatay konuma getirilmesi üst muhafazanın yerleştirilmesi (c) hücrenin dik konuma getirilmesi (d) hücrenin numune hazırlama aparatının dışına alınması (e) hücrenin test pozisyonuna getirilmesi (f) yükleme başlığının yerleştirilmesi ve normal yükün uygulanması, (g) test numunesinin görünümü [46]	45
Şekil 59. Granüler zeminlerin farklı dane oryantasyonları için içsel sürtünme sürtünme açısının değişimi (a) Köşeli kireçtaşı kumu (b) Ottawa kumu (c) cam boncuk malzemesi [46]	46
Şekil 60. Yağmurlama oluşturulmuş doymun ve doymun olmayan kumlu malzemelerin maksimum kayma modülünün (G_o), çökme açısı (α) ile değişimi ve doymamış kumun başlangıç kayma modülün değişimi (a) Dinamik üç eksenli basınç deneyi (b) Bender eleman deneyi [47]	47
Şekil 61. Kayma dalgası hızının (V_s) frekansa ile değişimi [47].....	48
Şekil 62. Anizotropi derecesi (LS) ve (BE) deneylerde [47].....	48
Şekil 63. Numune hazırlama için modifiye edilmiş kesme kutusu hücresi ve havadan yağmurlama yöntemi ile numune hazırlanması [48].....	49
Şekil 64. İçsel sürtünme açısının numune hazırlama düzeneği taban eğim eğim açısı ile değişimi (a) Sıkı kum (b) Gevşek kum [48].....	50

Şekil 66. Deneylerde kullanılan kum ve mika malzemelerinin özellikleri [1]	51
Şekil 65. Deneylerde kullanılan kum malzemelerinin özellikleri [1]	51
Şekil 67. (a) düzlem polarize ışık (PPL) ile mikroskop altındaki ince kesitin görünümü (b) çapraz kutuplu (XPL) muskovit mika mineralli mikroskop altında ince kesitin görünümü [1].....	53
Şekil 68. (a) Kalibrasyon testi sonuçları ve mika içeriği için ilişki X-RD sayım değeri (b) Kalibrasyon testi sonuçlarına göre saha numuneleri için mika içeriği [1]	53
Şekil 69. Kesme kutusu test numunelerinin hazırlandığı yağmurlama düzeneği	55
Şekil 70. Tek yönlü sıkışma deneylerinin uygulandığı hücre ve ekipman	56
Şekil 71. Kum-mika karışımlarının maksimum ve minimum boşluk oranlarının değişimi [1]	58
Şekil 72. Gevşek numuneler için yığılma açılarının belirlenmesi [1].	59
Şekil 73. Monotonik üç eksenli, yığılma ve kesme kutusu ($\alpha=0$, $L_{mika}/D_{kum}=1$) deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açılarının karşılaştırılması [1]	60
Şekil 74. Kesme kutusu deney sonuçlarına örnek ($\alpha=0$, $L_{mika}/D_{kum}=1$, normal yükler: 0.25 kg/cm^2 , 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2) [1].....	60
Şekil 75. Kesme kutusu deney sonuçları	61
Şekil 76. Tek yönlü sıkışma deney sonuçları.....	62
Şekil 77. Yassı mika danelerinin yakınındaki kum danelerinin kayması ve dönmesi [51]	64

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1. Literatürde mika karışımı kumlar üzerinde yapılmış bazı çalışmalar.....	10
Tablo 2. Boşaltma sonrası geri dönen deformasyon miktarı [28]	21
Tablo 3. Kayma dayanım parametreleri [28]	22
Tablo 4. Ankara Kili'nin göçme anında drenajsız kayma dayanımı için anizotropi oranı [33].....	31
Tablo 5. Göçme anında toplam kayma dayanımındaki anizotropi oranı [33].....	52
Tablo 6. Kesme kutusu deney programı için hazırlanan numune özellikleri	55
Tablo 7. Farklı mika içeriklerindeki kumlu zeminlerin tek yönlü sıkışma eğrileri ve sıkışma (c_c) ve tekrar sıkışma (c_r) katsayıları üzerindeki etkisi.	63



TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında yardımlarını esirgemeyen bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI'ya teőekkürü bir borç bilirim. Öğrenim hayatım boyunca sayısız fedakârlık yapan ve beni bugünlere getiren aileme minnettarlığımı özellikle belirtmek isterim.

Nooragha NEJAT

Manisa, 2021



ÖZET

Yüksek Lisans Tez

MİKRO ÖLÇEKTE DANE YÖNELİMİNİN MAKRO ÖLÇEKTE ZEMİN DAVRANIŞINA ETKİSİ

Nooragha NEJAT

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI

Zeminlerin fiziksel ve mekanik davranışının yöne göre değişimi anizotropi olarak tanımlanmaktadır. Zemin tabakalarının oluşumu esnasında danelerin yönelimi enerjilerini minimuma getirme eğilimindedir. Örtü ve yatay basıncı etkisi ile zeminlerde gerçekleşen düşey ve yatay yöndeki sıkışmalar farklılık arz edebilmektedir. Bu faktörlere ilaveten birçok faktörün etkisi ile zeminlerin sıkışma, dayanım, permeabilite gibi özellikleri yöne bağlı farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, dane şekli ve boyutlarının kumlu zeminlerin dayanım ve sıkışma potansiyeli üzerindeki etkisi deneysel bir çalışma programı ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, doğal halde ağırlıkça bol miktarda yapraksı dane içerdiği bilinen Eski Gediz Nehri Deltası kumlu zeminleri kullanılmıştır. Yapraksı danelerin kumlu zeminlerin davranışları üzerindeki etkisi iki açıdan araştırılmıştır. (1) Yapraksı dane boyutunun (L_{mika}) kum dane boyutuna oranının (D_{kum}) davranış üzerindeki etkisi, (2) yapraksı danelerin kumlu zeminlerin anizotropik özelliklerine etkisi. Bu amaç için farklı L_{mika}/D_{kum} boyutlarında ve ağırlıkça farklı oranlarda kum-mika karışımları hazırlanmıştır. Mika danelerinin anizotropik davranış üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi için test numuneleri yatayla farklı açı yapan kesme kutusu hücrelerinde havadan yağmurlama ile oluşturulmuştur. Daha sonra kesme kutusu hücresi orijinal yatay konuma getirilerek deneyler yürütülmüştür. Çalışma sonunda yapraksı danelerin boy oranının dayanım ve sıkışma özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde yapraksı mika dane içeren ve içermeyen kumlu zeminlerin anizotropik özellikleri arasında da belirgin farkların olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kum, mika, yapraksı dane, anizotropi, boşluk oranı, kayma dayanımı, dane yönelimi, dane dizilimi

2021, 72 sayfa

ABSTRACT
M. Sc. Thesis

The Effect of Micro-Scale Grain Orientation on Macro-Scale Soil Behavior

Nooragha NEJAT

Manisa Celal Bayar University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ender BAŞARI

The change of physical and mechanical behavior of soils according to direction is defined as anisotropy. During the formation of soil layers, the orientation of the grains tends to minimize their energy. Vertical and horizontal compressions in soils may have difference due to overburden and horizontal pressures. In addition to these factors, the properties of soils such as compression properties, strength and permeability may have differences depending on the direction, with the effect of many factors. In this study, the effect of grain shape and size on the strength and compression properties of sandy soils was investigated with an experimental study program. Within the scope of the study, the Old Gediz River Delta sandy soils which are known as in naturally contain abundant platy grains by weight were used. The effects of platy grains on the behavior of sandy soils has been investigated from two aspects. (1) The effect of size ratio of the mica grain (L_{mica}) to the sand grain size (D_{sand}) on the behavior, (2) the effect of the platy grains on the anisotropic properties of sandy soils. For this purpose, sand-mica mixtures in different L_{mica}/D_{sand} sizes and different mica contained specimens were prepared. In order to determine the effects of mica grains on anisotropic behavior, test specimens were prepared by air-pluviation method in shear box cells at different angles to the horizontal. Then, the shear box cell was placed to the original horizontal position and the shear box tests were carried out. At the end of the study, it was observed that the size ratio of the platy grains has a significant effect on the strength and compression properties. Similarly, it has been determined that there are significant differences between the anisotropic properties of sandy soils contain mica grains and without platy mica grains.

Keywords: Sand, mica, platy grain, anisotropy, void ratio, shear strength, grain orientation

2021, 72 pages

1. GİRİŞ

İri daneli ve kumlu zeminlerin davranışlarını ve anizotropik özelliklerini dane şekli, dane boyutu, danelerin yönelimi, gerilme koşulları, mineralojik yapısı, ince dane içeriği, ortamda suyun bulunması ya da bulunmaması, ince dane malzeme özellikleri gibi birçok faktör etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında kumlu zeminlerde dane boyutu düzeyinde (mikro düzeydeki) yapraksı danelerin ve bu danelerin yönelimlerinin kayma dayanımı ve sıkışma potansiyeli gibi genel (makro düzeyde) özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

Kumlu zeminlerdeki kum daneleri oluştukları kayanın fiziki, minerolojik, kimyasal vb. özelliklerini taşımaktadırlar. Dünyada ve ülkemizde yüksek oranlarda yaprak şeklinde dane içeren kumlu zeminler mevcuttur. Yapraksı şekilli daneler, şekillerinden dolayı kumlu zeminlerin davranışlarını beklenmedik şekilde değiştirebilmektedir. Homojen kumlu zeminlerin anizotropik özellikleri çokça çalışılmış olup, yapraksı dane içeren kumlu zeminlerin bilhassa anizotropik davranışlarının çalışılmasına ihtiyaç vardır.

Bu çalışma kapsamında, literatürde yer alan bilgiler ışığında, dane şekli ve boyutlarının kumlu zeminlerin dayanım ve sıkışma potansiyeli üzerindeki etkisi deneysel bir çalışma programı ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, doğal halde ağırlıkça bol miktarda yapraksı dane içerdiği bilinen Eski Gediz Nehri Deltası kumlu zeminleri kullanılmıştır. Eski Gediz Deltası kumlu zeminlerinin ağırlıkça %5 ile %20 oranlarında yapraksı mika daneleri içerdiği bilinmektedir [1]. Söz konusu bu oranlardaki yapraksı dane içeriği kumlu zeminlerin davranışlarını önemli derecede değiştirebilmektedir. Deneysel çalışmalarda Eski Gediz Nehri Deltası kumlu zeminlerinin seçilmesi ile çalışmanın sahada da bir karşılığının olması hedeflenmiştir.

Yapraksı danelerin kumlu zeminlerin davranışları üzerindeki etkisi iki açıdan araştırılmıştır. (1) Yapraksı dane boyutunun kum dane boyutuna oranının davranış üzerindeki etkisi, (2) yapraksı danelerin kumlu zeminlerin anizotropik özelliklerine etkisi. Bu amaç için L_{mika}/D_{kum} boyut oranları 0.5, 1.0, 2.0 ve 4 olacak şekilde, ağırlıkça %2.5 % 5, %7.5, %10, %15 ve %20 mika içeriklerinde kum-mika karışımları hazırlanmıştır. Mika danelerinin anizotropik davranış üzerindeki etkilerinin

belirlenebilmesi için test numuneleri yatayla farklı açılı yapan (0.5° , 10° , 20° , 30° ve 40°) kesme kutusu hücresi içinde havadan yağmurlama ile oluşturulmuştur. Daha sonra kesme kutusu hücresi yatay konuma getirilerek deneyler yürütülmüştür. Çalışma sonunda yapraksı danelerin boy oranının dayanım ve sıkışma özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde yapraksı mika dane içeren ve içermeyen kumlu zeminlerin anizotropik özellikleri arasında da belirgin farkların olduğu tespit edilmiştir.



2. GENEL TANIM VE BİLGİLER

Zeminlerin fiziksel ve mekanik davranışının yöne göre değişimi anizotropi olarak tanımlanmaktadır. Zemin tabakalarının oluşumu esnasında daneler potansiyel enerjilerini minimuma getirecek şekilde yönelim gösterirler. Örtü basıncı ile zeminlerde gerçekleşen düşey ile yatay yöndeki sıkışmalar farklılık arz edebilmektedir. Bu faktörlere ilaveten dane şekli, dane çapı dağılımı, danelerin mineralojik yapısı gibi birçok faktörün etkisi ile zeminlerin sıkışma, dayanım, permeabilite gibi özellikleri yöne bağlı farklılık gösterebilmektedir.

Anizotropi, geoteknik mühendisliğinin ilk yıllarından beri zemin davranışının temel özelliklerinden biri olarak tanımlanmıştır. Zemin anizotropisinin ilk değerlendirmeleri ve tanımlamaları Casagrande ve Carrillo (1944) [2] gibi araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Anizotropi, içsel/doğal (inherent) ve indüklenmiş/uyarılmış (induced) anizotropi olarak iki kısma ayrılır [2, 3]. Bununla birlikte, bir zemin numunesine asal gerilmeler uygulayarak danelerin belirli bir konuma ve rotasyona sahip olmasına yönelik öncü çalışmalar Arthur ve Menzies (1972) [3] tarafından yapılmıştır. Zemin anizotropisinin zemin davranışına olan etkileri literatürde farklı araştırmacılar tarafından laboratuvar ve arazi çalışmaları ile gözlemlenmiştir [2, 3, 4, 5]. Bu konuda yapılan çalışmalar 1970'li yıllardan öncesine gitmekle beraber, 1970'li yıllardan itibaren Arthur ve Menzies (1972), Oda (1972) [3, 4, 5] gibi araştırmacılar tarafından kumlu zeminlerin anizotropisi düzenli bir şekilde araştırılmaya başlanmıştır. 1970'li yıllardan günümüze kadar anizotropi konusundaki düzenli çalışmalar artarak devam etmiş ve bu çalışmalar her geçen gün daha iyi enstrümanle edilmiş deneysel numuneler üzerinde yürütülmüştür.

Mühendislik bakış açısıyla zeminler, homojen ve izotropik olmayan, özellikleri çevre koşullarına, jeolojik tarihçesine ve zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösteren ortamlardır. Bu açıdan zeminlerin her yönü ile mühendislik davranışlarını tanımlayan genel analitik modellerin ve sabit malzeme katsayılarının belirlenmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Zemin özelliklerinin her proje sahası için deneysel olarak belirlenmesi ve bu yapılırken de arazide geçerli olacak koşulların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bundan dolayı deneysel yöntemler zemin mekaniğinin ayrılmaz ve vazgeçilmez bir parçasını oluşturmaktadır. Deneysel olarak

belirlenen birçok zemin özelliği ise ancak belirli koşullarda geçerliliğini korumaktadır. Kullanılan deneysel yöntemlerin ve zemin davranışını etkileyen faktörlerin iyi anlaşılması, elde edilen sonuçların birçok durumda yanıltıcı olabilmesine yol açabilmektedir [6].

2.1. Granüler Zeminler ve Özellikleri

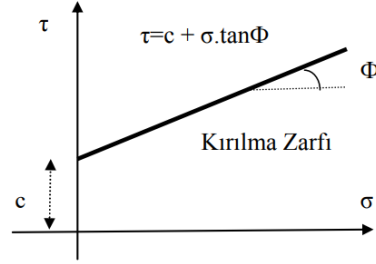
Granüler zeminler veya iri daneli zeminler olarak nitelendirilen kum ve çakıl malzemeler ile ilgili çalışmalar zemin mekaniğinin kuruluşunun ilk yıllarına hatta zemin mekaniğinin bir bilim dalı olarak kabul edilmediği günlere kadar uzanır. Coulomb (1776) [7] istinat duvarları üzerinde yaptığı çalışmalarda iri daneli zeminlerin dayanım özelliklerini de incelemiştir. Terzaghi (1925) [8] ise granüler zeminleri çok yönlü olarak araştırmıştır. Devam eden yıllarda birçok araştırmacı bu tür zeminlerin bilhassa dayanım özellikleri hususunda çalışmalar yapmıştır [9].

2.2. Zeminlerin Kayma Dayanımı

Bir zemin kütesine yük uygulandığında yükün şiddeti yeteri kadar büyük ise zemin daneleri birbirine göre hareket etmeye başlar ve bir düzlem boyunca kayarak göçme meydana gelir. Bu durumdan sonra zemin daha fazla yük taşıyamaz. Zeminin kayma dayanımı, dayanabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanır. Zeminlerin kayma dayanımının matematiksel bir ifade ile gösterimi Coulomb (1776) [7] ile başlamıştır. Zeminlerin kayma dayanımı ile ilgili farklı hipotez ve modeller vardır. Coulomb (1776) [7] tarafından ortaya atılan kayma dayanımı ve Mohr (1900) [10] tarafından geliştirilen farklı düzlemlerdeki gerilmeleri tarif eden Mohr dairelerinin birlikte değerlendirilmesi ve yorumlanması ile Mohr-Coulomb Yenilme Teorisi/Hipotezi ortaya çıkmış ve zemin mekaniğinde en çok kullanılan teorilerden biri olmuştur. Bu teoride, göçmeye yol açacak normal ve kayma gerilmesi ilişkisi gerçekte eğrisel olmakla birlikte yaklaşık olarak bir doğru ile gösterilebilir. Göçme durumunu gösteren Mohr gerilme dairelerine çizilecek ortak teğet (doğru) göçme zarfı olarak nitelendirilmektedir Şekil 1. Kayma dayanım doğrusunun denklemi Denklem 1'de verildiği gibidir. Teorik olarak temiz üniform kumda kohezyon olmadığı kabul edilir. Kohezyonsuz bir zemin için kayma dayanım doğrusunun denklemi Denklem 2'de ifade edildiği gibi sürtünme bileşeninden oluşur.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (2)$$

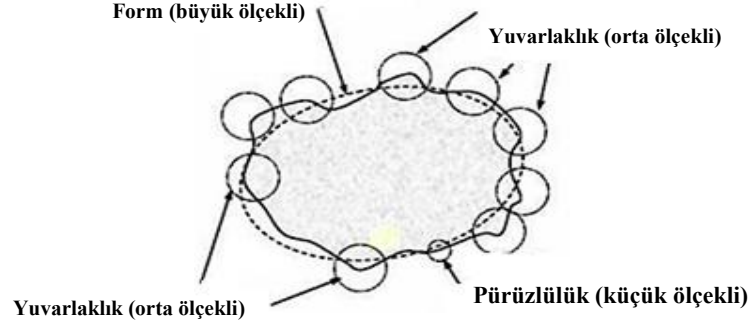


Şekil 1. Mohr-Coulomb kayma dayanım doğrusu.

Kayma dayanım doğrusunun (içsel sürtünme) açısı malzemenin mineralojik özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, dane şekli, daneler arasındaki boşluk oranı, daneler arası oluşmuş olan doku, gerilme seviyesi gibi özelliklerin bir fonksiyonudur. Boşluk oranı, köşellilik, dane boyu dağılımı, yüzey pürüzlülüğü, su muhtevası ve dane boyutu gibi özellikler kayma mukavemeti (içsel sürtünme) açısına etki eden en önemli faktörler olarak sıralanabilir. Malzemenin içsel sürtünme açısı daneler arası sürtünme ve kilitlenmenin bir bileşimidir. Daneler arasındaki sürtünme ise danelerin birbiri üzerinde kayma ve yuvarlanma direncinden oluşur. Kilitlenme bileşimi ise zemin ortamının sıklığı ve dağılımı ile ilgili olan paketlenme ile bağlantılıdır. Danelerin şekli ve pürüzlülüğü kayma dayanımı açısının sürtünme kısmını etkiler. Boşluk oranı ve daneler arasındaki doku ise danelerin kilitlenmesini etkilediği söylenebilir [9].

2.3. Danelerin Şekilsel Özellikleri ve Etkisi

Danelerin şekilsel özellikleri ile ilgili öncü çalışmalar Mackie (1897) [11] ve Dunn (1911) [12] tarafından yapılmıştır. Her iki çalışmada yuvarlaklığın gözlemsel gruplandırılmasına yöneliktir. Benzer çalışmalar ilerleyen yıllarda artarak devam etmiştir. Dane şekli, büyüklüğü, pürüzlülüğü vb. olarak sıralayabileceğimiz şekilsel (morfolojik) özelliklerinin tanımlanması Şekil 2’de görüleceği gibi dane ölçeğine bağlıdır [9].



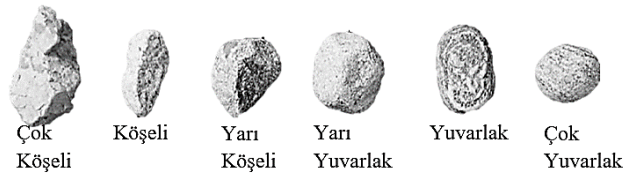
Şekil 2. Ölçeğe bağlı dane şekil tanımlaması [9]

Parçacık morfolojisini, şeklini veya biçimini (form), köşelilik veya yuvarlaklığı (angularity or roundness) Denklem 3 ve 4'te, yüzey dokusunu veya pürüzlülüğünü (surface texture or roughness) tanımlamak için Şekil 3 ve 4 gösterildiği gibi kullanılan üç farklı ölçek vardır. Biçim veya şekil faktörü (form), köşelilik veya yuvarlaklığın köşelerin sayısını ve keskinliğini yansıttığı bir parçacığın brüt (bütün) biçimiyle (eksen uzunlukları, çevre, yüzey alanı, hacim vb.) ilgilidir. Dijital görüntü yakalama ve işlemede tekniklerindeki ilerleme ile birlikte, farklı yazarlar tarafından dairesellik (2B küresellik biçimi) ve yıllar içinde yuvarlaklık için çeşitli matematiksel tanımlar önerilmiş olup günümüzde geçerliliği en yüksek olanlar aşağıda verilmiştir [9, 13, 14].

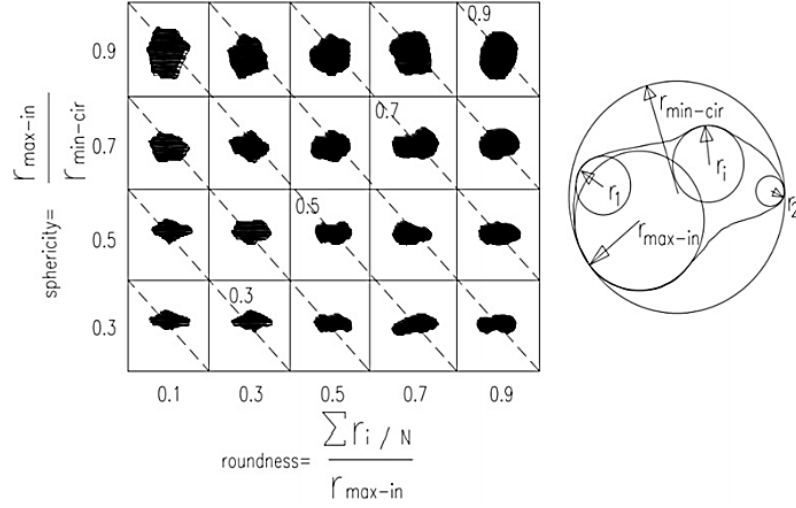
$$\text{Yuvarlaklık} \quad R = \frac{4A}{\pi L_{\text{Büyük}}^2} \quad (3)$$

$$\text{Dairesellik} \quad C = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (4)$$

Burada, p: dane çevresi, A: enine kesit alanı ve $L_{\text{Büyük}}$ ana eksenin uzunluğudur.

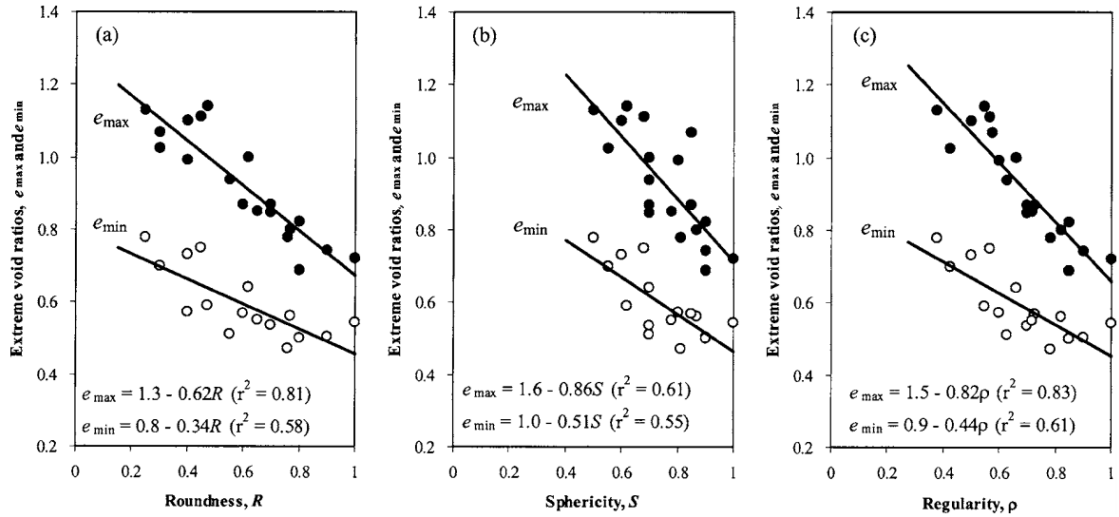


Şekil 3. Niteliksel küresellik-yuvarlaklık şeması [13]



Şekil 4. Parçacık yuvarlaklığı- küresellik tablosu [14]

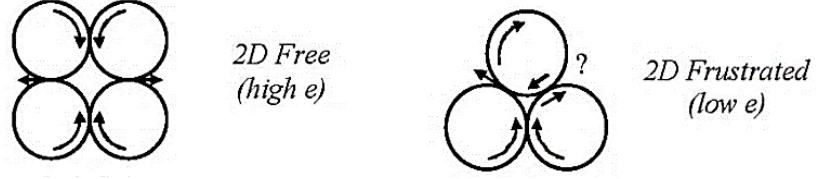
Maksimum ve minimum boşluk oranları yuvarlaklık ve küreselliğin azalmasıyla artar. Cho ve ark. (2006) [15] tarafından, danelerin köşeliliği arttıkça boşluk oranının arttığı ve boşluk oranının dane çapı dağılımının bir fonksiyonu olduğu, dane büyüklüğünün artmasıyla boşluk oranının arttığı belirtilmiştir. Cho ve ark. (2006) [15] tarafından boşluk oranına dane şeklinin etkisi Şekil 5 ile açıklanmıştır



Şekil 5. Dane şekilsel özelliklerinin boşluk oranlarına etkisi [15]

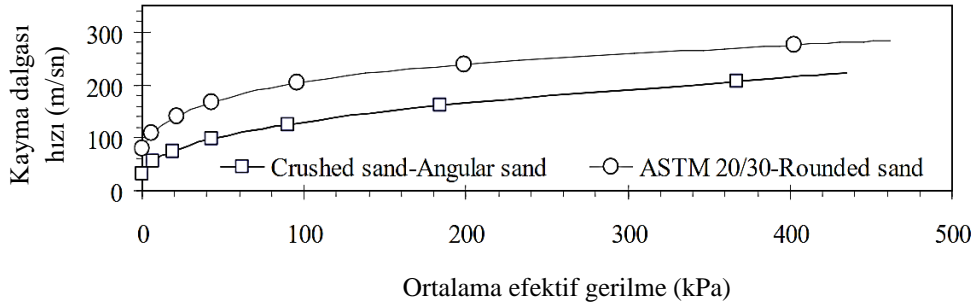
Zeminin kayma dayanımındaki anizotropi ve iç kuvvetlerin gelişimi dane köşeliliğinden etkilenir. Şekil 6'da sıklığın dönmeye etkisi verilmektedir. Bu mikro

mekanik yapı sonucunda, köşeliliğin danelerin dönmesini zorlaştırdığı ve pürüzlülüğün kaymayı engellediği. ayrıca, köşelilik ve pürüzlülüğün kabarma (dilatancy) ve anizotropiyi arttırdığı belirtilmiştir [16].



Şekil 6. Köşelilik ve pürüzlülüğün kayma dayanımına etkisi [16]

Zemin danelerinin şekli, esas olarak jeolojik kökenlerine ve çevre koşullarına bağlıdır. Cho ve ark. (2006)'ya göre, Şekil 7'de görüldüğü gibi kayma dalgası hızı yuvarlaklıkla birlikte artar. Yuvarlak daneli kum zeminlerin kayma dalgası hızı, köşeli dane içeren kumlu zeminlerin kayma dalgası hızından daha yüksektir. Kum danelerinin köşeliliği, boşluk oranında artışa neden olur. Boşluk oranının artışı kayma dalgalarının içinde yayıldığı ortamın yoğunluğunda bir azalmaya neden olur ve bu da kayma dalgası hızında bir düşüşe neden olur [15].



Şekil 7. Kayma dalgası hızı üzerinde yuvarlaklık etkisi [15]

2.4. Zeminlerin Anizotropi Tanımı ve Geçmişi

Anizotropi, bir malzemenin özelliklerinin yönlere göre farklılık gösterdiğini tanımlayan bir terimdir, başlangıçta iki ana kategoriye ayrılmış ve zamanla üç kategoriye genişletilmiştir: doğal/içsel (inherent), indüklenmiş (induced) ve başlangıç anizotropisi (initial anisotropy).

2.4.1. Doğal/İçsel (İnherent) Anizotropi

Doğal anizotropi, zemine uygulanan gerilmeler veya deformasyondan bağımsız olan zeminin bir özelliğidir, sedimentasyon sürecinden ve zeminin dane özelliklerinden kaynaklanır [2]. Doğal/içsel (inherent) anizotropi malzemenin doğasında bulunan (uygulanan gerilmelerin ve deformasyonların neticesinde oluşmamış – indüklenmemiş olan) fiziksel bir özellik olarak tanımlanır [2].

Georgiannou ve Hight (1990) [17] ve Collins (1974) [18] gibi araştırmacılar tarafından dane şekli ve dane boyu dağılımının malzemenin anizotropisini etkileyen en önemli iki faktör olduğunu ileri sürmüşlerdir. Dane şeklinin anizotropide önemli bir etkiye sahip olmasına rağmen küresel parçacıkların da anizotropi geliştirebileceği gözlenmiştir [4, 19]. Oda (1972) parçacıklar arası temasların çökme yönünde oluşma eğiliminde olduğunu ve bu şekilde küresel danelerden oluşan zeminlerinde anizotropik bir yapı oluşturduğunu açıklamıştır [4].

2.4.2. İndüklenmiş (Induced) Anizotropi

İndüklenmiş anizotropi, gerilme koşullarındaki değişimler neticesinde oluşan deformasyonlardan kaynaklı partiküllerin yeniden konumlanması ve oryantasyonu ile oluşan anizotropi olarak tanımlanır [2]. Malzemeye etkileyen gerilme ve deformasyonlar neticesinde daneler yeniden konumlanmakta ayrıca yeni temas noktaları oluşabilmekte ya da var olanlar ortadan kalkabilmektedir. Meydana gelen bu değişiklikler neticesinde anizotropik özellikler de değişebilmektedir. Gerilme ve deformasyonlar neticesinde oluşan anizotropi indüklenmiş (induced) anizotropi olarak tanımlanmaktadır [2].

2.4.3. Başlangıç (Initial) Anizotropi

Doğal (içsel) ve mevcut gerilme koşullarının kombinasyonu altındaki uyarılmış (indüklenmiş) anizotropi zeminin "başlangıç anizotropisi" olarak adlandırılır. Belirli bir yükleme kombinasyonu altında zeminin mekanik davranışını tarif eden bir özelliktir. Diğer bir ifade ile gerilme koşullarındaki değişiklikler nedeniyle, anizotropik zeminlerde dahil olmak üzere tüm zeminler mikro-yapı düzeyinde tepki verir ve değişime uğrar. Bu tepki ve değişimin gerçekleştiği başlangıçtaki anizotropik durum "başlangıç (initial) anizotropisi" olarak tanımlanır [20].

3. LİTERATÜR BİLGİSİ

3.1. Yapraksı Mika İçeren Kumlu Zeminlerin Davranışları

Mika, çoğunlukla metamorfik ve magmatik kayalarda bol miktarda bulunur. Kum malzemenin temin edildiği Eski Gediz Deltası zeminlerinde mika minerali en çok muskovit ve biyotit olarak bulunur [1]. Zeminin yapraksı mika içeriğinin artması, sıkışabilirliğini, optimum nem içeriğini, plastik limit (killi ve siltli zeminlerde) değerini ve dona karşı duyarlılığını genelde artırır, buna karşın taşıma kapasitesi ve kayma dayanımı özelliklerini azaltır. Malzemenin mühendislik özelliklerini istenmeyen şekilde etkilediğinden %10'dan daha fazla mika içeriğine sahip zeminlerin yol inşaatlarında kullanımından kaçınılması önerilmektedir [21]. Mika daneleri, iki boyutlu düz şekilleri nedeniyle kumlu zeminlerin statik ve dinamik mühendislik özelliklerini değiştirebilmekte ve geoteknik açıdan birçok istenmeyen neticelere yol açabilmektedir. Literatürde mikalı kumlar üzerine çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmaların mevcut olmasına rağmen, halen üzerinde araştırma yapılması gereken konulardan biridir. Konu ile ilgili ve önemli sayılabilecek bazı çalışmalar aşağıda Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatürde mika karışımı kumlar üzerinde yapılmış bazı çalışmalar

Referans	L_{mika}/D_{kum}	Mika İçeriği (%)
Gilboy (1928) [22]	-	0, 5, 10, 20, 30, 40
McCarthy ve Leonardo (1963) [23]	1-5	0, 3, 6, 12, 25, 50, 100
Harris ve ark. (1984) [24]	~1.7	0, 5, 10, 15, 25, 50
Hight ve ark. (1998) [25]	~0.67	0, 1, 2.5, 10, 20, 40
Lee ve ark. (2007) [26]	0.33, 0.66, 1, 2, 3	0, 1, 2, 5, 10, 20, 100
Cabalar (2010) [27]	1-2	0,5, 10, 15, 20
Basari (2012) [1]	1.07-4.07	1.5 10, 20
Ebrahimizadeh (2015) [28]	0.02-0.41	0, 5, 10, 15, 20

L_{mika} : İki boyutlu yapraksı mika danesinin çapını temsil eden dane boyutu,

D_{kum} : Üç boyutlu danenin ortalama çapını temsil eden dane boyutu.

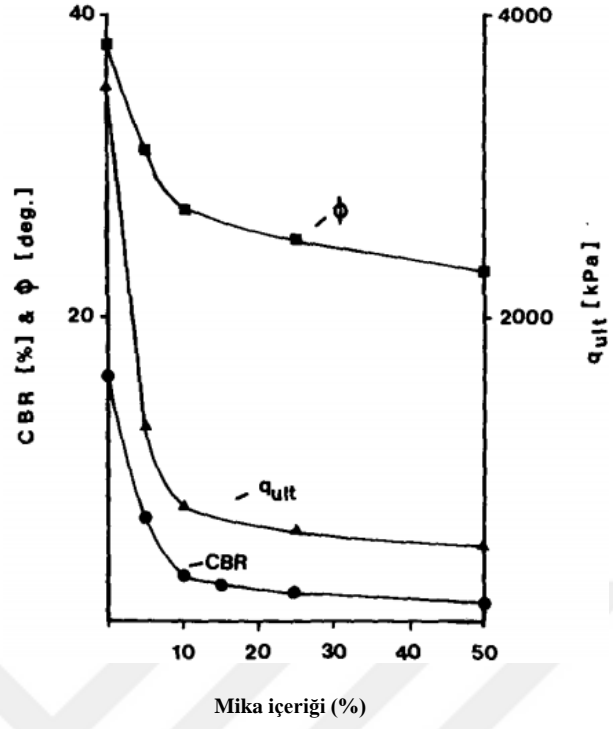
Farklı L_{mika}/D_{kum} dane çapı oranı ve mika içeriğine sahip zeminlerin davranışları birçok araştırmacı tarafından incelenmiş olup önemli görülenleri aşağıda özetlenmiştir.

Harris ve ark. (1984)

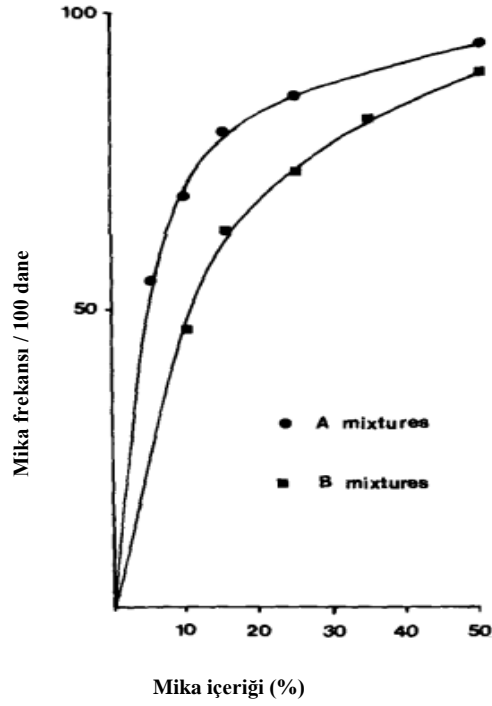
Harris ve ark. (1984) tarafından yapılmış olan çalışma [24] kapsamında, yassı mika daneleri ve kuvars kumlarını kullanarak kum-mika karışımları oluşturmuştur. Daha sonra izotropik olarak konsolide edilmiş numuneler üzerinde drenajlı üç eksenli, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testi ve kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, kum malzemenin mühendislik özelliklerinin mika içeriği ile değişimi araştırılmıştır. Araştırmacılar, F_m (100 zemin danesinde mika dane sayısı) ve MFA (birim hacim başına düşen mika yüzey alanı) gibi bazı yeni parametreler ve ilişkiler önermişlerdir. Granüler zeminin ϕ (içsel sürtünme açısı), c (kohezyon), Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), q_{ult} (nihai taşıma kapasitesi) ve E_t (tanjant deformasyon modülü) özelliklerinin mika içeriği ile değişimi deneysel olarak araştırılmıştır (Şekil 8 ve Şekil 9). Araştırmada; kum malzemenin mühendislik parametrelerinin mika içeriği ile doğrusal olmayan bir değişim gösterdiğini, ancak, aynı parametrelerin, F_m ile doğrusal ilişki sergilediği tespit edilmiştir. Araştırma sonucunda F_m parametresi ile alakalı ilişkiler önerilmiştir (Şekil 10 ve Şekil 11).

Araştırmacılar kum malzemenin mühendislik parametrelerinin değişiminin mika-kum danelerinin temasıyla ilişkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. Mika içeriği ile MFA'nın doğrusal olarak artacağını belirtmişlerdir. Bunların neticesinde mika içeren kumlu bir malzemenin mühendislik özellikleri ile mika içeriği arasında doğrusal bir ilişki kurulabileceği hipotezi kurulmuştur. Çalışma ile %10 mika içeriğine kadar kum-mika karışımlarının dayanım parametrelerinde çok hızlı ve keskin bir düşüşe, sıkışabilirlik özelliklerinde ise artış neden olduğu tespit edilmiştir.

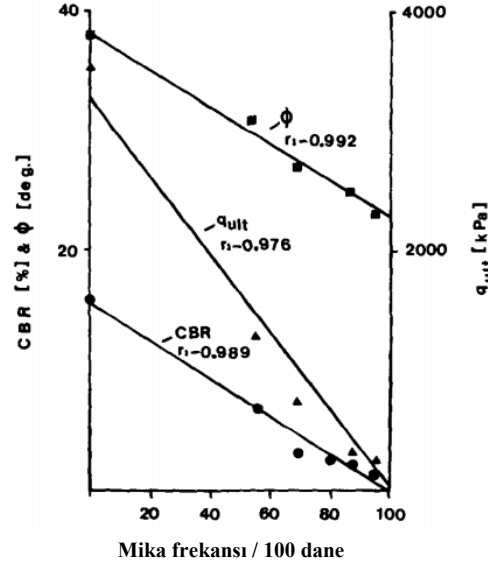
Yürütülen deneysel program sonucunda, %10 ve daha az seviyelerdeki mika içeriğinin kum parametreleri üzerinde daha keskin ve belirgin bir düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. %10 civarındaki bir mika içeriğinin kumlu malzemenin dayanım parametrelerinde %15'e kadar bir düşüşe neden olabileceği gözlemlenmiştir. Yapraksı mika danelerinin küçük ağırlık yüzdelerinde bile zeminin dayanım parametrelerini önemli mertebelerde düşürebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma bulguları ile mikanın daneli zeminlerdeki etkisinin belirlenmesi için ağırlıkça ilişki kurulmasından ziyade daha duyarlı ve hassas sonuçlar verdiği belirtilen F_m ve MFA gibi parametrelerin kullanılması önerilmiştir.



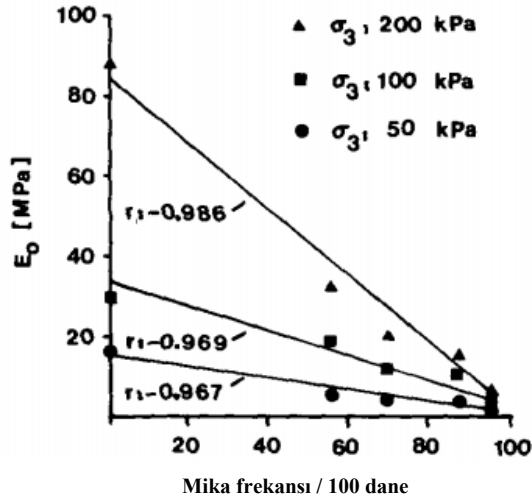
Şekil 8. Dayanım parametrelerinin mika içeriği ile değişimi [24].



Şekil 9. Mika içeriği ile 100 zemin danesi başına mika frekansının değişimi [24].



Şekil 10. Dayanım parametreleri ile mika-kum karışımların 100 zemin danesinde görülen mika frekansının değişimi [24]



Şekil 11. Farklı çevre basınçları altında, başlangıç tanjant deformasyon modülünün 100 danede görülen mika frekansı ile değişimi [24].

Georgiannou (2006)

Georgiannou (2006) [29] çalışmasında, izotropik olmayan koşullarda konsolide edilmiş yapay olarak hazırlanmış numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyler vasıtasıyla kum içinde bulunan değişik şekil ve boyutlara sahip ince malzemelerin drenajsız davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney programında

kullanılan katkı maddeli malzemeler; mika, silt ve kaolin gibi ince danelerle karıştırılmış iki çeşit kuvars kumu, HRS (Ham Nehri Kumu) ve JS (Jamuna Kumu) kullanılmıştır. Kum dane boyutlarının dağılımı orta-ince arasında değişmiştir, maksimum ve minimum boşluk oranları ise, HRS kumu için $e_{maks}=0.870$ ve $e_{min}=0.526$ ve JS kumu için $e_{maks}=0.885$ ve $e_{min}=0.537$ olarak kaydedilmiştir. Numuneler hazırlanırken, homojen karışımlar elde etmek ve yapraksı danelerin yatay yönlenmesini sağlamak için yağmurlama yöntemi ve suda çökeltme yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde üç eksenli drenajsız deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında boşluk suyu basıncı, hücre basıncı, eksenel yük ve deformasyon ölçümleri yapılmıştır.

Çalışma sonucunda, yapraksı danelerin her iki (orta ve ince) kumda granüler yapıyı değiştirerek stabiliteyi azalttığını, küresel danelerin (silt) kumun granüler yapısını güçlendirdiği ve daha stabil hale getirdiği ancak dane çapı dağılımı daha büyük olan kumda iyileştirme etkisinin daha güçlü olduğu, kum boyutundaki mikaların yine kumların stabilitesini bozucu etki yaptığı ve bu etkinin ince malzeme ve kumun göreceli dane boyutu ile ilişkili olduğu, silt boyutundaki mika ve kum karışımında boşluk oranının ve iri daneler arası boşluk oranının davranışa etkisinin kumun yapısını değiştiren ince malzemeye (mika) nazaran daha az etkili olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Lee ve ark (2007)

Lee J.S., Guimaraes M. ve Santamarina J.C., (2007) [26] yaptıkları çalışma kapsamında, yuvarlak kum ve yapraksı mika parçacıklardan oluşan karışımlarda gelişen kendine özgü paketlenme (packing) özelliklerini ve mikanın küçük, orta ve büyük deformasyon (kayma dayanım) parametreleri üzerindeki etkilerini incelemek için mikro ve makro ölçekli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Mika plakaları, boşluk doldurma, köprüleme (bridging), sıralanma (ordering) ve mika-mika etkileşme yoluyla kumun paketlenme şeklini değiştirmektedir. $L_{mika}/D_{kum} \geq 1$ olduğunda, köprüler oluşturarak küresel boşluk oranında artışa neden olduğu belirtilmiştir (Şekil 13). Küresel boşluk oranı arttığında kumun dayanımı azalırken sıkışabilirliği artmıştır. Karışımlarda, $L_{mika}/D_{kum} \geq 1$ oranı ve mika içeriğinin artması ile, kayma dalgası hızının azaldığı, gerilme durumuna karşı daha duyarlı hale geldiği ve içsel sürtünme açısında azalma meydana geldiği belirtilmiştir. Mika parçacıkları, ince düz ve yapraksı

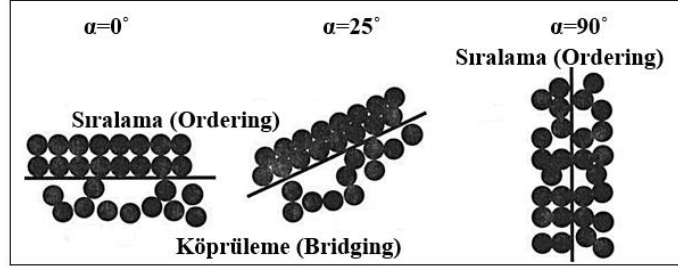
plakalardır. Malzemenin içindeki danelerin oryantasyon veya sıralanma düzeni (paketlenmesi), danelerin potansiyel enerjilerini minimuma indirecek şekilde olacağı düşünülmektedir. Ancak, iki boyutlu mika daneleri, Şekil 12’de gösterildiği gibi farklı düzlem eğimlerine (α) bağlı olarak boşluklar içeren ve gevşek paketlenme yapıları teşkil edeceği belirtilmiştir.

Şekil 14, deneysel çalışmalarda kullanılan tüm karışımlar için 70-105 kPa basınç aralığında belirlenen mika içeriğine karşı sıkışma indisini (c_c) göstermektedir. Mika içeriği $>2\%$ ’yi aştığında sıkışma miktarında artış görülürken, L_{mika}/D_{kum} boyut oranının sıkışma indisi üzerinde net bir etki kaydedilmemiştir.

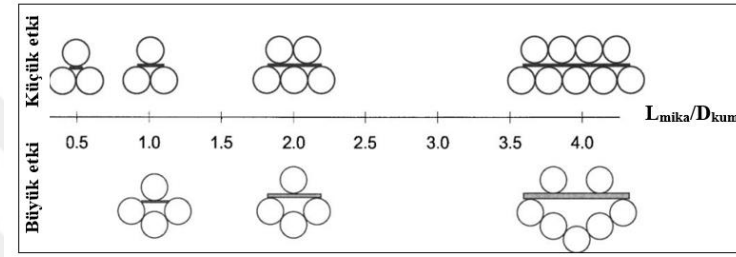
Şekil 15’te ise boşluk oranındaki değişimi göstermektedir. Genel olarak, mika içeriği arttıkça boşluk oranı artmaktadır. Ancak boyut oranı düşük olan ($L_{mika}/D_{kum}=0.33$ ve $L_{mika}/D_{kum}=0.66$) ve mika içeriği az olan karışımların boşluk oranı değerlerinde fark edilebilir bir değişime rastlanılmamıştır. Yazarlar bunun sebebini küçük mika plakaları, kum partikülleri arasındaki bulunan boşlukları doldurulmasıyla boşluk oranının azalmasına neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Oranı $L_{mika}/D_{kum} \geq 1$ olan karışımlarda düşük mika içeriğinde ($mika < 5\%$) olsa bile köprüleme etkisinin hâkim olduğu belirtilmiştir.

Mika içeriği 5% ’ten fazla olan karışımlarda, büyük L_{mika}/D_{kum} oranına sahip olan bazı mika plakaları ve bu plakalar arasındaki etkileşim nedeniyle boyut oranındaki farklılık azalmaktadır. Çalışmada mika içeren karışımlarda; porozitelilik, boşluk doldurma ($L_{mika}/D_{kum} < 1$), köprüleme ve sıralanma ($L_{mika}/D_{kum} \geq 1$) ve mika-mika etkileşimlerinin $10\% \sim 15\%$ daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir.

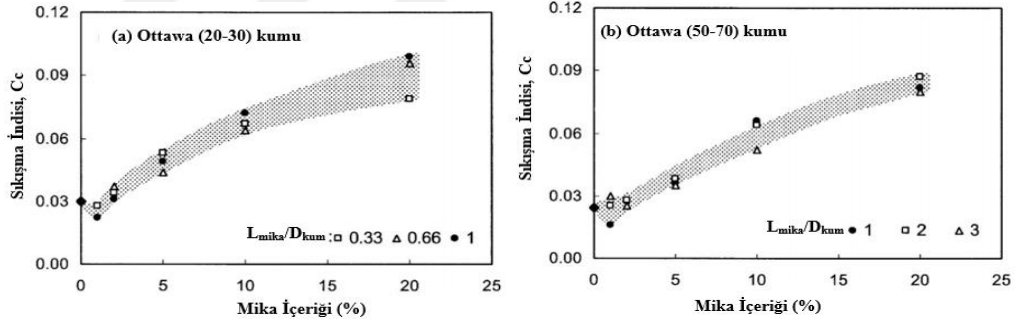
Üç eksenli deneylerden elde edilen sonuçlara göre, mika içeriğinin artmasıyla pik (ϕ_p) ve rezidüel (ϕ_r) içsel sürtünme açılarında düşüş gözlenmiştir (Şekil 16.a,b). Benzer davranış [1, 24, 28] çalışmalarında da görülmektedir. Rezidüel sürtünme açısı değerlerinde azalım, mika içeriği $2\% \sim 10\%$ arasında gerçekleşmiştir. İçsel sürtünme açısı üzerinde L_{mika}/D_{kum} oranı ikincil bir oynadığı ifade edilmiştir, ayrıca rezidüel değer (ϕ_r), pik değere (ϕ_p)’e göre daha belirgin olarak değişime uğramıştır. Şekil 16.c ise büyük deformasyon mertebeleri için mika içeriğinin etkisini göstermektedir.



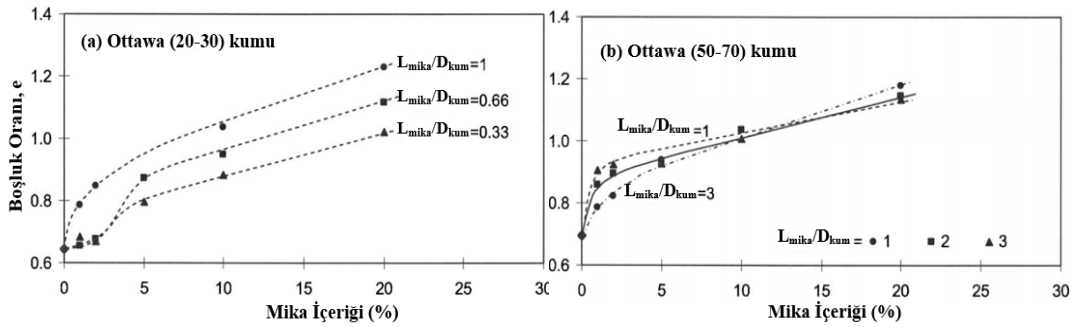
Şekil 12. Mika-kum danelerinin oryantasyon açısına (α) bağlı muhtemel dizilim modelleri [26]



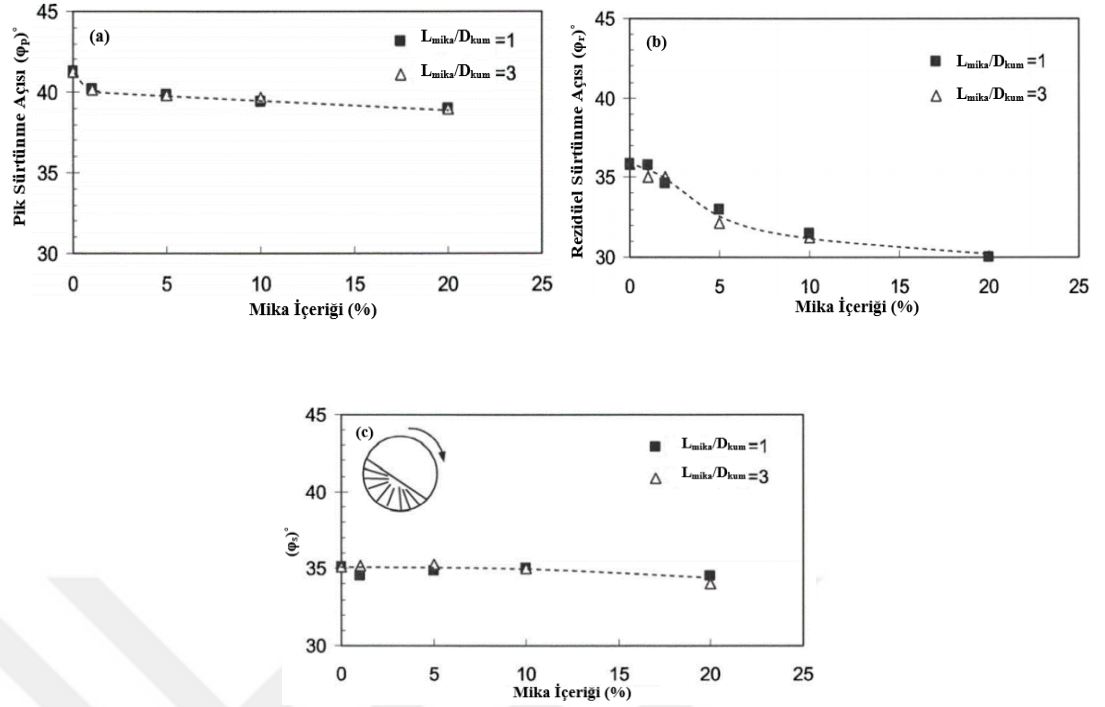
Şekil 13. Mika danelerinin köprüleme ve L_{mika}/D_{kum} boşluk oranı etkisi [26]



Şekil 14. Farklı L_{mika}/D_{kum} değerleri ve mika içeriği ile sıkışma indisinin değişimi (a) Ottawa 20-30 ve (b) Ottawa 50-70 kumu - mika karışımları [26]



Şekil 15. Mika içeriği ile boşluk oranı değişimi (a) Ottawa 20-30 ve (b) Ottawa 50-70 kumu - mika karışımları [26]

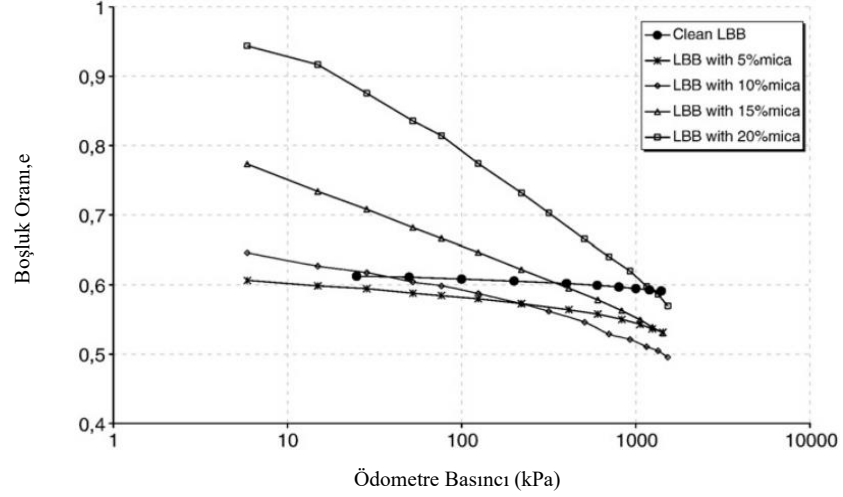


Şekil 16. Mika içeriği ile içsel sürtünme açısının değişimi (a) pik içsel sürtünme açısı (b) rezidüel içsel sürtünme açısı (c) büyük deformasyonlarda içsel sürtünme açısı [26]

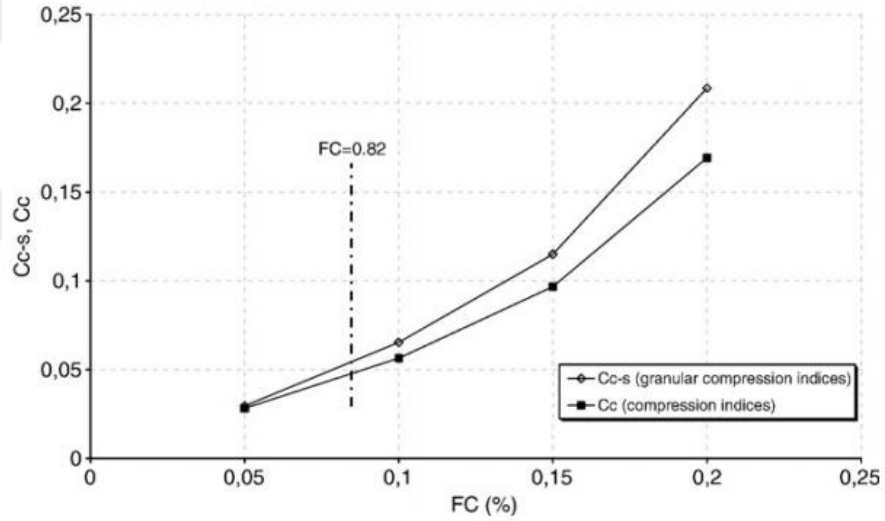
Çabalar (2010)

Cabalar, A.F. (2010) [27] çalışmasında, ince malzeme (Fine Content – FC) olarak mika ve iri dane olarak yuvarlak daneli Leighton Buzzard standart kumu ile farklı mika içeriklerinde karışımlar oluşturulmuştur. Daha sonra hazırlanan karışımlar doygun hale getirilerek bir seri ödometre, üç eksenli ve rezonans kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada mekanik davranışlar için geçiş ince dane içeriği (Transition fines content, FC_t) ve dinamik özellikler üzerindeki mika içeriğinin etkisi incelenmiştir. Ödometre deneylerin sonucunda, mika içeriği ve boşluk oranı gibi başlangıç koşullarının, sıkışma davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu bulgulanmıştır.

Başlangıç durumunda boşluk oranları 0.61-0.95 arasında değişen kum – mika karışımlarının sıkışabilirliklerinin Şekil 17 ile gösterildiği gibi mika içeriğinin artması ile arttığı tespit edilmiştir. Şekil 18’de görüldüğü gibi Mikalı kumların sıkışabilirlik davranışı, geçiş mika içeriği bölgesine kadar iri kum daneleri tarafından kontrol edilirken, geçiş mika içeriğinden (FC_t) sonra sıkışma davranışı mika dane matrisi tarafından kontrol edilmektedir.

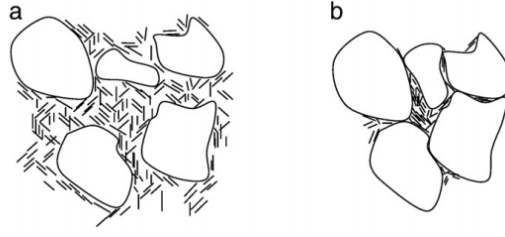


Şekil 17. Mika içeriği ve ödometre basıncı ile boşluk oranının değişimi [27]



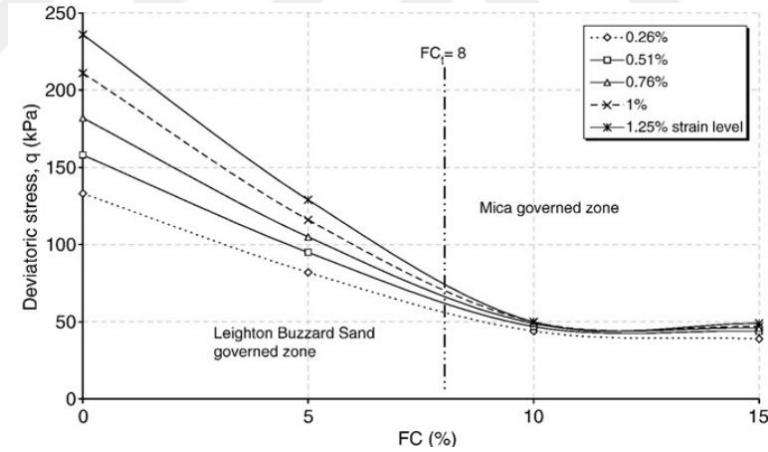
Şekil 18. Mika içeriği ile sıkışabilirlik indisinin değişimi [27]

Theron (2004) [30] öne sürdüğü davranış mekanizmasına göre, mika parçacıkları yuvarlak iri kum parçacıkları arasındaki boşlukları doldurmaktadır. Mevcut mika parçacıklarının belirli bir eşik miktarına kadar kum daneleri birbiriyle temas halindedir ve malzemenin genel davranışı iri kum daneleri tarafından kontrol edilir. Kum daneleri arasındaki temas ortadan kalktığına, malzemenin davranışını iri daneler arasında konumlanmış olan mika daneleri kontrol eder. Kum ve mika daneleri, başlangıç koşullarına ve yükleme koşullarına bağlı olarak Şekil 19'de gösterildiği gibi yeniden konumlanırlar.



Şekil 19. Basınç altında danelerin konumlanması (a) %10 Mika içeren dane matrisinin düşük basınç altında durumu (b) Malzemenin daha yüksek basınç altında güçlü temas noktalarının oluşması ve boşluk oranlarının değişimi [27]

Söz konusu çalışmada üç eksenli deneylerden elde edilen sonuçlar neticesinde deviator gerilme, boşluk suyu basıncı ve drenajsız Young modülü (E_u) gibi dayanım parametrelerinin mika içeriği ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Üç eksenli deneylerde malzemenin mika içeriği arttıkça deviator gerilme değerlerinin belirgin bir şekilde azaldığı ileri sürülmüştür (Şekil 20).



Şekil 20. Mika içeriği ile deviator gerilme değişimi [27]

Çalışmada son olarak doymuş numuneler üzerinde rezonans kolon deneyleri yapılmış ve kum mika karışımların kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) gibi dinamik zemin parametreleri incelenmiştir. Mika içeriğinin artması ile Şekil 21’de gösterildiği gibi G/G_{mak} eğrilerinin aşağıya, D/D_{min} eğrilerinin ise yukarıya kaydığı belirtilmiştir.



Şekil 21. Mika içeriği ile G/G_{\max} ve D/D_{\min} eğrilerinin değişimi [27]

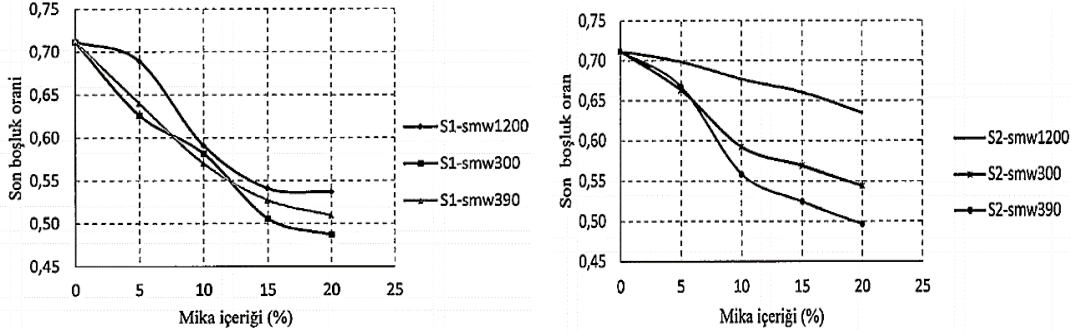
Ebrahimzadeh (2015)

Ebrahimzadeh, S. (2015) yüksek lisans tez çalışması [28] kapsamında, ödometre ve üç eksenli basınç deneylerini içeren deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada iri (S1) ve ince (S2) kum kullanılarak üç farklı $L_{\text{mika}}/D_{\text{kum}}$ (İnce Mika – SMW390:, Orta Mika – SMW300 ve Kaba Mika – SMW1200) oranları için farklı mika içeriklerinde (%50, %22 ve %1) kum – mika karışımları hazırlanmış ve yağmurlama yöntemi ile test numuneleri hazırlanmıştır.

Çalışma neticesinde elde edilen, farklı mika dane boyutları için, nihai boşluk oranının mika içeriği ile değişimi Şekil 22’de verilmiştir. Tüm mika dane boyutları için yükleme sonrası nihai boşluk oranlarının mika içeriğindeki artış ile azalmıştır. $L_{\text{mika}}/D_{\text{kum}}$ oranın da her iki kum malzeme içinde davranış üzerinde etkili olduğu nihai boşluk oranlarını değiştirmiştir. Daha iri mika daneleri içeren kumlu malzemeler, daha küçük boyutta mika danesi içeren kumlu malzemelere nazaran daha yüksek boşluk oranlarına sahip olmuştur. Bu davranış hem S1 hem de S2 kumu için, özellikle S2’de daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Tüm karışımlarda %20 mika içeriği için nihai boşluk oranları arasındaki farklar artmıştır. Yükleme sonrası yapılan boşaltma sonrası geri dönen deformasyonlar ($\Delta e_{\text{elastik}}$) Tablo 2 ile verilmiştir. Tablo 2’de bakıldığında mika içeriği arttıkça kum – mika karışımının $\Delta e_{\text{elastik}}$ artmış dolayısı ile karışımların daha elastik bir yapıya sahip olduğu yorumu yapılabilir.

Çalışmada daneler arası boşluk oranının (e_s) başlangıç değerleri ve malzemenin sıkışabilirliği mika içeriği ile arttığı gözlenmiştir. Şekil 23’te gösterildiği gibi farklı

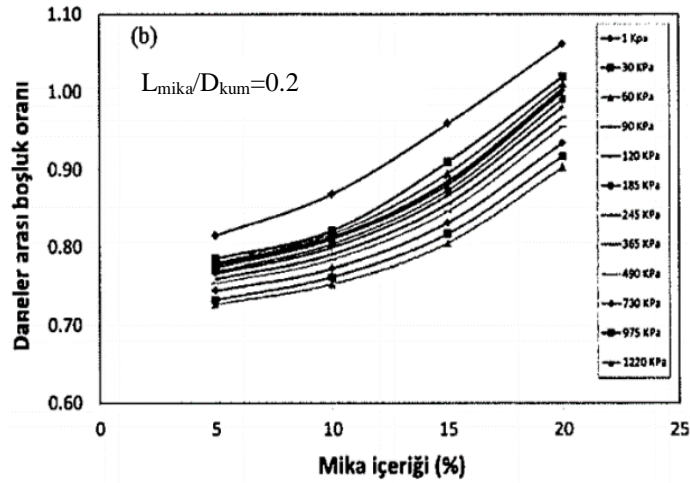
yüklemeye değerleri için daneler arası boşluk oranı mika içeriği ile birlikte arttığı tespit edilmiştir. Daneler arası boşluk oranındaki artış %10 mika içeriğinden sonra daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 23).



Şekil 22. Mika içeriği ile nihai boşluk oranı değişimi S1 ve S2 kumu için [28]

Tablo 2. Boşaltma sonrası geri dönen deformasyon miktarı [28]

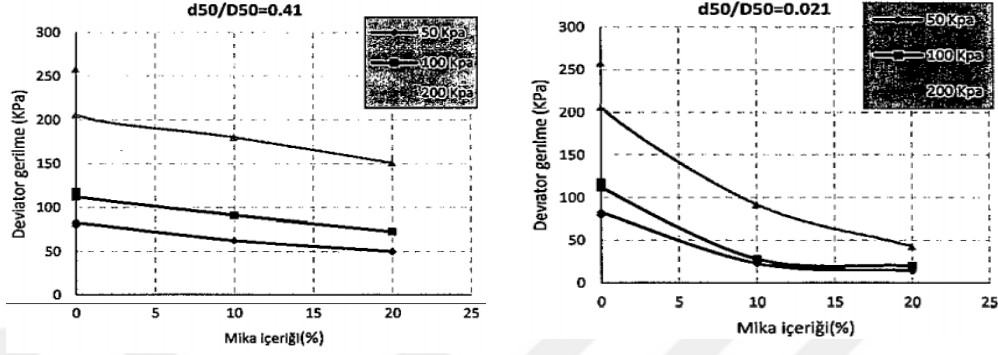
		Mika içeriği (%)	5	10	15	20
$\Delta e_{\text{elastik}}$	S1	Mika-1	0,092	0,105	0,089	0,058
		Mika-2	0,034	0,044	0,049	0,046
		Mika-3	0,034	0,036	0,051	0,062
	S2	Mika-1	0,050	0,047	0,043	0,049
		Mika-2	0,044	0,051	0,031	0,044
		Mika-3	0,035	0,054	0,062	0,066



Şekil 23. Mika içeriği ile daneler arası boşluk oranı değişimi [28]

Şekil 24'te farklı $L_{\text{mika}}/D_{\text{kum}}$ oranları için verilen grafikler incelendiğinde; $L_{\text{mika}}/D_{\text{kum}}$ oranının daha düşük olan değeri için mika içeriğinin artması ile

numunelerin deviator gerilme değerleri arasındaki fark azalmıştır. mikasız dunum ile kıyaslandığında, mika içeriğinin %20 olması durumunda deviator gerilme değerlerinde yaklaşık %25'lik bir düşüş gözlenmiştir . İçsel sürtünme açılarında ise Tablo 3 gösterildiği gibi L_{mika}/D_{kum} değerinin artması ile düşüş ortaya çıkmıştır.



Şekil 24. Farklı basınç altında mika içeriği ile gerilme değişimi [28]

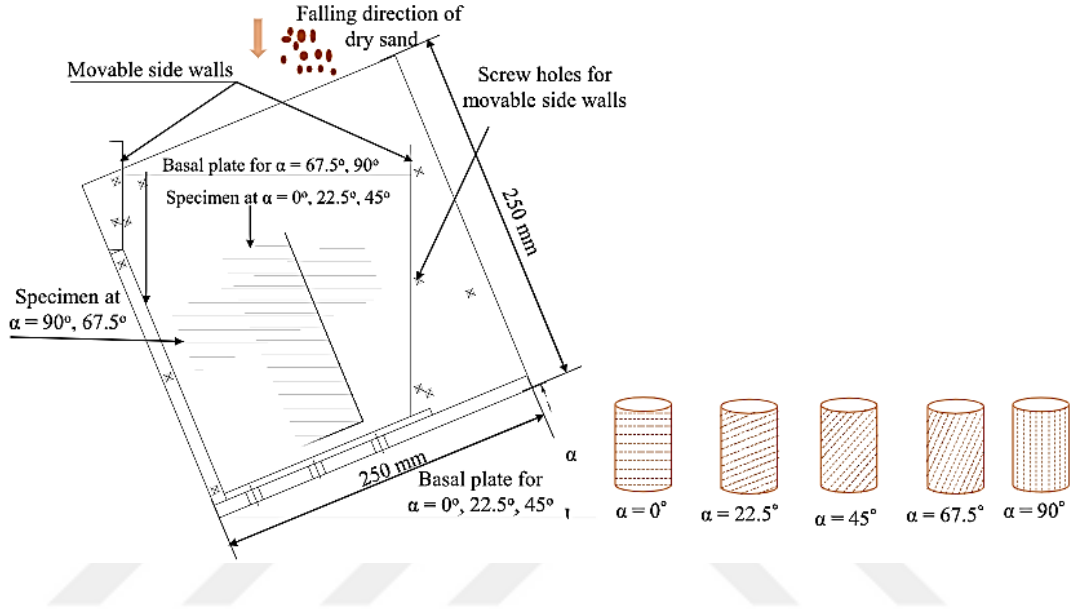
Tablo 3. Kayma dayanım parametreleri [28]

D/L	% 0		%10		%20	
	Φ	C	Φ	C	Φ	C
S1-0%	33.8	-				
S2-0%	33.9	-				
0.41			31.9	-	32.7	-
0.19			33.5	-	31.5	-
0.11			33.2	-	33.1	-
0.05			30.7	-	29.4	-
0.047			30.2	-	22.5	-
0.021			32.4	-	24.3	-

Le ve ark. (2020)

Le B, Toyota H. ve Takada S., tarafından 2020 yılında yapılmış olan çalışma [31] kapsamında, doğal (içsel) anizotropinin doymuş ve doymamış kumların kayma dayanımı ve kayma modülü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı mika içeriklerine sahip yuvarlak daneli Toyoura kumu kullanılarak doymuş ve doymuş olmayan karışımlar üzerinde dinamik üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada test numuneleri çeşitli çökeltme açılara (α) sahip, yağmurlama (AP) ve kuru titreşim (DV) yöntemi ile hazırlanmıştır.

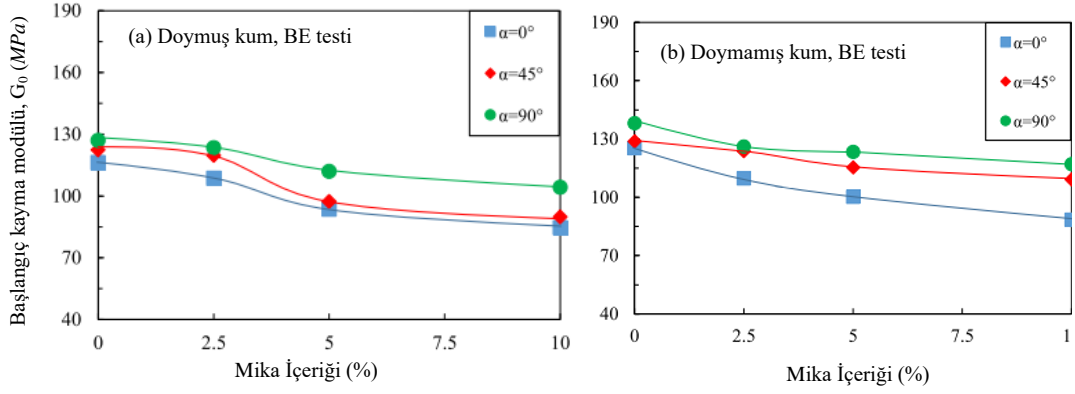
Zemin partiküllerinin yönü ve dokusu kumun mekanik özelliklerini etkilemesinden dolayı numune hazırlanma yöntemi içsel anizotropi üzerinde önemli bir role sahiptir. Yazarlar, test numunelerini hazırlamak için altı ayrı hareketli metal plaka ile birleştirilmiş eğimli bir dikdörtgen kap (konteyner) kullanmışlardır. Konteyner duvarlarının eğimi ve konumu değiştirilerek Şekil 25'te görüldüğü gibi farklı çökme açılarında (α) numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 25. Farklı çökme açılarında numune hazırlanması [31]

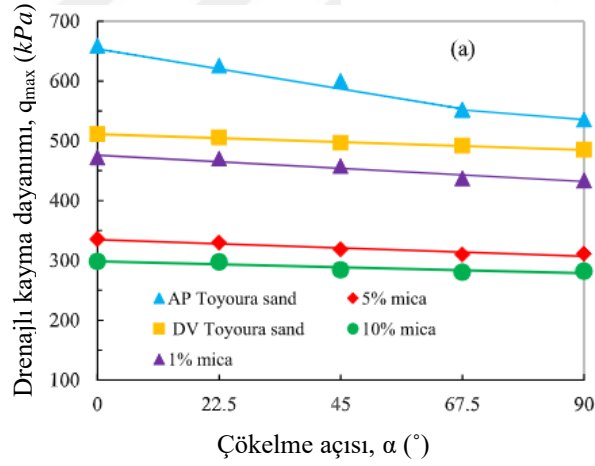
Çökme açısı yataydan düşey yönüne yaklaşıncaya kayma dayanımında azalma meydana gelirken Şekil 28, başlangıç kayma modülünde kayma dayanımının tam tersine düşey çökme açısına yaklaşıncaya daha büyük bir başlangıç kayma modülü sergiler.

Doymun olmayan kum – mika karışımlarının kayma modülü, doymun kum – mika karışımlarının kayma modülüne nazaran biraz daha yüksek bir anizotropiye sahip olduğu Şekil 26'da görülmektedir. Kayma modülünün anizotropi derecesi (α değerine bağlı değişimi) doymun olmayan test numunelerinde daha belirgin olmak ile birlikte mika içeriği artımı ile artmıştır. Ek olarak çalışmada mika içeriğindeki artış ile mika partiküllerinin kırılmasından dolayı kayma dayanımının içsel anizotropi derecesinde bir azalma olduğu yorumu da yapılmıştır.



Şekil 26. Mika içeriği ile başlangıç kayma modülü etkisi (a) doymuş (b) doymamış numune [31]

Aynı çalışmada drenajlı kayma dayanımının içsel anizotropisi üzerinde mika danelerinden ziyade yuvarlak kum danelerinin daha belirgin bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 27).

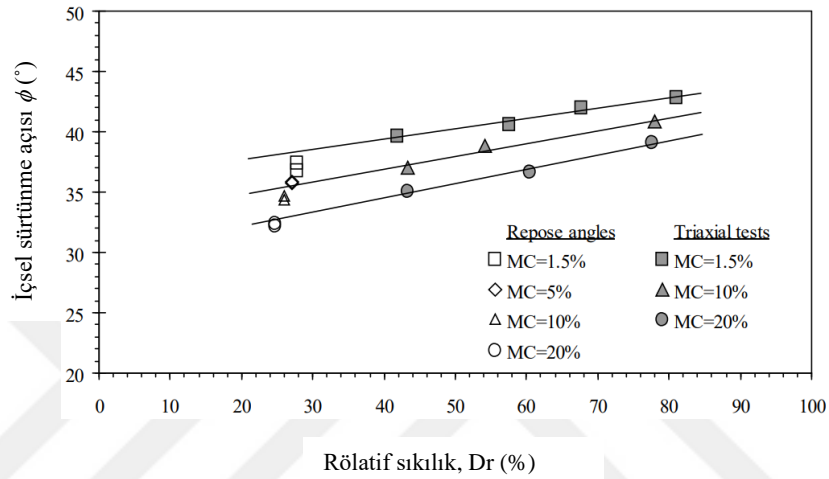


Şekil 27. Drenajlı kayma dayanımı özellikleri [31]

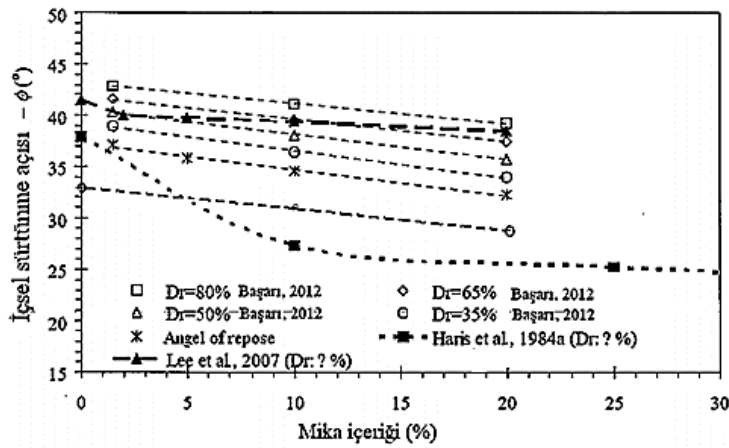
Başarı (2011)

Başarı, E. tarafından 2011 yılında yapılmış olan çalışma [1] kapsamında, Eski Gediz Nehri Deltası (EGND) kumlu zeminlerinin dinamik zemin özelliklerine dane şeklinin ve ince malzeme içeriğinin etkisini monotonik üç eksenli basınç, dinamik üç eksenli basınç ve bender eleman deneyleri ile araştırılmıştır. İlaveten çalışmada farklı mika ve ince malzeme içeriğine sahip zeminler üzerinde arazide SPT deneyleri de yapılmıştır. Deneysel çalışmasında farklı mika içeriklerindeki numunelerin istiflenme

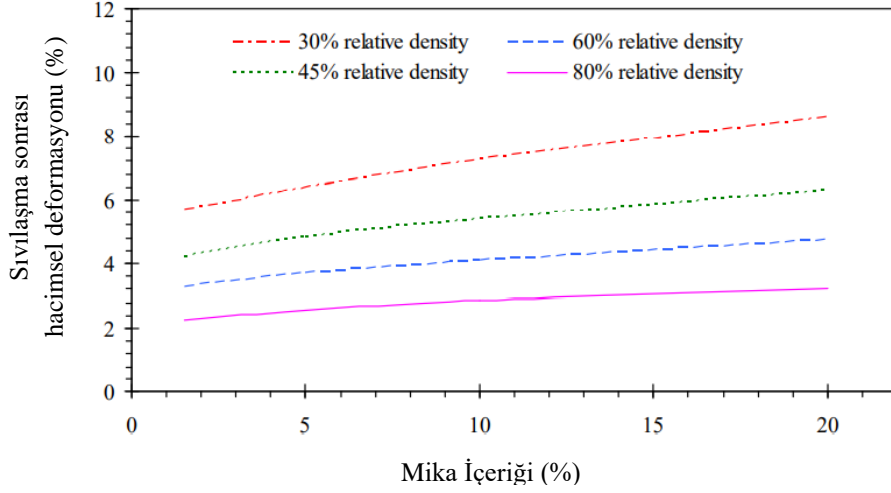
özellikleri (maksimum ve minimum boşluk oranları), farklı sıklıklar için sıvılaşma dirençleri, sıvılaşma sonrası hacim değişimleri, kayma dalgası hızları ve içsel sürtünme açısı gibi özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, mika ve non-plastik ince malzemenin EGND kumların CRR (devirsel direnç oranı) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi dayanım parametrelerini belirgin bir şekilde düşürdüğü gözlenmiştir Şekil 28-29. Sıvılaşma sonrası hacim değişiminin ise mika içeriği ile arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 30).



Şekil 28. Kum-mika karışımlarının içsel sürtünme açılarının rölatif sıklık ile değişimi [1]

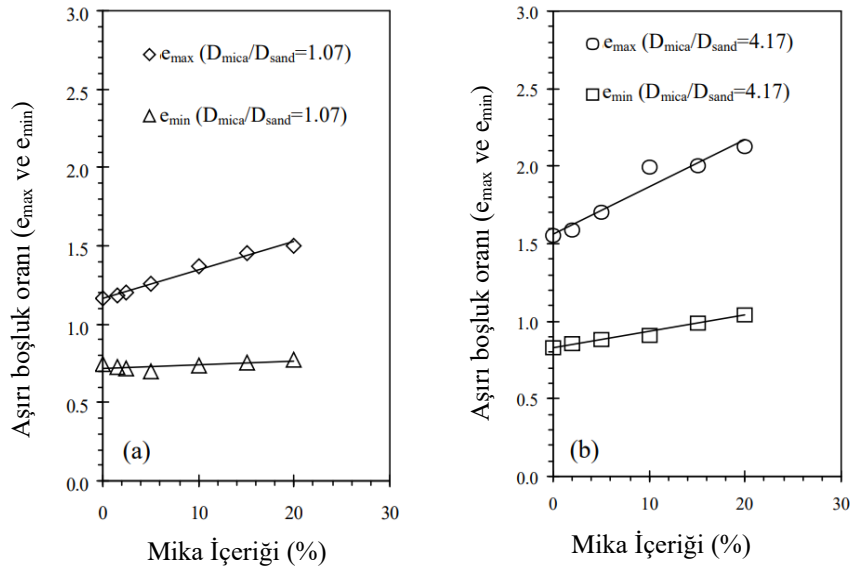


Şekil 29. İçsel sürtünme açısının (ϕ) mika içeriği ile değişimi [1]



Şekil 30. Mika içeriği ile sıvılaştırma sonrası hacimsel deformasyonu ilişkisi [1]

Yazar, mika plakalarının kum daneleri arasında köprüleme etkisi ile malzemenin boşluk oranını arttırdığı bunun neticesinde de malzemenin maksimum ve minimum boşluk oranlarında bir artışa neden olduğu sonucuna varmıştır (Şekil 31). Ayrıca bu etkinin gevşek durumdaki malzemede daha belirgin olduğunu, sıkı malzemelerde bu etkinin daha düşük mertebelerde gerçekleştiğini ileri sürmüştür. Mika ve kum dane boyutlarının oranının, malzeme içerisinde köprüleme etkisi ile meydana gelen ilave boşlukların oluşumunda etkili olduğunu belirtmiştir (Şekil 31.a ve b).

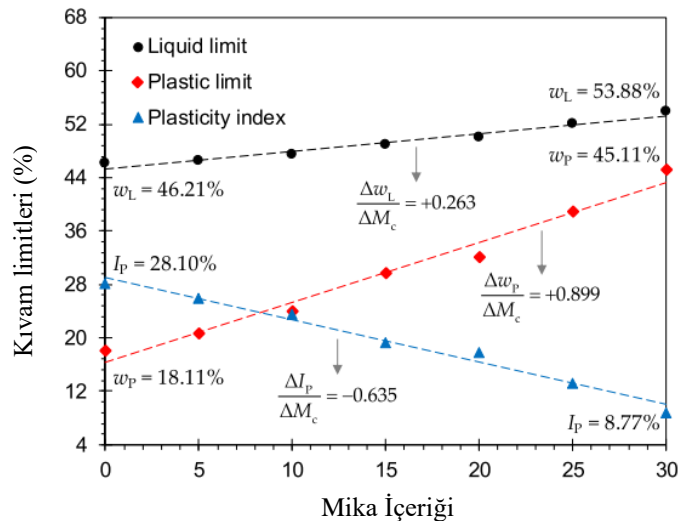


Şekil 31. Mika içeriği ile maksimum ve minimum boşluk oranlarının değişimi [1]

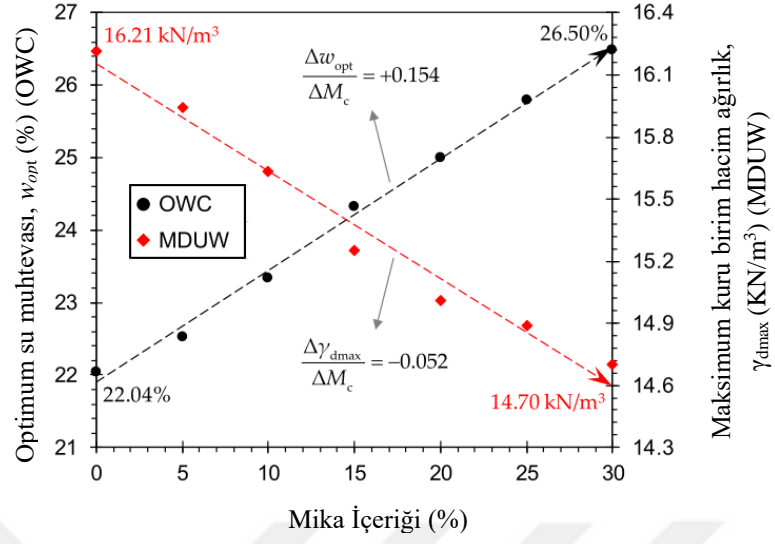
Zhang ve ark. (2019)

Zhang J., Soltani A., Deng A. ve Jaksa B., tarafından 2019 yılında yapılmış olan çalışma [32] kapsamında, ticari olarak temin edilebilen mika içeriğinin, killerin mekanik özellikleri üzerinde etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Karışımlar, ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30'luk değişen mika içeriklerinde yerel olarak temin edilebilen kil zemini ile hazırlanmıştır. Çalışmada kıvam limitleri tayini, kompaksiyon, serbest basınç (UC), direkt kesme kutusu (DS) deneyleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) testleri gerçekleştirilmiştir.

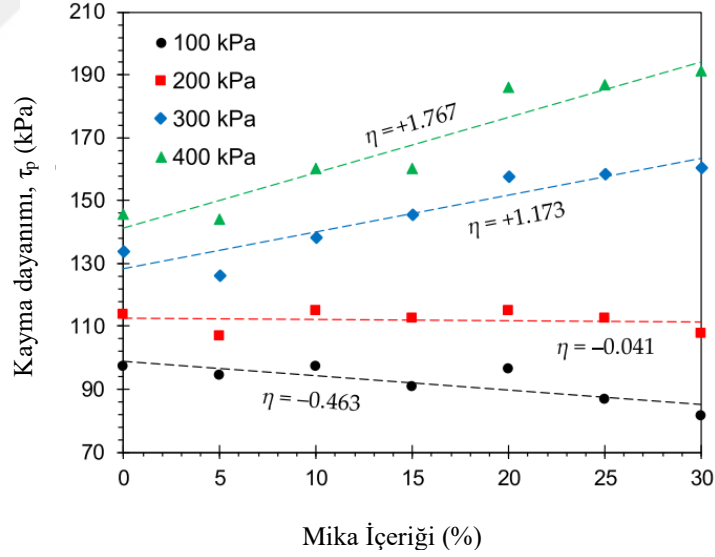
Çalışmada likit ve plastik limit değerlerinin mika içeriği ile doğrusal olarak arttığı, plastisite indisinin ise doğrusal olarak azaldığı gözlenmiştir (Şekil 32). Mika içeriğinin artması ile malzemenin non-plastik (NP) bir karaktere doğru geçişe neden olduğu yorumu yapılmıştır. Kompaksiyon deneyleri neticesinde ise mika içeriğinin artması ile daha yüksek optimum su içeriği ve daha düşük maksimum kuru birim ağırlıkları elde edilmiştir (Şekil 33). Bu etkinin olarak mika mineralinin yumuşak, süngerimsi doku ve yüksek su talebine meyli bir özelliğe sahip olmasından kaynaklandığı yorumu yapılmıştır. Kayma dayanımının mika içeriği değişimi Şekil 34'te verildiği gibi elde edilmiştir. İçsel sürtünme açısının Şekil 35'te gösterildiği gibi mika içeriği ile arttığı, kohezyonun ise mika içeriği ile düştüğü belirlenmiştir. düşük normal gerilmelerde mikadan olumsuz olarak etkilenmiştir Şekil 34.



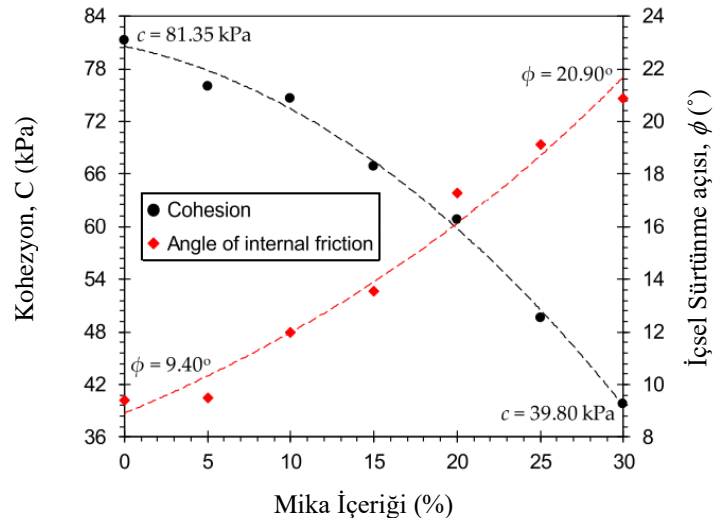
Şekil 32. Kıvam limitlerinin mika içeriği ile değişimi [32]



Şekil 33. Mika içeriğine karşı optimum su içeriği (OWC) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDUW) değişimleri [32]



Şekil 34. kayma dayanımının mika içeriği ile değişimi [32]



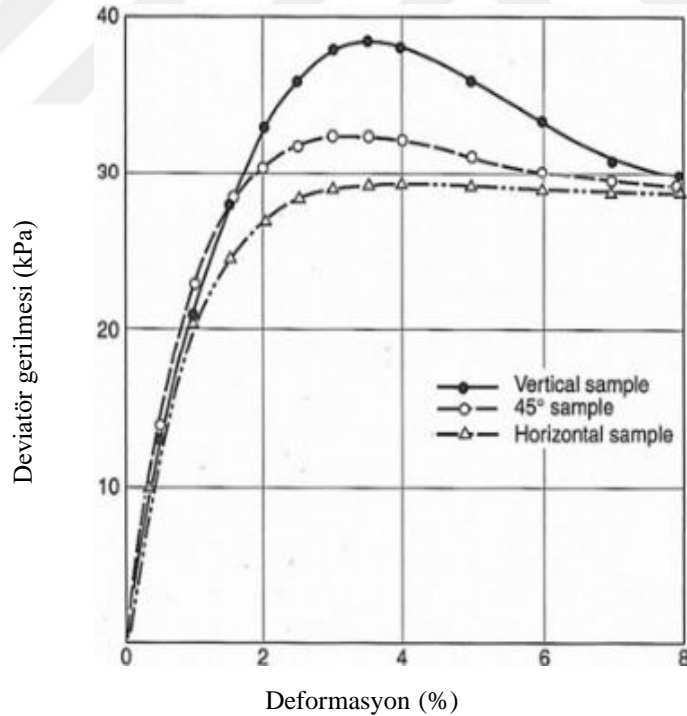
Şekil 35. Kayma dayanım parametrelerinin mika içeriği ile değişimi [32]

3.2. Killi Zeminlerin Anizotropisi

Deneysel çalışmalar, killi zeminlerin bir dereceye kadar dayanım, sıkışma, hidrolik iletkenlik gibi özelliklerinde anizotropik özelliğe sahip olduğunu göstermiştir. Geleneksel geoteknik uygulamalarda, basitlik nedeniyle izotropik yaklaşım benimsenmiştir. Son yıllarda, teknolojinin gelişmesi ile geoteknik analiz ve tasarım prosedürlerinde gerçek anizotropik davranışın dikkate alması mümkün olmaya başlamıştır. Ancak, bu tür analizlerden elde edilen sonuçların güvenilirliği, girdi verileri olarak malzeme özelliklerinin doğruluk derecesine bağlıdır. Bu tür malzeme verilerinin tespiti yalnızca uygun laboratuvar ve özel olarak tasarlanmış arazi deneyleri ile yapıldığından, bu amaç için uygun test yöntemlerinin geliştirilmesi ve pratikleştirilmesi gereklidir. Günümüze kadar, kohezyonlu zeminlerin anizotropik özellikleri üzerine bolca araştırma yapılmıştır.

Killi zeminlerin çoğu, özellikle aşırı konsolide killer, anizotropik davranma eğilimindedir. Zeminlerin mühendislik özelliklerinde anizotropi, zemin dokusunu oluşturan sedimantasyon süreci ve/veya zemin tarihindeki farklı yönsel gerilmeler nedeniyle oluşur. Kil anizotropisi, zeminin mikro yapısından kaynaklandığı kabul edilmektedir. Killi zeminlerin partikül düzeni, boşluk dağılımı ve zemin partiküllerinin arasındaki temas yönlerine göre farklılık arz edebilir. Aşırı konsolide olmuş kohezyonlu zeminlerde anizotropi daha belirgin olup kayma dayanımı, sıkışabilirlik, permeabilite ve şişme gibi mekanik davranışlar anizotropik özellikler sergiler [33, 34].

Killerin drenajsız kayma dayanımı anizotropisi ile alakalı ilk çalışmalar Hansen ve Gibson (1949) [20] tarafından yapılmaya başlanmış ve sonrasında birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yürütülmüştür. Ward ve ark. (1959) [35] aşırı konsolide "Londra Kili" üzerine yaptıkları çalışmalarında, yatay ve düşey yönlerde numunelerin serbest basınç dayanımı, sıkışabilirlik ve kayma dayanımı açısından anizotropik olduğu sonucuna varmışlardır. Yatay yöndeki kayma dayanımının düşey yöndeki kayma dayanımına nazaran daha yüksek olduğunu bulmuşlar. Bishop (1966) [36] yapmış olduğu çalışmada, Londra Kili'in yatay/düşey kayma dayanım oranını 1.23 ila 1,63 arasında değiştiğini, eğimli numunelerin kayma dayanımında büyük bir azalma olduğunu bildirmiştir İspir (2011) [33] ve Wesley (2010) [37] Londra deniz yatağı kili olan "Mucking Clay" üzerinde deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında normal konsolide yumuşak tortul kilden alınan örselenmemiş numuneleri üzerinde yaptıkları deneyler neticesinde Şekil 36'de gösterileceği gibi drenajsız kayma dayanımı numunenin eğimi yataya yaklaştıkça azalmıştır.



Şekil 36. Farklı yönlerde Mucking kilinden alınan numuneler üzerinde yapılan monotonik üç eksenli basınç deney sonuçları [37]

İspir (2011)

İspir M. (2011) [33] tarafından yapılan çalışma kapsamında ön konsolide edilmiş, katı ve fisürlü Ankara Kili'nin drenajsız kayma dayanımı ve sıkışabilirlik özellikleri anizotropi yönünden incelemiştir. Konya Yolu boyunca Çukurambar-Balgat bölgesinde çeşitli derin kazılardan alınan düşey ve yatay yöndeki örselenmemiş numuneler üzerinde, ödometre deneyleri ile sıkışabilirlik özellikleri ve monotonik üç eksenli basınç deneyleri ile drenajsız kayma dayanım özellikleri belirlemiştir. Yürütülen deneysel çalışmalar neticesinde, Ankara Kili, 50-1600 kPa aralığında farklı yük kademeleri için yatay (H) ve düşey (V) yönde belirlenen hacimsel sıkışma katsayılarının 0.72-1.17 arasında değişen oranlarda anizotropik özelliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan, Ankara Kili'nin drenajsız kayma dayanımının 0.87-1.19 arasında değişen oranlarda anizotropik olduğu belirlenmiş (Tablo 4), ancak aynı yöndeki numunelerin drenajsız kayma dayanımı geniş bir aralıkta dağılım göstermesi sonucu araştırma sahasındaki killi zeminlerin drenajsız kayma dayanımı bakımından pratik uygulamalarda izotropik kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır.

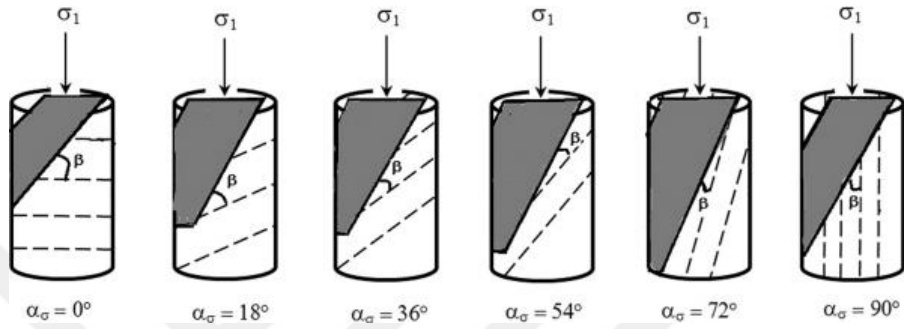
Tablo 4. Ankara Kili'nin göçme anında drenajsız kayma dayanımı için anizotropi oranı [33]

Confining Pressure (kPa)	Anisotropy Ratio (H/V) in Total Shear Strength at Failure			
	Site-A1	Site-A2	Site-B	Site-C
250	1.19	1.13	0.87	-
350	1.17	1.01	-	-
450	-	0.91	0.98	1.12
650	-	-	-	0.90

Zarei ve ark. (2018)

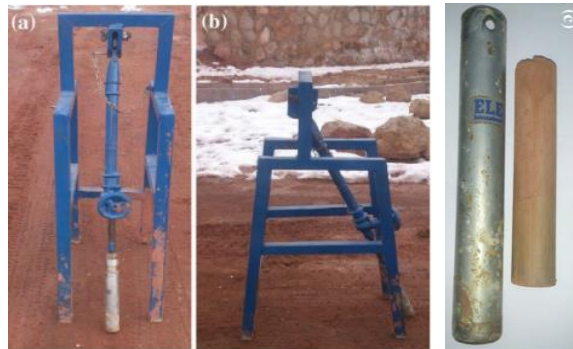
Zarei ve ark. (2018) [38] yürüttükleri araştırmada, örselenmemiş numunelerin kayma dayanımı ve sıkışabilirliğin numune alma yönüne sıkı bir şekilde bağlı olduğunu göstermişlerdir. Numune alma yönünün yataylaşmasına bağlı olarak kayma dayanımının azaldığı, oturma değerlerinin ise arttığı bulgulanmıştır. Ek olarak, göçme yüzeyi ile tabakalanma yönü arasındaki açı azaldıkça, göçme yüzeyinin zemin tabakalanma yönüne daha yakın (paralel) olma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda göçme yüzeyi ile tabakalanma yönü arasındaki açının azalmasının boşluk suyu basıncında artışa ve kayma dayanımında da azalmaya neden olmuştur.

Çalışma neticesinde test numunesinin yatay ile yönelimi göçme (kayma) yüzeyinin (θ_f) yönelimini de etkilediği tespit edilmiştir. Örselenmemiş numunelerin alma açısının yataylaşması malzemenin kayma dayanımında ve kohezyonunda azalmaya neden olmuştur. Dayanım, göçme yüzeyi ile yataklanma (danelerin sedimantasyon – tabakalanma) yönünün birbirine yaklaşması durumunda ve bilhassa göçme yüzeyinin yataklanma – tabakalanma yüzeyi ile çakışması durumunda kayma dayanımı azaldığı gözlenmiştir (Şekil 37).



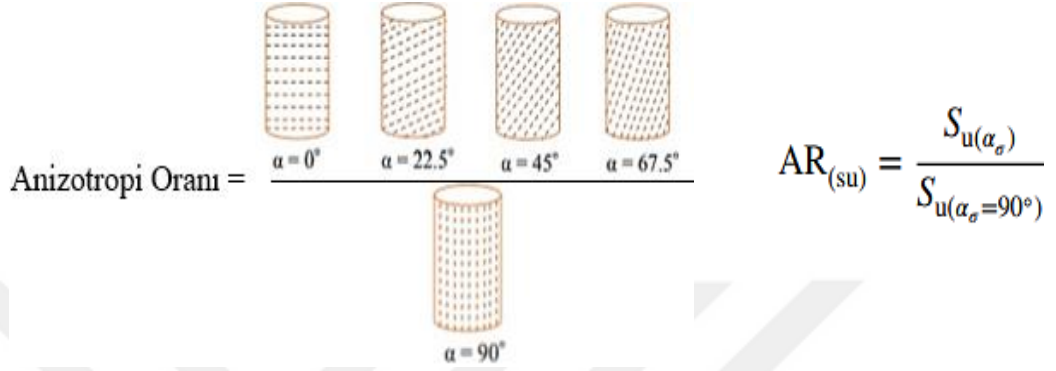
Şekil 37. Göçme yüzeyi ile yataklanma (tabakalanma) yönünün birbirine göre konumu [38]

Genellikle örselenmemiş numuneler tabakalanma yönüne dik olarak düşey yönde zemine batırılan bir tüp ile alınırlar. İçsel anizotropinin zemin özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için, zeminin tabakalanma yönüne göre farklı yönlerden alınmış numuneler ile çalışılması gerekir. Bu amaç için Şekil 38’de görüldüğü gibi, farklı yönlerde örselenmemiş numune çıkarabilme kabiliyetine sahip özel bir aparat yapılmıştır. Anizotropi etkisini dikkate almak için genellikle *anizotropi oranı*, zeminin rastgele bir yönde kayma dayanımının zemin tabakalanma yönündeki kayma mukavemeti değerine oranı olarak tanımlanır (Şekil 39).

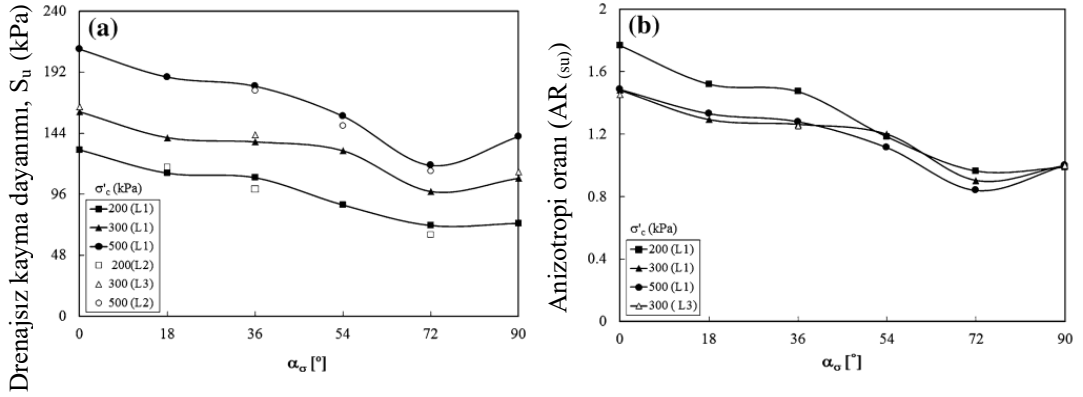


Şekil 38. Değişik yönlerde örselenmemiş numune alma aparatı [38]

Çalışmanın sonucuna göre, test edilen malzemenin anizotropi oranı (Anisotropy Ratio) - $AR_{(Su)}$ 0.9-1.76 arasında değiştiği bulgulanmıştır. Genel olarak, içsel anizotropi yanal basınçtan bağımsız olarak, numunelerin gerilme-deformasyon davranışını etkilediği kabul edilir. Numuneler için maksimum ve minimum dayanımlar sırası ile $\alpha_\sigma=0^\circ$ ve $\alpha_\sigma=72^\circ$ için elde edilmiştir (Şekil 40).



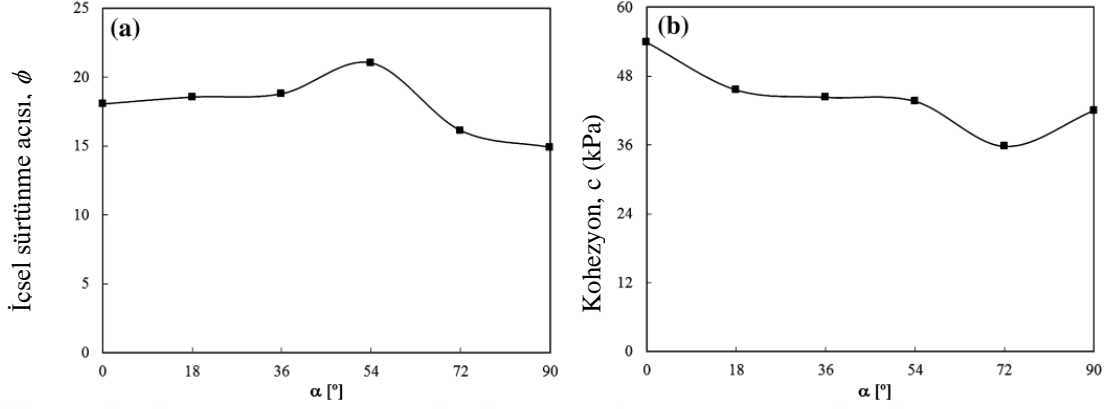
Şekil 39. Anizotropi oranının belirlenme şeması [38]



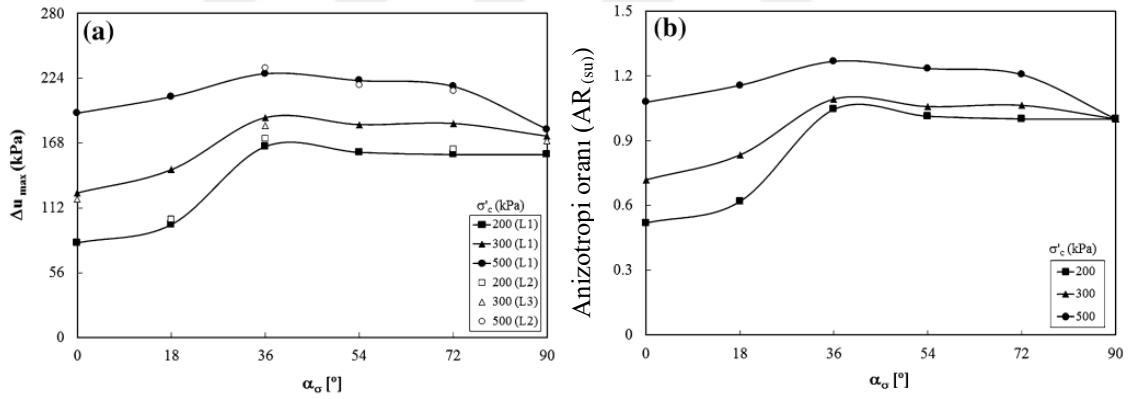
Şekil 40. (a) kayma dayanımı (b) Kayma dayanımı için anizotropi oranı [38]

Kayma dayanımı parametreleri, zeminlerin stabilite analizinde önemli rol oynadığından, bu parametreler üzerindeki anizotropi etkisinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. İspir M. (2011) [33] anizotropinin kayma parametrelerinden kohezyon üzerindeki etkisinin içsel sürtünmeye nazaran daha belirgin olduğu sonucuna varmıştır (Şekil 41). Test numunelerinde yükleme esnasında beklendiği aşırı boşluk suyu basıncı artmış ve maksimum (Δu_{max}) değere ulaştıktan sonra sabit kalmıştır. Çalışmada aşırı boşluk suyu basıncı için anizotropi oranının $AR(\Delta u)$ 0.52 ile 1.26 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 42). Farklı yönlerde alınan örselenmemiş numunelerin konsolidasyon eğrileri birbirinden farklılık göstermiştir ve anizotropinin sıkışabilirlik

üzerinde de etkili olduğu gözlenmiştir. Sıkışma ve şişme indislerinin numune alma açısına ($\alpha_\sigma = 72^\circ$ ve 90° değerleri için) bağlı olarak azaldığı gözlenmiştir (Şekil 43).



Şekil 41. Yükleme yönünün kayma dayanımı parametresi üzerindeki etkisi: (a) içsel sürtünme açısı, (b) kohezyon [38]

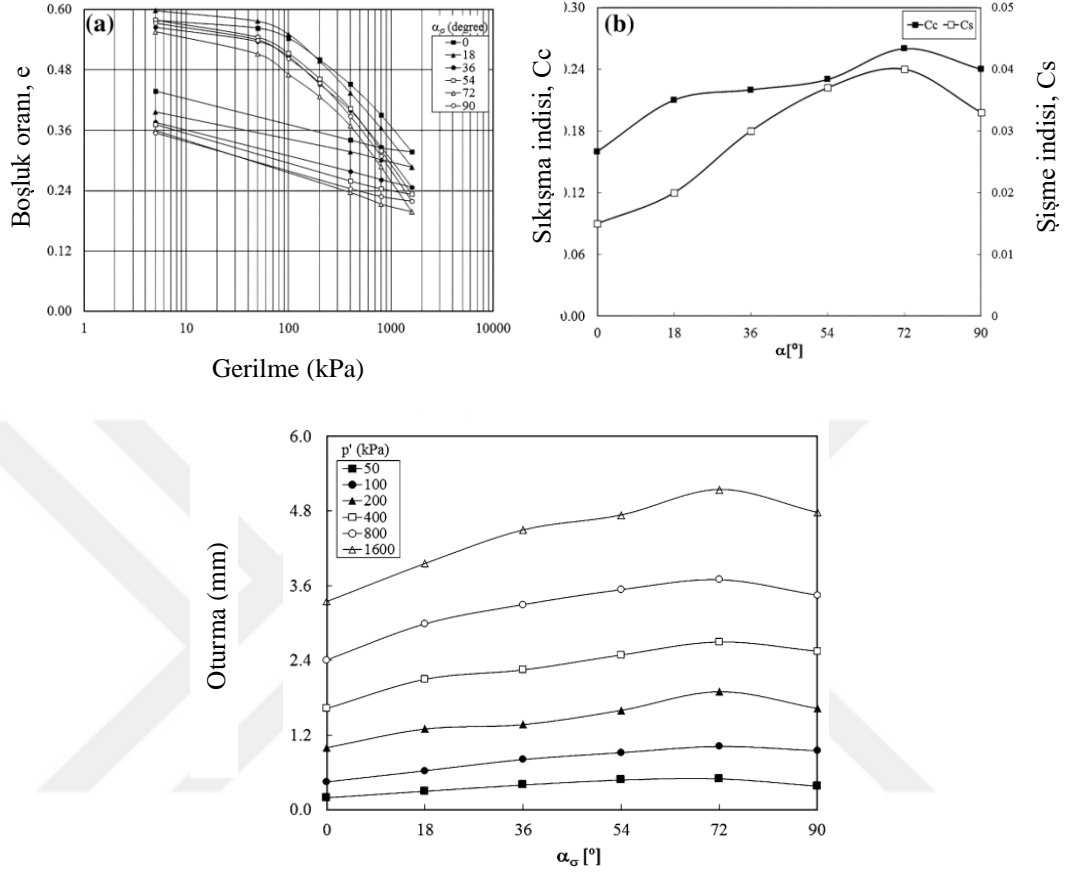


Şekil 42. Boşluk suyu basıncı gelişiminin anizotropik özelliği (a) maksimum boşluk suyu basıncı (b) boşluk suyu basıncı anizotropi oranı [38]

Aziz ve ark. (2019)

Aziz ve ark (2019) [39], S1 ve S2 olarak tanımlanan farklı plastisiteli iki kil zemin kullanılarak örselenmiş numuneler üzerinde konsolidasyonsuz – drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Danelerin çökme düzlemlerinin ve yönelimlerinin zemin malzemesinin mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaç için Şekil 44'te verilen boyutları 280 mm \times 280 mm olan özel bir kalıp

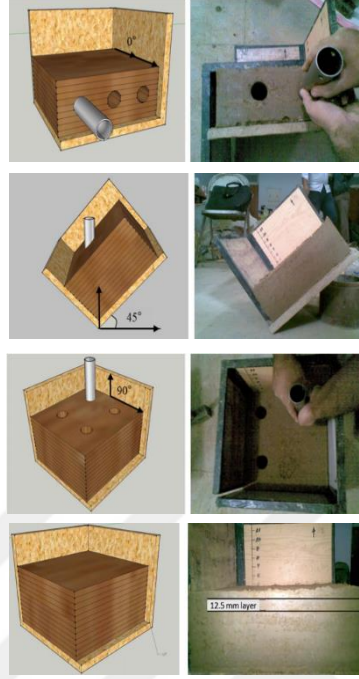
kullanılmıştır. Şekil 44'te gösterildiği gibi zemin numuneleri 12.5 mm'lik tabakalar halinde ve her tabaka 6.7 kg ağırlığındaki metal bir çekiç kullanılarak sıkıştırılmıştır.



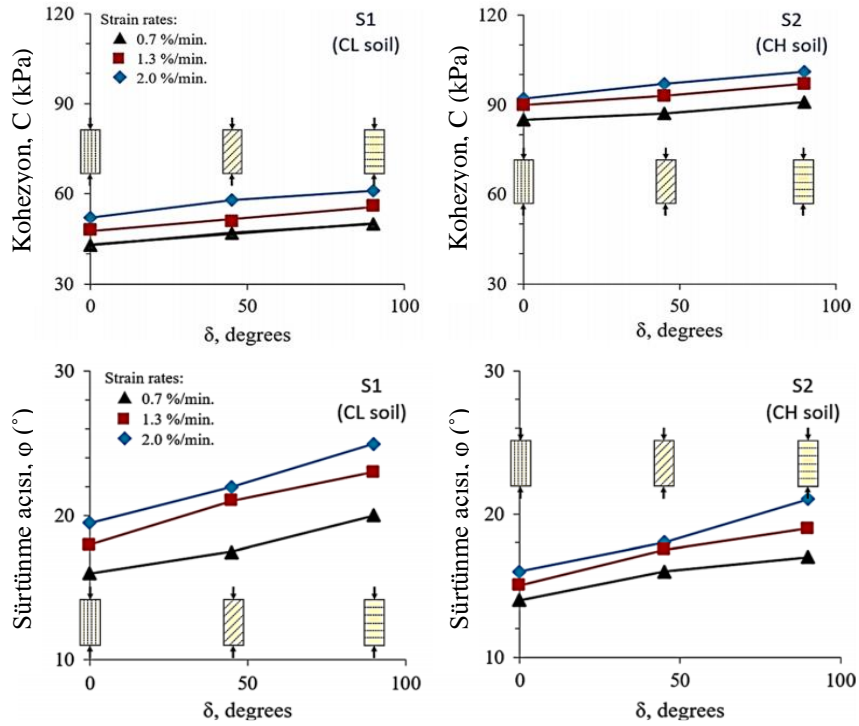
Şekil 43. (a) Farklı numuneler için sıkışma basıncı ve boşluk oranı değişimi, (b ve c) sıkışma, şişme indislerinin ve oturma değerlerinin örselenmemiş numune alma yönü ile değişimi [38]

Farklı çökeltme düzlemleri ve farklı yükleme hızlarında, S1 ve S2 zeminleri için ölçülen kayma dayanım parametreleri (ϕ ve c) Şekil 45 ile verilmiştir. Şekil 45 incelendiğinde yönelimi 90° olan numuneler için daneler arasında daha iyi kenetlenmenin olduğu görülebilmektedir. Aynı grafiklerden çökeltme düzlemlerinin yönelimi 0° doğru azalması ile numunelerin kayama dayanım parametrelerinde azalmaktadır. Çökeltme ve dane yöneliminin etkisi içsel sürtünme açısı üzerinde daha belirgin iken kohezyon üzerinde nispeten düşüktür. Numunelerin çökeltme yönelimleri ile yükleme eksenleri arasındaki açığa (δ) bağlı olarak farklı yenilme düzlemleri oluşmuştur. Numunelerde gözlemlenen yenilme düzlemleri Şekil 46 ile verilmiştir. Şekil 46'da görüldüğü gibi $\delta=0^\circ$ için düşey, $\delta=45^\circ$ için 45° eğimli kayma düzlemleri

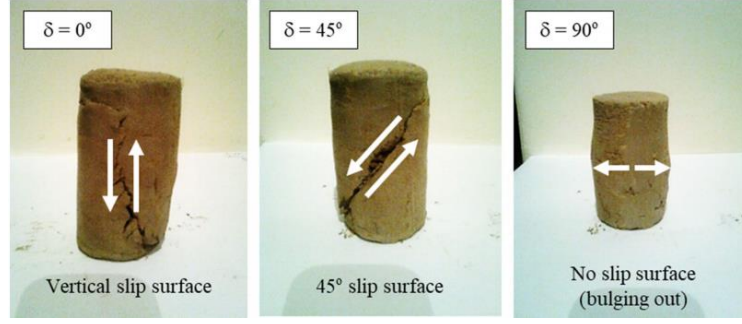
ile göçme meydana gelmişken, $\delta=90^\circ$ için numuneler fıçı gibi şişerek göçme meydana gelmiştir.



Şekil 44. Çökeltme düzlemlerine göre numune alma açıları [39]



Şekil 45. S1 ve S2 zeminlerin kayma dayanım parametrelerin değişimi (a) Kohezyon (b) Sürtünme açısı değerleri [39]



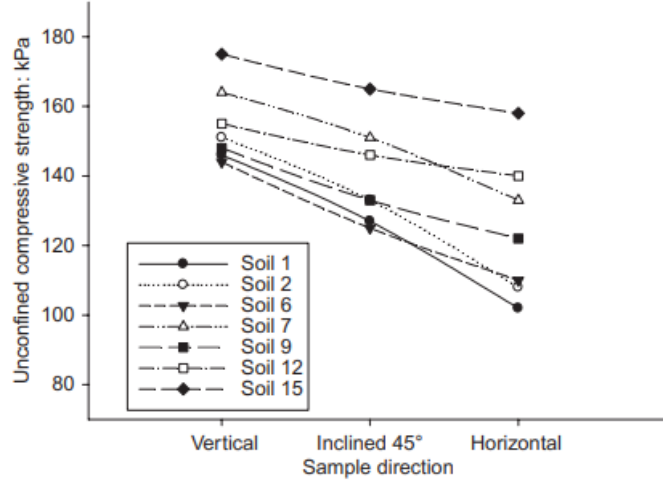
Şekil 46. Deneyde kullanılan numunelerin göçme sonrası görüntüsü [39]

Attom ve Al-Akhras (2008)

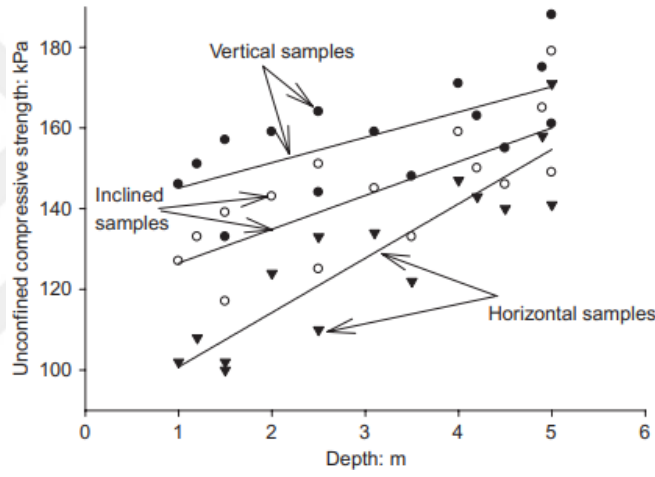
Attom ve Al-Akhras (2008) [40] tarafından yapılan çalışmada, killi zeminlerin kayma dayanımlarının anizotropik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı bölgelerden toplam 15 çeşit killi zemin üç farklı eğimde (yatay, düşey ve 45° eğimli) test zeminleri hazırlanmış ve hazırlanan zeminlerden örselenmemiş numuneler alınarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Çalışma sonucunda düşey yönde hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımları yatay ve 45° eğimli olarak hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımlarından daha yüksek bulgulanmıştır (Şekil 47). Şekil 48 incelendiğinde numune alma derinliği arttıkça anizotropi etkisinin (faktörünün) bire yaklaştığı görülmektedir.

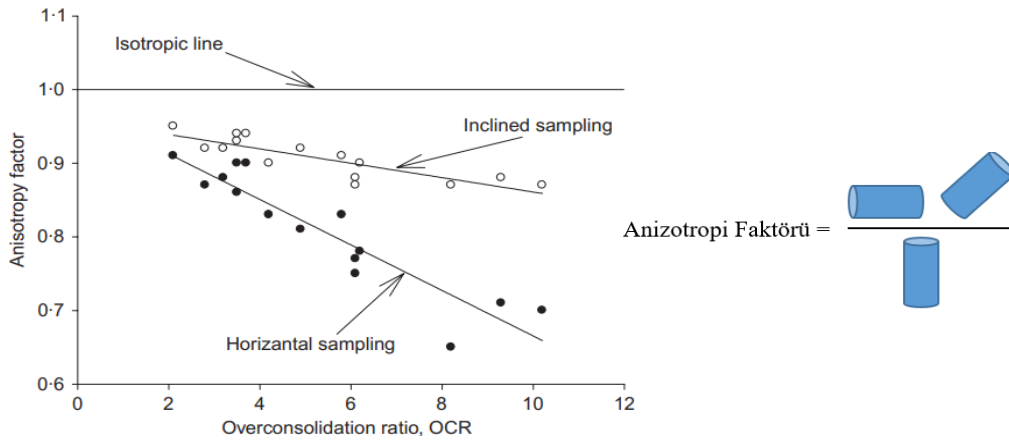
Aşırı konsolidasyon oranı (OCR) arttıkça anizotropi faktörünün önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 49). OCR=2 değeri için hem yatay hem de eğimli numuneler için anizotropi faktörü bire yakındır. Şekil 49 zeminin düşük OCR değerlerinde izotropik davrandığını işaret etmektedir. Aşırı konsolide killi zeminlerin kayma dayanımı, sıkışabilirlik, permeabilite ve şişme gibi bazı özelliklerinin sınırlı ölçüde anizotropik olduğu bilinmektedir. Anizotropik etkilerin derecesi ve büyüklüğü, bu tür zeminlerin partiküllerinin veya partikül gruplarının yönelimine bağlıdır. Deney sonuçlarından, derinlik arttıkça ve OCR azaldıkça, zeminin serbest basınç dayanımı giderek izotropik davranışa yaklaştığı belirlenmiştir. Deneysel çalışma ile anizotropi faktörünün derinlik ve OCR değerlerinden doğrudan etkilendiğini göstermiştir.



Şekil 47. Serbest basınç dayanımının numunelerin hazırlanma eğim açısı ile değişimi [40]



Şekil 48. Farklı yönlere alınan numunelerin serbest basınç dayanımlarının derinlik ile değişimi [40]



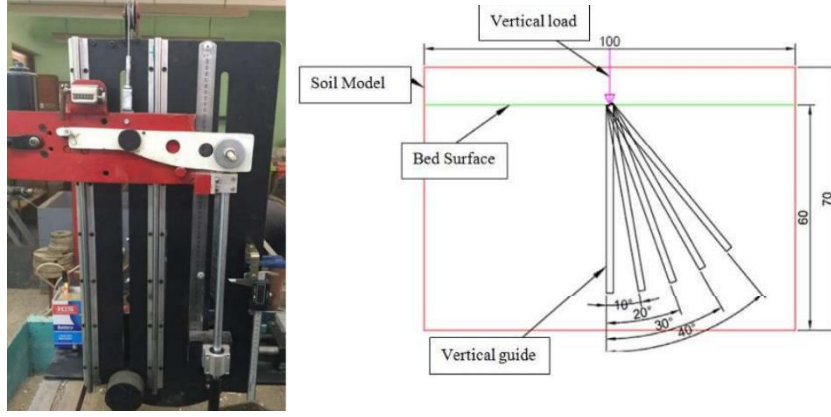
Şekil 49. Aşırı konsolidasyon oranının zemin anizotropisine etkisi [40]

Al-Neami (2020)

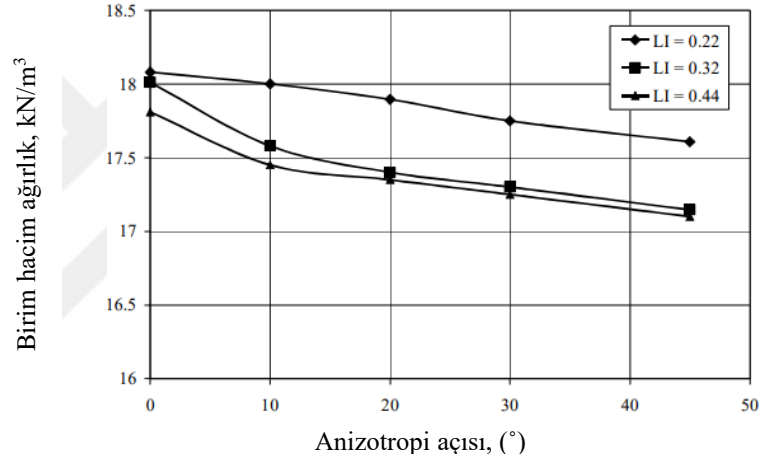
Al-Neami (2020) [41] yürüttüğü deneysel çalışmada, ince malzemeli zeminlerin sıkışabilirlik ve kayma dayanımı özellikleri üzerinde doğal anizotropinin etkisi araştırılmıştır. Şekil 50’de gösterilen kazık çakmaya benzer özel bir düzenek ile 0-45° arasında değişen eğim açılarında hazırlanan zemin malzemesinden numuneler alınmıştır. Alınan numuneler üzerinde, serbest basınç ve ödometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numune alımının kolaylaştırmak için düşük plastisiteli üç farklı kil kullanılmıştır. Çalışma neticesinde zeminlerin birim hacim ağırlık ile drenajsız kayma dayanımının anizotropik özellik gösterdiği ve en yüksek kayma dayanımına düşey yönde alınan numunelerin sahip olduğu görülmüştür (Şekil 51 ve Şekil 52). Kayma dayanımının numune alma yönü arttıkça ve düşeyden uzaklaştıkça azalmıştır. Araştırmada kayma düzlemi ile tabakalanma düzlemlerinin yönelimleri birbirine yaklaştıkça kohezyonun daha düşük gerçekleştiği yorumu yapılmış ve numune alma açısı 45° olan numunelerin en düşük dayanıma sahip olması buna bağlanmıştır. Zeminin birim hacim ağırlığının numune alma yönüne bağlı olarak değişimi ise danelerin oryantasyonuna bağlı olarak düşey ve yatay yöndeki boşluk oranlarının farklı olmasının bir sonucu olduğu yorumu yapılmıştır.

Konsolidasyon deneyi konsolidasyon katsayısı ve zemin sıkışabilirliği hakkında bilgi vermektedir. Numune alma yönünün artması, sıkışma ve şişme indisleri ile oturma değerlerinin artmasına neden olmuştur (Şekil 53.a,b).

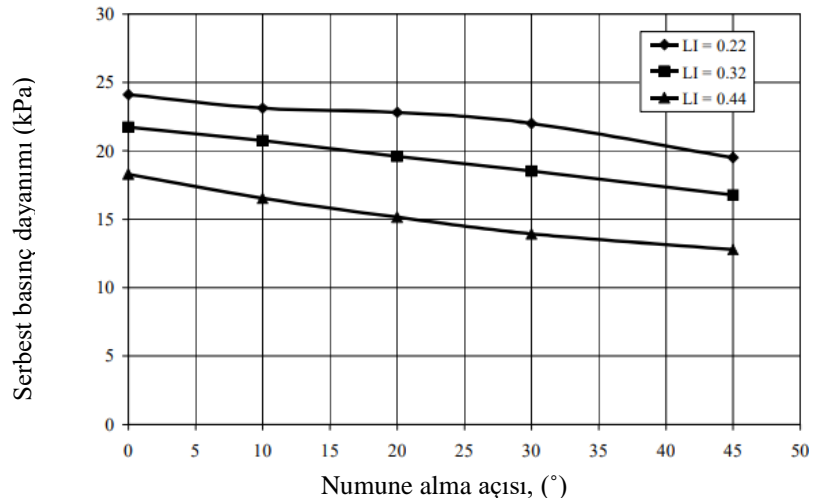
Çalışma sonuçları incelendiğinde numune alma yönünün drenajsız kayma dayanımı, sıkışma ve şişme indisleri üzerinde oturma ve birim hacim ağırlığa nazaran daha fazla değişime neden olduğu tespit edilmiştir.



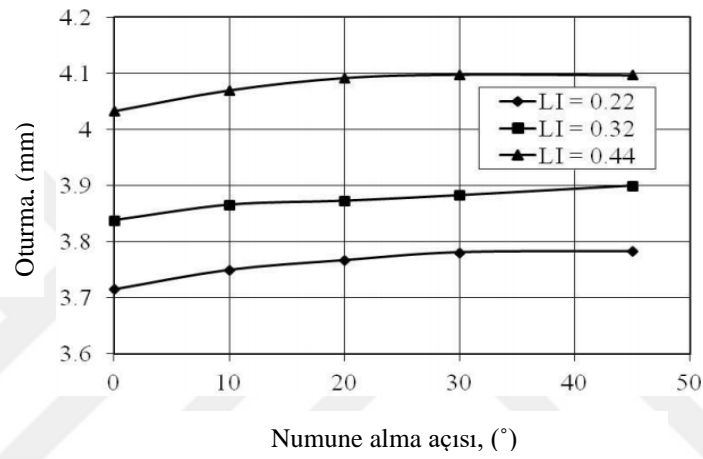
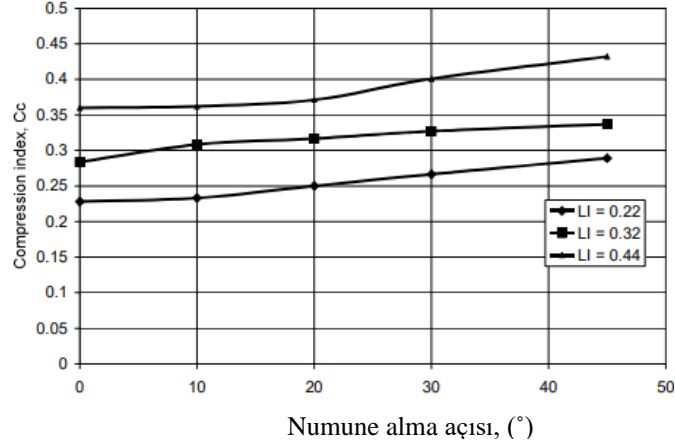
Şekil 50. (a) Numune alma aparatı (b) Numune alma açılarının temsili [41]



Şekil 51. Anizotropi açısı ile birim ağırlığı değişimi [41]



Şekil 52. Drenajsız kayma dayanımının (S_u) numune alma açısı ile değişimi [41]

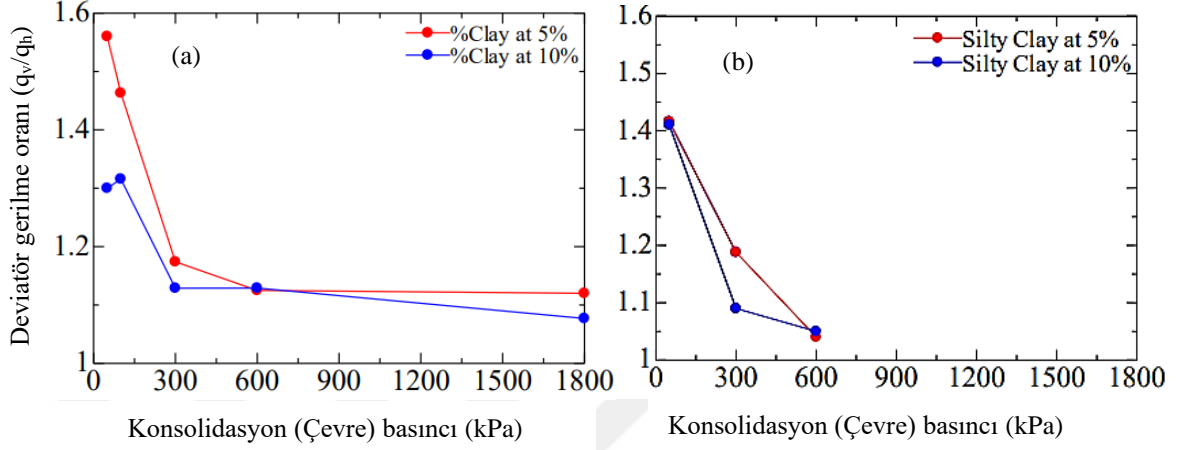


Şekil 53. Numune alma açısı ile (a) Sıkışma indisi ve (b) oturmanın değişimi [41]

Khan ve ark. (2020)

Khan ve ark (2020) [42], kil ve siltli kil malzeme kullanılarak çökeltme yöntemi ile hazırlanan zemin malzemelerinden düşey ve yatay yönlerde numuneler alınarak konsolidasyonlu monotonik üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Teste tabi tutulan numuneler yükleme öncesi izotropik olarak uygulanan çevre basıncı ile konsolide edilmiş ve çevre basıncı sabit tutularak monotonik yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Yükleme esnasında drenaja izin verilerek efektif çevre basıncı yükleme boyunca sabit tutulmuştur. Yürütülen deneysel çalışma neticesinde düşey yönde alınan ve aynı eksen doğrultusunda yüklenen numunelerin dayanımlarının diğer numunelere nazaran daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca uygulanan çevre basıncı arttıkça numuneler arasındaki dayanım farkının azaldığı gözlenmiştir (Şekil 54). Siltli malzemeler için 600 kPa çevre basıncında yöne bağlı değişimin ortadan kalktığı bulgulanmıştır. Kil malzemede yüksek konsolidasyon basınçlarında dahi anizotropik davranış

gözlenmeye devam edilmiştir. Kil ve siltli kil malzemeler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde zeminlerin anizotropik özelliklerinin gerilme koşullarından ve dane boyutundan etkilendiği ve bu faktörlere bağlı olduğu yorumu yapılmıştır.



Şekil 54. Farklı çökme yönlerindeki a) killi ve (b) siltli malzemelerin yenilme anındaki deviator gerilme oranlarının konsolidasyon (çevre) basıncı ile değişimi [42]

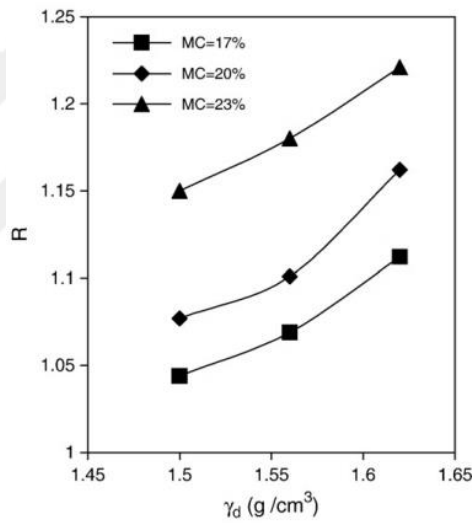
Rowshanzamir ve Askari (2010)

Rowshanzamir ve Askari (2010) [43] kapsamında, toprak barajlarda geçirimsiz çekirdek olarak kullanılan killi bir zeminin numunesinin tek eksenli serbest basınç dayanımlarının yöne bağlı değişimi üzerinde nem içeriği ve kuru yoğunluğun etkisi deneysel bir çalışma ile araştırılmıştır. Test için hazırlanan killi malzeme geçirimsiz çekirdek inşasında kullanılan yöntemlere benzer olarak tabakalar halinde ve sıkıştırılarak oluşturulmuştur. Malzemenin sıkışma doğrultusunda alınan numuneler düşey numune, sıkışma doğrultusuna dik yönde alınan numuneler ise yanal numuneler olarak tarif edilmiştir. Çalışmada anizotropiyi tarif etmek için anizotropi oranı olarak adlandırılan bir R katsayısı tanımlanmıştır. R katsayısı, hazırlanan zemin malzemesinden düşey yönde alınan numunenin serbest basınç dayanımının aynı koşullardaki yatay yönde alınan numunenin serbest basınç dayanımına oranı olarak tarif edilmiştir.

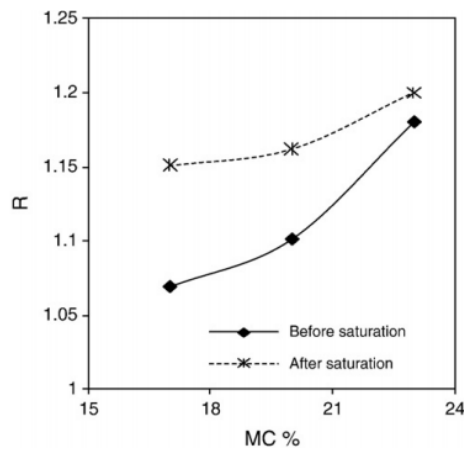
Sıkışma yönünde alınan düşey numunelerin serbest basınç dayanımları, yanal numunelerin serbest basınç dayanımından daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Teste tabi

tutulan numuneler için R katsayısının Anizotropi oranı (R), zemin durumu ile 1.03~1.23 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Anizotropi oranının (R) malzemenin nem içeriğine (MC) bağlı olarak kuru birim hacim ağırlık ile Şekil 55'te verildiği gibi değiştiği, nem içeriğinin yükselmesi ile kuru birim hacim ağırlık ile R katsayısının yaklaşık doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Sıkıştırma sonrası doygun hale getirildikten sonra teste tabi tutulan numunelerin R katsayısının, sıkıştırma sonrası doygun hale getirilmeden mevcut su içerikleri ile teste tabi tutulan numunelerin R katsayısından daha büyük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 56). Anizotropik özellikler üzerinde diğer koşulların yanında malzemenin doygun olup olmaması ya da diğer bir deyiş ile su içeriğinin de önemli bir etkiye sahip olduğu yorumu yapılmıştır.



Şekil 55. Anizotropi oranının (R) kuru birim ağırlık ile değişimi [43]



Şekil 56. Anizotropi oranının (R) malzemenin doygunluğu ile ilişkisi [43]

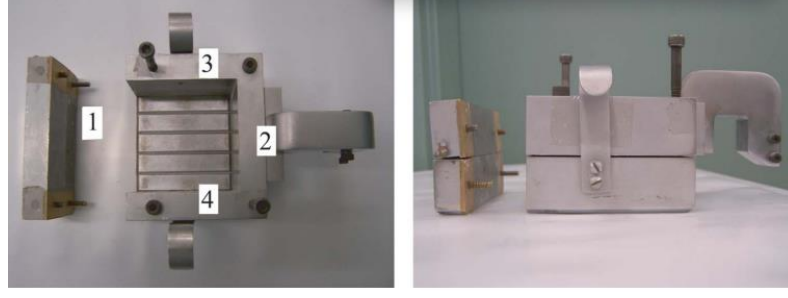
3.3. Kumlu Zeminlerin Anizotropisi

Doğada kumlu zeminler genellikle yatay tabakalarda halinde biriktiği ve daha sonra partiküllerin yönlenmesinde ve birbirleri arasında doku oluşturmasında rol oynayan düşey ve yatay yönde farklı (anizotropik) gerilmelere maruz kaldığı bilinmektedir. Zemin anizotropisinin geoteknik konusunda problemlerinde önemine yönelik farkındalığın artması ile zeminlerin mekanik davranışlarının anizotropik özellikleri üzerine kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kum zeminlerin anizotropik özelliklerini araştırmak için 1970'li yıllardan itibaren çeşitli deneysel teknikler geliştirilmiştir. Granüler zeminlerin anizotropik özelliklerinin araştırılması için çoğunlukla üç eksenli basınç deneyi kullanılmıştır. Zemin danelerinin yataklanma ya da yığılma yönünün maksimum asal gerilme eksenine (silindirik numunenin eksenine) göre değişen numuneler hazırlayabilmek için özel yöntemler kullanılması gerekmiştir [4]. Kumlu zeminler için yürütülen deneysel çalışmalarda, killi zeminler için yürütülen deneysel çalışmalara nazaran, daha teknik ekipmanlara ihtiyaç duyulmakta ve numune hazırlanması daha fazla zorluk içermektedir.

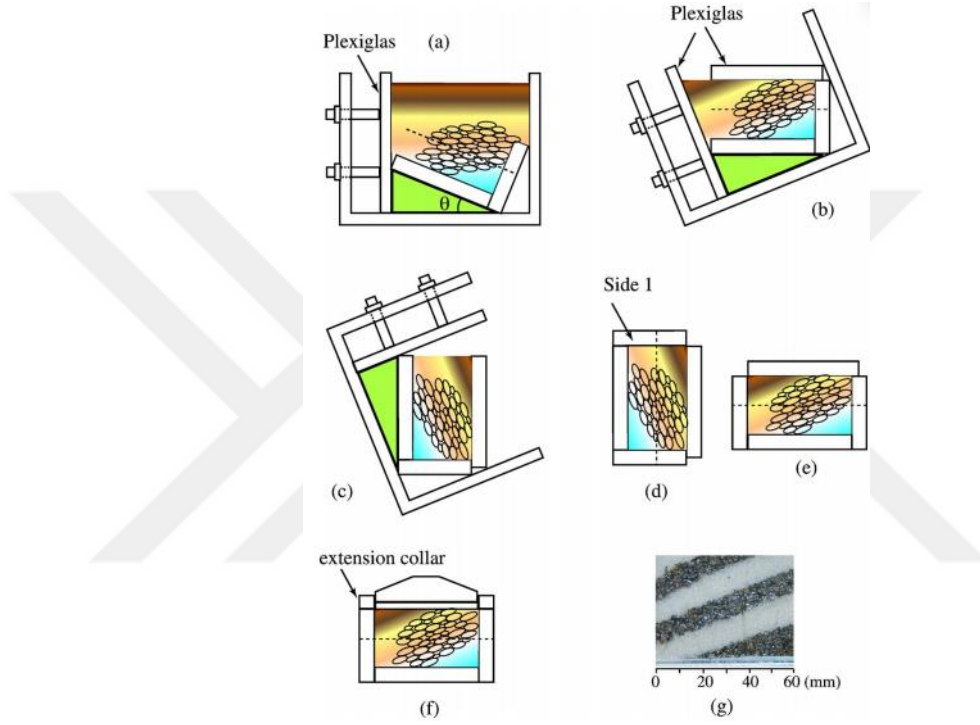
Kumlu zeminlerin içsel anizotropisinin danelerin şekline ve zeminlerin oluşum esnasında danelerin çökme biçimine bağlı olduğunu Oda (1972) [4] yaptığı çalışmalar ile ortaya koymuştur. Meyerhof (1978) [44] zemin anizotropisinin, kumlu zeminlerin temel taşıma kapasitesi üzerinde dikkate değer bir etkisi olduğunu ileri sürmüştür. Al-Rkaby ve ark (2017) [45] ince plastik malzemeleri içeren kumun anizotropik kayma dayanımını incelemişler ve tüm karışımlar için yatay ve düşey ($\alpha_\sigma=0^\circ$, $\alpha_\sigma=90^\circ$) yöndeki dayanımları arasında belirgin farklar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Guo (2008)

Guo (2008) [46] 'de köşeli ve yuvarlak daneli malzemelerin dayanım özelliklerinin yöne bağlı değişimi deneysel olarak araştırılmıştır. Test numuneleri Şekil 57 gösterilen modifiye edilmiş bir kesme kutusu hücrelerinde, Şekil 58 ile tarif edilen özel bir numune hazırlanma prosedürü ile hazırlanmıştır. Yuvarlak dane olarak Ottawa kumu, köşeli dane için kırma kireçtaşı kumu ve üçüncü olarak cam boncuklardan oluşan malzeme kullanılmıştır



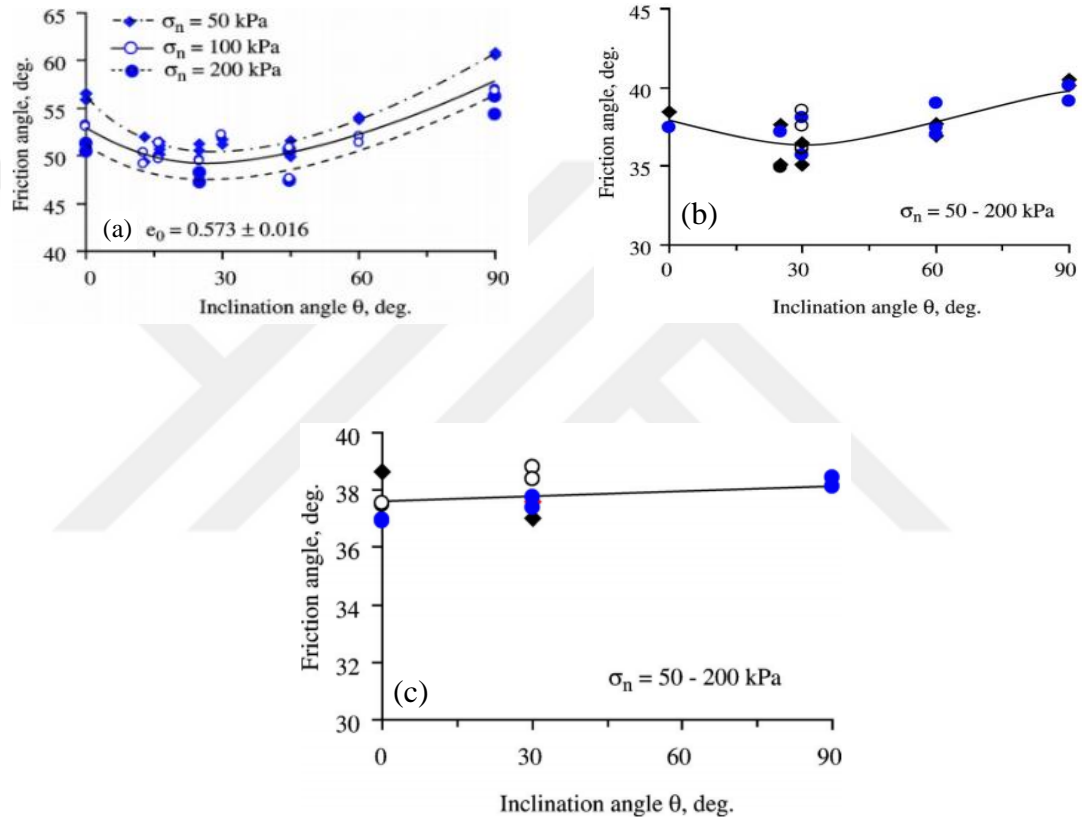
Şekil 57. Modifiye edilmiş kesme kutusu görüntüsü [46]



Şekil 58. Farklı düzlemlerde dane oryantasyonu ile numune hazırlanması (a) kum malzemenin kesme kutusu hücreğine yerleştirilmesi (b) kesme kutusu hücresinin yatay konuma getirilmesi üst muhafazanın yerleştirilmesi (c) hücrenin dik konuma getirilmesi (d) hücrenin numune hazırlama aparatının dışına alınması (e) hücrenin test pozisyonuna getirilmesi (f) yüklem başlığının yerleştirilmesi ve normal yükün uygulanması, (g) test numunesinin görünümü [46]

Deneyisel çalışmada, granüler zeminlerin dane oryantasyon (yataklanma) düzlemi ile kayma düzleminin konumuna göre içsel sürtünme açısının değiştiği ve malzemenin anizotropik davrandığı gözlenmiştir. Malzemenin anizotropik özelliklerinin ise granüler malzemenin dane şeklinden etkilendiği tespit edilmiştir. Köşeli kum malzemenin içsel sürtünme açısında yataklanma ve kayma düzleminin konumuna bağlı olarak 25-30° değerlerine varan farklılıklar gözlenmiştir. Anizotropik

davranış uygulanan normal kuvvetin (σ_n) artması ile azaldığı tespit edilmiştir. Yuvarlak daneli Ottawa kumun anizotropik özellikleri köşeli kuma nazaran nispeten daha düşüktür. En düşük anizotropik özelliği ise cam boncuklardan oluşan malzeme göstermiştir. Cam boncuklardan oluşan malzemenin en düşük anizotropik özellik göstermesinin nedeni olarak, cam boncuk danelerinin küreye en yakın dane şekline sahip olması olarak yorumlanmıştır.

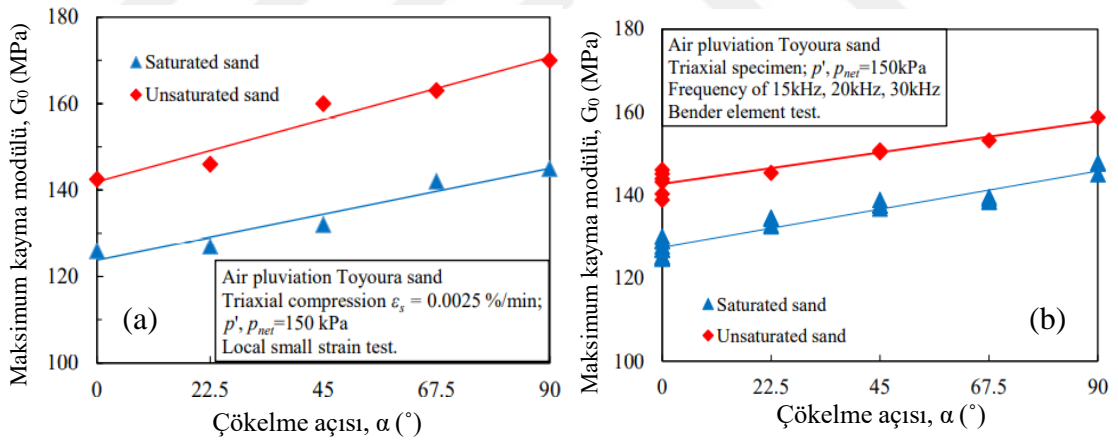


Şekil 59. Granüler zeminlerin farklı dane oryantasyonları için içsel sürtünme sürtünme açısının değişimi (a) Köşeli kireçtaşı kumu (b) Ottawa kumu (c) cam boncuk malzemesi [46]

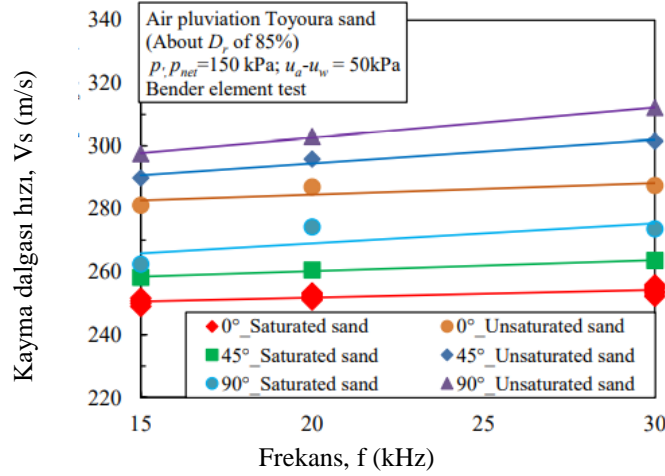
Le ve ark. (2020)

Le ve ark. (2020) [47] çalışmasında kuvars kökenli köşeli Toyoura kumunun içsel anizotropik özelliklerinin maksimum (başlangıç) kayma modülü (G_0) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Numuneler taban eğimi (α) değiştirilebilen bir kaptaki yağmurlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler doymamış ve doymuş olarak iki farklı biçimde dinamik üç eksenli teste tabi tutulmuştur. etkisini doymuş ve doymamış

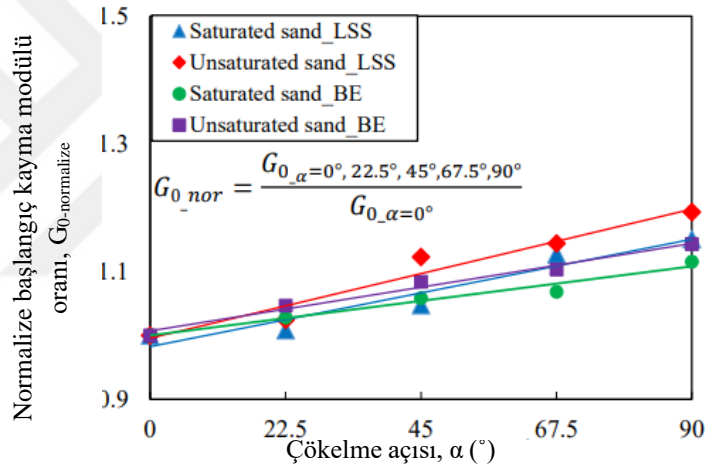
alt köşeli-köşeli kötü derecelendirilmiş ince kuvars bakımından zengin olan Japon standart kumu olan Toyoura kumu üzerinde bir seri üç eksenli deneyi gerçekleştirerek araştırılmıştır. Numuneler yağmurlama yöntemiyle eğimli (α) bir kapta hazırlanmıştır (Şekil 25). Çalışma maksimum kayma modülünün (G_0) danelerin çökme ve yükleme doğrultusunun birbirine göre konumundan etkilendiğini göstermiştir. Şekil 60 maksimum kayma modülünün (G_0) yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin hazırlanma kabının taban açısı (α) ile değişimini göstermektedir. Doymamış kumun kayma dalgası hızı (V_s), doymuş kuma kıyasla daha büyük ölçülmüştür. Kayma dalgası hızının (V_s) impulsun frekansı ve yağmurlama açısına (α) bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 60 ev Şekil 61). α değerinin 0° 'dan 90° 'a artması ile kayma dalgası hızı da (V_s) artmıştır. Local small strain (LSS) testler ile bender eleman (BE) testlerinden farklı α açıları için belirlenen normalize kayma modülünün ($G_{o-normalize}$) değişimi verilmiştir. Doymun ve doymun olmayan her iki koşul için Local small strain (LSS) ve bender eleman (BE) testlerinden belirlenen normalize kayma modülünün ($G_{o-normalize}$) yöne bağlı değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 60. Yağmurlama oluşturulmuş doymun ve doymun olmayan kumlu malzemelerin maksimum kayma modülünün (G_0), çökme açısı (α) ile değişimi ve doymamış kumun başlangıç kayma modülün değişimi (a) Dinamik üç eksenli basınç deneyi (b) Bender eleman deneyi [47]



Şekil 61. Kayma dalgası hızının (V_s) frekansa ile değişimi [47]

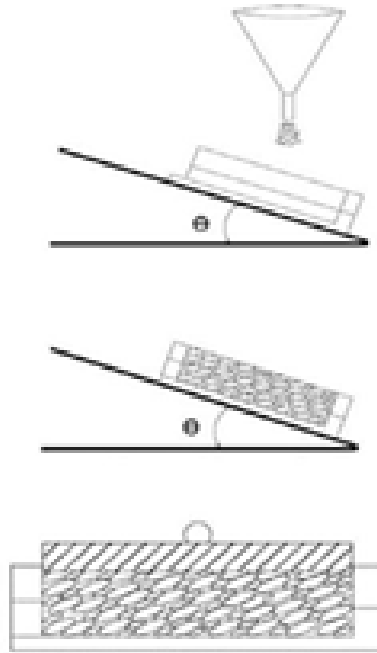


Şekil 62. Anizotropi derecesi (LS) ve (BE) deneylerde [47]

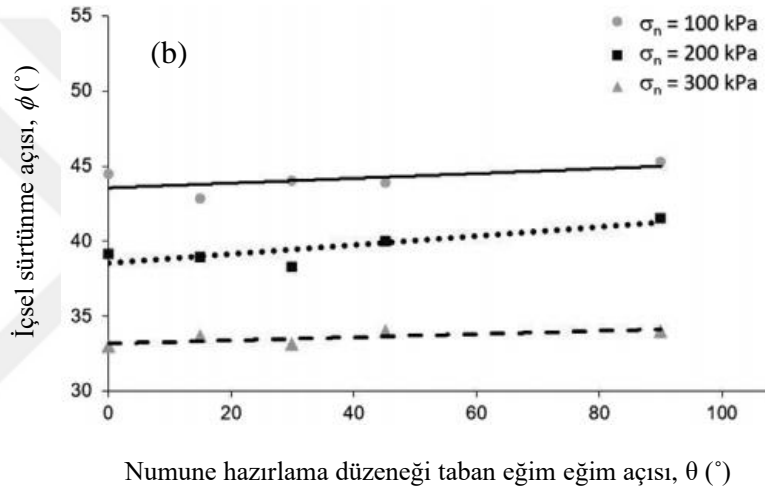
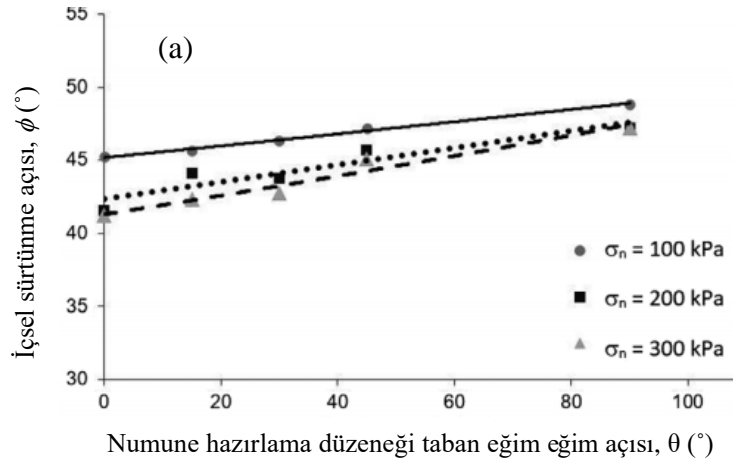
Shahnazari ve ark. (2017)

Shahnazari ve ark. (2017) [48] çalışmasında, Fars Körfezi'nin kuzeyinde yer alan Hormoz Adası'nın karbonatlı kumlarının anizotropik davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Test numuneleri Şekil 63'te gösterilen modifiye edilmiş kesme kutusu hücresi düzeneğinde havadan yağmurlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kuru ve doymun olarak teste tabi tutulmuştur İstenen birim hacim ağırlıkta numune elde etmek için yağmurlama yüksekliği kontrol edilmiştir. Numune hazırlama esnasında kesme kutusu hücresinin bulunduğu tabanın yatayla yaptığı açı ayarlanabilir bir mekanizmaya sahiptir. Deneysel çalışma sonucunda numune hazırlama düzeneğinin taban eğim açısından diğer bir deyiş ile danelerin oryantasyonu ve

yönelimi ile kayma düzleminin konumunun içsel sürtünme açısını değiştirdiği gözlenmiştir. Gevşek olarak hazırlanan numunelerde yüksek normal kuvvetler uygulandığında içsel sürtünme açısının yöne bağlı olarak değişmediği ve yaklaşık sabit kaldığı, diğer bir deyiş ile malzemenin içsel sürtünme açısı bakımından izotropik özelliğe yakın davrandığı gözlenmiştir. Sıkı olarak hazırlanan test numunelerinde ise yüksek normal gerilmelerde dahi malzemenin anizotropik davranış gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 64). Numunelerde maksimum dayanım numune hazırlama düzeneği tabanının 90° olması durumu için elde edilmiştir.



Şekil 63. Numune hazırlama için modifiye edilmiş kesme kutusu hücresi ve havadan yağmurlama yöntemi ile numune hazırlanması [48]



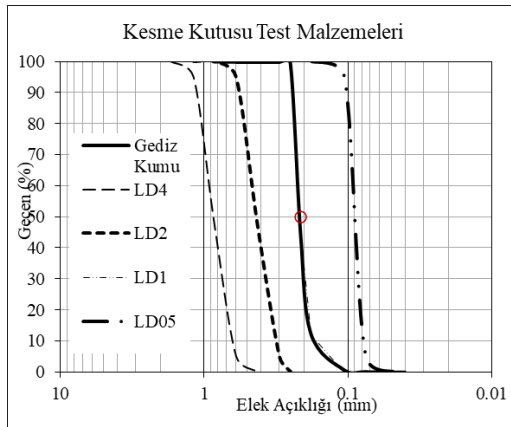
Şekil 64. İçsel sürtünme açısının numune hazırlama düzeneği taban eğim açısı ile değişimi (a) Sıkı kum (b) Gevşek kum [48]

4. MATERYAL VE YÖNTEM

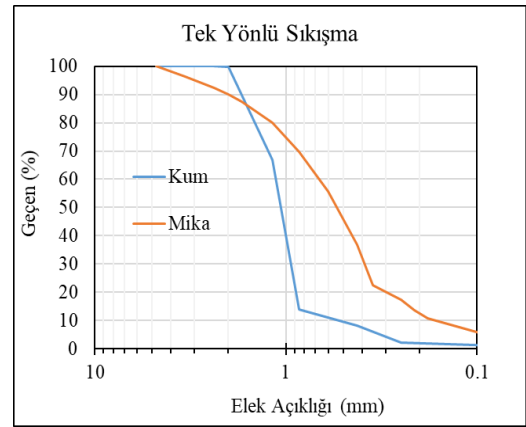
Çalışma kapsamında zeminlerin elek analizleri, maksimum ve minimum boşluk oranları ve kesme kutusu deneyleri ile kayma dayanımı parametreleri mekanik olarak bulunmuştur.

4.1. Materyal

Deneylerde kullanılan kum malzemesi test numuneleri Gediz Nehri Deltası'ndan sondajlardan temin edilmiştir. Yapraksı dane olarak mika minerali kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan mika daneleri Aydın Çine bölgesinde ticari olarak faaliyet gösteren Kaltun Madencilikten temin edilmiştir. Kesme kutusu deneylerinde dane çapı dağılımı açısından 4 farklı mika malzemesi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan 4 farklı mika malzemesi kum malzemesinin ortalama dane çapının 4 farklı boyutunda seçilmiştir, seçilen mika danelerinin ortalama dane çapları ($L=D_{50\text{-mika}}$) kum malzemesinin ortalama dane çapının ($D=D_{50\text{-kum}}$) oranı ($L_{\text{mika}}/D_{\text{kum}}$) sırasıyla yaklaşık olarak 0.5, 1.0, 2.0 ve 4 olacak şekilde seçilmiştir. Kesme kutusuna ilaveten kum mika karışımları üzerinde tek yönlü sıkışma deneyleri yapılmıştır. Tek yönlü sıkışma deneylerin de mika ve kum malzemelerinin dane çapı oranı 4.88 olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan kum ve mika malzemelerinin dane çapı dağılımları Şekil 65 ve Şekil 66 ile verilmiştir.



Şekil 66. Deneylerde kullanılan kum malzemelerinin özellikleri [1]



Şekil 65. Deneylerde kullanılan kum ve mika malzemelerinin özellikleri [1]

Kum ve mika malzemelerin özgül ağırlıkları sırası ile 2.60 ve 2.80 olarak belirlenmiştir. Deneylerde hazırlanan karışımların özgül ağırlıkları aşağıda Tablo 5'te verildiği gibi belirlenmiştir.

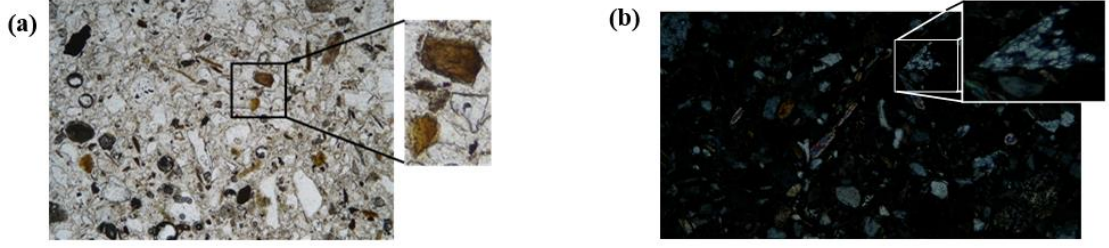
Tablo 5. Göçme anında toplam kayma dayanımındaki anizotropi oranı [33]

Mica Content (%)	Specific Gravity
0.0	2.660
1.5	2.662
2.5	2.663
5.0	2.667
7.5	2.670
10.0	2.673
15.0	2.680
20.0	2.687
30.0	2.701
100.0	2.800

Test programı için Eski Gediz Deltası'ndan temin edilen kumlu malzemeler genellikle Standart Penetrasyon Testi (SPT) kaşığından elde edildi. Sahada yapılan SPT deneylerinde her kaşık numunesi ile 500 gr'dan az malzeme çıkarılmıştır. SPT deneylerinden temin edilen numuneler birleştirilmiştir. Eski Gediz deltasından sondajlardan temin edilen kum ve mika karışımı malzemeler flotasyon tekniği ile birbirinden ayrıştırılmıştır. Deney programında flotasyon tekniği ile ayrıştırılan ve Eski Gediz Deltası Nehri'nden temin edilmiş olan kum malzemesi kullanılmıştır.

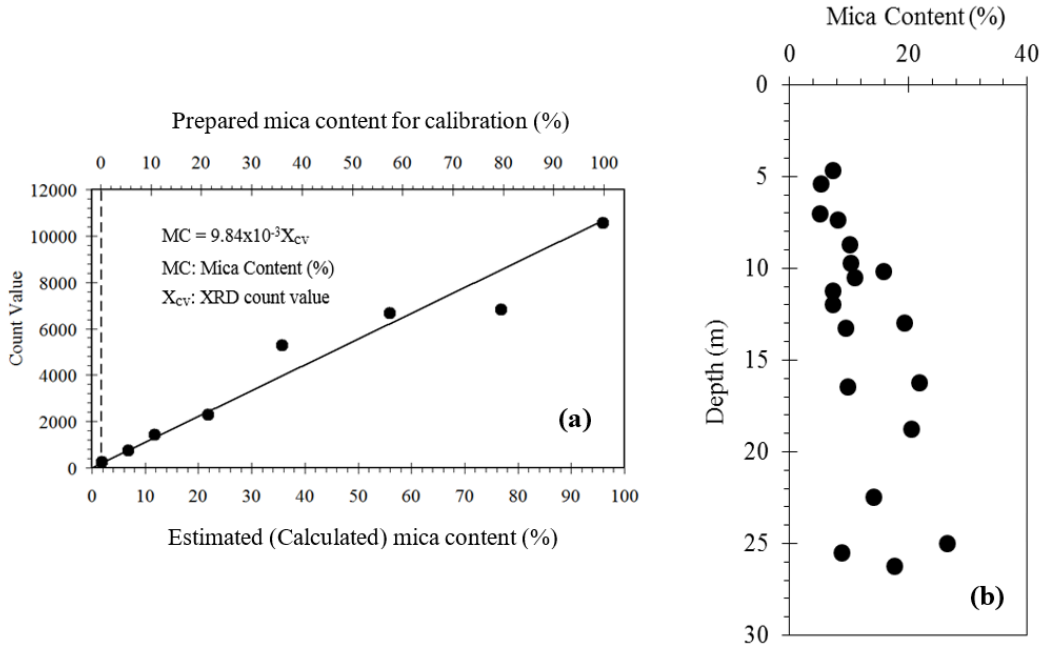
Araziden temin edilen ve ayrıştırılan kum ve mika malzemelerinin (L_{mika}/D_{kum}) çap oranı 0.67 ve 1.64 dir. Kum ve yapraksı mika malzemelerinin dane çapı dağılımı eğrilik katsayıları sırası ile 1.67 ve 1.64 tür.

Gediz Deltasından temin edilen doğal mika daneleri içeren kumlu zeminlerin mineralojik yapısı ve mika içerip içermedikleri polarize mikroskop altında, petrografik ince kesitler Şekil 67 ile gösterildiği gibi araştırılmıştır. Görsel inceleme sonucunda alüvyal kumlu zeminlerin bol miktarda mika minerallerinden oluşan yassı daneler içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 67. (a) düzlem polarize ışık (PPL) ile mikroskop altındaki ince kesitin görünümü (b) çapraz kutuplu (XPL) muskovit mika minerali mikroskop altında ince kesitin görünümü [1]

Mika minerallerinin (yapraksı danelerin) saha zeminleri içindeki ağırlıkça yüzdesi, X-Işını Kırınımı (X-RD) test sonuçları analiz edilerek belirlenmiştir [1]. [1]'de Mika X-RD sayım değeri ile yassı danelerden oluşan mika mineral içeriği arasındaki ilişki belirlenmiştir Şekil 68.a aynı çalışmada arazi örneklerinin mika içeriği (yassı tane içeriği), Şekil 68.a'da verilen kurulan korelasyon yardımı ile Şekil 68 b'da verildiği gibi belirlenmiştir. Dolayısı ile Eski Gediz Nehri Deltası doğal zeminleri %20-%25 mertebelerinde yassı dane içermektedir. Yüksek oranda yassı dane içeren bu tür kumlu zeminlerin özelliklerinin bilhassa belirlenmesi gerektiğinden bu tez kapsamındaki çalışmalar yürütülmüştür.



Şekil 68. (a) Kalibrasyon testi sonuçları ve mika içeriği için ilişki X-RD sayım değeri (b) Kalibrasyon testi sonuçlarına göre saha numuneleri için mika içeriği [1]

4.2 Yöntem

Farklı dane şekline sahip kum boyutundaki iri daneli zeminlerin birbirleri ile etkileşimleri tek yönlü sıkışma ve kayma dayanım deneyleri ile araştırılmıştır. Bu amaç için yapraksı ve yapraksı olmayan kum boyutundaki daneler içeren karışımlar hazırlanmıştır. Esas malzeme olarak yapraksı olmayan kum malzemesi seçilmiştir. Kum malzemenin davranışlarını yapraksı danelerin etkileme derecesi ve mekanizmasını ortaya koyabilmek için farklı miktarlarda yapraksı dane içeren karışımlar hazırlanmıştır. Kesme kutusu için hazırlanan karışımlardaki yapraksı dane içerikleri sırası ile temiz kum, %2.5 % 5, %7.5, %10, %15 ve %20 mika içerikli olarak hazırlanmıştır. Tek yönlü sıkışma deneyleri ise temiz kum, %5, %10 ve %15 mika içerikli karışımlar üzerinde yapılmıştır.

Yapraksı danelerin miktarına ilaveten yapraksı danelerin boyutunun davranış üzerindeki etkileri de deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaç için kesme kutusu deneylerinde yapraksı dane çapının kum dane çapına oranı 0.5, 1.0, 2.0 ve 4 olan dört farklı yapraksı dane boyutunda malzeme içeren kum mika karışımları hazırlanmıştır. Tek yönlü sıkışma deneylerinde ise L_{mika}/D_{kum} oranı 4.88 olan karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ayrıca yapraksı danelerin zeminlerin izotropik özelliklerine etkileri de araştırılmıştır. Normal kumlu zeminlerin sahip oldukları izotropiklik özelliklerine yapraksı danelerin etkileri farklı yağmurlama açıları ile oluşturulan kesme kutusu deney örnekleri ile araştırılmıştır. Kesme kutusu deney numuneleri Şekil 71’de verilen düzenek ile hazırlanmıştır. Şekil 69’da verilen düzenekte kesme kutusunun yatayla yaptığı açı (yağmurlama açısı: α) değiştirilerek farklı yönelimlerde yapraksı dane içeren numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında yağmurlama açısı (α) 0.5°, 10°, 20°, 30° ve 40° olacak şekilde seçilmiştir. Kesme kutusu için hazırlanan numune özellikleri aşağıdaki Tablo 6’da verilmiştir.

Havadan yağmurlama (air pluviation) [49] ile numune hazırlama yönteminde kum-mika karışımları yaklaşık 30 cm (+/-2 cm) yükseklikten yağmurlama ile hazırlanmıştır. Danelerin aynı yükseklikten düşmesini temin etmek ve hazırlanan numune içinde homojen bir dağılım elde etmek için aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi

kum mika karışımları en büyük danenin rahatlıkla geçebileceği bir elekten elenerek yağmurlama yapılmıştır.

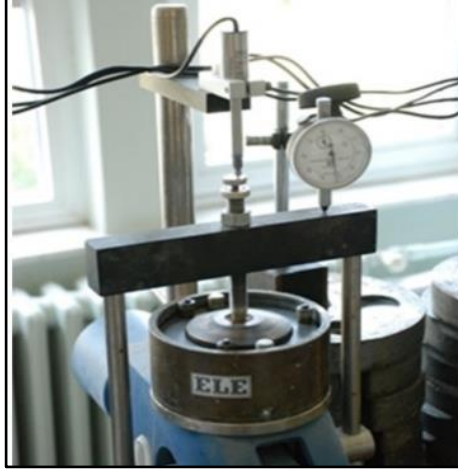
Tek yönlü sıkışma test numuneler, iç çapı 70 mm, yüksekliği 20 mm olan çelik konsolidasyon deneylerinde kullanılan standart hücrelerde hazırlanmış ve konsolidasyon hücreleri üzerinde tek yönlü sıkışma deneyleri icra edilmiştir Şekil 70.

Tablo 6. Kesme kutusu deney programı için hazırlanan numune özellikleri

Mika Content (%)	D_{mika}/D_{kum}	Pluviation Angle	Vertical Stress	Test Numbers
0.0	--	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
5	0.5	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
5	1	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
5	2	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
5	4	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
10	0.5	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
10	1	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
10	2	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
10	4	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
20	0.5	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
20	1	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
20	2	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
20	4	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
100	0.5	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
100	1	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
100	2	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
100	4	0°-10°-20°-40°	0.35 kg/cm ² -0.66 kg/cm ² - 1.29 kg/cm ²	12
Total Test Numbers :				204



Şekil 69. Kesme kutusu test numunelerinin hazırlandığı yağmurlama düzeneği



Şekil 70. Tek yönlü sıkışma deneylerinin uygulandığı hücre ve ekipman

4.2.1. Malzemelerin Dane Çapı Dağılımının Belirlenmesi (Elek Analizi)

Deneylerde kullanılan malzemelerin dane çapı dağılımları ASTM D422 [50] standardına göre yapılmıştır.

4.2.2. Maksimum ve Minimum Boşluk Oranlarının Belirlenmesi

Maksimum ve minimum boşluk oranlarının tespiti için literatürde ve farklı yöntemler mevcuttur. Bu çalışma kapsamında malzemelerin maksimum ve minimum boşluk oranları ASTM D4254 ve D4253'e [50] uygun olarak yapılmıştır.

4.2.3. Özgül Ağırlık Belirlenme Deneyi (G_s)

Bir zemin malzemesinin özgül ağırlığı dane birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Özgül ağırlık zemin partiküllerinin yoğunluğunu hesaplamak için uygulanan bir yöntemdir. Bunun yanı sıra boşluk oranı ve doygunluk derecesi gibi, zeminlerin faz ilişkileri arasında geçiş yaparken kullanılan bir parametredir. Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin özgül ağırlığı, zeminin boşluk oranını belirlenmesi için gerekli olup bu çalışma kapsamında özgül ağırlıklar ASTM D854 [50] standardına uygun olarak belirlenmiştir.

4.2.4. Direkt Kesme Kutusu Deneyleri

Kesme kutusu deneyleri ASTM (The American Society For Testing And Materials)'ye [50] uygun olarak yapılmıştır. Kesme kutusu deneylerinde 60 mm x 60

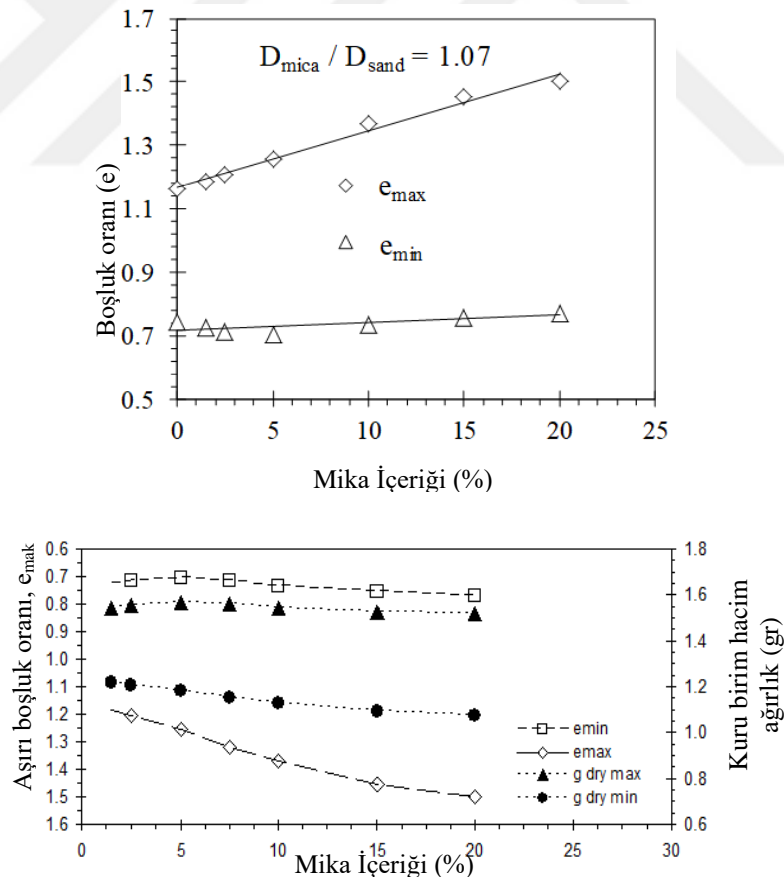
mm boyutlarındaki kesme kutusu hücresi ile icra edilmiştir. Kesme kutusu hızı 1 mm/dk olarak uygulanmıştır.

4.2.5. Tek Yönlü Sıkışma DeneYleri

Tek yönlü sıkışma test numuneler, iç çapı 70 mm, yüksekliği 20 mm olan çelik konsolidasyon deneYlerinde kullanılan standart hücrelerde hazırlanmış ve konsolidasyon hücreleri üzerinde tek yönlü sıkışma deneYleri icra edilmiştir. Çelik hücre içinde havadan yağmurlama ile yerleştirilen numuneler daha sonra başlangıç boşluk oranları 1.0 olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin başlangıç boşluk oranlarının 1.0 olması için çelik ring içine yerleştirilen numunelerin üzerine yükleme başlığı yerleştirildikten sonra yükleme başlığına lastik çekiç ile hafif bir şekilde vurulmak sureti ile tamping uygulanmıştır. Tek yönlü sıkışmada yükleme ve boşaltma kademeleri sırasıyla Yükleme 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 – Boşaltma: 2.0, 0.5, Tekrar Yükleme: 2.0, 8.0, 16 kg/cm² olarak uygulanmıştır. Her yük kademesinde 24 saat beklenmiştir.

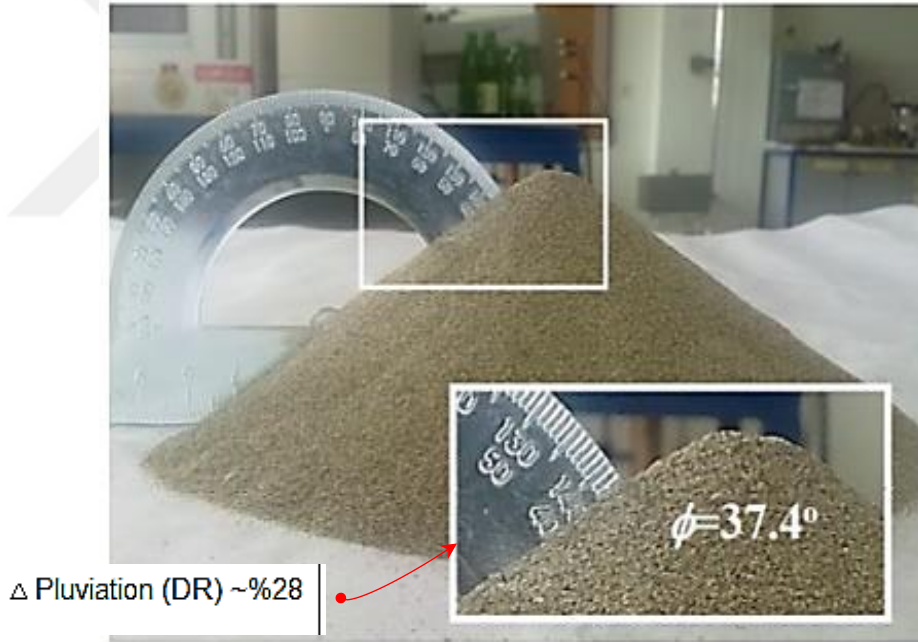
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Mika içeriğine göre maksimum ve minimum boşluk oranlarının değişimleri Şekil 71’de verilmiştir. Hem maksimum hem de minimum boşluk oranları mika içeriği ile arttığı gözlenmiştir. Benzer etki [15, 16, 26] çalışmalarında da gözlenmektedir. Yapraksı mika taneleri, kum taneleri arasındaki boşluklar üzerinde bir köprü görevi gördüğü, bu nedenle nispeten büyük boşluklar oluşturduğu öngörülmektedir. Mika tanelerinin nispeten büyük boşluklar oluşturması nedeni ile mika dane miktarına bağlı olarak maksimum ve minimum boşluk oranlarının her ikisinde de artışa neden olmaktadır. Mika içeriği ile maksimum boşluk oranının artması, minimum boşluk oranının artmasından daha yüksektir. Bu, gevşek kumda yassı mika tanelerinin sıkı kumda oluşturduğundan daha fazla boşluk oluşturabileceği anlamına gelir. Bu durum muhtemelen sıkı kumlarda, bazı dengesiz mika köprülerinin kum taneleri tarafından bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

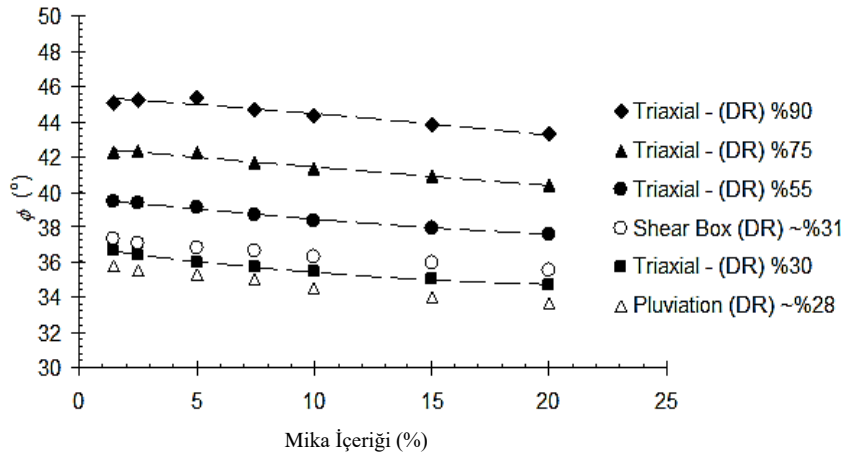


Şekil 71. Kum-mika karışımlarının maksimum ve minimum boşluk oranlarının değişimi [1]

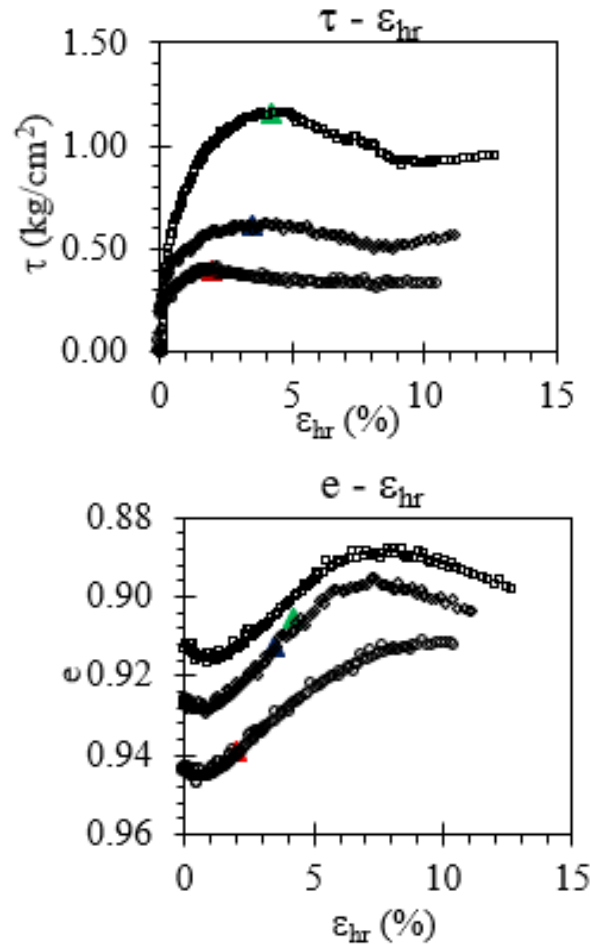
Mika danelerinin kumlu zeminlerin kayma dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak için belirli dūşey yükler altında konsolide edilmiş ve drene edilmiş kesme kutusu testleri gerçekleştirilmiştir. Test programında, yassı mika danelerinin etkilerini daha net görebilmek için nispeten gevşek numuneler hazırlanmıştır. Kesme kutusu deneylerinde uygulanan dūşey yükler sırası ile 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm² olarak uygulanmıştır. Kesme kutusu kayma mukavemeti deneylerine ek olarak, kum-mika karışımlarının yığılma açıları belirlenmiştir. Kum-mika karışımlarının yığılma açıları Şekil 72'de görüldüğü gibi bir açı ölçer ile ölçülmüştür. benzer numuneler üzerinde [1]'de yapılan monotonik üç eksenli deney sonuçları Şekil 73 ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Kesme kutusu deneyinden elde edilen içsel sürtünme açıları (Şekil 74, Şekil 75), Tek yönlü sıkışma deney sonuçları ise Şekil 76 ve Tablo 7'de verilmiştir.



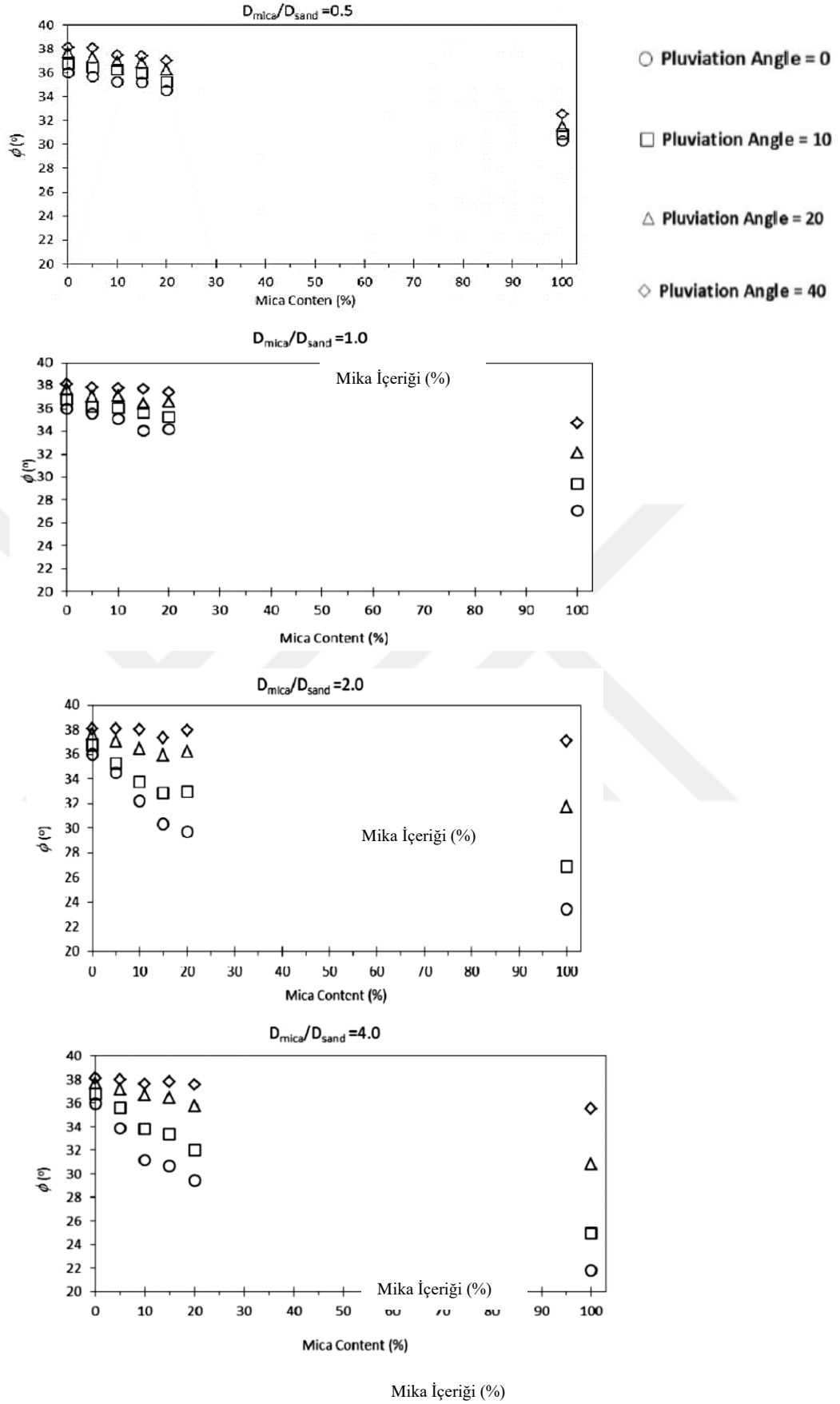
Şekil 72. Gevşek numuneler için yığılma açılarının belirlenmesi [1].



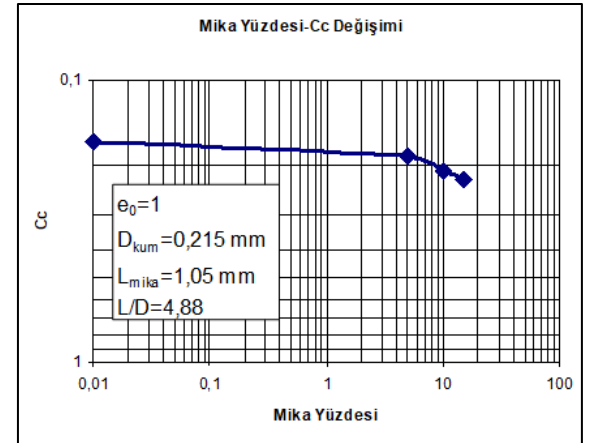
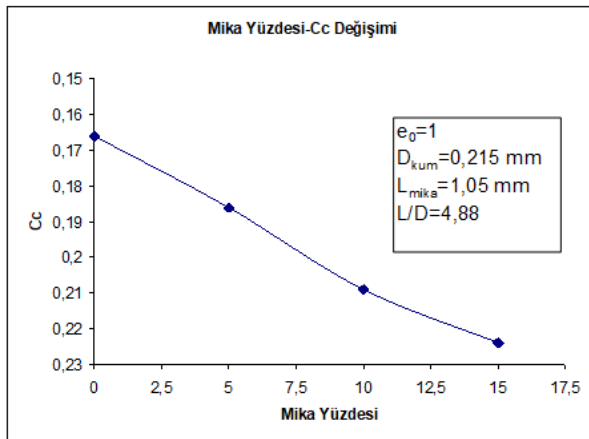
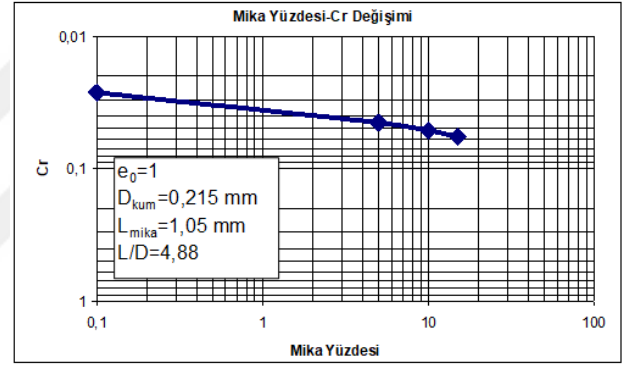
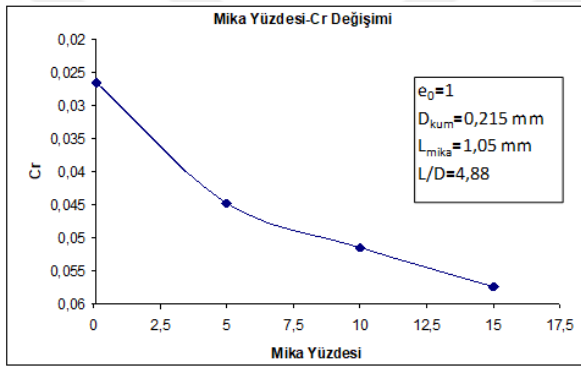
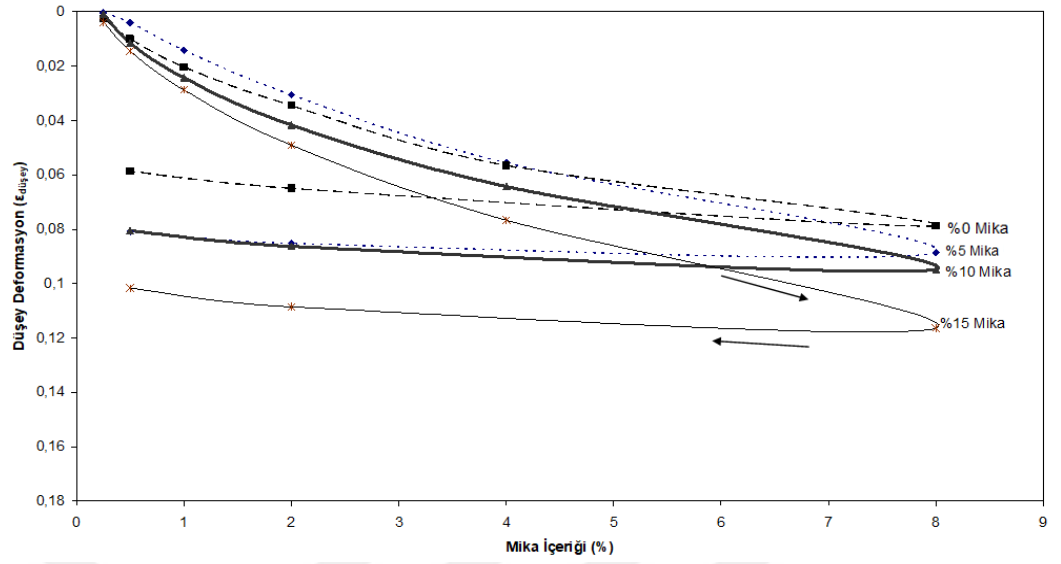
Şekil 73. Monotonik üç eksenli, yığılma ve kesme kutusu ($\alpha=0$, $L_{mika}/D_{kum}=1$) deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açılarının karşılaştırılması [1]



Şekil 74. Kesme kutusu deney sonuçlarına örnek ($\alpha=0$, $L_{mika}/D_{kum}=1$, normal yükler: 0.25 kg/cm^2 , 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2) [1]



Şekil 75. Kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 76. Tek yönlü sıkıştırma deney sonuçları.

Tablo 7. Farklı mika içeriklerindeki kumlu zeminlerin tek yönlü sıkışma eğrileri ve sıkışma (c_c) ve tekrar sıkışma (c_r) katsayıları üzerindeki etkisi.

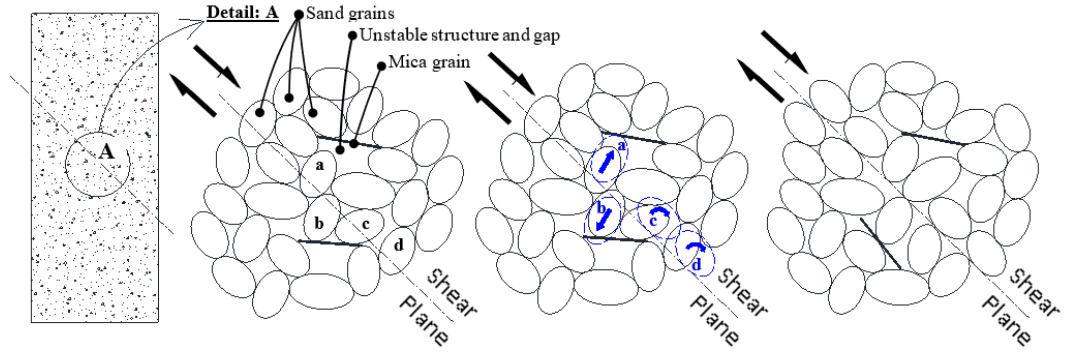
Karışımlar	C_r	C_c
Kum+%0 Mika	0,0266	0,1660
Kum+%5 Mika	0,0448	0,1860
Kum+%10 Mika	0,0515	0,2090
Kum+%15 Mika	0,0574	0,2240

5.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Yapraksı mika daneleri, kum daneleri arasında Şekil 77'de gösterildiği gibi boşluklar oluşturur. Kesilme durumu için Şekil 77'de gösterilen kesme düzlemi düşünüldüğünde, zemin kütlelerinin kesme düzlemi üzerindeki hareketi, danelerin birbiri üzerinde hareket etmesine ve yuvarlanmasına neden olur. Kesme düzleminin yakınında bulunan dengesiz boşluklar, zemin kütlelerinin kayması sırasında kum danelerinin hareketine ve dönmesine katkıda bulunur. Bu mekanizmanın bir sonucu olarak, yassı mika daneleri, kumlu zeminlerin kayma mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır.

Farklı yağmurlama açıları ile yapılan kesme kutusu deney sonuçları incelendiğinde mika danelerinin konumu düzlemine paralel olmasının, kayma dayanımını azalttığı sonucuna ulaştırmaktadır. Benzer şekilde mika danelerinin kayma düzlemine paralelliği azaldıkça kayma dayanımı üzerindeki etkisi de azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Netice olarak yapraksı danelerin kum danelerinin düşey ve yatay düzlemlerdeki davranışını etkileme derecesi mika danelerinin yönelimine bağlı olarak farklılık arz ettiği deney sonuçlarından tespit edilmiştir.

Tek yönlü sıkışma deneylerinden yapraksı mika danelerinin kum daneleri arasında köprüler ve boşluklar oluşturarak sıkışma potansiyellerini arttırdığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Kum malzemesinin içeriğinde mika miktarı arttıkça daneler arasında oluşan dengesiz boşluklarında arttığı bunun neticesinde de malzemenin sıkışma eğiliminin arttığı sonucuna varılmıştır.



Danelerin hareketi ve dönüşü, a ve b daneleri kesme düzleminden uzağa doğru hareket eder c ve d ise kendi ekseni etrafında döner

Şekil 77. Yassı mica danelerinin yakınındaki kum danelerinin kayması ve dönmesi
[51]



6. TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm açıklamalar ve řu ana kadar literatürde ulaşılan sonuçlar, laboratuvar ortamında yeniden oluşturulmuş kum-mika karışımları ile elde edilen test sonuçlarına dayanmaktadır. Arazide zemin dokusunun ve daneler arasında çimentolanmanın olduğu zeminlerde davranış bir miktar farklılık gösterebilir. Ancak kumlu numunelerden örselenmemiş numune olarak üzerinde çalışılması çok zahmetli ve yüksek bütçeli çalışmalar gerektirdiğinden bu çalışmada doğal dokusunu koruyan numuneler araştırılmamıştır. Laboratuvarda oluşturulan numuneler her ne kadar doğada doğal haldeki numunelerden farklılık arz etse de literatürde genel davranışı temsil ettiği kabul edilmektedir.

Diğer bir husus ise, suda yağmurlama, nemli tamping, kuru tamping gibi farklı numune hazırlama yöntemlerinin köprü oluşumu üzerindeki etkisi bu çalışmada ele alınmamıştır. Numune hazırlanmasında literatürde çokça tercih edilen bir yöntem olan havadan yağmurlama yöntemi kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında oluşturulan numunelerin davranışları üzerinde numune hazırlama yönteminin de etkili olabileceği bu çalışmanın sonuçları değerlendirilirken göz önünde bulundurulmalıdır.

Yukarıda sayılanlara ilaveten yapraksı mika danelerinin kum zeminler üzerindeki davranış etkisi deneysel çalışma sonuçları yorumlanarak yapılmıştır. Bu çalışmada danelerin kesilme davranışına etkileri görsel olarak gözlenmemiştir. řu an için bu gözlem pahalı olmak ile birlikte ilerleyen teknolojiye paralel olarak daha ekonomik ve ucuz hale gelecektir. Yeterli bütçeye sahip araştırmalar ile ya da ileride görsel olarak gözlemlenmenin daha ekonomik olması durumunda tomografi ya da yüksek çözünürlüklü fotoğraflar çekilerek danelerin davranış mekanizmaları iki veya üç boyutlu olarak incelenmelidir. Burada yapılan yorumlar doğrudan yapılan gözlemlerden ziyade test sonuçlarının değerlendirilmesine ve yorumlanmasına dayanmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları değerlendirilirken ve ileride yapılacak çalışmalar açısından bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada, dane şeklinin dane dizilimine ve zemin özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Eski Gediz Nehri Deltası sahasından temin edilen zemin örnekleri test programında kullanılmıştır. Çalışma alanındaki zeminlerin yassı mika dane içeriği önceki çalışmalar [1] ile yüzeyden 20 m'ye kadar tespit edilmiştir. İnceleme alanının saha zeminlerinin % 5 ile % 20 arasında değişen oranlarda yassı mika minerali içerdiği belirlenmiştir. Kumlu zeminler için bu orandaki mika içeriği önemli mühendislik özelliklerini (iç sürtünme açısı, oturma potansiyeli gibi) değiştirebildiği deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür.

Deneysel çalışmalar neticesinde yassı mika danelerinin kumlu zeminlerin dayanımlarını düşürebileceği ve sıkışma potansiyellerini artırabileceği bulgulanmıştır. Yapraksı daneler Şekil 77'de gösterildiği gibi kum daneleri arasında köprü ve boşluklar oluşturarak malzemenin genel (global) boşluk oranının arttırmakta ve stabilitesini düşürmektedir. Köprülerin büyüklüğü ve malzeme içinde oluşturulan boşluk ceplerinin büyüklüğünü etkilemektedir. Yapraksı mika daneleri kum danelerine göreceli olarak büyüdükçe malzeme içinde oluşturduğu boşluk ceplerinin büyüklüğü de artmaktadır. Malzeme içinde oluşan boşluk ceplerinin büyümesi malzeme dayanımının düşmesine ve sıkışma potansiyelinin artmasına neden olduğu deneysel çalışma sonuçlarında gözlemlenmiştir.

Yapraksı danelerin malzeme içindeki yatay ya da düşey yönelimi ve yerleşimi malzemenin dayanımını üzerinde etkili olmuştur. Aynı özellikteki kum ve mika karışımlarında yağmurlama açısı arttıkça mika danelerinin içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisi azalmıştır. Yapraksı mika daneleri içsel sürtünme açısı üzerinde en büyük etkisi, yağmurlama açısının kayma düzlemi ile benzer olduğu $\alpha=0^\circ$ olan kesme kutusu deney sonuçlarında gözlemlenmiştir. Yapraksı mika daneleri dayanım üzerindeki en büyük etkiyi kendi eksenleri doğrultusuna paralel olan kayma düzlemleri üzerinde göstermişlerdir. Mika danelerinin konumlanmasına dik olan düzlemlerde ise içsel sürtünme açısında daha düşük miktarlarda azalma gözlemlenmiştir. Yapraksı mika daneleri her durumda içinde buldukları kum malzemenin dayanımını düşürmekte ancak bu etki yapraksı mika danelerinin yönelim

ve konumuna göre değişmektedir. Yapraksı danelerin yönelimi doğada çökme koşulları ile belirlenmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, Su içinde yavaş bir çökme ile oluşan zeminler ile rüzgâr veya çalkantılı bir ortamda çökelen yapraksı danelerin kumlu zeminler üzerindeki etkileri farklı olacağını işaret etmektedir.

Mika danelerinin kumlu zeminlerin belirli mukavemet ve sıkışma özellikleri üzerindeki etkisi literatürde önceki araştırmalarda incelenmiştir. Ancak yapraksı dane içeriğinin maksimum ve minimum boşluk oranlarının değişimine ve malzemelerin sıklıkları üzerindeki etkisi çoğunlukla göz ardı edilmiştir. Bu araştırmada, artan mika miktarı ile maksimum boşluk oranındaki değişimin, minimum boşluk oranı için bulunandan daha yüksek olduğu bulgulanmıştır. Bu durum mika danelerinin köprüleme mekanizması ile açıklanabilir. Mika daneleri gevşek numuneler için kum daneleri arasında daha büyük boyutlu boşlukların oluşmasına neden olmaktadır. Kumun sıklığı arttıkça stabil olmayan köprülerin çökmesi neticesinde mika danelerinin oluşturduğu boşluk miktarı göreceli olarak azalmaktadır. Deney sonuçlarında görece sıkı olan malzemelerde mika etkisinin daha az gözlemlenmesinin açıklanan bu mekanizmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Doğada boşluk oranını belirleyen en önemli unsurlardan biri de zemin istifinin kendi ağırlığı, diğer bir deyiş ile derinlik faktörüdür. Yukarıda açıklanan mekanizma neticesinde doğada belirli bir derinlikten sonra yapraksı danelerin etkisinin azalacağı, buna karşın yüzeye yakın seviyelerde yapraksı danelerin davranış üzerinde daha baskın etki gösterebileceği söylenebilir.

Kum daneleri arasında mika daneleri tarafından oluşturulan köprüler diğer kum danelerine nazaran daha az stabiliteyi sahip olduğunda kesilme ya da sıkışma esnasında çökebilir ve bozulabilirler. Buda malzemenin kayma dayanımını düşürmekte ve sıkışma potansiyelini arttırmaktadır. Dane oryantasyonunun, köprü oluşumunun ve açıklanan mekanizmanın ileriki çalışmalarda görüntü işleme teknikleri ile daha ileri düzeyde araştırmasına ve ortaya konulmasına ihtiyaç vardır.

Bu ve literatürdeki benzer çalışmalar laboratuvar ortamında oluşturulan numuneler üzerinde yürütülmüştür. Farklı ince malzeme içeriğine sahip ve doğal

dokusunu koruyan kumlu malzemeler üzerinde yapraksı danelerin etkisinin sahadan alınacak örselenmemiş numuneler ile incelenmesine ihtiyaç vardır.



8. KAYNAKLAR

- [1] Başarı, E. Influence of Mica Plates on Cyclic Strength of Soils of Old Gediz River Delta. Fen Bilimler Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2011, 246 S. (Doktora Tezi).
- [2] Casagrande, A., Carrillo, N. Shear Failure of Anisotropic Materials. Journal of the Boston Society of Civil Engineers. 1944, 31(4), 74-87.
- [3] Arthur, J.F., Menzies, B.K. Inherent Anisotropy in a Sand. Géotechnique. 1972, 22, 115-128.
- [4] Oda, M. Initial Fabric and Their Relations to Mechanical Properties of Granular Soils Found. 1972, 12(1), 17-36.
- [5] Oda, M. The Mechanism of Fabric Changes During Compressional Deformation of Sand. Soils Found. 1972, 12(37), 1-18.
- [6] Kumbasar, V., Kip, F. Zemin Mekanięi Problemleri. Çaęlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 1985, 68.
- [7] Coulomb, C. A. Essai sur une application des regles des Maximis et Minimis a quelques problemes de Statique relatifs a l'Architecture. 1776,.Memoirs Academie Royal Pres. Division Say. 7, Par~s, France (in French).
- [8] Terzaghi, Karl. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. 1925, F. Deuticke
- [9] Arasan, S. Görüntü Analizi ile Granüler Zeminlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erzurum, 2011, 420 s. (Doktora Tezi).
- [10] Mohr O, Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? 1900, Zeit des Ver Deut Ing 44:1524–1530
- [11] Mackie W, On the laws that govern the rounding of particles of sand, Trans. 1897, Edinburgh Geol. Soc., Vol. 7, pp. 298–311.
- [12] Dunn E J., VI.—Pebbles, 8vo, pp. 122, 76 plates, containing 250 figures. Melbourne, etc.: Robertson & Co., Geological Magazine, 1911, 8(9), 423-423. doi:10.1017/S0016756800116504
- [13] Powers, M. C. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. Journal Of Sedimentary Petrology. 1953, 23(17), 117-119.
- [14] Krumbein, W.C., Sloss, L.L. Stratigraphy and Sedimentation. H. Freeman Company, San Francisco, ABD, 1963, 660.

- [15] Cho, Y.C., Dodds, J., Santamarina, J.C. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006, 132(5), 591-602.
- [16] Santamarina, J.C., Cho, G.C. *Soil Behavior: The Role of Particle Shape*. Institution of Civil Engineers. 2004.
- [17] Georgiannou, V.N., Hight, D.W. The Undrained Behaviour of Clayey Sands in Triaxial Compression and Extension. *Geotechnique*. 1990, 40(3), 431-449.
- [18] Collins, K.M. The Form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils. *Geotechnique*. 1974, 24(2), 223-254.
- [19] Wong, R.S., Arthur, J.F. Induced and Inherent Anisotropy in Sand. *Geotechnique*. 1985, 35, 471-481.
- [20] Hansen, J.B., Gibson, R.E. Undrained Shear Strengths of Anisotropically Technique. *Geotechnique*. 1949, 1(3), 189-204.
- [21] Tubey, L.W., Bulman, J.N. Micaceous Soils: Methods of Determining Mica Content and The Use of Routine Tests in The Evaluation of Such Soils. Australian Road Research Board. 1964, 2, 880-901.
- [22] Gilboy, G. The Compressibility of Sand–Mica Mixtures. *Proceedings of American Society of Civil Engineering*. 1928, 54, 555-568.
- [23] McCarthy, D.F., Leonard, R.J. Compaction and Compression Characteristics of Micaceous Fine Sands and Silts. *Highway Research Record*. 1963, 22, 23-37.
- [24] Harris, W.G., Parker, J.C., Zelazny, L.W. Effects of Mica Content on Engineering Properties of Sand. *Soil Science Society of America Journal*. 1984, 48(3), 501-505.
- [25] Hight, D.W., Georgiannou, V.N., Martin, P.L., Mundegar, A.K. Flow Slides in Micaceous Sand. *Problematic Soils, Sendai, Japan, 1998*, 945-958.
- [26] Lee, J.S., Guimaraes, M., Santamarina, J.C. Micaceous Sands: Microscale Mechanisms and Macroscale Response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2007, 133(9), 1136-1143.
- [27] Cabalar, A.F. Applications of The Oedometer, Triaxial and Resonant Column Tests to The Study of Micaceous Sands. *Engineering Geology*. 2010, 112 (1), 21-28.
- [28] Ebrahimzadeh, S. Mika İçeriği ve İnceliğinin Kumların Dayanım ve Sıkışma Özelliklerine Etkisi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2015, 128 s. (Yüksek Lisans Tezi).

- [29] Georgiannou, V.N. The Undrained Response of Sands With Additions of Particles of Various Shapes and Sizes. *Geotechnique*. 2006, 56(9), 639-649.
- [30] Theron, M. The effect of particle shape on the behaviour of gold tailings. 2004, Diss. PhD thesis, University of Southampton, UK
- [31] Le, B., Toyota, H., Takada, S. Evaluation of Mechanical Properties of Mica-Mixed Sand Considering Inherent Anisotropy. *Soils and Foundations*. 2020, 60(2), 533-550.
- [32] Zhang, J., Soltani, A., Deng, A., Jaksa, M.B. Mechanical Behavior of Micaceous Clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019,11, 1044-1054.
- [33] İspir, M.E. A Laboratory Study of Anisotropy of Ankara Clay. Orta Doğu Teknik Üniversitesi. Fen Bilimler Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2011, 94 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [34] Clough, G.W., Hansen, L. A. Clay Anisotropy and Braced Wall Behavior. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981, 107(7), 893-913.
- [35] Ward, W.H., Samuels, S.G., Butler, M.E. Further Studies of the Properties of London Clay. *Géotechnique*. 1959, 9(2), 33-58.
- [36] Bishop A.W. The Strength of Soils as Engineering Materials. *Géotechnique*. 1966, 16(2), 91-130.
- [37] Wesley, L. D. *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils*. John Wiley and Sons Inc. 2010, 431.
- [38] Zarei, C., Soltani, H., Badv, K. Effect of Inherent Anisotropy on the Behavior of Fine-Grained Cohesive Soils. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 17(2).
- [39] Aziz, M., Nawaz, M., Israr, J. Orientation of Deposition Planes and Shear Strength of Typical Clays from Pakistan. *Iranian Journal of Science*. 2019, 44(3).
- [40] Attom, M.F., Al-Akhras, N.M. Investigation Anisotropy in Shear Strength of Clayey Soils. *Geotechnical Engineering*. 2008, 161(5), 269-273.
- [41] Al-Neami, M. A. A Laboratory Study on the Influence of Anisotropy on the Soil Behavior. *International Review of Civil Engineering*. 2020, 11(1).
- [42].Khan, İ., Nakai, K., Noda, T. Experimental Research on Development/Diminishing of Anisotropy and its Effect on Mechanical Behavior of Clay. *International Journal of Geomate*. 2020,18(65), 9-14.

- [43] Rowshanzamir, M.A., Askari, A.M. An Investigation on The Strength Anisotropy of Compacted Clays. *Applied Clay Science*. 2010, 50(4), 520-524.
- [44] Meyerhof, G. G. Bearing capacity of anisotropic cohesionless soils. 1978, *Canadian Geotechnical Journal* 15.4, 592-595.
- [45] Al-Rkaby, A.J, Chegenizadeh, A., Nikraz, H.R. Anisotropic Strength of Large Scale Geogrid-Reinforced Sand: Experimental Study. *Soils and Foundations*. 2017, 57(4), 557-574.
- [46] Guo, P. Modified Direct Shear Test for Anisotropic Strength of Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2008, 134(9), 1311.
- [47] Le, B.N., Toyota, H., Takada, S. Effects of Inherent Anisotropy on G₀ of Unsaturated Sand. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2020, 7(2),102-109.
- [48] Shahnazari, H., Maghoul, M., Alizadeh, M., Javadi, A.S. Effect of Anisotropy on Shear Behavior of Hormoz Carbonate Sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2017, 12(5), 1-7.
- [49] Ishihara, K. Soil behavior in earthquake geotechnics. 2003, 2. Press, ISBN: 0-19-856224-1, New York: Oxford University Press.
- [50] ASTM. Annual Book of ASTM Standards. American Society for testing and materials Vol. 04.08. 2005, Philadelphia, USA
- [51] Başarı E. ve Özden G. Effects of grain shape on the standard penetration test and particle packing. 2020, *Acta Geotechnica Slovenica*, V17(2), p.65-75

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nooragha NEJAT
Yabancı Dil : Türkçe, İngilizce, Farsça

Eğitim Durumu

Lise : Zukur-i Merkezi Lisesi Kunduz-Afganistan, 2012

Lisans : Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2017

Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Anabilim Dalı, Geoteknik Programı, 2021

