



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEOGRİD İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İRİ DANELİ ZEMİNLERİN
KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNDE ŞEKİL FAKTÖRÜNÜN
ETKİSİ

ALTAN AKER
YÜKSEK LİSANS



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKES BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEOGRİD İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İRİ DANELİ ZEMİNLERİN
KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNDE ŞEKİL FAKTÖRÜNÜN
ETKİSİ

ALTAN AKER
YÜKSEK LİSANS

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ BAHADIR OK

ADANA 2022

ÖZET

GEOGRİD İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ İRİ DANELİ ZEMİNLERİN KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNDE ŞEKİL FAKTÖRÜNÜN ETKİSİ

Altan AKER

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bahadır OK

Ağustos 2022, 88 sayfa

Günümüzde granüler zeminlere geogrid yerleştirilmesi ile farklı birçok geoteknik mühendisliği problemine çözüm üretilmektedir. Bu çözümlerde zemin-geogrid kenetlenme mekanizması önemli rol oynamaktadır. Ancak zemin danelerinin şekil faktörlerinin zemin-geogrid kenetlenme mekanizmasına etkisi ve zemin-geogrid kenetlenmesinin derinlik boyunca değişimi yeterince iyi bilinmemektedir. Bu çalışmanın temel amacı danelerinin şekil faktörlerinin zemin-geogrid kenetlenme mekanizmasına etkisinin ve bu etkinin geogridin üstündeki ve altındaki zemin bölgelerindeki değişimini incelemektir. Bu amaçla üç granüler zemin numunesi elde edilip sayısal görüntü işleme ile danelerin şekil faktörleri belirlenmiştir. Sonrasında bu granüler zemin numuneleri üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu ve CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kesme yüzeyine, kesme yüzeyinin altına ve üstüne farklı derinliklere geogrid yerleştirilerek büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri ile zemin profili boyunca zemin-geogrid kenetlenme düzeyi araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda danelerin açısallığı arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Geogridin üstünde ve altındaki zemin bölgelerinin kayma dayanımının farklı olduğu görülmüştür. En yüksek kenetlenme etkisi geogrid donatının maksimum dane çapı kadar üstündeki bölgede elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin-geogrid kenetlenme mekanizması, Dane şekil faktörü, Görüntü işleme, Granüler zeminler, Büyük ölçekli kesme kutusu testi, CBR

ABSTRACT

EFFECTS OF SHAPE FACTOR ON THE SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF COARSE GRAINED SOILS REINFORCED WITH GEOGRID

Altan AKER

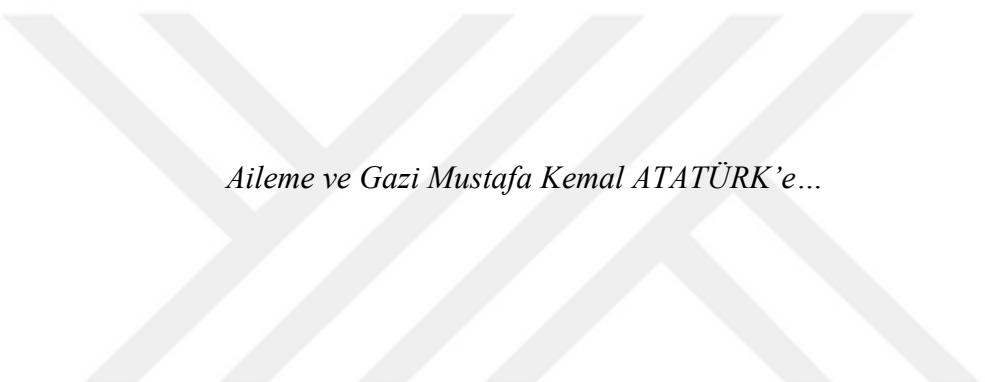
M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Bahadır OK

August 2022, 88 pages

Geogrids are used nowadays to handle a wide range of geotechnical engineering challenges in granular soils. These challenges heavily rely on the interlocking mechanism of the soil and geogrid. However, it is unknown how the shape factors of the soil grains will affect the soil-geogrid interlocking mechanism and how this will affect the variance along the depth. The major objective of this paper is to investigate how the shape factors of the soil grains affect the soil-geogrid interlocking mechanism and how this effect varies in the soil regions above and below the geogrid. Three granular soil samples were obtained for this purpose, and image processing was used to estimate the shape parameters of the grains. After that, these granular soil samples were subjected to large-scale direct shear box and CBR tests. After that, geogrids were positioned at various depths on, beneath, and above the shear surface, and large-scale direct shear box tests were used to look at the soil-geogrid interlocking level along the soil profile. The study's findings revealed that the shear strength rose in proportion to the angularity of the grains. It was observed that the soil sections above and below the geogrid had varying shear strengths. The highest interlocking effect was obtained in the region above the geogrid reinforcement as much as the maximum grain diameter.

Keywords: Soil-geogrid interlocking, Grain shape factor, Image processing, Granular soils, Large-scale direct shear test, CBR



Aileme ve Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e...

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde desteğini esirgemeyen bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren tez danışmanım ve saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Bahadır OK'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda, desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarıma Arş. Gör. Serdar KARAAHMETLİ, Arş. Gör. Mustafa TOLUN'a ve Adana Alparslan Türkeş B.T.Ü İnşaat Müh. Bölümü Yapı Laboratuvarı sorumlusu Hasan DAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmada desteklerini esirgemeyen İnş. Müh. Hüseyin ÇOLAKOĞLU, İnş. Müh. Murteda ÜNVERDİ, İnş. Müh. Umud DAĞLI ve Biyo. Müh. Murat İDİKUT'a teşekkür ederim.

Hayatım tamamımda ve tez çalışması sürecinde her daim beni destekleyen, arkamda duran ve motivasyon kaynağım, babam İhsan AKER ve annem Şengül AKER'e sonsuz sevgi, saygı ve minnetarlığımı sunmak isterim. Ayrıca lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca yanımda duran ve desteğini esirgemeyen dostum Yaşar GÜNEŞ'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sürecinde TÜBİTAK 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı aracılığı ile beni maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin tanımı.....	1
1.2. Çözüm önerisi ve çalışmanın kapsamı.....	3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
2.1. Granüler zeminler ve özellikleri.....	6
2.2. Danelerin şekil faktörleri	7
2.3. Danelerin şekil faktörlerinin zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi	10
2.4. Görüntü işleme tekniklerinin geoteknik mühendisliğinde kullanımı	11
2.5. Granüler zeminlerin kayma mukavemeti	12
2.6. Kayma mukavemetinin kesme kutusu deneyi ile belirlenmesi.....	14
2.7. Kesme kutusu deneyinde boyut etkisi ile ilgili araştırmalar	16
2.8. Kesme kutusu deneyinde kullanılan geosentetik güçlendirme etkisi ile ilgili araştırmalar	21
2.9. Önceki çalışmaların değerlendirilmesi	26
3. MALZEME VE YÖNTEM	29
3.1. Malzeme.....	29
3.1.1. Granüler zemin numuneleri.....	29
3.1.1.1. Numune 1	29
3.1.1.2. Numune 2	30
3.1.1.3. Numune 3	31
3.1.2. Geogrid donatı.....	32
3.1.3. Görüntü işleme ekipmanları	32
3.1.4. Görüntü işleme yazılımı	34
3.2. Yöntem.....	35
3.2.1. Görüntü işleme için yapılan işlemler.....	35

3.2.2.	Dane birim hacim ağırlık deneyleri.....	37
3.2.3.	Su emme deneyi.....	37
3.2.4.	Los Angeles deneyi.....	38
3.2.5.	Yassılık indeksi deneyi.....	39
3.2.6.	Kompaksiyon deneyleri	40
3.2.7.	Kesme kutusu deneyi	41
3.2.7.1.	Donatısız deneyler	42
3.2.7.2.	Donatılı (güçlendirmeli) deneyler	44
3.2.8.	Taşıma oranının tayini (CBR).....	45
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1.	Danelerin şekilsel özelliklerinin belirlenmesi.....	47
4.1.1.	Numune 1'in şekilsel özellikleri	48
4.1.2.	Numune 2'nin şekilsel özellikleri	51
4.1.3.	Numune 3'ün şekilsel özellikleri	55
4.1.4.	Zemin numunelerinin şekilsel özelliklerinin karşılaştırılması.....	58
4.2.	Danelerin şekilsel özelliklerinin kayma dayanımına etkisi.....	59
4.3.	Danelerin şekilsel özelliklerinin CBR'a etkisi.....	62
4.4.	Danelerin şekilsel özelliklerinin zemin-geogrid ile kenetlenme ilişkisi.....	63
4.4.1.	Donatının kesme yüzeyine yerleştirilmesi.....	63
4.4.2.	Donatının kesme yüzeyinin altına yerleştirilmesi	65
4.4.2.1.	$h/D_{max}=0.5$ deneyleri.....	66
4.4.2.2.	$h/D_{max}=1.0$ deneyleri.....	68
4.4.2.3.	$h/D_{max}=2.0$ deneyleri.....	70
4.4.2.4.	$h/D_{max}=3.0$ deneyleri.....	72
4.4.3.	Donatının kesme yüzeyinin üzerine yerleştirilmesi	74
4.4.4.	Donatılı deneylerin karşılaştırılması	77
5.	SONUÇLAR	81
6.	ÖNERİLER.....	83
	KAYNAKLAR.....	84
	ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kesme kutusu şematiği (Zhou ve diğerleri, 2009	1
Şekil 1.2. İki eksenli geogrid (Naeini ve diğerleri, 2013).....	3
Şekil 2.1. Dolgu malzemesi olarak kullanılan agrega.....	6
Şekil 2.2. Danelerin ölçeğe bağlı tanımlanması (Mitchell ve Soga, 2005; Arasan, 2010)	8
Şekil 2.3. Dane boyutlarının gösterimi (Arasan, 2010)	8
Şekil 2.4. Cox (1927)'a ait dane sınıflandırması (Cox, 1927).	9
Şekil 2.5. Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezinin şematik gösterimi (Uzuner, 2007)	13
Şekil 2.6. Mohr-Coulomb kırılma hipotezi	13
Şekil 2.7. Kesme kutusu test cihazının şematik gösterimi	14
Şekil 2.8. Kesme kutusu deneyinde c ve ϕ 'nın belirlenmesi (Uzuner, 2007)	15
Şekil 3.1. Taş ocağı	29
Şekil 3.2. Numune 1	30
Şekil 3.3. Numune 2	31
Şekil 3.4. Numune 3	31
Şekil 3.5. Geogrid donatı (Ok, 2018)	32
Şekil 3.6. Fotoğraf makinesi	33
Şekil 3.7. Kit lens	33
Şekil 3.8. Halojen lamba	33
Şekil 3.9. Görüntü işleme düzeneği	34
Şekil 3.10. ImageJ yazılımına ait genel görüntü	34
Şekil 3.11. Fotoğraf çekim işlemine ait düzenek	36
Şekil 3.12. ImageJ programı kullanılarak yapılan sayısal görüntü işleme aşamaları	36
Şekil 3.13. Los Angeles deney cihazı	39
Şekil 3.14. Yassılık indeksi deneyinde kullanılan elekler (kare göz açıklıklı elekler, silindirik çubuklu elekler).....	40
Şekil 3.15. Titreşimli tokmak ile kompaksiyon	41
Şekil 3.16. Kesme kutusu test cihazı.....	42
Şekil 3.17. Donatısız kesme kutusu deney aşamaları	43
Şekil 3.18. Donatılı kesme kutusu deney aşamalar	45
Şekil 3.19. Geogrid yerleşimine ait şematik gösterim	45
Şekil 3.20. CBR kalıbı ve deney cihazı	46
Şekil 4.1. Sayısal görüntü işleme sonucunda alınan Numune 1'e ait görüntüler.....	48
Şekil 4.2.ÇKA zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği	51
Şekil 4.3. Sayısal görüntü işleme sonucunda alınan Numune 2'ye ait görüntüler.....	52
Şekil 4.4.YKA zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği	55
Şekil 4.5. Sayısal görüntü işleme sonucunda alınan Numune 3'e ait görüntüler.....	55
Şekil 4.6.TYA zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği.....	58
Şekil 4.7.Tüm zemin numunelerine ait karşılaştırmalı şekil faktör değerleri	59

Şekil 4.8. Tüm zemin numunelerine ait alan-çevre dağılım grafiği.....	59
Şekil 4.9. Zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği	60
Şekil 4.10. Zemin numunelerinin göçme zarfı.....	60
Şekil 4.14. Zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği	64
Şekil 4.15. Zemin numunelerinin göçme zarfı.....	64
Şekil 4.16. $h/D_{max}=0.5$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği.....	66
Şekil 4.17. $h/D_{max}=0.5$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı	67
Şekil 4.19. $h/D_{max}=1$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği.....	69
Şekil 4.20. $h/D_{max}=1$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı	69
Şekil 4.22. $h/D_{max}=2$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği.....	71
Şekil 4.23. $h/D_{max}=2$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı	71
Şekil 4.25. $h/D_{max}=3$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği.....	73
Şekil 4.26. $h/D_{max}=3$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı	73
Şekil 4.28. Üst kutu güçlendirmeli ÇKA zemin numunesinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği	75
Şekil 4.29. Üst kutu güçlendirmeli ÇKA zemin numunesinin göçme zarfı.....	76
Şekil 4.32. Geogrid kesme yüzeyinin altında olması durumunda dane şekil özellikleri ile $\emptyset$ değişimi	78
Şekil 4.33. h/D_{max} ile içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki.....	79
Şekil 4.34. Güçlendirmeli ve güçlendirmesiz deney sonuçları.....	80
Şekil 4.35. Granüler zemin numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme grafiği.....	80

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Geogrid genel özellikleri.....	32
Tablo 3.2. Granüler zeminlerin dane birim hacim ağırlıkları.....	37
Tablo 3.3. Granüler zeminlerin su emme değerleri	38
Tablo 3.4. Granüler zeminlerin parçalanma dirençleri.....	39
Tablo 3.5. Granüler zeminlerin parçalanma dirençleri.....	39
Tablo 3.6. Numunelerin kompaksiyon parametreleri.....	41
Tablo 3.7. Granüler zemin numunelerine ait deney tablosu.....	44
Tablo 4.1. Sayısal görüntü işleme sonucunda alınan Numune 1'e ait görüntüler	48
Tablo 4.2. Numune 1'e ait şekil faktörleri.....	51
Tablo 4.3. Numune 2'e ait fraktal boyutları ve şekil faktörleri.....	52
Tablo 4.4. Numune 2'e ait şekil faktörleri.....	54
Tablo 4.5. Numune 2'e ait fraktal boyutları ve şekil faktörleri.....	55
Tablo 4.6. Numune 3'e ait şekil faktörleri.....	57
Tablo 4.7. Numunelerin karşılaştırmalı şekilsel özellikleri.....	58

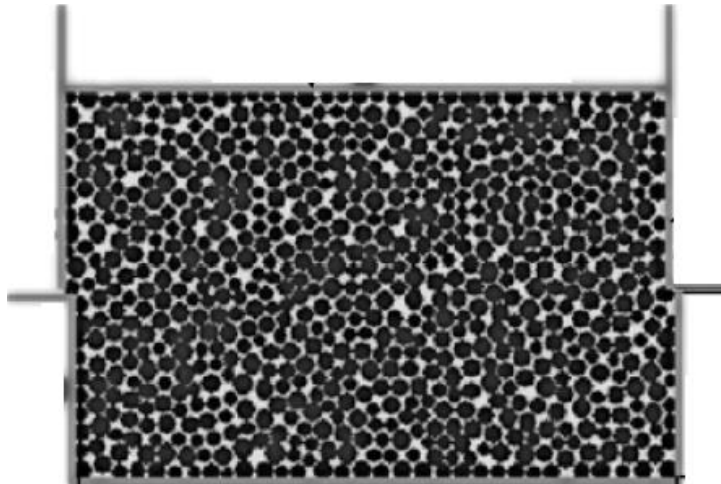
KISALTMALAR

ÇKA	: Çok Köşeli Agreg
YKA	: Yarı Köşeli Agreg
TYA	: Tam Yuvarlak Agreg
USCS	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
D_{max}	: Maksimum dane çap boyutu
D_{50}	: Ortalama dane boyutu
D_r	: Sıkılık
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı
L	: Danenin uzun kenar uzunluğu
I	: Danenin orta kenar uzunluğu
S	: Danenin kısa kenar uzunluğu
A	: Danenin alanı
P	: Danenin çevre uzunluğu
τ_f	: Kayma anındaki kayma mukavemeti
c	: Kohezyon
σ	: Kırılma yüzeyindeki normal gerilme

1. GİRİŞ

1.1. Problemin tanımı

İri daneli zeminler sahip oldukları birçok avantaj sayesinde geoteknik mühendisliğinde çeşitli alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde, güvenli ve ekonomik yapılar üretmek için, bu iri daneli zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri, özellikle geoteknik yapının tasarım çalışmaları için çok önemlidir (Alias ve diğerleri, 2014). Bu tip zeminlerin elverişli bir şekilde kullanılabilmesi için zeminlere ait tüm mühendislik özelliklerin ve davranışların bilinmesi gereklidir. Bu bağlamda sözü geçen iri daneli zeminlerin dayanım parametrelerinin belirlenmesi geoteknik mühendisliğinin önemli konularından biridir. Bu zeminlerin dayanım parametrelerinin tayininde birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri uzun yıllardan beri kullanıldığı için geniş bir tecrübe biriktirilen bir laboratuvar deneyi olan kesme kutusu deneyidir. Birçok laboratuvar, mühendislik geoteknik yapı tasarımı amacıyla zeminlerin içsel sürtünme açısını veya kayma mukavemetlerini belirlemek için zeminler üzerinde kesme kutusu deneyi uygulanmıştır (Palmeria ve Milligan, 1989; Zhou ve diğerleri, 2009; Abdi ve Gonbad, 2019; Moayed ve diğerleri, 2016). Bu deneyde genellikle kesme kutusu iki ayrı parçadan oluşmakta iken deney sırasında alttaki parça sabit tutulur üsteki parça hareket ettirilerek zeminin bir düzlemde kesilmesi sağlanır. Şekil 1.1’de kesme kutusu deneyinin şematik bir çizimi gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Kesme kutusu şematığı (Zhou ve diğerleri, 2009)

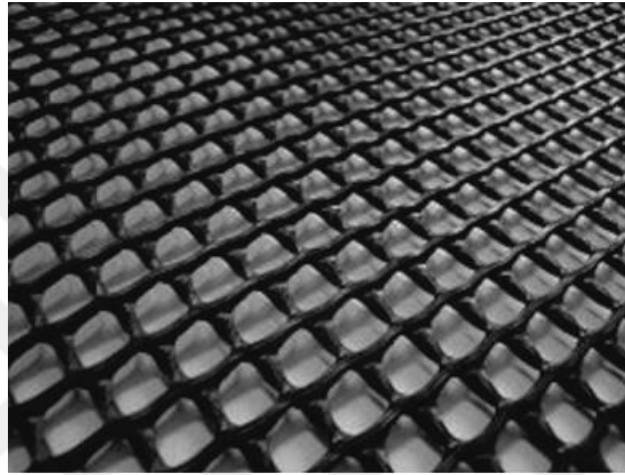
İri daneli zeminlerin kayma mukavemetini etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bu faktörler kesme kutusu deneyinde de deney sonuçlarını etkilemektedir. Kesme kutusundan elde edilen

bu zemin parametlerine etki eden birçok faktör mevcuttur. Kesme kutusunun boyutu, zeminin gradasyonu, maksimum dane çapı, dane şekli ve rölatif sıklığı iri daneli zeminlerin kayma mukavemetini etkileyen en önemli parametrelerdendir (Moayed ve diğerleri, 2016). İri daneli zeminlerin kayma mukavemetini zemin danelerinin morfolojik (şekilsel) özelliklerinden ve danelerin yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir. Danenin formunun belirlenebilmesi için danenin boyutsal özelliklerine ihtiyaç vardır. Danenin boyutları kullanılarak yassılık (elongation), aspect oranı (aspect ratio) ve yuvarlaklık (roundness) gibi danelerin bazı şekil faktörlerine ulaşılabilir (Arasan, 2011). Ancak kayma mukavemetine etkileyecek yukarıda belirtilen faktörlerin belirlenmesi için gerekli danelerin boyutlarının elde edilmesi zeminin heterojen yapısı düşünüldüğünde oldukça zordur. Ayrıca danelerin şekillerinin tek tip olmaması ve düzgün geometrilere sahip olamaması da bu işlemi daha da zorlaştırmaktadır. Bu zorluklar sebebi günümüzde iri daneli zeminlerin kayma mukavemetlerinde şekil faktörünün etki düzeyi hala tam olarak ortaya koyulamamış ve bu durum çeşitli çalışmalarla hala araştırılmaya devam etmektedir (Vangla ve diğerleri, 2015).

Kesme kutusu deneyi, iri daneli zemin numunelerini kayma mukavemetinin belirlenmesinde nispeten kolaylıkla kullanılan bir deney olsa da gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi için dane boyutları ve kesme kutusu boyutları belli oranlarda olmalıdır. Özellikle dolguda kullanılan iri daneli granüler zeminlerin dane boyutları çoğu kesme kutusunun test ekipmanı için fazla büyük olduğundan bu granüler zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek oldukça zor olmaktadır. ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Derneği), zeminleri test etmek için kesme kutusu genişliğinin en büyük dane çapının en az on katı olması ve kutunun yüksekliğinin genişliğinin yarısından fazla olmaması gerektiğini önermektedir (ASTM D 3080). Bu da standart bir kesme kutusu (60 mm x 60 mm), iri daneli granüler zemin numunelerini test etmek için uygun olmadığı anlamında gelmektedir. Bu durumda granüler zeminler kayma mukavemetlerinin güvenli şekilde belirlenebilmesi için büyük ölçekli deney sistemleri ihtiyacı doğmuştur (Alias ve diğerleri, 2014; Zhou ve diğerleri, 2009).

Geoteknik mühendisliği tarihinde, zeminlerin basınca karşı iyi direnç gösterdiği, ancak çekme gerilmesine karşı çok zayıf oldukları bilinmektedir. Özellikle granüler zeminin çekme gerilmelerini arttırmak için zemin içerisine bir çekme elemanının yerleştirilmesi uzun zaman önce düşünülmüştür (Haeri ve diğerleri, 2000). Geosentetikler, güçlendirme için en yaygın kullanılan çekme elemanlarından bir tanesidir ve piyasada çok çeşitli geosentetik donatı

elemanı mevcuttur. Geosentetik takviyeli zeminler, geosentetiğin nispeten uygun maliyet ve çevre dostu olması nedeniyle çeşitli geoteknik mühendisliği projelerinde çok sık kullanılmaktadır. Günümüzde birçok zemin mühendisliği projesinde, geosentetik kullanarak zemin güçlendirme sadece bir mühendislik çözümü değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel bir çözümdür (Naeini ve diğerleri, 2013; Abdi ve Gonbad, 2019; Parihar ve diğerleri, 2015). Granüler dolgulara geogridler yerleştirilerek gerekli dolgu kalınlıkları azaltılabilir. Şekil 1.2’de çok sık kullanılan bir geosentetik türü olan bir tip geogrid gösterilmiştir.



Şekil 1.2. İki eksenli geogrid (Naeini ve diğerleri, 2013)

Kesme kutusu deneyleri, donatılı zeminin kayma dayanım davranışını anlamak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Infante ve diğerleri, 2016). Zemin ve geosentetik arasındaki etkileşim, güçlendirilmiş zemin yapılarının tasarımı, modellenmesi ve performansı için son derece önemlidir. Bu etkileşim mekanizması zemin dane şekli ve özellikleri gibi çeşitli parametreler ile birlikte, donatı özelliklerine bağlıdır. Ayrıca zemin ile donatı arasındaki kenetlenme mekanizmaları bu özelliklerden etkilenmektedir. Ancak zemin dane şeklinin kenetlenme mekanizmasına etki düzeyi hala bir araştırma konusudur.

1.2. Çözüm önerisi ve çalışmanın kapsamı

Numune boyutunun ve şekillerinin kesme bölgesi üzerinde birtakım etkilere sahip olduğu ve bu etkilerin deformasyon özelliklerini, kesme mukavemetini ve sürtünme açısını kontrol ettiği olduğu bilinmektedir (Wu ve diğerleri, 2008). Granüler zeminlerin mukavemet davranışının farklılık göstermesinden danelerin boyutunun ve morfolojik özelliklerinin değişmesi sorumlu tutulmuştur (Zhou ve diğerleri, 2009). Teknolojik gelişmelerin getirdiği avantajlardan biri olan yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek, danelerin görüntülerine hiçbir değer kaybı olmadan

ulaşılabilmesine olanak sağlamaktadır. Danelerin şekil faktörlerine sayısal görüntü işleme (Digital Image Processing) ve bilgisayar destekli yazılımlar kullanılarak elde edilmesi mümkündür (Arasan, 2010). Bu bağlamda, bilgisayar destekli yazılımlar kullanılıp daha doğru ve hiçbir değer kaybına maruz kalmamış şekil faktörleri hesaplanabilir. Bununla birlikte daha doğru hesaplanmış olan şekil faktörlerinin kayma mukavemetine olan etkisi daha net olarak hesaplanabilir. Granüler zeminlerin dayanım tayininde serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve vane deneyleri gibi yöntemler bulunmaktadır. Buna rağmen kesme kutusu deneyi, kuru veya doygun zeminlerin kayma dayanım parametrelerin belirlenmesi için ve buna ek olarak zemin-geogrid kenetlenme mekanizmasının algılanması için yapılan en basit ve en ekonomik testlerden biri olduğu araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Kesme kutusu deneyleri, basitliği ve tekrarlanabilirliği nedeniyle geoteknik mühendisliği uygulamalarında son 50 yılda varlığını sürdürmüştür. (Moayed ve diğerleri, 2016; Alias ve diğerleri, 2014; Mizaeifar ve diğerleri, 2013). Granüler malzemeler üzerinde uygulanan kesme kutusu testlerinde, 1936 gibi erken bir tarihte ölçek etkisi gözlemlenmiştir. Kesme kutusu testi, iri daneli zemin numunelerini nispeten kolaylıkla test ettiği bilinmektedir. İri dane boyutlarına sahip zeminler, sahadaki muadillerine daha yakın koşullar altında kesme kutusu kullanılarak en verimli şekilde test edilebilmektedir. Bununla birlikte çoğu test ekipmanı, zemindeki granüllerin boyutuna göre küçük boyutlu olduğundan, iri daneli zeminlerin kayma mukavemeti için test edilmesi bir sorun olmuştur (Alias ve diğerleri, 2014; Zhou ve diğerleri, 2009). Bu bağlamda, zeminin sahip olduğu danelerin boyutlarına göre en uygun büyük ölçekli kesme kutusu test cihazı kullanılarak iri daneli granüler zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerine daha doğru ve net şekilde ulaşılabileceği düşünölmektedir. Zemin ve geosentetik arasındaki etkileşim, güçlendirilmiş zemin yapılarının tasarımı, modellenmesi ve performansı için son derece önemli olduğu bilinmektedir. Bu etkileşim mekanizması zemin özelliklerine, donatı özelliklerine ve bu malzemeler arasındaki ilişkilere bağlıdır (Infante ve diğerleri, 2016). Ancak geosentetik güçlendirme mekanizmaları henüz net değildir. Donatı ile zemin arasındaki kenetlenme günümüzde hala sıkça araştırılan bir konu olmaktadır. Zemin ve geosentetik arasındaki etkileşimin daha iyi anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi için donatılı zeminlerin en önemli güçlendirme mekanizmalarından biri olan zemin ile donatı arasındaki kenetlenme mekanizmasının etkisi üzerinde yapılacak kapsamlı kesme kutusu deneyleri ile araştırılması bu mekanizmanın daha iyi anlaşılmasına ışık tutabilecektir.

Bu çalışma için üç tip farklı morfolojik özelliklere sahip agregalar elde edilmiştir. Bu agregalar farklı çap aralıklarındadır. Öncelikle bu farklı morfolojik özellikler sahip agrega grupları kendi içlerinde karıştırılarak dolgularda dolgu malzemesi olarak kullanmaya uygun gradasyona sahip üç granüler zemin numunesi elde edilmiştir. Daha sonra bu numunelerin morfolojik özellikleri belirlenebilmesi için görüntü işleme tekniği kullanılmıştır. Görüntü işleme için 3 tip zemin numunesinde numuneler alınmış ve bu numunelerin yüksek kalitede fotoğrafları çekilmiştir. Daha sonra bir bilgisayar programı yardımı ile fotoğraflardan şekil boyutları belirlenmiş ve daha sonra yuvarlaklık, yassılık, aspect oranı ve küresellik gibi katsayılar hesap edilmiştir (Cox, 1927; Sympatec, 2008; Mora ve Kwan, 2000; Kuo ve diğerleri, 2000). Daha sonra elde edilen granüler zemin numunelerine dane birim hacim ağırlık deneyleri, su emme deneyi, kompaksiyon deneyleri, los angeles deneyi, yassılık indeksi deneyi ve rölatif sıkılık deneyi gibi laboratuvar deneyleri yapılmış ve numunelerin yığın ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir (ASTM C 127-01; ASTM C 128-01; ASTM D 7382; ASTM C 131-03; TS 9582 EN 933-3; ASTM D 4254-00; ASTM D 4253-16). Maksimum dane çapı 15 mm olan optimum su içeriğine getirilen granüler zemin numuneleri, bu maksimum dane çapı için uygun büyük ölçekli kesme kutusuna sahip olan bir kesme kutusu deney cihazında kesme kutusu deneyine tabi tutulmuş ve numunelerin kayma mukavemeti belirlenmiştir (ASTM D 3080). Bu şekilde granüler zeminlerin morfolojik özellikler ile kayma mukavemetleri arasında ilişkiler kurulmaya çalışılmıştır. Ayrıca farklı morfolojik özelliklere sahip granüler zeminlerin geogrid donatı ile kenetlenme mekanizmasının araştırılması da bu çalışmanın bir konusudur. Bunun için geogrid donatı yerleştirilen granüler zemin numunelerine kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kenetlenmenin etkisinin belirlenebilmesi için donatı kesme yüzeyine ve kesme yüzeyinin altında ve üstünde dört farklı mesafeye koyarak yerleştirilerek kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Tüm sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak sunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Granüler zeminler ve özellikleri

Zemin, boşluklar veya boşluklarla ayrılmış katı parçacıklardan oluşan bir kütleden oluşur. Zemin, geoteknik mühendisliği için en geniş olarak bir yapıyı destekleyen kütle olarak tanımlanmaktadır. Bu kütle çakıl, kum, silt ve kil gibi malzemelerden veya bu malzemelerin karışımından meydana gelmektedir. Zeminler USCS (Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi)'e göre, iri daneli ve ince daneli ve bunların alt grupları olmak üzere sınıflara ayrılmaktadır. Elek analizi sonucunda No.200 elekten geçen kısım yüzde 50'den az ise iri daneli olarak kabul edilmektedir (ASTM C – 136). Zeminler dane boyutlarına göre de sınıflandırılabilir. Dane çapı 0.075mm ile 75mm arasında olan daneler iri daneli olarak sınıflandırılmaktadır (ASTM D – 2487-11). Zeminler için bir diğer ayırt edici özellik ise özgül ağırlık değerleridir. İri daneli zeminlerde özgül ağırlık değerleri 2.65 ile 2.68 değerleri arasında değişmektedir (Okman, 2013). İri daneli zeminler olarak ifade edilen kohezyonsuz zeminler ise genelde kum ve çakıl gibi kendini tutamayan kütlelerden meydana gelmektedir (Uzuner, 2007). Granüler zeminler, yüksek mukavemetleri, suyu hızla tahliye edebilme özellikleri, nispeten elverişli oturma ve sıkışma özellikleri nedeniyle setler, yollar ve istinat yapıları için dolgu olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Alias ve diğerleri, 2014). Şekil 2.1'de sıkça dolgu malzemesi olarak kullanılan bir granüler zemin türü gösterilmiştir.

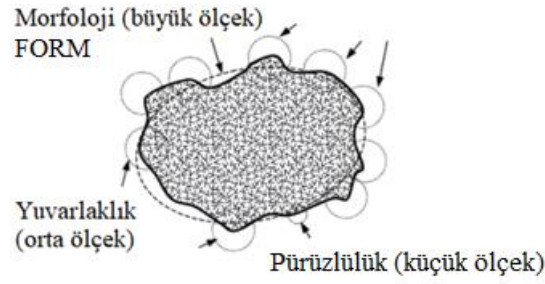


Şekil 2.1. Dolgu malzemesi olarak kullanılan agrega

Dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zemin için farklı tipte gradasyonlar önerilmektedir. Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) sıkça dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zeminlerin yüksek oranda çakıl içerdiğini belirtmektedir. Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu'na göre Gradasyon A, B, C ve D dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zeminler için uygun görülmektedir. Bu çakıl oranı Gradasyon A için yüzde 45, Gradasyon B için yüzde 40, Gradasyon C için 35 ve Gradasyon D için 15 olarak belirtilmektedir. Farklı gradasyonlarda dolgu malzemesi olarak kullabilen granüler zeminlerin ortalama dane boyutları ise Gradasyon A için 16mm, Gradasyon B için 14mm, Gradasyon C için 11mm ve Gradasyon D için 7mm olarak bilinmektedir (ASTM D 1241 – 00). Gradasyonları ve ortalama dane boyutları bilinen sıklıkla dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler zeminlerin geoteknik tasarımlar için kayma mukavemetlerinin ve davranışlarının bilinmesi çok önemlidir. Bu sebeple geçmişten günümüze granüler zeminler ve granüler zeminlerin özellikleri araştırma konusu olmuştur. Coulomb istinat duvarlarında dolgu malzemesi olarak kullanılan iri daneli zeminlerin mukavemet parametrelerini incelemiştir (Coulomb, 1776). Buna ek olarak, uzun yıllardır birçok araştırmacı granüler zeminlerin mukavemet parametrelerinin incelendiği çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Zhou ve diğerleri, 2009; Alias ve diğerleri, 2014; Haeri ve diğerleri, 2000; Infante ve diğerleri, 2016; Moayed ve diğerleri, 2016; Wu ve diğerleri, 2008; Palmeira ve Milligan, 1989; Bareither ve diğerleri, 2008).

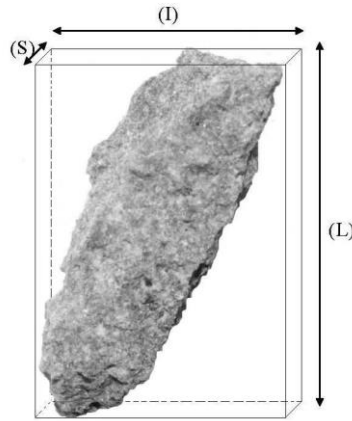
2.2. Danelerin şekil faktörleri

Danelerin şekil faktörleri, danelerin morfolojik özellikleri hakkında bilgi vermek için kullanılan parametrelerdir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi zemin danelerinin morfolojik özellikleri, danelerin genel geometrisini ve şeklini temsil etmektedir (Vangla ve diğerleri, 2015). Şekil faktörleri ile ilgili birçok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda danelerin şekil faktörlerine ait parametreler tanımlanmış, bu parametrelere ait gözlemsel çalışmalar ve formülasyonlar tanıtılmıştır. Yapılan ilk çalışmalarda danelerin morfolojik özellikleri hakkında bilgi veren gözlemsel çalışmalara yoğunlaşmıştır ve bu gözlemsel çalışmalar abaklar ile tanıtılmıştır (Zingg, 1935; Powers, 1953; Sneed ve Folk, 1958). Yapılan bu çalışmaların ışığında, ilerleyen zamanlarda danelerin morfolojik özellikleri hakkında bilgi veren şekil faktörleri matematiksel formülasyonlar ile tanıtılmıştır (Cox, 1927; Sympatec, 2008; Mora ve Kwan, 2000; Kuo ve diğerleri, 2000; Arasan, 2010).



Şekil 2.2. Danelerin ölçeğe bağlı tanımlanması (Mitchell ve Soga, 2005; Arasan, 2010)

Danelerin morfolojik özellikleri hakkında bilgi veren şekil faktörlerine ulaşmak için danelerin üç boyutuna (uzun, orta ve kısa) ihtiyaç vardır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi danelerin uzun, orta ve kısa boyutları sırası ile L, I ve S sembolleri ile gösterilmektedir. Danelerin uzun, orta ve kısa boyutlarına ise görüntü işleme sürecinden sonra ulaşılması mümkündür. Danelerin görüntü işleme sürecinden geçmesi için öncelikle danelerin dijital görüntüsü elde edilmesi gerekmektedir. Danelerin kamera yardımı ile fotoğraf haline dönüştürülmesinden sonra elektronik ortama alınıp piksel ögeleri haline getirilmesi ile danelerin dijital görüntüsü elde edilmesi mümkündür. Elde edilen dijital görüntü bilgisayar ve yazılımlar kullanılarak sayısal görüntü işleme (Digital Image Processing) çalışmasına tabi tutulabilir ve danelerin boyutlarına ulaşılabilir (Arasan, 2010).



Şekil 2.3. Dane boyutlarının gösterimi (Arasan, 2010)

Danelerin bu üç boyutu kullanılarak danelerin yassılık, aspect oranı, yuvarlaklık ve küresellik gibi şekil faktörleri değerlerine ulaşılabilir. Bu doğrultuda daneler bu şekil faktörleri kullanılarak farklı sınıflara ayrılabilir. Bu şekil faktörleri aşağıda sunulmuştur.

Yassılık genelde dane boyu dağılımlarında etkili olmaktadır.

$$Yassılık = \frac{I}{L} \quad (1)$$

Danenin uzun, orta ve kısa kenarları sırasıyla L, I, ve S'dır (Mora ve Kwan, 2000).

$$Aspect\ Oranı = \frac{L}{I} \quad (2)$$

Danenin uzun, orta ve kısa kenarları sırasıyla L, I, ve S'dır (Kuo ve diğerleri, 2000).

Yuvarlaklık danelerin köşelerinin değişimini ifade eden parametre olup danelerin orta ölçekli bir morfolojik özelliğidir. Yuvarlaklık değeri Wentworth (1919) ve Wadell (1932)'in geliştirdikleri eşitlik yüzey özelliklerinin ortalama eğrilik yarıçapının en büyük iç dairenin yarıçapına oranı olarak ifade edilmiştir. Ancak bu yarıçapların bulunmasının zorluğu göz önünde bulundurularak Cox (1927) tarafından sadece danenin alanı ve çevre değerlerinin kullanıldığı bir eşitlik geliştirilmiştir. Temel olarak bu eşitlik kullanılarak hepaplanan değer 1'e yaklaştıkça danenin köşeliden yuvarlağa doğru değiştiği yorumu yapılmaktadır. Bu yoruma ait sınıflandırma Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

$$Yuvarlaklık = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3)$$

Danenin alanı ve çevresi sırasıyla A ve P'dir (Cox, 1927).

	Yuvarlaklık Değeri						
Cox (1927)	<0,5	0,5-0,65	0,65-0,70	0,70-0,75	0,75-0,77	0,77-0,80	0,80-1,00
Dane Görüntüleri							
							
Yuvarlaklık Sınıfı		Çok Köşeli	Köşeli	Yarı Köşeli	Yarı Yuvarlak	Yuvarlak	Tam Yuvarlak

Şekil 1.4. Cox (1927)'a ait dane sınıflandırması (Cox, 1927).

Küresellik ise büyük oranda yassılık değerine bağlıdır.

$$Küresellik = \frac{2\sqrt{\pi A}}{P} \quad (4)$$

Danenin alanı ve çevresi sırasıyla A ve P'dir (Sympatec, 2008; Vangla ve diğerleri, 2015).

2.3. Danelerin şekil faktörlerinin zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisi

Danelerin şekil faktörlerinin zeminin kompaksiyon, boşluk oranı ve kayma mukavemeti gibi özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Uzuner, 2007; Okman, 2013). Birçok araştırmacı çalışmalarında bu ilişkileri araştırmıştır. Şekil faktörlerinin mühendislik özelliklerine etkisini araştıran ve bu konu ile ilgili ilk çalışmalardan biri Athanasopoulos tarafından gerçekleştirilmiştir. Athanasopoulos (1993), kumların dane boyutunun kum-geotekstil kompozitlerinin genel davranışı ve kum-geotekstil arayüzündeki sürtünme açısı üzerindeki etkisini araştırmak amacı ile örgülü geotekstil ile güçlendirilmiş ortalama dane boyutu (D_{50}) 0.285mm ile 3.571mm arasında değişen kum numuneleri üzerinde 63mm x 63mm boyutunda bir kesme kutusu ile kesme kutusu testleri gerçekleştirelerek bu etkileri araştırmıştır. Ortalama dane çapları 0.285mm ile 3.571mm arasında değişen kum numuneleri, kayma düzlemine dik olarak yerleştirilen 63mm x 37mm boyutundaki örgülü geotekstil ile güçlendirilmiş bir şekilde 63mm x 63mm bir kesme kutusu kullanılarak test edilmiştir. Güçlendirilmiş kum numuneleri, küçük bir vibratör kullanılarak $Dr = \%92$ sıklık oranında sıkıştırılmıştır. Test 50, 100, 200, 400 ve 600kPa düşey gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Deformasyon hızı 0,4mm/dk sabit olarak uygulanmıştır. Güçlendirilmiş numuneler, güçlendirilmemiş muadillerinden daha yüksek mukavemet değeri göstermiştir. Güçlendirilmemiş numunelerin pik sonrası dayanım kaybı, gevrekliğin sünek davranışa dönüşmesi nedeniyle güçlendirilmiş numunelerde önemli ölçüde azalmıştır. Düşük bir geogrid açıklık oranı değerinin (A), geosentetik ile güçlendirilmiş kumun tüm özelliklerini kullanmak için elverişsiz koşullar ürettiği sonucuna varılmıştır. Dilatasyonun, özellikle daha yüksek normal gerilme değerleri için artan dane boyutunda daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçların yorumlanması için δ/ϕ değeri normalize edilmiştir. Maksimum δ/ϕ değerinin, $A/D_{50} = 1.60$ optimum değerinde elde edildiği sonucuna varılmıştır. Bu konu ile ilgili bir diğer kayda değer ve önem arz eden çalışmalardan biri Vangla ve diğerleri (2015) tarafından yapılmış olup farklı gradasyon ancak benzer şekil faktörlerine sahip CS, MS ve FS olarak adlandırılmış iri, orta ve ince kum numuneleri üzerinde büyük boyuta sahip (300mm x 300mm x 160mm) kesme kutusu kullanarak numune boyutunun zeminin kayma mukavemet parametrelerini incelemek için bir dizi teste tabi tutmuşlardır. Zemin numuneleri, görüntü analizi işlemi sonucunda açısallık, yuvarlaklık, küresellik, düzenlilik ve pürüzlülük gibi şekil faktörlerini ele almışlardır. Deneyler sırasında 21, 37 ve 58kPa düşey gerilmeler uygulanmıştır. Numuneler 1mm/dk deformasyon hızında kesmeye tabi tutulmuşlardır. Araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen testlerin sonucunda, aynı boşluk oranında yapılan testler ele alındığında benzer morfolojik özelliklere sahip kumların maksimum

kayma mukavemet değerleri dane boyutundan etkilenmediği sonucuna varılmıştır. Deneyler aynı boşluk oranında benzer morfolojiye sahip kumlar üzerinde yapıldığında ise, kumların maksimum kayma gerilmesi sonrası davranışı parçacık boyutundaki değişime göre değiştiği ifade edilmiştir. Araştırmacılar, genel olarak benzer şekil faktörlerine sahip zemin numunelerinin benzer koşullar altında test edildikleri durumlarda birbirlerine yakın davranış sergiledikleri sonucuna ulaşmışlardır. Günümüzde hala bu konu güncel olmakla birlikte üzerindeki yapılan alımlar devam etmektedir.

2.4. Görüntü işleme tekniklerinin geoteknik mühendisliğinde kullanımı

Görüntü işleme teknikleri teknolojinin ilerlemesi ile geoteknik mühendisliğinde zemin kütlesinin davranışlarını daha rahat kavrayabilmek ve yorumlayabilmek için danelerin şekil faktörlerine ait parametrelerin bulunmasında kullanılmaktadır (Alshibli ve diğerleri, 2004; Cerato ve Lutenegeer, 2006; Arasan, 2010). Konu ile ilgili dikkate değer çalışmalardan bir tanesi Cerato ve Lutenegeer tarafından 2006 yılında gerçekleştirilmiştir. Cerato ve Lutenegeer (2006), farklı özelliklere,  relatif sıklığa (yoğun, orta ve gevşek) sahip ve USCS'göre SW (iyi derecelendirilmiş kum), SW, SP (kötü derecelendirilmiş kum), SP, GP (kötü derecelendirilmiş çakıl) olarak sınıflandırılan beş kum numunesi ölçek etkisinin zemin dayanım parametrelerine etkisini incelemek için farklı boyutlara sahip (60mm x 26.4mm, 101.6mm x 40.64mm, 304.8mm x 177.8mm)  kare kesme kutusunda test etmiştir. Numuneler görüntü analizi ile test edilerek form faktörü, açısallık, aspect oranı ve yuvarlaklık olmak üzere 4 parametre altında incelenmiştir ve bu parametrelerin zemin dayanım parametrelerine etkisi incelenmiştir. Deney sırasında 69, 103, 138, 172 ve 207 kPa'lık düşey gerilmeler uygulanmıştır. Test edilen numuneler 0.25mm/dk deformasyon hızında kesmeye tabi tutulmuştur. Testlerinin sonuçları, sürtünme açısının numune boyutuna bağlı olabileceğini ve numune boyutunun etkisinin kum tipi ile değişebileceğini göstermiştir. Testler, iyi derecelendirilmiş kumlar için, kutu boyutu arttıķa sürtünme açısının azaldığını göstermiştir. Gevşek numunelerin yanı sıra yoğun numunelerin de kutu boyutundan etkilendiği gözlemlenmiştir. İyi derecelendirilmiş köşeli kumların sürtünme açıları ve köşeli zayıf derecelendirilmiş akıl GP#3, numune boyutundan en çok etkilenmiştir. En yuvarlak Ottawa kumu numune boyutundan en az etkilenen numunelerden biri olarak tanıtılmıştır. Arasan (2010), farklı fraktal boyutlarına ve şekil faktörlerine sahip dere malzemesi, bazalt ve kırmataş zemin numunelerini modifiye edilmiş orta ölçekli (150mm x 150mm) bir kesme kutusu kullanarak birtakım testlere tabi tutmuştur. Deneyler 50, 100 ve 150kPa düşey gerilmeler altında gerçekleşirken, deformasyon

hızı 0.25mm/dk olarak uygulanmıştır. Zemin numuneleri görüntü işleme aşamasından geçirilip bilgisayar destekli programlar aracılığı ile zemin numunelerine ait şekil faktörleri elde edilmiştir. Dere malzemesi ve bazalt agregası ele alındığında, görüntü analizi ile zeminlere ait fraktal boyutları, dağılım özellikleri, dane boyu dağılımı ve şekilsel özellikleri yüksek bir seviyede doğruluk ile tespit edilebileceği sonucuna varılmıştır. Görüntü analizi süreci ile aspect oranı, köşelilik, yuvarlaklık, küresellik ve konvekslik gibi parametrelere ulaşılabilmiştir. Buna ek olarak, danelerin görüntüleme yönünün sonuçları önemli bir seviyede değiştirmedeğinden yalnızca üst taraftan alınan görüntülerin yeterli olduğu belirtilmiştir. Görüntü analizi sonucunda tespit edilen yuvarlaklık değerleri kullanılarak yuvarlaklık sınıfları belirlenmiştir. Görüntü analizi ile zemin numunelerine ait dane boy dağılım grafiklerinin çizilebileceği ve bu grafiklere göre zeminlerin sınıflandırılabilceği önerilmiştir. Zemin numunelerinin kesme kutusu deneylerinden sonra elde edilen kayma mukavemet açısının yuvarlaklığın artması ile azaldığı fakat fraktal boyutu ve dane boyutunun artması ile azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Arasan, araştırmalar ve analizler doğrultusunda zeminlerin kayma mukavemeti açısına en etken parametreleri sırası ile rölatif sıklık, şekilsel özellikler, dağılım özellikleri ve dane boyutu olarak sıralarken boşluk oranına etkiyen parametreleri sırası ile şekilsel özellikler, dane boyutu ve dağılım özellikleri olarak sıralamıştır. Arasan, çalışmasının sonucunda görüntü analizi kullanılarak zeminlerin geoteknik özelliklerinden olan maksimum ve minimum boşluk oranları, dane boyu dağılımı, endeks özellikleri ve kayma mukavemet açısının deneye tabi tutmadan yeterli seviyedeki bir doğrulukta tahmin edilebileceğini göstermiştir.

2.5. Granüler zeminlerin kayma mukavemeti

Geoteknik yapı tasarımı için hayati rol oynayan kayma mukavemeti zeminlerin yüklere karşı olan davranışını temsil etmektedir. Şev yüzeylerinde bulunan zeminlerin dengede kalması ve temellerin nihai taşıma güç kapasiteleri direkt olarak kayma mukavemetine bağlıdır. Yeterli seviyede zemin kütesine uygulanan yük ile zemin daneleri birbirlerine göre hareket ederek düzlem boyunca kaymaya başlarlar ve göçme meydana gelir. Göçme meydana geldikten sonra zemin kütesi yük taşıma özelliğini kaybederek daha fazla yük taşıyamaz. Zemin kütesinin dayanabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanan zeminin kayma mukavemetinin sürtünme ve kohezyona bağlı olduğu belirtilmiştir. Zeminlerin dane dağılımına göre değişen zemin danelerinin arasındaki sürtünme ϕ ile ifade edilmektedir. Danelerin kimyasal ve mineralojik özelliklerine ve daneler arasındaki uzaklığa bağlı olan kohezyon ise zemin danelerini birbirine bağlayan kuvvet olarak ifade edilmektedir. Coulomb (1776) zeminlerin

kayma mukavemet değerini matematiksel eşitlik ile ifade eden ilk araştırmacılardandır. Coulomb (1776) ile başlayan bu çalışmalar Mohr (1900) tarafından geliştirilip ortaya sunulan ve Şekil 2.5'te açıkça gösterilen Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi zemin mekaniğinde yaygınca kullanılmaktadır. Bu teoride, özet olarak zemin kütlesinin göçme anında maruz kaldığı normal gerilme ve kayma gerilmesi bileşenlerinin konumunun bir doğru yardımı ile gösterilmesidir (Şekil 2.6). Mohr gerilme dairelerine teğet olarak çizilen ve göçme durumu temsil eden doğru temel olarak göçme zarfı olarak ifade edilmektedir. Bu doğrunun denklemi Denklem 5'te matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

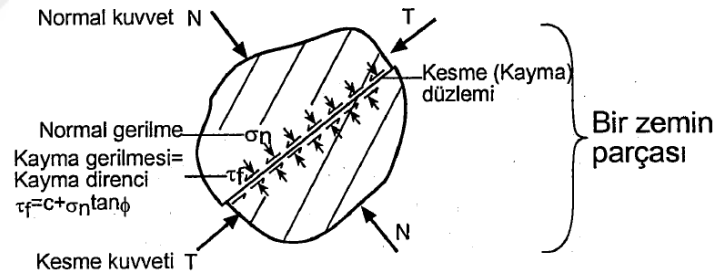
Burada;

τ_f = Kayma anındaki kayma mukaveti

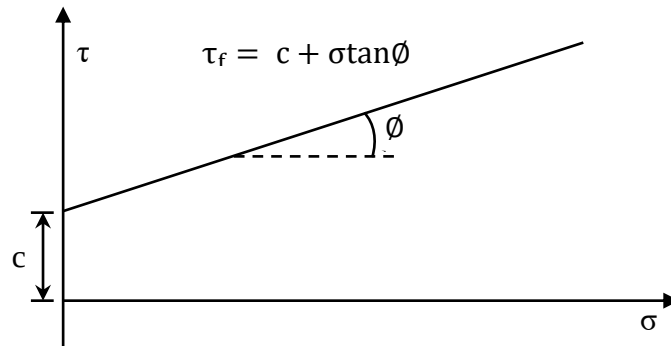
c = Kohezyon

σ = Kırılma yüzeyindeki normal gerilme

ϕ = İçsel sürtünme açısı



Şekil 2.5. Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezinin şematik gösterimi (Uzuner, 2007)

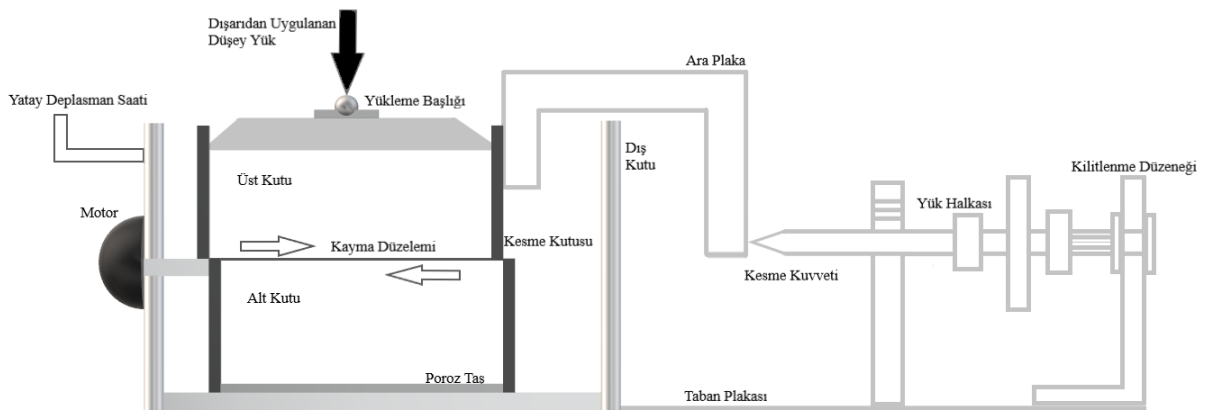


Şekil 3.6. Mohr-Coulomb kırılma hipotezi

Denklem 5’te matematiksel olarak ifade edilmiş olan ve geoteknik mühendisliğinde kayma mukavemet parametreleri olarak ifade edilen kohezyonun ve içsel sürtünme açısının belirlenmesi tasarımlar için hayati önem taşımaktadır. Geoteknik mühendisliğinde bu parametrelerin tayini araştırıldıkları yerlere göre arazi ve laboratuvar olmak üzere iki farklı başlık altında ele alınmaktadır. Arazide standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) gibi deneyler yapılırken, laboratuvar ortamında ise doğrudan kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi, serbest basınç deneyi ve vane deneyi gibi deneyler yapılmaktadır.

2.6. Kayma mukavemetinin kesme kutusu deneyi ile belirlenmesi

Şekil 2.7’de şematığı gösterilen kesme kutusu testi, onlarca yıllar boyunca zeminler için mukavemet parametrelerinin elde edilmesinde bir araç olarak kullanılmıştır. Kesme kutusu aparatının karmaşık olmaması, test gerçekleştirme hızının yüksek olması ve gerekli parametrelerin elde edilmesinde çıktı verilerin hızlı bir şekilde işlebilmelerinden dolayı birçok laboratuvar tarafından mühendislik tasarımı amacı ile zeminlerin sürtünme açısı ve kayma mukavemet değerlerinin elde edilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Özetle, kesme kutusu deneyi basitliği ve kolayca tekrarlanabilirliği nedeniyle mühendislik uygulamalarında son yıllardır varlığını sürdürmüş ve büyük oranda tercih edilmiştir (Palmeria ve Milligan, 1989; Moayed ve diğerleri, 2016; Cerato ve Lutenege, 2006; Alias ve diğerleri, 2014).



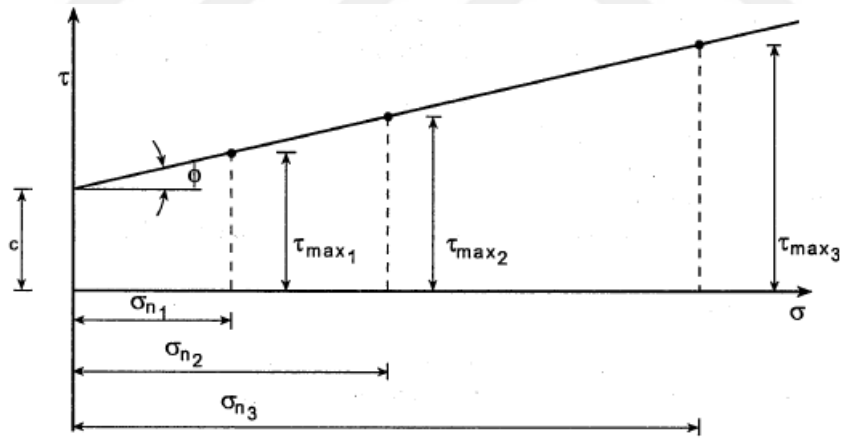
Şekil 4.7. Kesme kutusu test cihazının şematik gösterimi

Kesme kutusu deneyi, biri sabit ve bir diğeri hareketli olmak üzere iki çerçeveden oluşan bir alet ile yapılmaktadır. Zemin numunesinin kayma mukavemet parametrelerini elde etmek için, numune kesme kutusunun içerisine yerleştirilir. Numunenin üzerine kayma düzlemine dik olacak şekilde düşey bir yük uygulanır. Daha sonra kesme kutusunun hareketli olan çerçevesine, kayma düzlemine paralel olan ve artan bir yatay kuvvet uygulanır. Uygulanan bu

kuvvet ile numune kaymaya zorlanır. İlk olarak uygulanan kesme kuvveti numunede bir deformasyon oluşturur daha sonra ise numune kaymaya başlar.

$$\sigma_n = \frac{\text{Normal gerilme (N)}}{\text{Kesme kutusu enkesit alanı}}, \quad \tau_{max} = \frac{\text{En büyük kayma dayanımı}}{\text{Kesme kutusu enkesit alanı}} \quad (6)$$

Denklem 6’da matematiksel ifadeleri verilmiş olan kayma gerilmesi ve normal gerilme ise numune kaymaya başladığı durumda hesaplanabilmektedir. Zemin numunesinin kaydığı durumda yani maksimum kesme kuvvetinin uygulandığı durumda, uygulanan kesme kuvveti numunenin alanına bölünerek kayma gerilmesine ulaşılır. Aynı şekilde zemin numunesine uygulanan düşey kuvvet de numunenin alanına bölünerek normal gerilme değerine ulaşılır. Daha sonra kesme kutusuna aynı zeminden farklı düşey yükler altında test edilmek üzere numuneler yerleştirilerek yeterli sayıda deney yapılır ve Denklem 6’ya göre normal ve kayma gerilme değerleri hesaplanır (Okman, 2013).



Şekil 5.8. Kesme kutusu deneyinde c ve Ø'nın belirlenmesi (Uzuner, 2007)

Yeterli sayıda deney yapıldıktan sonra, normal gerilmeler yatay eksen ve kayma gerilmeleri düşey eksen olmak üzere koordinat sisteminde noktalar ile yerleri belirlenir. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi bu noktalardan geçen doğru, normal gerilme ve kayma gerilmesinin değişimini gösteren Coulomb doğrusunu yani kayma diyagramını vermektedir. Elde edilen bu doğrunun eğimi içsel sürtünme açısını temsil ederken kayma gerilmesi eksenini yani τ eksenini kestiği nokta ise kohezyon değerini temsil etmektedir (Şekil 2.8).

2.7. Kesme kutusu deneyinde boyut etkisi ile ilgili araştırmalar

Literatür incelendiğinde kesme kutusu deneyinde rastlanan boyut etkisinin ortaya konulduğu birçok çalışmaya rastlanmıştır. Uzun yıllardır boyut etkisinin incelendiği çalışmalar araştırmacılar tarafından en önemli konulardan biri olarak esas alınmıştır. Yapılan bu çalışmalar içerisinde önem arz eden ve göze çarpan birtakım çalışmalar aşağıdaki paragraflarda sunulmuştur.

Palmeria ve Milligan (1989), kesme kutusu boyutlarının içsel sürtünme açıları üzerindeki ölçek etkisini incelemek için, boyutları 1000 x 1000 x 1000 mm, 252 x 152 x 152 mm ve 60 x 60 x 32 mm olan büyük, orta ve küçük kesme kutusu olarak sınıflandırılan 3 farklı boyuta sahip kesme kutularını kullanarak, ortalama dane boyutu (D_{50}) 0.8 mm olan Leighton Buzzard silis kumu üzerinde birtakım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonrasında her üç kutusu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda bulunan içsel sürtünme açılarının birbirlerine çok yakın olduğu ifade edilip 49° ile 50° arasında değerler aldığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda araştırmacılar kum zeminlerde kesme kutusu boyutlarının içsel sürtünme açıları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, kayma düzleminin kalınlığında ve maksimum kayma gerilmesi sonrası davranışında önemli bir şekilde ölçek etkisi gözlemlendiği belirtilmiştir. Buna rağmen, kesme kutusunun geoteknik mühendisliğinde kullanılıp özellikle granüler zeminlerin kayma mukavemet parametrelerine ulaşılması için kullanılabileceği önerilmiştir.

Dadkhah ve diğerleri (2010) kesme kutusu boyutunun USCS'ye göre SC (Killi Kum) olarak sınıflandırılan zeminin dayanım parametreleri üzerindeki etkileri incelemek için kesme kutusu deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Numuneler, 1.67 ile 1.82 g/cm^3 arasında yoğunluğa sahip bir şekilde iyi derecelendirilmiştir. SC zeminin kesme mukavemeti özellikleri 60mm x 60mm ,100mm x 100mm ve 300mm x 300mm kesme kutusu boyutlarına sahip küçük, orta ve büyük ölçekli kesme kutusu ekipmanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hemen hemen aynı özelliklere sahip olan örselenmemiş numuneler, farklı boyutlarda üç kare kesme kutusunda test edilmiştir. Kesme kutularının boyut etkisini ve zemin yoğunluğunun dayanım parametreleri üzerindeki etkisini incelemek için 45 set sabit 1 mm/dk hızında kesme kutusu testleri yapılmıştır. Sonuç, ölçeğin test üzerindeki etkisini göstermiştir. Büyük ve orta ölçekli doğrudan kesme testi, küçük ölçekli doğrudan kesme testinin sonuçlarına kıyasla daha yüksek bir kohezyon ve daha düşük sürtünme açısı üretmiştir. Test, üç kesme kutunun her birindeki zemin yoğunluğu arttığında

sürtünme açısının ve kohezyonun arttığını göstermiştir. Büyük ve orta ölçekli kesme kutularından elde edilen sonuçlar birbirine yakınken küçük kesme kutusundan elde edilen mukavemet değerleri diğer iki kesme kutusu boyutuna göre daha düşük kohezyon ve daha yüksek içsel sürtünme açısı değeri sunmuştur. Mukavemet parametrelerinin zeminin, ölçek etkisi ve fiziksel özellikler tarafından kontrol edildiği sonucuna varılmıştır.

Mamo ve Dey (2016) kuru kohezyonsuz zeminin gerilme-deformasyon özellikleri, hacimsel deformasyonlar, maksimum ve kritik kesme dayanımı parametreleri üzerindeki şekil değiştirme hızı, relatif sıkılık ve numune boyutunun etkilerini araştırmayı ve anlamayı amaçlamıştır. Kesme kutusu kullanılarak kuru numuneler üzerinde bir dizi kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Küçük ölçekli ve büyük ölçekli testler için sırasıyla 60mm x 60mm x 30mm ve 300mm x 300mm x 150mm boyutlarında kesme kutuları kullanılmıştır. Küçük kesme kutusu testi için 0.05 mm/dk, 0.25 mm/dk ve 1.25 mm/dk olmak üzere üç farklı deformasyon oranı kullanılmıştır. Büyük kesme kutusu için 0.088 mm/dk, 0.502 mm/dk, 1.26 mm/dak ve 2.258 mm/dak olmak üzere dört farklı deformasyon hızı kullanılmıştır. Numuneler 50kPa, 100kPa ve 150kPa olmak üzere üç farklı normal gerilme altında test edilmiştir. Maksimum içsel sürtünme açısının deformasyon hızı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, deformasyon hızındaki daha fazla artış, içsel sürtünme açısının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Büyük numunelere kıyasla, küçük numunelerde deformasyon hızının içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisi sınırlama etkisinden dolayı daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum içsel sürtünme açısının numune boyutundan anlamlı bir şekilde etkilenmediği gözlemlenmiştir.

Moayed ve diğerleri (2016) farklı silt içeriklerine sahip kum zemini üzerindeki ölçek faktörünü araştırmak için bir dizi kesme kutusu testi yapmışlardır. %0, 10, 20 ve 30 silt yüzdelere sahip kum numuneleri hazırlanmıştır. Kesme kutusu testleri, üç farklı kesme kutusu boyutu (60mm x 60mm, 100mm x 100mm ve 300mm x 300mm) ile yapılmıştır. 60x60, 100x100mm boyutlarına sahip kesme kutularında 109, 163, 218, 327 ve 436 kPa düşey gerilme uygulanırken 300x300mm boyutuna sahip kesme kutusunda 109, 163 and 218 kPa düşey gerilme uygulanmıştır ve tüm testler 0.9mm/dk sabit bir deformasyon hızında kesmeye tabi tutulmuştur. Sonuçlar, kesme kutusu boyutunun artmasıyla maksimum kesme mukavemetinin ve maksimum sürtünme açısının azaldığını gösterirken artık(residual) kayma mukavemet değerlerinde bir değişiklik gözlemlenememiştir. Ayrıca silt yüzdelerinin arttırılması, maksimum kesme mukavemetinde bir azalmaya neden olmuştur. İçsel sürtünme açıları, kesme kutusu boyutu

arttıkça azalmıştır ve buna ek olarak içsel sürtünme açısındaki azalma oranı, silt içeriği arttıkça azaldığı kaydedilmiştir.

Alias ve diğerleri (2014) dane boyutunun granüler malzemelerin kesme dayanımı üzerindeki etkisini, büyük ve küçük kesme kutusu ile deneye tabi tutularak incelenmişlerdir. Büyük kesme kutusu (300mm x 300mm x 200mm) testleri ve küçük kesme kutusu (60mm x 60mm x 24mm) testleri, 0.09 mm/dk'lık kesme hızında ve 100, 200 ve 300 kPa'lık düşey gerilmeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Granüler malzeme boyutunun etkisini değerlendirmek için iki grup halinde dane boyutu kullanılmıştır. Maksimum 2,36 mm dane çapına sahip Grup 1, küçük boyuttaki kesme kutusunda test edilirken, maksimum 20 mm dane çapına sahip Grup 2, büyük boyuttaki kesme kutusunda test edilmiştir. Test edilen numunler USCS'ye göre GW (iyi derecelendirilmiş çakıl) olarak sınıflandırılmıştır. Kesme kutusu testlerinin sonuçları, efektif içsel sürtünme açısının dane boyutuna bağlı olabileceğini göstermiştir. Daha büyük dane boyutuna sahip numuneler üzerinde yapılan testler sonucunda daha yüksek efektif içsel sürtünme açısı olduğu ve daha yüksek kesme mukavemeti olduğu gözlemlenmiştir. Küçük kesme kutusu deneyinde ve büyük kesme kutusu deneyinde maksimum ve artık (residüal) efektif içsel sürtünme açısı sırasıyla yaklaşık 5° ve 3° farklılık gösterdiği kaydedilmiştir, küçük kesme kutusunda daha yüksek değerler gözlemlenmiştir.

Shakri ve diğerleri (2017) farklı boyutlarda kesme kutusu kullanılarak, modifiye edilmiş kum kolonlu yumuşak zemin numunesinin kesme dayanımı belirlemek için bir dizi kesme kutusu deneyi gerçekleştirmişlerdir. Farklı boyuttaki kesme kutusunun, modifiye kum kolon (PFA-Kum kolonu) ve yumuşak zemin numunesi arasındaki kesme dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Pülverize yakıt külü (PFA), kesme mukavemeti dahil olmak üzere kum kolonunun mekanik özelliklerini iyileştirmek için seçilmiştir buna ek olarak çevreye olan negatif etkisi bildiğinden kirliliğin azaltmasına yardımcı olması için de seçilmiştir. Çeşitli oranlarda malzeme (Çimento, Pulverize Yakıt Külü ve Kum) içeren 40 numune hazırlanmıştır. Büyük ve küçük olmak üzere 2 kesme kutusu boyutunda (60 x 60 mm ve 300 x 300 mm) kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Numuneler çeşitli PFA, çimento ve kum yüzdeleri kullanılarak hazırlanmıştır. %40, %50, %60, %70 ve %80 PFA kullanılırken, %4, %8, %12 ve %16 çimento kullanılmıştır. Küçük kesme kutusu testi için kullanılan normal gerilme değerleri 30 kPa, 60 kPa ve 120 kPa iken, büyük kesme kutusu testi için 5 Psi, 10 Psi ve 20 Psi seçilmiştir. %8 ila %12 aralığında kullanılan çimento yüzdesi ile %60 PFA kullanılarak, kesme kutusu

boyutlarından farklı olsa bile en yüksek kesme mukavemeti sonucuna ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Mirzaeifar ve diğerleri (2013) yoğunluğun ve numune boyutunun zemin-geogrid etkileşim parametreleri üzerindeki etkileri 6cm x 6cm, 10cm x 10cm ve 30cm x 30cm olmak üzere farklı ölçülerde 3 adet kesme kutusu kullanılarak araştırılmıştır. Geogrid ile güçlendirilmiş zemin üzerindeki ölçek etkisini incelemek için üç tip geogrid kullanılmıştır. A, B ve C tipi olarak kullanılan geogridler sırası ile 2.6, 2.4 ve 1.5kN/m dayanıma, 1.4, 1.2 ve 0.7mm kalınlığa, 4.2, 2.5 ve 1.2mm açıklığa sahip geogrid olarak seçilmiştir. Zemin yoğunluğunun kesme dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için, 1.67, 1.58 ve 1.5 g/cm³ yoğunluklu numuneler test edilmiştir. 100, 200 ve 300 kPa'lık düşey gerilmeler uygulanmıştır. Tüm numuneler için test hızı aynıdır ve 1mm/dk olarak belirlenmiştir. Yoğunluk arttığında, sürtünme açısı da yükseldiği sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, sabit yoğunlukta güçlendirilmemiş kum numunesinin boyutunun artmasının sürtünme açısında bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Küçük kesme kutularında artan zemin yoğunluğu, içsel sürtünme açısında önemli bir artışa neden olurken, büyük kesme kutularında bu miktar dikkate değmez bir değer olarak gözlemlenmiştir. Geogrid ile güçlendirilmiş kum numunelerinin sabit miktarda yoğunluğunu arttırarak, daneler ve geogrid arasındaki sürtünme açısının arttığı belirtilmiştir. Küçük kesme kutularında, kum daneleri ile daha büyük açıklıklara sahip geogrid arasındaki sürtünme açısı artarken, büyük kutularda sürtünme açısında önemsiz bir değişiklik olmuştur. Zemin yoğunluğu, geogrid ile güçlendirilmiş yoğun kumun sürtünme açısı üzerinde önemli bir etkiye sahipken, gevşek kumda önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır. Büyük kesme kutularında, geogrid uygulamasının kum direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ve bunun nedeni, kum daneleri ile geogrid yüzey arasındaki sürtünme etkileşim eksikliği olarak tanıtılmıştır.

Bareither ve diğerleri (2008), küçük ve büyük kesme kutusunda test edilen çok çeşitli doğal kum dolgu malzemelerinin kesme davranışını karşılaştırmak ve küçük ve büyük kesme kutusu kullanılarak doğal dolgu malzemesindeki çakıl içeriğinin içsel sürtünme açısı üzerindeki etkilerini incelemek için kesme kutusu deneyleri yapmışlardır. Kemse kutusu testleri, 64 mm kare küçük ölçekli kesme kutusu ve 305 mm kare büyük ölçekli kesme kutusunda %0 ila %30 arasında değişen çakıl içeriğine sahip 30 kum dolgu malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Küçük kesme kutusunda 26 ile 184 kPa arasındaki normal gerilmeler kullanılarak testler

yapılmıştır ve tüm testler 0.24 mm/dk sabit deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Büyük kesme kutusu her bir kum numunesi beş normal gerilmede (26, 69, 105, 148 ve 184 kPa) test edilmiştir ve tüm testler 0.24 mm/dk sabit deformasyon hızından gerçekleştirilmiştir. Büyük ve küçük kesme kutusu kullanılarak ölçülen sürtünme açıları, çakıl miktarının %30'dan az olması koşuluyla, benzer olarak bulunmuştur. Deneyler sonucunda, büyük ve küçük kesme kutusunda istatistiksel olarak benzer göçme zarflarının elde edildiğini gözlemlenmiştir. %30'dan daha az çakıl içeren temiz kum dolgusu için içsel sürtünme açısının, büyük ve küçük kesme kutusundan herhangi biri kullanılarak benzer doğrulukla ölçülebileceği gözlemlenmiştir.

Infante ve diğerleri (2016) iyi derecelendirilmiş kum ve siltli kum olmak üzere 2 farklı granüler zemin ve örgülü, örgüsüz, tek ve çift eksenli geogrid olmak üzere 4 farklı geosentetik 63mm çapına sahip dairesel kesme kutusu ve 100mm uzunluğunda kare kesme kutusu kullanılarak güçlendirilmiş zemin numunelerinin kesme dayanımı karakterize etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneler gevşek (%10 relatif sıkılık) ve yoğun (%90 relatif sıkılık) olarak hazırlanmıştır; geosentetikler kayma düzlemine dik olarak yerleştirilmiştir. Testler, 15.7, 31.4 ve 62.8 kPa olmak üzere üç düşey gerilme uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusu testleri, 1 mm/dk bir deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Testlerinin sonuçlarını etkileyen farklı faktörlerin etkisi, örneğin zeminlerin dane boyutu, zemin yoğunluğu, kesme kutusu boyutu ve geosentetik türü gibi faktörler analiz edilmiştir. Test sonuçları, çift eksenli geogrid ile güçlendirilmiş yoğun siltli kum numuneleri için en yüksek kesme mukavemeti iyileştirme değerinin elde edildiğini ortaya koymuştur. Genel olarak, geotekstil ile güçlendirilmiş numunelere kıyasla geogrid ile güçlendirilmiş numuneler için gelişme daha olumlu olmuştur. Güçlendirilmiş zemin numuneleri, güçlendirilmemiş numunelere göre daha yüksek kayma gerilmelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Gevşek kum numuneleri için güçlendirilmiş zeminin maksimum sürtünme açıları, geosentetik tipine bağlı olarak 0,8 ila 8,2 derece arasında artmıştır. Yoğun kumlar için sürtünme açılarının daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, yoğun numunelerde gevşek numunelere kıyasla elde edilen kohezyon daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. İyi derecelendirilmiş kum (SW) yoğun numuneleri için, en iyi ve en kötü kesme mukavemeti gelişimi, sırasıyla tek eksenli ve çift eksenli geogrid ile güçlendirilmiş numunelerde meydana gelmiştir. Siltli kum (SM) numuneleri için, gevşek ve yoğun kumda çift eksenli geogrid ile güçlendirilmiş numunelerde maksimum kesme mukavemeti gelişimi gerçekleşmiştir.

2.8. Kesme kutusu deneyinde kullanılan geosentetik güçlendirme etkisi ile ilgili araştırmalar

Son yıllarda, zemin istinat yapılarında taşıma kapasitesi, şev stabilitesi ve yanal basınç gibi geoteknik mühendisliği problemlerine çeşitli geosentetikler ile güçlendirilmiş zemin yapıların kullanımı çözüm olarak sunulmuştur ve geosentetikler ile güçlendirmede önemli bir artış gözlemlenmiştir. Son otuz yılda araştırmacılar, geosentetik takviyesinin mekanik davranışını araştırmak için bir dizi laboratuvar ve saha deneyi gerçekleştirmişlerdir. Kesme kutusu deneyi, zemin-geosentetik etkileşim parametrelerini belirlemek için kullanılması uygun deneylerden biri olarak ifade edilmiştir. Sonuçlar, geosentetiklerin, dolgu temel kalınlığını azaltmak ve temel dolgu hizmet ömrünü uzatmak ve performansını artırması gibi birçok olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Mirzaeifar ve diğerleri, 2013; Han ve diğerleri, 2017).

Zemin tipine, geosentetik tipine, numunenin boyutuna ve testin ölçek faktörüne bağlı olarak, geosentetikler ile güçlendirilmiş zemin yapılarının tasarımında zemin ve geosentetik arasındaki etkileşim son derece önemli olduğu kaydedilmiştir. Literatür incelendiğinde, bu etkileşimlerin araştırıldığı birçok çalışmaya ulaşılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan birkaçı aşağıdaki paragraflarda sunulmuştur.

Han ve diğerleri (2017), agrega daneleri ve geogridler arasındaki etkileşim mekanizmasını araştırmak, agrega-geogrid arayüzünün kesme davranışını ve dane boyutunun arayüzey kesme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek için 50x50x18cm boyutunda büyük ölçekli bir kesme kutusu kullanarak 1mm/dk deformasyon hızında ve 50, 100, 150kPa normal gerilme altında bir dizi kesme kutusu testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada dikdörtgen ve üçgen açıklığa sahip iki tip geogrid ve AAG1(12.5–19 mm), AAG2(19–25 mm), AAG3(25–37.5 mm) olmak üzere üç adet tek boyutlu iri daneli zeminler test edilmiştir. Geogridlerin agregadaki güçlendirme etkisini araştırmak için, maksimum kesme mukavemeti, nihai kesme mukavemeti, düşey deformasyon ve arayüzey kayma mukavemeti verimlilik katsayısı (a) dahil olmak üzere çok sayıda parametre kullanılmıştır. Sonuçlar, a değerinin 0.78 ile 1.01 arasında değiştiğini ve AAG2'nin agrega-geogrid arayüzünün en yüksek sonucu elde ettiğini göstermiştir. Geogrid ve agrega kombinasyonları, farklı etkileşim mekanizmaları ve göçme modları sergilemiştir. Test sonuçlarına dayanarak, bir agrega gradasyonu için uygun geogrid açıklık boyutunu belirlemek için yöntem geliştirilmiştir. Eşdeğer açıklık boyutunun parçacık çapına oranı (A/D) çift eksenli geogridler için 1.30-1.71 ve üç eksenli geogridler için 1.08-1.43 olduğunda etkili kilitleme elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.

Naeini ve diğerkleri (2013) farklı incelik oranlarına sahip güçlendirilmiş siltli kumun kesme davranışını incelemek için, güçlendirmesiz ve geogrid ile güçlendirilmiş kuru kum numunesi ve siltli kum numuneleri üzerinde bir dizi büyük doğrudan kesme testi gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından bu çalışma, geogrid ile güçlendirilmiş kum zeminin ara yüzey kesme dayanımını incelemek için yapılmıştır ve kum numunelerin ince dane oranı %0 ile %45 arasında değişmiştir. Bu amaçla, bir dizi büyük doğrudan kesme testi 30x30x15cm boyutundaki kesme kutusu üzerinde sistematik olarak gerçekleştirilmiştir. Testler, her numune için 100, 200, 300 kPa'lık düşey normal gerilmelerde (σ_n) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan geogridlerin boyutları yaklaşık 0,3 x 0,3 m olarak seçilmiştir ve yatay olarak tam olarak kesme yüzeyine yerleştirilmiştir ve geogrid, kesme kutusunun orta derinliğine sabitlenmeden yerleştirilmiştir. Deformasyon hızı tüm testler sırasında 1 mm/dk olarak tutulmuştur. Test sonuçlarının analizi, geogrid donatının kum ve siltli kum numunelerinin kesme davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. Donatılı kum numunelerinin kohezyon ve sürtünme açısındaki artışın, donatısız siltli kum numunelerine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Geogrid donatısının, daha yüksek silt içeriğine sahip numunelerde daha az etkinliğe sahip olduğunu göstermiştir. Numunelerin silt içeriği arttıkça, donatısız ve donatılı numuneler arasındaki fark azalmaya başlamıştır. Silt içeriği arttıkça, geogrid donatının verimliliği azaldığı gözlemlenmiştir. Donatısız kum numuneleri için silt içeriği yaklaşık %30'a kadar yükseldikçe zemin mukavemetinin azalmıştır. %30 ile %35 arasındaki silt içeriği kesme mukavemeti önemli ölçüde etkilenmemiştir. %35'ten fazla ince malzeme ile zeminin kayma mukavemetinin biraz arttığı gözlemlenmiştir.

Kayadelen ve diğerkleri (2018), kum zemine gömülü geogrid malzemenin çekme direncine olan etkilerini küçük bir modifikasyon ile 30x60mm boyutundaki basit kesme kutusu testi düzeneği kullanılarak incelemişlerdir. Farklı relatif sıklılık ve gradasyonlu kumlu zemin üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde %50, %60, %70 relatif sıklılığa sahip zemin numuneleri kullanılmıştır. Gradasyon olarak ise 1mm eleğin üstünde ve altında kalan zemin numuneleri kullanılmıştır. Deneylerde normal gerilme değerleri 27.2 kPa, 54.4 kPa, 108.8 kPa uygulanmıştır. Testlerde, zayıf dereceli kum (SP) 0.85mm kalılığa, 1cm ızgara açıklığına sahip geogrid ile güçlendirilmiştir. Tesler sonucu, deformasyon arttığında, çekme direnci belirli bir deformasyon değerine kadar arttığı, ancak belirli bir çekme direncinden sonra deformasyon arttığında çekme direnci azaldığı gözlemlenmiştir. Bulgular, zeminin relatif sıklılığının ve

numuneye etkiyen normal gerilmenin, çekme yükündeki artışta baskın parametre olduğunu göstermiştir. Çekme kuvveti ile normal gerilmeler arasındaki ilişkinin neredeyse doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Zeminin gradasyonunun çekme kuvveti üzerinde baskın bir etkisi olduğu görülmektedir. Testler, relatif sıkılıktaki artışın çekme kuvvetinde artışa yol açtığını göstermiştir. Zemin daneciklerinin geogrid boşluklarla birbirine kenetlenmesi nedeniyle, zemin ile geogrid arasındaki arayüz sürtünmesi de zeminin iç sürtünmesinden daha fazla gözlenmiştir.

Kim ve Ha (2014), dane boyutunun geogrid güçlendirmeli/güçlendirmesiz iri daneli zeminlerin kesme davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için USCS'ye göre SW, SW ve SW olarak sınıflandırılmış maksimum dane çapı sırasıyla 4.5mm, 7.9mm ve 15.9mm olan üç tip iri daneli zemin numunesi üzerinde büyük ölçekli (300×300mm) kesme kutusu testleri gerçekleştirmişlerdir. Test aşamasında sert ve yumuşak olmak üzere 2 farklı geogrid kullanılmıştır. Test numunesinin üst kısmına bir yükleme baskı plakası dikkatlice yerleştirildikten sonra, test aşamasında hedeflenen 96, 196 ve 294kPa düşey gerilmeler uygulanmıştır. Test, 1mm/dak deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusu testi sonuçlarına göre, geogrid olmaması durumunda, maksimum dane boyutu ne kadar büyük olursa, sürtünme açısının o kadar büyük olduğu bulunmuştur. Güçlendirmesiz durumla karşılaştırıldığında, yumuşak geogrid veya sert geogrid ile güçlendirilmiş zemin numunlerinde daha küçük sürtünme açıları hesaplanmıştır. Sert geogrid ile güçlendirilmiş zeminin kohezyonu, yumuşak geogrid ile güçlendirilmiş zeminden daha büyük olarak bulunmuştur. Yumuşak ve sert geogrid ile güçlendirilen numunelerin arayüz sürtünme açıları, hiç güçlendirme bulunmayan numunelerden daha küçük olarak bulunmuştur. Maksimum dane çapı arttıkça sürtünme verimliliği azaldığı gözlemlenmiştir. Geogrid ile güçlendirilmiş numune durumunda, maksimum dane çapı daha büyüdükçe geogrid ile daneler arasındaki kohezyon artmıştır.

Sweta ve Hussaini (2018), güçlendirilmemiş ve geogrid ile güçlendirilmiş çakılın farklı kesme oranlarındaki davranışını araştırmak için bir dizi büyük ölçekli doğrudan kesme testi yapılmıştır. Pratikte, çalışma koşulları altındaki bir ray hattı, döngüsel gerilimin büyüklüğüne ve tren hızına bağlı olarak farklı kesme hızlarına tabi tutulduğu için çakıl-geogrid arayüzlerinin davranışı üzerindeki kesme hızının (Sr) rolünün araştırmak için 450x450x300mm boyutundaki kesme kutusu kullanılarak testler yapılmıştır. Bu çalışmada, 42 mm ve 65mm ortalama dane boyutuna (D₅₀) sahip çakıl ve farklı açıklık şekil ve boyutlarına sahip beş geogrid kullanılmıştır.

Testler, 35, 70, 100 ve 140 kPa normal gerilmelerde ve 2.5, 5.0 ve 10.0 mm/dk kesme hızlarında (Sr) gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar test sonuçları, çakılın kesme dayanımının kesme hızından önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur. Kesme hızı (Sr) 2.5'ten 10.0 mm/dk çıkarıldığında çakılın içsel sürtünme açısının (ϕ) 66.5 ° 'den 58 ° 'ye düştüğü bulunmuştur. Ayrıca, çakıl geogridlerle güçlendirildiğinde arayüz kesme mukavemetinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Çakıl-geogrid ara yüzün kesme dayanımının çakılın iç kesme dayanımına oranı olarak tanımlanan ara yüz verimlilik faktörü (α) 0.83 ile 1.06 arasında değişmiştir. Testten sonra numunelerin elek analizi, kesme sırasında önemli miktarda dane kırılmasının meydana geldiğini ortaya koymuştur. Marsal'ın kırılma indeksi (Bg) açısından değerlendirilen kırılma değeri, kesme hızlarının 2,5'ten 10,0 mm/dk yükselmesiyle %5,12'den %13,24'e yükseldiği gözlemlenmiştir.

Abdi ve Gonbad (2019), temas yüzeyi pürüzlülüğü ve geogrid açıklık boyutu ve zemin-geogrid etkileşimi gibi parametrelerin etkilerini araştırmak için numuneler büyük ölçekli kesme kutusu aparatları kullanılarak bir dizi kesme kutusu testine tabi tutulmuştur. Temas yüzeyi pürüzlülüğünü ve geogrid açıklık boyutunu incelemek için, farklı açıklık boyutuna sahip üç geogrid (G1, G2, G3) ile güçlendirilmiş %80 relatif sıklığa sahip iyi derecelendirilmiş ve USCS'ye göre SW ve SP olarak sınıflandırılmış numuneler kullanılarak büyük ölçekli (300 × 300 × 170mm) kesme kutusu testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 12.5, 25 ve 50 kPa'lık düşey gerilmelere tabi tutulmuştur ve 1 mm/dk deformasyon hızı uygulanmıştır. Geogrid yüzey pürüzlülüğü, tek boyutlu kum parçacıklarının yapıştırılmasıyla elde edilmiştir. Sonuçların iyi bir şekilde ifade edilebilmesi için güçlendirilmiş zemin kesme dayanımının güçlendirilmemiş zemin kesme dayanımına oranı olan etkileşim katsayısı C_i kullanılmıştır. Sonuçlar, geogrid yüzey pürüzlülüğünün artmasının zemin-geogrid arayüzündeki kesme dayanımını arttırdığını göstermiştir, kum danelerinin geogrid yüzeyine yapıştırılması yoluyla pürüzlülüğün artırılması, zemin-geogrid arayüzünde kayma mukavemetlerinin artmasıyla sonuçlanmıştır. Pürüzlendirilmiş geogrid yüzeylerle güçlendirilmiş numuneler için geliştirilmiş katsayı oranının (C_i) değerleri 1.02 ile 1.09 arasında değişmiştir. Geogrid açıklık boyutu ile kesme dayanımı artışı arasında optimal bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Stacho ve diğerleri (2020), geogrid kullanılarak güçlendirilmiş iri daneli zeminlerin laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Kayma mukavemeti özellikleri, 300x300x200mm boyutundaki büyük ölçekli bir doğrudan kesme test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Testler orijinal ve

güçlendirilmiş zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Testler, kötü derecelendirilmiş kum, zayıf derecelendirilmiş ince çakıl ve zayıf derecelendirilmiş orta çakıl olmak üzere 3 iri daneli zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Örgülü polyester geogrid ve sert polipropilen geogrid olmak üzere iki tip geogrid test edilmiştir. Testler $\sigma_n = 50, 100$ ve 150 kPa normal gerilme altında yapılmıştır. Numune 1 ve 2 için deformasyon hızı 1mm/dakika olarak seçilirken, Numune 3 için $0,5\text{mm/dakika}$ olarak seçilmiştir. Testlerin amacı, zemin-geogrid arayüzünün kayma mukavemetinin güçlendirmesiz zemin numunesinin kayma mukavemetine oranını temsil eden arayüz kayma mukavemeti katsayısını α belirlemek olarak belirlenmiştir. Orta çakıl (GP_m) üzerinde yapılan laboratuvar testlerinin sonuçları, sert polipropilen geogrid durumunda α katsayısının daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. İnce çakıl ve kum durumunda, arayüz katsayısı α 'nın değerleri birbirine benzediği kaydedilmiştir. Arayüzün kayma mukavemeti katsayısı α ve $d_{50}/h_{\text{geogrid}}$ oranı optimum geogrid kalınlığı ve ortalama dane boyutunun kullanılan her iki geogrid için ifade edilebilmesi için tanıtılmıştır. Örgülü polyester geogrid için bu değer 5.1 olarak ifade edilirken sert polipropilen geogrid için 6.4 olarak kaydedilmiştir. Böylece farklı parametrelere sahip bir geogrid ve zemin numunesi için optimum dane boyutu rahatça belirlenemebilmektedir.

Reddy ve Madhusudhan (2018), kil ve uçucukül zemin numuneleri üzerinde örgüsüz geotekstil geokompozit ve geogrid kullanarak zemin numuneleri üzerindeki güçlendirmenin etkisini incelemek için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada gerilme değer aralığı $0.5, 1.0, 1.5 \text{ kg/cm}^2$ olarak seçilerek çeşitli zemin kombinasyonlar için kesme mukavemeti analiz edilmiştir. Çalışmada $450 \times 450 \times 130\text{mm}$ boyutunda büyük kesme kutusu kullanılmıştır. Tüm kombinasyon için kayma gerilmesi normal gerilmenin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Uçucu kül kullanılan numunelerinde kesme mukavemetini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Farklı malzemeler ve katmanların kombinasyonu üzerinde yapılan çalışmalardan kil-uçucu kül tabakalarının daha yüksek kesme dayanımları sağladığı görülmüştür. Geosentetiklerin dahil edilmesinin, uçucu kül karışımları için bir anormallikle, kesme direncinin iyileştirilmesinde zararlı olduğu gözlenmiştir. Arayüzdeki kayma mukavemetinin geosentetik mukavemeti arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır.

2.9. Önceki çalışmaların değerlendirilmesi

Literatürde yapılan detaylı incelemeler ve araştırmalar sonucunda kullanılan test yöntemi, ölçek etkisi, şekil faktörü ve güçlendirme etkisi gibi granüler zeminlerin dayanım parametrelerini etkileyen birçok etken gözlemlenmiştir.

İri daneli zeminler olarak ifade edilen granüler zeminler, birçok test ekipmanı kullanılarak test edilebilip mukavemet parametrelerine ulaşılabilir. Ancak, yüksek doğrulukla gerçeğe en yakın sonuçlardan biri de kesme kutusu test cihazı kullanılarak elde edilebileceği belirtilmiştir. Palmeria ve Milligan (1989), farklı boyutlarda kesme kutusu cihazı kullanıp yaptıkları deneylerde, kutu boyutunun ortalama dane çapı 0.8mm olan kum numunelerinin içsel sürtünme açısında büyük bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Dadkhah ve diğerleri (2010), yaptıkları deneylerde büyük ve orta ölçekli kesme kutularından elde edilen sonuçlar birbirine yakınken küçük kesme kutusundan elde edilen sonucunun daha düşük olduğunu kaydetmişlerdir. Mamo ve Dey (2016), granüler zemin numunesi üzerinde yapıları deneylerde ise deformasyon hızının küçük kesme kutularında daha belirgin olduğunu ve küçük kesme kutusunun isabetli sonuçlar vermekte zorlanacağını belirtmişlerdir. Küçük ve orta ölçekli kesme kutusu test cihazı granüler zeminlerin boyutlarına göre küçük kaldığı sonucuna varılabilmektedir. Buna ek olarak da ASTM D 3080 standardı referans alındığında granüler zeminlerin testleri için uygun büyük ölçekli kesme kutusu kullanılması sonucuna doğurmuştur (Alias ve diğerleri, 2014; Zhou ve diğerleri, 2009). Danelerin şekil faktörlerinin, zeminin birçok yığın ve mukavemet özelliklerini etkilediği uzun yıllardır bilinmesine rağmen danelerin şekil faktörleri ile mühendislik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar literatürde gerektiği oranda yer kaplamamaktadır (Uzuner, 2007; Okman, 2013). Vangla ve diğerleri (2015), yuvarlaklık, küresellik, düzenlilik ve pürüzlülük gibi şekil faktör etkilerinin araştırıldığı araştırmalarında benzer şekil faktör (morfoloji) değerlerine sahip numunelerin kayma mukavemet değerlerinin dane boyutundan bağımsız olduğunu belirtirken benzer morfolojiye sahip numunelerin genel anlamda benzer sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Cerato ve Lutenege (2006), görüntü analizi ile elde edilen form faktörü, açısallık, aspect oranı ve yuvarlaklık gibi şekil faktörlerinin ele alındığı çalışmada köşeli zeminlerin numune boyutundan en çok etkilenen numuneler olduğunu belirtmişlerdir. Arasan (2010), farklı fraktal boyutlarına ve şekil faktörlerine sahip granüler zeminlerin ele alındığı çalışmada ise yuvarlaklığın artmasıyla içsel sürtünme açısında azalmanın olduğunu kaydetmiştir. Geoteknik mühendisliği uygulamalarının ilerlemesiyle, yapıların geosentetikler ile güçlendirilmesinde büyük artış söz konusu olmuştur. Geosentetiklerin dolgu temel kalınlığını azaltması ve dolgu hizmet ömrünü uzatması gibi birçok

avantaja sahip olduğundan geoteknik uygulamalarında kullanılması yaygınlaşmıştır. Bununla birlikte geosentetikler ile zemin danelerinin kenetlenme mekanizması ve davranışı literatürde sıkça yerini almıştır (Mirzaeifar ve diğerleri, 2013; Han ve diğerleri, 2017). Han ve diğerleri (2017), yaptıkları çalışmada farklı geogrid ve agrega kombinasyonlarının farklı etkileşim mekanizması ve göçme modları sergilediklerinin belirtmişlerdir. Naeini ve diğerleri (2013), geogrid donatının kum ve siltli kum numunelerinin kesme davranışını iyileştirdiğini belirtirken, silt içeriğinin artmasının güçlendirme verimliliğinde azalmaya sebep olduğunu kaydetmişlerdir. Reddy ve Madhusudhan (2018), yaptıkları çalışmada ara yüzey kayma mukavemetinin geosentetik mukavemetinin artması ile paralel bir şekilde arttığını ifade etmişlerdir. Sweta ve Hussaini (2018), geogrid ile güçlendirilmiş çakıl üzerinde yaptıkları çalışmada ise, iri daneli granüler zeminin geogridler ile güçlendirilmesi sonucunda ara yüzey mukavemet değerinde önemli artış gözlemlendiği ifade edilmiştir. Literatürdeki yapılan çalışmalar sonucunda, kesme kutusu kullanılarak zemin dayanım parametrelerinin belirlenmesi konusunda daha kapsamlı, detaylı ve birden fazla parametrenin araştırıldığı bir çalışmanın gerekliliği ortaya konulmuştur. Araştırmacılar, kesme kutusu kullanarak zemin dayanım parametrelerini etkileyen faktörleri incelerken genel olarak kısıtlı faktörler üzerinde yoğunlaştıkları tespit edilmiştir. Hem güçlendirmenin hem de danelerin şekil faktörleri gibi birden fazla faktörün zemin dayanım parametreleri üzerindeki etkisinin araştırılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte optimum donatı yerleştirme derinliğinin araştırıldığı ve bunun danelerin şekil faktörü ile yorumlandığı bir çalışmanın yapılmasının gerekliliği ortaya konulmaktadır.

Literatürdeki açık göz önüne alınarak ve bu tez çalışmasında yapılan araştırmalar aşağıda sıralanmaktadır.

- Şekli farklı olan iri daneli zemin numuneleri temin edilmiş ve bu numunelerin şekil faktörleri görüntü analizleri ile belirlenmiştir.
- Şekil faktörleri belirlenen iri daneli granüler zemin numuneleri üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri yapılarak numunelerin kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Bu deneylerle şekil faktörlerinin kayma mukavemet parametreleri üzerindeki etkileri yorumlanmıştır.
- Şekil faktörleri belirlenen iri daneli granüler zemin numuneleri CBR (Taşıma Oranı Tayini) deneyine tabi tutulmuş ve CBR değerleri belirlenmiştir. Bu deneyler ile şekil faktörünün CBR değeri üzerindeki etkileri yorumlanmıştır.

- Geosentetik donatı ile farklı şekil faktörlerine sahip iri daneli granüler zeminlerin kenetlenme mekanizmalarını incelemek için geosentetik donatı yerleştirilerek kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.
- Kenetlenme mekanizmasını etki derinliğini belirlemek için donatı kesme kutusuna farklı derinliklerde yerleştirilerek kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

Yukarıda belirtilen araştırmalar sonucunda, zeminlerin davranışını etkileyen faktörler hakkında bilgi erişimine katkı sağlayacaktır ve olası saha çalışmalarında ön fikir vermesi açısından çok önemli olacaktır.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Tez çalışmasında, şekil faktörünün zemin dayanımına olan etkisinin ve geosentetik güçlendirmeler ile kenetlenme mekanizmasına etkisinin kolaylıkla anlaşılabilmesi için farklı morfolojik özelliklere sahip olmak üzere üç granüler zemin elde edilmiştir. Elde edilen bu zeminlerin şekil faktörlerinin tayini için görüntüleme işlemi ve bu işleme ek olarak bilgisayar destekli yazılım kullanılmıştır. Bununla birlikte, şekil faktörünün geosentetik güçlendirme ile kenetlenme mekanizmasına etkisinin tayini için güçlendirme amacı ile kullanılan geogrid temin edilmiştir.

3.1.1. Granüler zemin numuneleri

Doğada bulunan zemin danelerinin çok farklı morfolojik özelliklere sahip olması ve sahip oldukları bu farklı morfolojik özelliklerin zemin kütlesinin davranışı üzerinde hâkim rol oynadığı bilindiğinden farklı morfolojik özelliklere sahip 3 zemin numunesi elde edilmiştir.

3.1.1.1. Numune 1

Tez çalışma kapsamında, dolgu olarak kullanılabilen zemin numunesi morfoloji etkisinin incelenmesi için tercih edilmiştir. Numune 1 zemin numunesi, Mersin il sınırları içerisinde bulunan Toroslar bölgesindeki Camili köyünde faaliyetlerini sürdüren ve Şekil 3.1’de görüntüsü mevcut olan taş ocağından temin edilmiştir.



Şekil 3.1. Taş ocağı

Çalışma kapsamında temin edilmiş ve Şekil 3.2’de açıkça gösterilmiş Numune 1 0-5mm, 5-12mm ve 12-15mm olmak üzere 3 farklı gradasyon şeklinde elde edilmiştir. Numune 1’e ait üç gradasyon laboratuvar ortamında ASTM D 422-03 standardı doğrultusunda elek analizi testine tabi tutulmuştur. Elek analizi sonucu yüzdeye geçen değerleri hesaplanan malzemeler dolgu malzemesi olarak tercih edilen ve ASTM D 1241-00 standardında açıkça belirtilen tip-I, gradasyon C’ye ait alt ve üst sınırlar esas alınarak karışım oranı belirlenmiştir. Belirlenen karışım oranı esas alınarak, üç gradasyona ait agregalar karıştırılmıştır. Karıştırılan numuneler, karışım oranının doğruluğunun tespiti için tekrardan ASTM D 422-03 standardı esas alınarak elek analizine tabi tutulmuştur. Elek analizi sonucunda tip-I, gradasyon C’ye ait alt ve üst sınırların yakalandığı tespit edilmiştir ve dolayısıyla istenilen gradasyon elde edilmiştir. Elde edilen gradasyona ait Numune 1 ASTM D 2487-11 standartına göre iyi derecelendirilmiş çakıl (GW) olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.2. Numune 1

3.1.1.2. Numune 2

Tez çalışma kapsamında, dolgu olarak kullanılabilen Numune 1 zemin numunesine ek olarak Numune 2 zemin numunesi de morfoloji etkisinin incelenmesi için tercih edilmiştir. Numune 2 zemin numunesi Çukurova Bölgesi’ndeki bir taş ocağından kırma taş agregası şeklinde temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu Numune 2 zemin numunesi Şekil 3. 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Numune 2

Numune 2 zemin numunesi için, Numune 1 zemin numunesi için yapılan tüm işlemler tam olarak aynı şekilde yapılmıştır. Elek analizi yapıp, dolgu olarak tercih edilen tip-I, gradasyon C değerlerine uygun hale getirilmiş ve kontrol edilmiştir.

3.1.1.3. Numune 3

Tez çalışma kapsamında, dolgu olarak kullanılabilen Numune 1 ve 2 zemin numunesine ek olarak Numune 3 zemin numunesi de morfoloji etkisinin incelenmesi için tercih edilmiştir. Numune 3 zemin numunesi Adana Alparsalan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi ait yerleşkenin yakınlarında ticari amaçlı faaliyet gösteren bir işletmeden doğal dere agregası şeklinde temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu Numune 3 zemin numunesi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

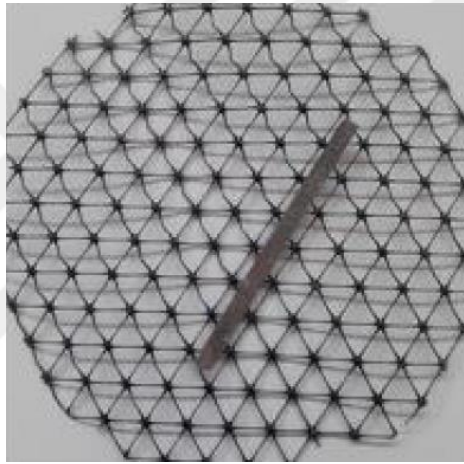


Şekil 3.4. Numune 3

Numune 3 zemin numunesi için, Numune 1 ve 2 zemin numuneleri için yapılan tüm işlemler tam olarak aynı şekilde yapılmıştır. Elek analizi yapıp, dolgu olarak tercih edilen tip-I, gradasyon C değerlerine uygun hale getirilmiş ve kontrol edilmiştir.

3.1.2. Geogrid donatı

Tez çalışma kapsamında, dolgu olarak kullanılan zemin numunelerinin sahip oldukları şekil faktörleri ile geogrid güçlendirme kenetle mekanizmasına ait ilişkinin net olarak anlaşılması için eşkenar üçgen deliklere sahip ve bir kenar uzunluğu 40mm olan üç yönlü (triaxial) geogrid ticari amaçlı faaliyetini sürdüren bir firmadan temin edilmiştir (Ok, 2018). Temin edilen bu geogride ait görüntü Şekil 3.5'te verilirken geogride ait özellikler ise Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Geogrid donatı (Ok, 2018)

Tablo 1.1. Geogrid genel özellikleri

Bileşenler	Geogrid
Hammadde	PP
Açıklık Şekli	Üçgen
Kenar Uzunlukları (mm/mm/mm)	40/40/40
Kalınlık (mm)	1.1
Çekme Dayanımı (%0.5 deformasyonda) (kN/m)	225

3.1.3. Görüntü işleme ekipmanları

Tez çalışma kapsamında kullanılan numunelere ait şekil faktörlerinin yüksek doğrulukla ve net bir şekilde elde edilmesi için Şekil 3.6'da görüntüsü bulunan yüksek çözünürlüklü görüntü alma kapasitesine sahip Canon EOS 6D 24-105mm DSLR Fotoğraf Makinesi kullanılmıştır. Ek olarak, odak mesafesi 24mm (geniş) ve 105mm (dar) olarak tasarlanmış kit lense ait görüntü Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Görüntü işleme aşamasında, görüntülerin daha net, değer kaybına

uğramadan ve gölgeye maruz kalmadan ulaşılması için kullanılan halojen lamba olan ACE ADVANCE 500 ait olan görüntü Şekil 3.8’de sunulmuştur. Tüm ekipmanların bir düzenek olarak hazırlandığı görüntü ise Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Fotoğraf makinesi



Şekil 3.7. Kit lens



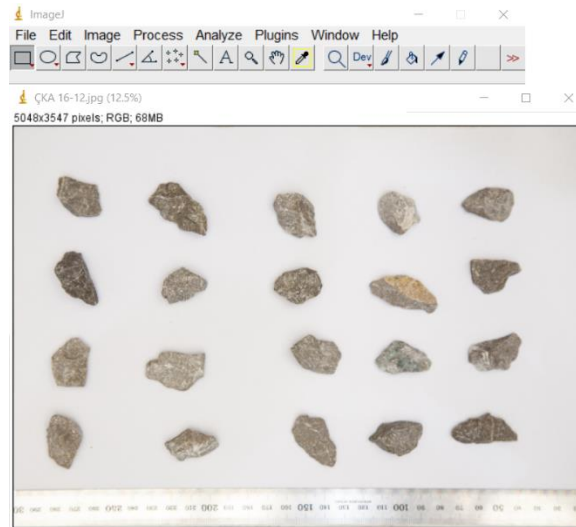
Şekil 3.8. Halojen lamba



Şekil 3.9. Görüntü işleme düzeneği

3.1.4. Görüntü işleme yazılımı

Tez çalışması kapsamında, Java programlama dilinde yazılmış olup açık erişime sahip olan ve isteğe bağlı olarak kodlar üzerinde değişiklikler ve düzeltmeler yapılabilinen ImageJ yazılımı elde edilen görüntülerin işlenmesi ve analizi için kullanılmıştır. Şekil 3.10’da genel görüntüsü verilmiş olan ImageJ yazılımı 8, 16 ve 32 bit formatındaki imajları görüntüleme, işleme ve analiz işlemlerini yapabilmektedir. Yazılım, kullanıcı tarafından piksel ile uzunluk değer oranı belirlendikten sonra piksel değerlerine ait alan, çevre, uzunluk ve istatistikleri hesaplayabilmektedir. Tez çalışması kapsamında ise ImageJ yazılımına ait birtakım avantaj kullanılarak zemin numunelerine ait şekil faktörlerine ImageJ yazılımından elde edilen alan, çevre vb. gibi değerler kullanarak ulaşılması mümkün olacaktır.



Şekil 3.10. ImageJ yazılımına ait genel görüntü

3.2. Yöntem

Tez çalışması kapsamında kullanılan üç farklı zemin numunesinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için elek analizi, dane birim hacim ağırlık, su emme, kompaksiyon, Los Angeles, yassılık indeksi deneyleri yapılmıştır. Yine bu kapsamda, zemin numunelerinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi için danelerin yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilerek bu fotoğraflar üzerinde sayısal görüntü işlemleri yapılmıştır. Ayrıca elde edilen zemin numunelerin kayma mukavemetleri büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir. Bunların dışında, donatı ve zemin arasındaki kenetlenme mekanizmasının anlaşılması için geogrid ile güçlendirilmiş zemin numuneleri üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusunun üst ve alt kutularına farklı derinliklerde geogrid yerleştirilerek, geogrid ile zemin arasındaki kenetlenme mekanizmasının etki derinliği tayin edilmiştir ve optimum geogrid yerleştirme derinliğini saptanmıştır. Bunlara ek olarak taşıma gücü oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır.

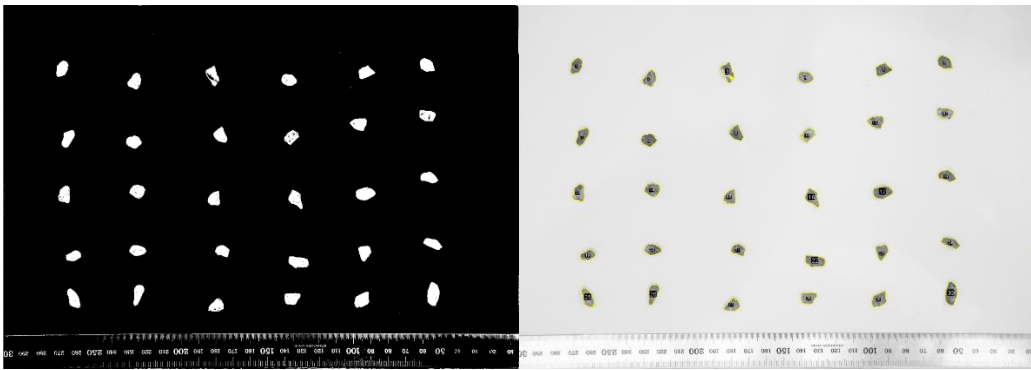
3.2.1. Görüntü işleme için yapılan işlemler

Sayısal görüntü işleme, (Digital Image Processing) sahip olunan görüntülerin bilgisayar destekli programlar aracılığı ile sayısal olarak işlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Tez çalışması kapsamında elde edilen, üç farklı granüler zemin numuneleri sayısal görüntü işlemenin ilk basamağı olan fotoğraflanma işlemi için hazırlanmıştır. Fotoğraf çekimi öncesinde zemin numunelerini temsil eden danelerin yüzeylerindeki toz kalıntıları ve tortular daha net ve doğru sonuçlar almak için yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Fotoğraf çekim işlemi ve bu işleme ait düzeneğin de yer aldığı görsel Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Fotoğraf çekim işlemine ait düzenek

Açık kaynak kodlu ve görüntü işleme fonksiyonları zengin olan sayısal görüntü işleme programı ImageJ, görüntüleri elde edilen üç zemin numunesi üzerinde kullanılmıştır. Birçok sayısal görüntü işleme programı olmasına rağmen, ImageJ hızlı, kolay, istenilen birimde değer elde etme, alan ve çevre değerlerine ulaşma ve elde edilen değerleri excel formatında temin etme gibi avantajlara sahip olduğu için tercih edilmesi uygun görülmüştür. Şekil 3.12’de ImageJ programı kullanılarak analizi yapılmış zemin numunesinin analiz sırasındaki görüntüleri mevcuttur.



Şekil 3.12. ImageJ programı kullanılarak yapılan sayısal görüntü işleme aşamaları

Zemin numunelerinin analizine ait sayısal görüntü işleme basamakları aşağıdaki gibi uygulandığı durumda en efektif şekilde yararlanılabileceği sonucuna varılmıştır.

- Open Image

- Analyze / Set Scale
- Clear Outside
- Image / Type / 8 bit
- Image / Adjust / Threshold
- Wand / Ctrl+T
- Analyze / Measure (Ctrl+M)

Yapılan bu işlemler sonucunda, zemin numunelerine ait fraktal boyutlarına ulaşılmıştır.

3.2.2. Dane birim hacim ağırlık deneyleri

Bir cismin hacim ağırlığı olarak veya bir cisme ait ağırlığın aynı cismin hacmine oranı olarak tanımlanan dane birim hacim ağırlık değeri genel olarak zeminler için 24 ila 28 kN/m³ arasındaki değerlere sahiptir (Uzuner, 2007). Tez çalışma kapsamında, üç farklı iri daneli zemin numunelerine ait dane birim hacim ağırlık değerlerini belirlemek için dane çapı 4.75 mm'den küçük daneler (ince daneli) için piknometre, dane çapı 4.75 mm'den büyük daneler (kaba daneli) için birim hacim ağırlık kovası deneyleri yapılmıştır. Tez çalışma kapsamında yapılan piknometre deneylerinde ASTM C 128 – 01 standardı esas alınırken, birim hacim ağırlık kovası deneyinde ise ASTM C 127 – 01 baz alınarak yapılmıştır. Üç farklı granüler zemin numunelerine ait dane birim hacim değerleri Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Granüler zeminlerin dane birim hacim ağırlıkları

Malzeme	Dane birim hacim ağırlık (kN/m ³)	
	İri dane	İnce dane
Numune 1	26.59	26.77
Numune 2	26.58	26.60
Numune 3	26.98	27.30

3.2.3. Su emme deneyi

Zemin danelerinin içerisinde bulunan boşlukların su ile doymun hale getirilmesi ile zemin içerisinde bulunan agregaların su emme kapasiteleri belirlenebilir. Yol dolgularında kullanılmak üzere temin edilen agregaların su emme kapasitelerinin belirli sınırlar içerisinde olmasının gerektiği Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (2013) açıkça belirtilmiştir. Üç farklı zemin numunelerine ait su emme kapasitelerini belirlemek amacı ile ASTM standardı esas alınarak dane çapı 4.75 mm'den küçük daneler (ince agrega) ve dane çapı 4.75 mm'den büyük daneler (kaba agrega) için ayrı ayrı yapılmıştır. Tez çalışma kapsamında araştırılan ince

danelerin su emme kapasiteleri, ASTM C 128 – 01 standardı esas alınmıştır. Su emme kapasitesi araştırılan malzeme ilk olarak suya doymun hale gelmesi amacı ile suda bekletilmiş sonrasında sıcak hava yardımıyla yüzey kuru doymun hale getirilerek tartılmıştır. Malzeme daha sonra 24 saat etüvde tutularak, kuru ağırlığı tartılmıştır ve elde edilen değerler neticesinde su emme değeri hesaplanmıştır. Tez çalışma kapsamında araştırılan iri danelerin su emme kapasiteleri, ASTM C 127 – 01 standardı esas alınmıştır. İri daneli agregalar da tıpkı ince daneli agregalar gibi suya doymun hale gelmesi amacı ile suda bekletilmiştir. Sonrasında malzemelerin yüzeyleri kuru bir havlu yardımıyla kurutularak yüzey kuru doymun hale getirilerek tartılmıştır. Daha sonra malzeme etüvde 24 saat bekletilerek kuru ağırlığı tartılmıştır ve elde edilen değerler neticesinde su emme değeri hesaplanmıştır. Üç farklı granüler zemin numunelerine ait su emme değerleri Tablo 3.3’te sunulmuştur.

Tablo 3.3. Granüler zeminlerin su emme değerleri

Malzeme	Su emme (%)	
	İri dane	İnce dane
Numune 1	0.55	1.32
Numune 2	0.83	3.31
Numune 3	0.67	1.95

3.2.4. Los Angeles deneyi

Los Angeles deneyi, agreganın aşınmaya ve parçalanmaya karşı olan direncinin ölçüsü olarak ifade edilmektedir. Los Angeles deneyi, Los Angeles makinesi içerisinde bulunana danelerin belirli sayıda çelik küre ile birlikte tambur içerisinde dakika 30-33 devirle toplam 500 devir dönmesi sonunda malzemenin parçalanması ve aşınması prensibine dayanmaktadır. Yol dolgularında kullanılmak üzere temin edilen agregaların Los Angeles değerinin (parçalanmaya karşı direncinin) belirli sınırlar içerisinde olmasının gerektiği Karayolları Teknik Şartnamesi’nde (2013) açıkça belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında, elde edilen üç farklı iri daneli zemin numunesi için ASTM C 131- 03 standardı esas alınarak Los Angeles deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde malzemelerin aşınma ve parçalanma oranlarına ait değerler ile ilgili kıyaslamalar yapılmıştır. Los Angeles deney cihazı Şekil 3.13.’de verilmiştir. Üç farklı granüler zemin üzerinde gerçekleştirilen Los Angeles deney sonuçları yüzde değer kaybı cinsinden Tablo 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Los Angeles deney cihazı

Tablo 4.4. Granüler zeminlerin parçalanma dirençleri

Malzeme	Gradasyon B	Gradasyon C	Ortalama LA kaybı (%)
Numune 1	27.7	26.6	27.1
Numune 2	29.2	27.5	28.3
Numune 3	18.1	18.8	18.4

3.2.5. Yassılık indeksi deneyi

Yassılık indeksi deneyi, belirli elek boyutlarına sahip agrega danelerinin; uzunluğun kalınlığa, genişliğin kalınlığa veya uzunluğun genişliğe oranlarını belirlemek için yapılmaktadır. Yassılık indeksi ASTM D4791 – 10'e göre yassı agrega danelerinin ağırlığının, tüm agregaların ağırlığına oranı olarak ifade edilmektedir. Yol dolgularında kullanılmak üzere temin edilen agregaların yassılık indeksi değerinin belirli sınırlar içerisinde olmasının gerektiği Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (2013) açıkça belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen üç farklı iri daneli granüler zemin için TS 9582 EN 933-3 standardına göre yassılık indeksi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde, malzemenin yassılık değerlerini ifade eden oranlar bulunmuştur. Bu değerler Tablo 3.5'te verilmiştir. Yassılık indeksinde kullanılan elek ekipmanları Şekil 3.14'te açıkça gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Granüler zeminlerin parçalanma dirençleri

Malzeme	Yassılık indeksi (%)
Numune 1	9.93
Numune 2	9.87
Numune 3	6.71



Şekil 3.14. Yassılık indeksi deneyinde kullanılan elekler (kare göz açıklıklı elekler, silindirik çubuklu elekler)

3.2.6. Kompaksiyon deneyleri

Kompaksiyon, malzemelerin sıkıştırılarak daneler arasındaki boşluğun mümkün oldukça azaltılması prensibine dayanır. Kompaksiyon deneyinde optimum su içeriği değerinin belirlenmesi ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin belirlenmesi esas alınmaktadır. Optimum su içeriğinin, farklı su içeriklerinde sıkıştırılan malzemenin üzerinde gerçekleştirilen bir dizi deney ile belirlenmesi mümkündür. Kompaksiyon deneyleri ile maksimum sıkıştırılmayı ifade eden su içeriği (optimum su içeriği) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenir (Das ve Sobhan, 2010; Uzuner, 2007). Kompaksiyon deneyinde, zeminlerin standart bir kap içerisine sıkıştırılabilmesi için iki yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan biri zemin üzerine sabit ve belirli bir yükseklikten sabit sayıda ağırlık düşürülerek yapılırken, diğeri titreşim uygulayarak zemini sıkıştıran bir ekipman yardımıyla gerçekleştirilir. Yol dolgularında ve arazi çalışmalarında, granüler zeminler büyük oranda titreşim veren araçlar kullanılarak sıkıştırılmaya tabi tutulmaktadır. Bu sebeble, bu tez çalışması kapsamında, üç iri daneli zemin numunesinin kompaksiyon parametrelerini belirlemek için titreşimli tokmak ile kompaksiyon deneyi (ASTM D 7382) yapılarak kompaksiyon parametreleri olan γ_{kmaks} ve ω_{opt} değerleri belirlenmiştir.

Titreşimli tokmak ile kompaksiyon deneyi (ASTM D 7382), ilgili standarda göre deney numunesinin en büyük dane boyutuna göre 2 farklı metotta yapılmaktadır. ASTM D 7382 standardı göz önüne alındığında, titreşimli tokmak ile kompaksiyon deneyi, numuneye ait en büyük dane çapı boyutuna göre 2 farklı yöntem ile yapılması mümkündür. Tez çalışmasındaki, deney numunesinin en büyük dane çap boyutu yaklaşık 15 mm olduğundan, ilgili standartta bulunan Metot A yöntemi esas alınarak kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Deney, deney kabına 3 tabaka halinde ve her tabakaya standartta belirtilen özelliklere sahip tokmak ile (Frekans, 22-55 Hz; darbe enerjisi, 12 m.N) 60 saniye süresince titreşim ve ek yük vererek

sıkıştırma gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15). Tez çalışması kapsamında, deney farklı su içeriklerinde tekrarlanarak kompaksiyon eğrisi çizilmiştir ve elde edilen eğriden optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.15. Titreşimli tokmak ile kompaksiyon

Morfolojik özellikleri farklı olan üç iri daneli granüler zemin numuneleri üzerinde titreşimli tokmak yöntemi ile yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon parametreleri Tablo 3.6’da sunulmuştur.

Tablo 6.6. Numunelerin kompaksiyon parametreleri

Malzeme	Kompaksiyon Parametreleri	
	ω_{opt} (%)	γ_{kmaks} (kN/m ³)
ÇKA	6.86	22.21
YKA	7.3	21.24
TYA	6.71	22.47

3.2.7. Kesme kutusu deneyi

Tez çalışma kapsamında 150 mm uzunluğa, 150 mm genişliğe ve 120 mm yüksekliğe sahip olan büyük ölçekli bir kesme kutusu ekipmanı kullanılarak ASTM D 3080 standardı esas alınarak zeminlerin kayma mukavemetleri ve kayma mukavemeti açılarının bulunması için kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üzerinde deneyleri gerçekleştirilen her bir zemin numunesi için üç farklı normal gerilme (σ) altında deneyler yapılmıştır. Normal gerilme seviyeleri, 21.8 kPa, 43.6 kPa ve 87.2 kPa olarak seçilmiştir. Her deney malzemesi için 1 mm/dk deformasyon hızı altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında, deney aşamalarına ait anlık olarak kayma mukavemeti, düşey ve yatay deplasman değerleri bilgisayar tarafından kaydedilerek test edilen numuneye ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Deneylerde göçmenin belirgin olduğu pik değere ait kayma gerilmesi, maksimum

kayma gerilemesi olarak alınmıştır. Tez kapsamında yapılan bütün büyük ölçekli kesme kutusu deneylerinde zemin numunesi optimum su içeriğine getirilmiş ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının sağlayacak şekilde tireşimli tokmakla kesme kutusuna tabaka tabaka yerleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, optimum su içeriğindeki ve maksimum birim hacim ağırlığı sağlanmış üç iri daneli granüler zemin numuneleri üzerinde donatılı ve donatısız kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Temiz kum ve çakıl gibi kohezyonsuz zemin sınıfına giren, granüler zemin numunelerinde kohezyon değerinin (c) sıfır olduğu bilinmektedir (Uzuner, 2007). Tez kapsamında, iyi derecelendirilmiş çakıl (GW) sınıfında bulunan üç iri daneli granüler zemin numunelerinin kohezyon değerlerinin sıfıra yakın olduğu bilindiğinden ve içsel sürtünme açısı değerinin kohezyon değerinden daha önemli ve etkili bir kayma dayanım parametresi olduğundan dolayı büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen göçme zarflarının başlangıç noktaları orijin olarak kabul edilmesi uygun görülmüştür. Dolayısıyla, içsel sürtünme açısı değerleri göçme zarfının başlangıç noktasının orijin kabul edildiği durumdan elde edilmiş ve yorumlanmıştır (Anubhav ve Basudhar, 2010; Bahaaddini ve diğerleri, 2016; Infante ve diğerleri, 2016; Bahaaddini, 2017; Stathas ve diğerleri 2017). Bu deneylere ait işlemler ve prosedürler aşağıdaki başlıklarda açıklanmıştır. Şekil 3.16'da kesme kutusu test cihazına ait genel görüntü verilmiştir.



Şekil 3.16. Kesme kutusu test cihazı

3.2.7.1. Donatısız deneyler

Optimum su içeriğine getirilmiş üç farklı iri daneli granüler zemin numuneleri bir güçlendirme (donatı) içermeyen maksimum birim hacim ağırlığı sağlanacak şekilde kesme kutusuna

yerleştirilmiş ve deneye tabi tutulmuştur. Deney aşamasına ait işlem basamakları aşağıda sunulmuştur.

- Karışım oranlarına göre zemin numuneleri hazırlanmıştır.
- Hazırlanan zemin numuneleri optimum su içeriği değerlerine su ile karıştırılarak getirilmiştir.
- Kesme kutusu boyut ve hacim değerleri göz önüne alınarak maksimum birim hacim ağırlık sağlanacak şekilde tabaka tabaka olarak titreşimli tokmak ile sıkıştırılarak kesme kutusuna yerleştirilmiştir.
- Zeminin su içeriğinin kontrolü için zeminden numuneler alınmıştır.
- Sıkıştırılmış zemin numunesinin, yüzey pürüzsüzlüğü su terazisi yardımı ile kontrol edilmiştir.
- Hazırlanan zemin numuneleri kesme kutusu test cihazına aktarılmıştır.
- Zemin numuneleri 21.8 kPa, 43.6 kPa ve 87.2 kPa normal gerilme altında test edilmiştir.
- Zemin numunelerine ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir.

Donatısız (güçlendirmesiz) kesme kutusu deneylerine ait aşamalarına ait görseller Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Donatısız kesme kutusu deney aşamaları

3.2.7.2. Donatılı (güçlendirmeli) deneyler

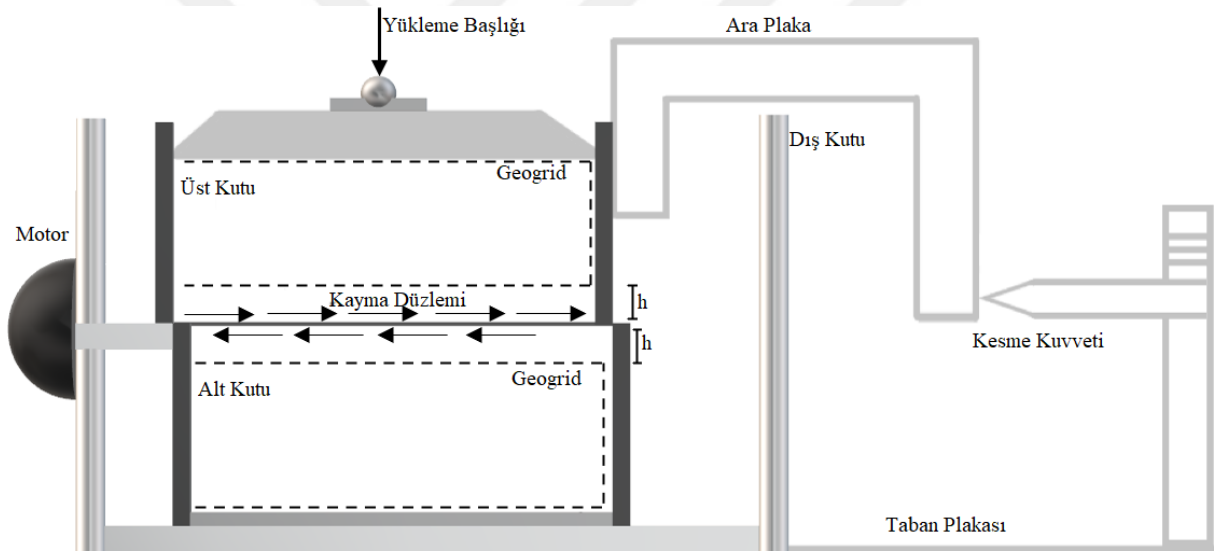
Optimum su içeriğindeki üç farklı iri daneli granüler zemin numuneleri, eşkenar üçgen deliklere sahip ve bir kenar uzunluğu 40mm olan üç yönlü (triaxial) bir geogrid (güçlendirme) kullanılarak kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. Donatılı kesme kutusu deneylerinde, donatısız deneylerden farklı olarak kesme kutusununa ait alt kutuya zemin numunesi yerleştirilmeden önce geogrid donatı yerleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen granüler zemin numunelerinin maksimum dane çapı D_{max} olarak sembolize edilmiştir. Donatının kesme düzeyine uzaklığı h olarak sembolize edilirken güçlendirme derinliği ifade edilirken h ile D_{max} oranlanarak verilmiştir. Donatılı (güçlendirmeli) kesme kutusu deneylerine ait aşamalar Şekil 3.18’de verilmiştir. Granüler zemin numunelerine ait geogrid güçlendirme derinlik bilgilerinin de bulunduğu deney tablosu Tablo 3.7’de gösterilmiştir. Şekil 3.19’da ise geogrid yerleşim aşamasına ait şematik gösterim bulunmaktadır.

Tablo 7.7. Granüler zemin numunelerine ait deney tablosu

Malzeme	Güçlendirme derinliği (h/D _{max})	Geogrid yerleşimi
Numune 1	-	-
	0	Kayma düzleminde
	0.5	Kayma düzleminin altında ve üstünde
	1.0	
	2.0	
	3.0	
Numune 2	-	-
	0	Kayma düzleminde
	0.5	Kayma düzleminin altında
	1.0	
	2.0	
	3.0	
Numune 3	-	-
	0	Kayma düzleminde
	0.5	Kayma düzleminin altında
	1.0	
	2.0	
	3.0	



Şekil 3.18. Donatılı kesme kutusu deney aşamalar



Şekil 3.19. Geogrid yerleşimine ait şematik gösterim

3.2.8. Taşıma oranının tayini (CBR)

Zeminlere ait taşıma gücü kapasitesinin yorumlanması ve ifade edilmesi için taşıma oranı değeri kullanılmaktadır. Taşıma oranı değeri, yol dolgularının tasarımında sıklıkla kullanılan bir değer olup CBR deneyi ile bu değere ulaşmak mümkündür. Deney bir pistonun 1.25 mm/dak. hız ile daha önceden sıkıştırılmış olan zemin numunesine batırılması sonucunda elde edilen yük-deplasman bağıntısı kullanılarak taşıma oranının hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem, laboratuvar ortamında sıkıştırılan numuneleri esas alarak yol alt tabaka, alt temel ve temel malzemelerinin taşıma oranının tayininin belirlenmesini kapsar. Yük-deplasman değerleri 1.25 mm'lik deplasmanda 0.84 kN, 2.5 mm'lik deplasmanda 13.2 kN ve

5.00 mm'lik deplasmanda 20 kN'ye denk gelen ilişkilerde taşıma oranı %100 olarak ifade edilir (Uzuner, 2007).

CBR deneyi yapılırken ASTM D 1883 – 99 standardı esas alınmıştır. Tez kapsamında, elde edilen üç farklı iri daneli granüler zemin üzerinde titreşimli tokmak kullanılarak yapılan kompaksiyon deneyi sonrasında elde edilmiş optimum su içeriği değerine göre numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra bu optimum su içeriği değeri ve maksimum birim hacim ağırlığı değeri elde edilmiş numuneler CBR deney kasasına yerleştirilmiştir ve CBR deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonrasında elde edilen yük-deplasman bağıntısından, taşıma oranı tayini bulunmuştur. CBR deney kalıbı ve deney cihazı Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. CBR kalıbı ve deney cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu başlık altında çalışmada yer alan üç farklı iri daneli granüler zemin numunelerinin fiziksel 12ve geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için elek analizi, görüntü analizi, dane birim hacim ağırlık, su emme, kompaksiyon, Los Angeles, yassılık indeksi, kesme kutusu deneyleri ve CBR deneyleri yapılmıştır. Deney sonrası malzemelerin fiziksel özellikleri, şekil faktörleri, kompaksiyon özellikleri, kayma mukavemeti ve taşıma gücü oranları olmak üzere 5 başlık altında incelenmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan üç farklı iri daneli granüler zeminlerin görüntüleri yüksek çözünürlükte alınmıştır. Alınan bu görüntüler, sayısal görüntü işleme aşamalarına tabi tutulmuştur ve zemin danelerine ait morfolojik özellikler ortaya çıkartılmıştır. Ortaya çıkan bu morfolojik özelliklerin ışığında, üç farklı şekil yapısına sahip zemin numunelerinin olduğu tespit edilmiştir. Morfolojik özelliklerin, zemin bütünü genel performansı üzerinde etkili rol oynayacağı düşünülerek iki grup şeklinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Morfolojik özellikler ile zemin dayanımı arasındaki ilişkinin açık ve net bir şekilde anlaşılması ve açıklanabilmesi için üç farklı morfolojik özelliklere sahip iri daneli granüler zemin numuneleri üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donatı ve zemin arasındaki kenetlenme mekanizmasının anlaşılması için geogrid ile güçlendirilmiş zemin numuneleri üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusunun üst ve alt kutularına farklı derinliklerde geogrid yerleştirilerek, geogrid ile zemin arasındaki kenetlenme mekanizmasının etki derinliği tayin edilmiştir ve optimum geogrid yerleştirme derinliğini saptanmıştır. Bunlara ek olarak taşıma gücü oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır.

4.1. Danelerin şekilsel özelliklerinin belirlenmesi

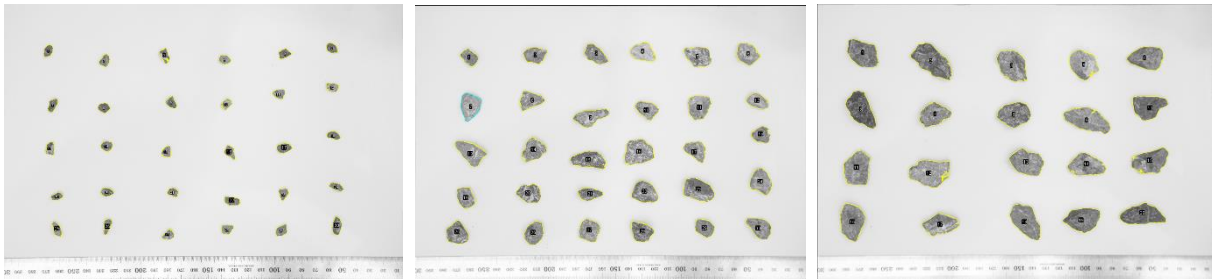
Danelerin uzun, orta ve kısa kenarları sırasıyla L, I, ve S ile ifade edilirken, alan ve çevre sırası ile A ve P olarak ifade edilmektedir. Cox (1927), tarafından geliştirilen ve danelerin sadece alan ve çevre değerleri kullanılarak zemin danelerine ait yuvarlaklık değerleri elde edilmiştir. Cox (1927), tarafından geliştirilen ve danelerin yuvarlaklık değerlerine göre zeminlerin yuvarlaklık sınıfları hakkında bilgi veren abak Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Mora ve Kwan (2000), tarafından önerilen ve danelerin uzun ve orta kenar uzunluklarını oranlayarak zemin danelerine ait yassılık

değeri elde edilirken, Kuo ve diğerleri (2000), tarafından önerilen ve yine danenin uzun ve orta kenar uzunluklarını oranlayarak zemin danelerine ait aspect oranı değerleri elde edilmiştir. Sympatec (2008), tarafından geliştirilen ve denenin alan ve çevre değerleri kullanılarak zemin danelerine ait küresellik değerleri elde edilmiştir. Farklı gradasyonlardan (0-5 mm, 5-12mm, 12-15mm) alınmış görüntü örnekleri üzerinde gerçekleştirilen sayısal görüntü işleme analizi sonucunda elde edilen şekil faktör değerleri karışım oranları göz önüne alınarak zemin bütününe temsil eden şekil faktör değerlerine ulaşılmıştır.

Tez çalışma kapsamında, dane şekil faktörlerinin belirlenmesi için sayısal görüntü işleme analizleri yapılmıştır. Zemin danelerine ait şekil faktörlerinden olan yuvarlaklık, yassılık, aspect oranı ve küresellik zemin danelerine ait görüntüler üzerinde bilgisayar destekli ve açık yazılımlı ImageJ programı ile analizi yapılarak elde edilen alan, çevre, kısa ve orta kenar uzunluk değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

4.1.1. Numune 1'in şekilsel özellikleri

Tez çalışma kapsamında, Numune 1'e ait danelerin yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiştir. Numune 1 ait üç farklı gradasyon halinde sayısal görüntü işleme sonucunda alınan görüntüler Şekil 4.1'de verilmiştir. Elde edilen fotoğraflar üzerinde gerçekleştirilen sayısal görüntü işlemlerinden sonra zemin danelerine ait alan (A), çevre (P), orta kenar uzunluğu (I) ve uzun kenar uzunluğu (L) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler Tablo 4.1'de verilmiştir. Elde edilen bu fraktal boyut değerleri kullanılarak, zemin danelerine ait şekil faktörlerinden olan yuvarlaklık, yassılık, aspect oranı değeri ve küresellik değerleri de Tablo 4.1'de verilmiştir.



Tablo 8.1. Sayısal görüntü işleme sonucunda alınan Numune 1'e ait görüntüler

Tablo 4.1. Numune 1'e ait fraktal boyutları ve şekil faktörleri

No	Numune 1							
	Alan (A) (mm ²)	Çevre (P) (mm)	I (mm)	L (mm)	Yuvarlaklık *	Yassılık **	Aspect Oranı ***	Kürsellik ****
N1	50.79	34.27	3.04	3.74	0.54	0.81	1.23	0.74
N2	67.34	36.58	3.65	4.09	0.63	0.89	1.12	0.80
N3	50.82	35.47	3.51	4.67	0.51	0.75	1.33	0.71
N4	55.77	31.89	3.99	2.95	0.69	1.36	0.74	0.83
N5	56.99	32.72	4.23	3.17	0.67	1.34	0.75	0.82
N6	50.86	34.19	3.41	3.32	0.55	1.03	0.97	0.74
N7	49.43	30.04	3.88	4.67	0.69	0.83	1.20	0.83
N8	60.27	35.65	4.13	3.30	0.60	1.25	0.80	0.77
N9	58.26	31.89	3.51	3.74	0.72	0.94	1.07	0.85
N10	43.04	35.01	3.86	4.09	0.44	0.94	1.06	0.66
N11	50.77	34.23	4.61	2.85	0.54	1.62	0.62	0.74
N12	47.10	28.99	3.78	3.07	0.70	1.23	0.81	0.84
N13	50.70	36.14	3.04	4.42	0.49	0.69	1.46	0.70
N14	68.48	49.85	3.99	3.52	0.35	1.13	0.88	0.59
N15	78.46	41.02	3.14	3.97	0.59	0.79	1.26	0.77
N16	53.54	32.57	3.89	4.67	0.63	0.83	1.20	0.80
N17	62.24	33.97	5.01	2.85	0.68	1.76	0.57	0.82
N18	46.80	29.17	4.37	2.95	0.69	1.48	0.67	0.83
N19	37.02	28.98	3.99	2.37	0.55	1.68	0.59	0.74
N20	56.04	31.23	4.61	2.60	0.72	1.77	0.56	0.85
N21	47.09	28.78	4.13	3.05	0.71	1.36	0.74	0.85
N22	60.30	35.15	5.03	2.75	0.61	1.83	0.55	0.78
N23	52.06	31.27	3.65	4.19	0.67	0.87	1.15	0.82
N24	46.55	31.18	4.47	2.85	0.60	1.57	0.64	0.78
N25	53.16	39.30	3.27	4.42	0.43	0.74	1.35	0.66
N26	48.62	32.49	3.38	4.77	0.58	0.71	1.41	0.76
N27	45.63	30.81	3.99	3.42	0.60	1.17	0.86	0.78
N28	43.04	36.54	4.13	3.07	0.40	1.34	0.74	0.64
N29	76.13	39.99	3.65	3.64	0.60	1.00	1.00	0.77
N30	77.42	38.69	3.38	5.57	0.65	0.61	1.65	0.81
N31	112.86	44.31	5.72	8.32	0.72	0.69	1.45	0.85
N32	161.12	54.30	8.15	6.32	0.69	1.29	0.78	0.83
N33	174.34	60.13	8.73	8.09	0.61	1.08	0.93	0.78
N34	257.57	85.65	8.76	8.78	0.44	1.00	1.00	0.66
N35	220.68	106.06	9.11	7.86	0.25	1.16	0.86	0.50
N36	209.22	67.73	7.67	6.81	0.57	1.13	0.89	0.76
N37	257.58	85.32	7.51	6.35	0.44	1.18	0.85	0.67
N38	176.57	67.51	8.49	8.55	0.49	0.99	1.01	0.70
N39	226.86	74.97	12.04	7.60	0.51	1.58	0.63	0.71
N40	164.02	62.05	7.77	7.63	0.54	1.02	0.98	0.73
N41	248.33	67.77	8.49	8.68	0.68	0.98	1.02	0.82
N42	191.46	67.04	7.40	6.20	0.54	1.19	0.84	0.73
N43	260.92	88.34	10.81	8.35	0.42	1.30	0.77	0.65

N44	222.90	78.78	8.97	8.22	0.45	1.09	0.92	0.67
N45	257.71	83.19	12.14	8.78	0.47	1.38	0.72	0.68
N46	329.95	79.85	10.68	8.55	0.65	1.25	0.80	0.81
N47	176.68	71.51	7.67	6.58	0.43	1.17	0.86	0.66
N48	127.65	52.22	6.31	7.53	0.59	0.84	1.19	0.77
N49	166.16	58.86	6.44	6.94	0.60	0.93	1.08	0.78
N50	198.90	58.73	8.15	8.91	0.72	0.91	1.09	0.85
N51	127.61	51.00	8.63	8.91	0.62	0.97	1.03	0.79
N52	245.66	64.58	9.72	5.40	0.74	1.80	0.56	0.86
N53	304.54	79.44	10.33	6.68	0.61	1.55	0.65	0.78
N54	234.75	68.36	7.75	7.73	0.63	1.00	1.00	0.79
N55	217.65	61.54	7.88	7.27	0.72	1.08	0.92	0.85
N56	192.76	59.61	6.92	8.58	0.68	0.81	1.24	0.83
N57	207.82	68.19	7.40	9.63	0.56	0.77	1.30	0.75
N58	191.27	70.55	7.77	8.58	0.48	0.91	1.10	0.69
N59	150.74	54.41	6.68	6.45	0.64	1.04	0.97	0.80
N60	212.66	63.99	8.76	8.81	0.65	0.99	1.01	0.81
N61	370.47	88.29	9.80	6.70	0.60	1.46	0.68	0.77
N62	496.80	107.62	10.38	8.27	0.54	1.25	0.80	0.73
N63	397.38	100.97	14.03	7.76	0.49	1.81	0.55	0.70
N64	393.19	93.13	12.90	8.67	0.57	1.49	0.67	0.75
N65	362.68	89.33	10.22	8.13	0.57	1.26	0.80	0.76
N66	394.07	93.18	10.38	9.33	0.57	1.11	0.90	0.76
N67	295.17	80.36	10.53	8.02	0.57	1.31	0.76	0.76
N68	348.23	81.08	10.77	8.93	0.67	1.21	0.83	0.82
N69	449.57	108.73	11.62	10.53	0.48	1.10	0.91	0.69
N70	346.08	87.43	9.13	8.02	0.57	1.14	0.88	0.75
N71	403.81	101.19	10.07	9.59	0.50	1.05	0.95	0.70
N72	496.73	107.33	13.15	7.62	0.54	1.73	0.58	0.74
N73	373.04	88.10	11.47	9.04	0.60	1.27	0.79	0.78
N74	344.16	99.69	13.60	7.47	0.44	1.82	0.55	0.66
N75	383.33	110.09	12.32	14.58	0.40	0.85	1.18	0.63
N76	394.29	100.26	12.90	8.02	0.49	1.61	0.62	0.70
N77	307.66	100.51	9.68	8.13	0.38	1.19	0.84	0.62
N78	405.64	92.48	12.63	8.16	0.60	1.55	0.65	0.77
N79	370.18	85.04	11.50	7.62	0.64	1.51	0.66	0.80
N80	393.48	97.73	12.05	8.79	0.52	1.37	0.73	0.72

* Yuvarlaklık = $4\Pi A/(P^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

** Yassılık = I/L formülü ile hesaplanmıştır.

*** Aspect Oranı = L/I formülü ile hesaplanmıştır.

**** Küresellik = $2(\Pi A)^{(1/2)}/P$ formülü ile hesaplanmıştır.

N1-N30, 0-5mm gradasyonu, N30-N60, 5-12mm gradasyonu ve N60-N80, 12-15mm gradasyonuna aittir.

Numune 1'e ait ve karışım oranları göz önünde bulundurularak elde edilen şekil faktörleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 9.2. Numune 1'e ait şekil faktörleri

Gradasyon (mm)	Alan (mm ²)	Çevre (mm)	Numune 1					
			I (mm)	L (mm)	Yuvarlaklık *	Yassılık **	Aspect Oranı ***	Küresellik ****
Ortalama (0-5)	54.82	34.27	3.89	3.62	0.59	1.14	0.97	0.77
Ortalama (5-12)	207.56	68.53	8.43	7.77	0.57	1.10	0.95	0.75
Ortalama (12-15)	386.30	95.63	11.416	8.67	0.54	1.35	0.77	0.73
Karışım Oranı	178.93	58.86	7.01	6.00	0.57	1.19	0.91	0.75

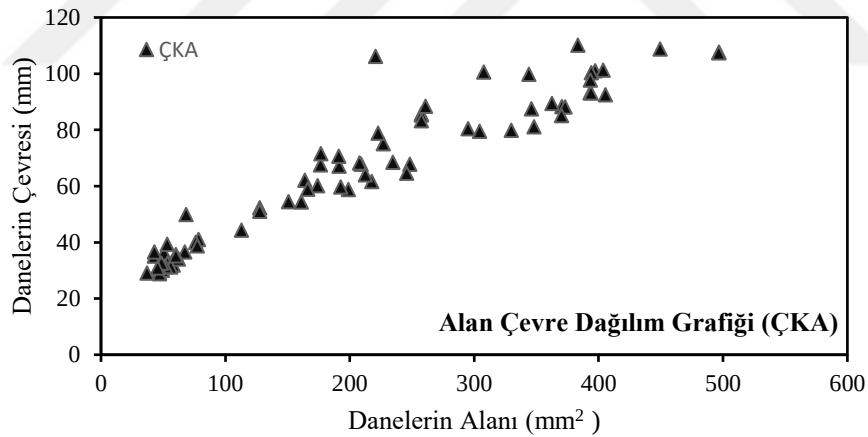
* Yuvarlaklık = $4\Pi A/(P^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

** Yassılık = I/L formülü ile hesaplanmıştır.

*** Aspect Oranı = L/I formülü ile hesaplanmıştır.

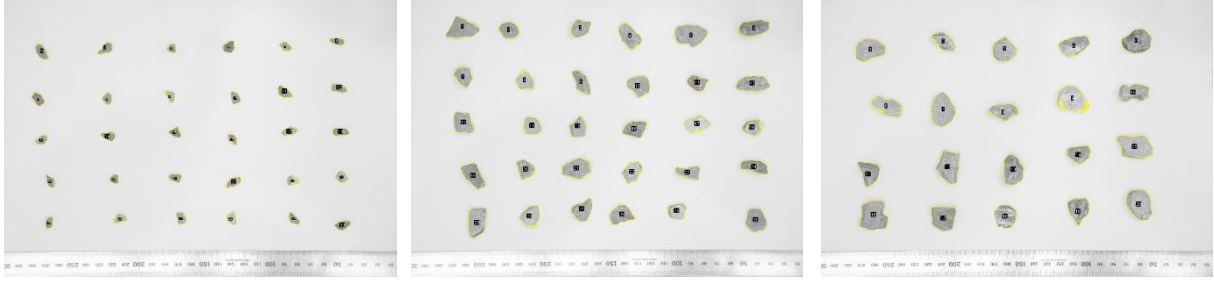
**** Küresellik = $2(\Pi A)^{(1/2)}/P$ formülü ile hesaplanmıştır.

Numune 1'e ait zemin Cox (1927), tarafından geliştirilen ve Şekil 2.4'de görüntüsü mevcut olan şekil faktörleri göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmaya göre çok köşeli agrega olarak isimlendirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan bu çok köşeli agrega (ÇKA) zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği ise Şekil 4.2'de verilmiştir.

**Şekil 4.2.** ÇKA zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği

4.1.2. Numune 2'nin şekilsel özellikleri

Numune 2 için de ÇKA zemin numunesi üzerinde yapılan görüntüleme işlemleri ve sayısal görüntü işleme analizlerine ait işlemler tam olarak aynı şekilde yapılmıştır. Numune 2'ye ait üç farklı gradasyon halinde sayısal görüntü işleme sonucunda alınan görüntüler Şekil 4.3'de verilmiştir. Numune 2'ye ait fraktal boyutları ve şekil faktör değerleri ise Tablo 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Sayısal görüntü işleme sonucunda alınan Numune 2'ye ait görüntüler

Tablo 10.3. Numune 2'e ait fraktal boyutları ve şekil faktörleri

No	Alan (A) (mm ²)	Çevre (P) (mm)	Numune 2					
			I (mm)	L (mm)	Yuvarlaklık *	Yassılık **	Aspect Oranı ***	Kürsellik ****
N1	73.89	35.73	3.64	5.15	0.73	0.71	1.42	0.85
N2	61.07	34.04	4.80	3.64	0.66	1.32	0.76	0.81
N3	33.83	22.74	2.92	2.92	0.82	1.00	1.00	0.91
N4	58.62	30.23	4.08	3.97	0.81	1.03	0.97	0.90
N5	43.74	27.20	4.21	3.28	0.74	1.28	0.78	0.86
N6	45.26	29.31	5.03	2.36	0.66	2.13	0.47	0.81
N7	62.49	32.07	4.44	4.44	0.76	1.00	1.00	0.87
N8	46.72	26.61	3.28	4.21	0.83	0.78	1.28	0.91
N9	44.54	28.46	3.51	3.87	0.69	0.91	1.10	0.83
N10	52.07	29.62	3.15	4.33	0.75	0.73	1.37	0.86
N11	65.57	34.33	4.46	3.51	0.70	1.27	0.79	0.84
N12	59.77	32.75	5.03	2.80	0.70	1.80	0.56	0.84
N13	44.41	26.39	3.97	2.92	0.80	1.36	0.74	0.90
N14	52.67	31.00	5.03	3.26	0.69	1.54	0.65	0.83
N15	46.40	29.24	4.33	3.62	0.68	1.20	0.83	0.83
N16	33.24	24.11	2.80	3.26	0.72	0.86	1.16	0.85
N17	55.98	32.02	5.62	2.59	0.69	2.17	0.46	0.83
N18	58.72	33.06	5.39	2.23	0.68	2.41	0.41	0.82
N19	42.26	27.83	2.59	4.10	0.69	0.63	1.58	0.83
N20	34.74	23.03	2.92	2.92	0.82	1.00	1.00	0.91
N21	49.19	28.81	3.87	2.92	0.74	1.32	0.75	0.86
N22	58.68	35.53	4.80	3.15	0.58	1.52	0.66	0.76
N23	23.84	21.68	4.21	3.39	0.64	1.24	0.80	0.80
N24	57.59	29.98	4.23	4.00	0.81	1.06	0.95	0.90
N25	41.20	26.06	2.46	3.39	0.76	0.73	1.37	0.87
N26	45.40	32.02	4.33	2.92	0.56	1.48	0.67	0.75
N27	52.17	29.83	3.41	3.87	0.74	0.88	1.14	0.86
N28	44.21	32.85	3.26	4.80	0.51	0.68	1.47	0.72
N29	45.64	28.00	3.39	3.62	0.73	0.94	1.07	0.86
N30	61.14	32.93	5.03	2.92	0.71	1.72	0.58	0.84
N31	276.65	72.79	11.49	7.89	0.66	1.46	0.69	0.81
N32	146.65	46.74	6.69	6.34	0.84	1.05	0.95	0.92
N33	151.38	50.57	6.34	6.51	0.74	0.97	1.03	0.86

N34	213.59	62.63	8.23	9.09	0.68	0.91	1.10	0.83
N35	313.76	72.28	11.14	7.89	0.75	1.41	0.71	0.87
N36	241.71	69.74	9.94	5.14	0.62	1.93	0.52	0.79
N37	154.29	49.37	6.69	7.71	0.80	0.87	1.15	0.89
N38	136.05	55.42	6.34	6.86	0.56	0.93	1.08	0.75
N39	156.18	54.87	6.00	8.91	0.65	0.67	1.49	0.81
N40	207.57	57.40	8.06	7.89	0.79	1.02	0.98	0.89
N41	134.28	49.41	7.20	6.34	0.69	1.14	0.88	0.83
N42	243.06	67.03	11.49	5.83	0.68	1.97	0.51	0.82
N43	202.42	57.97	7.54	8.23	0.76	0.92	1.09	0.87
N44	146.07	47.62	6.34	6.17	0.81	1.03	0.97	0.90
N45	145.95	49.23	5.83	7.20	0.76	0.81	1.24	0.87
N46	170.75	55.09	8.57	6.17	0.71	1.39	0.72	0.84
N47	151.41	50.41	8.74	6.34	0.75	1.38	0.73	0.87
N48	137.55	58.74	7.37	6.51	0.50	1.13	0.88	0.71
N49	221.25	62.99	7.89	9.43	0.70	0.84	1.20	0.84
N50	141.35	51.46	6.34	7.20	0.67	0.88	1.14	0.82
N51	253.44	67.34	10.80	7.71	0.70	1.40	0.71	0.84
N52	167.28	55.39	7.71	7.89	0.69	0.98	1.02	0.83
N53	138.78	56.73	9.09	5.31	0.54	1.71	0.58	0.74
N54	165.90	57.73	9.60	4.80	0.63	2.00	0.50	0.79
N55	265.26	68.15	6.86	10.97	0.72	0.63	1.60	0.85
N56	177.98	58.41	7.71	8.74	0.66	0.88	1.13	0.81
N57	183.16	56.13	7.03	8.74	0.73	0.80	1.24	0.85
N58	192.18	57.69	9.43	7.03	0.73	1.34	0.75	0.85
N59	136.61	49.53	6.51	5.83	0.70	1.12	0.89	0.84
N60	228.53	59.62	7.20	8.40	0.81	0.86	1.17	0.90
N61	304.18	70.63	11.14	8.40	0.77	1.33	0.75	0.88
N62	171.97	70.01	7.71	6.69	0.44	1.15	0.87	0.66
N63	250.08	62.37	8.74	8.74	0.81	1.00	1.00	0.90
N64	251.74	73.55	11.66	7.20	0.58	1.62	0.62	0.76
N65	322.29	70.42	10.29	8.91	0.82	1.15	0.87	0.90
N66	252.51	71.51	10.63	7.71	0.62	1.38	0.73	0.79
N67	357.48	77.42	9.09	12.69	0.75	0.72	1.40	0.87
N68	199.72	71.26	10.46	6.17	0.49	1.69	0.59	0.70
N69	357.35	77.47	11.31	9.94	0.75	1.14	0.88	0.87
N70	259.23	71.24	10.80	6.51	0.64	1.66	0.60	0.80
N71	214.67	62.83	7.20	9.60	0.68	0.75	1.33	0.83
N72	329.95	80.46	8.91	12.34	0.64	0.72	1.38	0.80
N73	291.17	74.34	6.69	11.66	0.66	0.57	1.74	0.81
N74	191.37	57.90	9.26	6.51	0.72	1.42	0.70	0.85
N75	397.95	86.96	12.34	8.91	0.66	1.38	0.72	0.81
N76	401.68	86.37	10.29	10.29	0.68	1.00	1.00	0.82
N77	301.66	74.92	8.91	8.91	0.68	1.00	1.00	0.82
N78	235.04	60.41	7.54	8.74	0.81	0.86	1.16	0.90
N79	236.98	65.32	8.06	9.77	0.70	0.82	1.21	0.83
N80	368.99	75.84	9.43	11.66	0.81	0.81	1.24	0.90

* Yuvarlaklık = $4\Pi A/(P^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

** Yassılık = I/L formülü ile hesaplanmıştır.

*** Aspect Oranı = L/I formülü ile hesaplanmıştır.

**** Küresellik = $2(\Pi A)^{(1/2)}/P$ formülü ile hesaplanmıştır.

N1-N30, 0-5mm gradasyonu, N30-N60, 5-12mm gradasyonu ve N60-N80, 12-15mm gradasyonuna aittir.

ÇKA zemin numunesinde olduğu gibi, karışım oranı göz önünde bulundurularak Numune 2'ye ait fraktal ve şekil faktör değerlerine ulaşılmıştır. Tablo 4.4'de Numune 2'yi temsil eden fraktal boyutları ve şekil faktörleri verilmiştir.

Tablo 11.4. Numune 2'e ait şekil faktörleri

Gradasyon (mm)	Alan (mm ²)	Çevre (mm)	I (mm)	Numune 1		Yuvarlaklık *	Yassılık **	Aspect Oranı ***	Küresellik ****
				L (mm)					
Ortalama (0-5)	49.833	29.58	4.01	3.48		0.71	1.22	0.93	0.84
Ortalama (5-12)	186.7	57.61	8.01	7.3		0.70	1.15	0.95	0.84
Ortalama (12-15)	284.8	72.06	9.52	9.07		0.68	1.11	0.99	0.83
Karışım Oranı	145.53	47.77	6.46	5.91		0.702	1.17	0.95	0.84

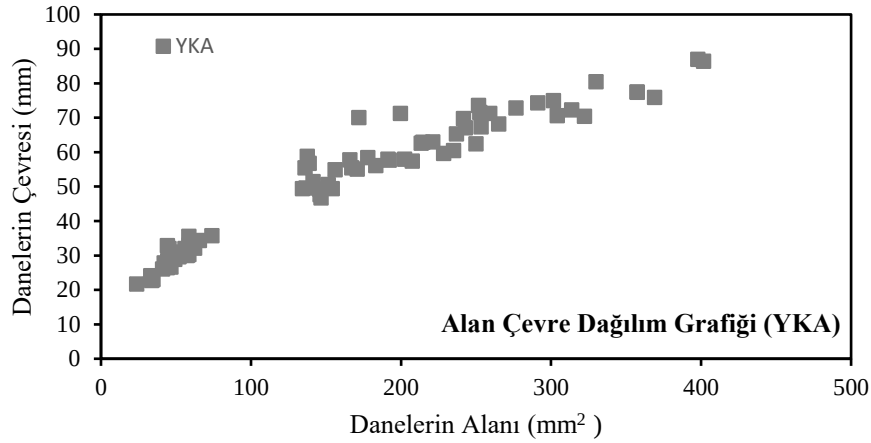
* Yuvarlaklık = $4\Pi A/(P^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

** Yassılık = I/L formülü ile hesaplanmıştır.

*** Aspect Oranı = L/I formülü ile hesaplanmıştır.

**** Küresellik = $2(\Pi A)^{(1/2)}/P$ formülü ile hesaplanmıştır.

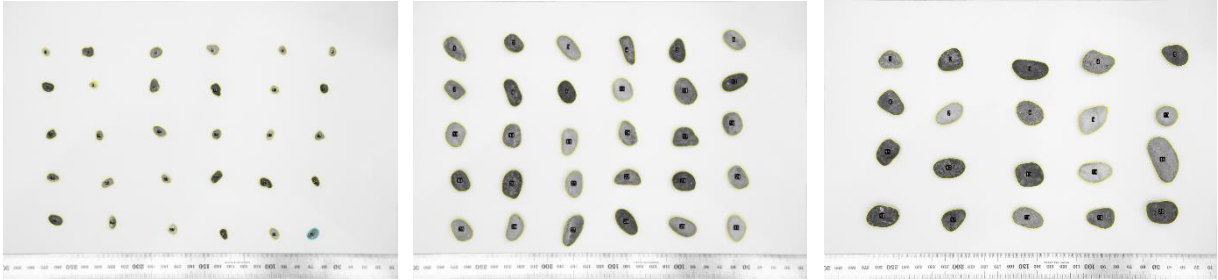
ÇKA zemin numunesinde olduğu gibi, Numune 2'ye ait zemin Cox (1927), tarafından geliştirilen ve Şekil 2.4'de görüntüsü mevcut olan şekil faktörleri göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmaya göre yarı köşeli agrega olarak isimlendirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan bu çok köşeli agrega (YKA) zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği ise Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. YKA zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği

4.1.3. Numune 3'ün şekilsel özellikleri

Numune 3 için de ÇKA ve YKA zemin numuneleri üzerinde yapılan görüntüleme işlemleri ve sayısal görüntü işleme analizlerine ait işlemler tam olarak aynı şekilde yapılmıştır. Numune 3'e ait üç farklı gradasyon halinde sayısal görüntü işleme sonucunda alınan görüntüler Şekil 4.5'de verilmiştir. Numune 3'e ait fraktal boyutları ve şekil faktör değerleri ise Tablo 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Sayısal görüntü işleme sonucunda alınan Numune 3'e ait görüntüler

Tablo 12.5. Numune 2'e ait fraktal boyutları ve şekil faktörleri

No	Alan (A) (mm ²)	Çevre (P) (mm)	Numune 1					
			I (mm)	L (mm)	Yuvarlaklık *	Yassılık **	Aspect Oranı ***	Kürsellik ****
N1	25.77	20.36	2.69	2.69	0.78	1.00	1.00	0.88
N2	56.11	29.06	3.97	3.39	0.84	1.17	0.85	0.91
N3	61.24	29.60	4.10	3.74	0.88	1.10	0.91	0.94
N4	54.43	28.60	3.97	3.85	0.84	1.03	0.97	0.91
N5	30.63	20.94	2.82	3.15	0.88	0.89	1.12	0.94
N6	33.37	22.11	2.33	3.51	0.86	0.66	1.51	0.93
N7	54.95	28.31	4.08	3.05	0.86	1.34	0.75	0.93

N8	61.25	29.60	3.03	2.23	0.88	1.36	0.74	0.94
N9	60.38	30.40	3.39	4.56	0.82	0.74	1.35	0.91
N10	54.89	29.38	3.28	4.33	0.80	0.76	1.32	0.89
N11	33.36	22.11	2.80	2.80	0.86	1.00	1.00	0.93
N12	37.67	23.15	2.67	3.15	0.88	0.85	1.18	0.94
N13	41.00	24.76	3.15	3.28	0.84	0.96	1.04	0.92
N14	33.02	21.89	2.21	3.15	0.87	0.70	1.43	0.93
N15	60.01	30.26	4.67	3.64	0.82	1.28	0.78	0.91
N16	42.30	24.53	3.03	3.39	0.88	0.89	1.12	0.94
N17	34.96	24.53	3.15	3.74	0.73	0.84	1.19	0.85
N18	39.16	24.03	3.62	2.80	0.85	1.29	0.77	0.92
N19	49.42	27.02	4.21	2.92	0.85	1.44	0.70	0.92
N20	47.58	27.41	3.74	3.05	0.80	1.23	0.81	0.89
N21	35.05	25.26	3.15	3.15	0.69	1.00	1.00	0.83
N22	55.77	29.05	3.87	3.97	0.83	0.97	1.03	0.91
N23	54.80	29.40	3.97	3.05	0.80	1.30	0.77	0.89
N24	33.15	22.64	2.69	3.15	0.81	0.85	1.17	0.90
N25	71.20	32.58	4.80	3.64	0.84	1.32	0.76	0.92
N26	45.92	26.72	2.69	4.56	0.81	0.59	1.70	0.90
N27	33.14	22.67	3.05	3.85	0.81	0.79	1.26	0.90
N28	37.33	24.12	2.69	3.62	0.81	0.74	1.34	0.90
N29	48.52	26.65	3.64	3.74	0.86	0.97	1.03	0.93
N30	54.71	28.09	3.85	3.51	0.87	1.09	0.91	0.93
N31	222.77	59.44	7.08	5.85	0.79	1.21	0.83	0.89
N32	161.60	48.12	6.23	5.60	0.88	1.11	0.90	0.94
N33	229.01	61.05	8.10	6.85	0.77	1.18	0.85	0.88
N34	186.01	59.00	4.95	6.38	0.67	0.78	1.29	0.82
N35	185.19	52.81	6.10	6.28	0.83	0.97	1.03	0.91
N36	194.81	53.72	7.64	7.43	0.85	1.03	0.97	0.92
N37	167.95	49.90	7.28	9.13	0.85	0.80	1.25	0.92
N38	203.43	58.54	5.77	6.50	0.75	0.89	1.13	0.86
N39	187.62	52.33	6.00	5.83	0.86	1.03	0.97	0.93
N40	237.44	60.95	7.15	6.63	0.80	1.08	0.93	0.90
N41	278.29	63.30	7.77	8.23	0.87	0.94	1.06	0.93
N42	208.60	57.48	8.56	4.90	0.79	1.75	0.57	0.89
N43	228.62	57.53	6.92	9.00	0.87	0.77	1.30	0.93
N44	214.62	55.70	6.33	8.45	0.87	0.75	1.33	0.93
N45	214.58	57.45	6.10	6.05	0.82	1.01	0.99	0.90
N46	207.17	56.19	6.72	8.45	0.82	0.80	1.26	0.91
N47	237.00	59.82	8.69	7.08	0.83	1.23	0.81	0.91
N48	222.46	56.14	6.69	5.13	0.89	1.31	0.77	0.94
N49	187.30	52.01	6.46	7.08	0.87	0.91	1.09	0.93
N50	269.41	63.32	6.92	6.15	0.84	1.13	0.89	0.92
N51	223.43	57.87	6.23	4.13	0.84	1.51	0.66	0.92
N52	198.53	56.24	8.80	7.18	0.79	1.23	0.82	0.89
N53	222.10	56.33	7.51	7.55	0.88	1.00	1.00	0.94
N54	216.04	56.23	7.15	8.68	0.86	0.82	1.21	0.93

N55	215.10	56.08	7.28	7.65	0.86	0.95	1.05	0.93
N56	210.28	57.51	6.33	7.30	0.80	0.87	1.15	0.89
N57	271.06	66.85	7.05	7.08	0.76	1.00	1.00	0.87
N58	237.42	60.95	7.74	6.73	0.80	1.15	0.87	0.90
N59	235.07	60.55	9.28	6.28	0.81	1.48	0.68	0.90
N60	223.73	60.49	6.80	6.95	0.77	0.98	1.02	0.88
N61	204.53	55.21	9.90	8.85	0.84	1.12	0.89	0.92
N62	266.79	62.44	12.75	11.70	0.86	1.09	0.92	0.93
N63	345.10	74.51	9.60	10.05	0.78	0.96	1.05	0.88
N64	334.36	72.03	9.45	9.45	0.81	1.00	1.00	0.90
N65	252.69	60.92	11.85	8.10	0.86	1.46	0.68	0.93
N66	267.72	63.63	9.30	11.85	0.83	0.78	1.27	0.91
N67	345.09	74.51	10.50	7.80	0.78	1.35	0.74	0.88
N68	307.93	68.10	10.65	8.10	0.83	1.31	0.76	0.91
N69	288.86	66.91	14.55	8.70	0.81	1.67	0.60	0.90
N70	215.61	56.05	11.25	8.25	0.86	1.36	0.73	0.93
N71	257.16	61.53	8.55	10.95	0.85	0.78	1.28	0.92
N72	305.06	68.01	13.50	8.70	0.83	1.55	0.64	0.91
N73	331.91	68.94	11.55	9.00	0.88	1.28	0.78	0.94
N74	582.24	97.53	12.30	7.50	0.77	1.64	0.61	0.88
N75	582.23	97.60	11.40	8.25	0.77	1.38	0.72	0.88
N76	333.77	70.85	7.65	11.85	0.84	0.65	1.55	0.91
N77	232.73	58.64	12.00	6.90	0.85	1.74	0.58	0.92
N78	288.83	66.91	10.20	11.55	0.81	0.88	1.13	0.90
N79	270.20	64.02	12.00	8.25	0.83	1.45	0.69	0.91
N80	360.30	73.85	14.40	6.60	0.83	2.18	0.46	0.91

* Yuvarlaklık = $4\Pi A/(P^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

** Yassılık = I/L formülü ile hesaplanmıştır.

*** Aspect Oranı = L/I formülü ile hesaplanmıştır.

**** Küresellik = $2(\Pi A)^{(1/2)}/P$ formülü ile hesaplanmıştır.

N1-N30, 0-5mm gradasyonu, N30-N60, 5-12mm gradasyonu ve N60-N80, 12-15mm gradasyonuna aittir.

ÇKA ve YKA zemin numunelerinde olduğu gibi, karışım oranı göz önünde bulundurularak Numune 3'e ait fraktal ve şekil faktör değerlerine ulaşılmıştır. Tablo 4.6'de Numune 3'ü temsil eden fraktal boyutları ve şekil faktörleri verilmiştir.

Tablo 13.6. Numune 3'e ait şekil faktörleri

Gradasyon (mm)	Alan (mm ²)	Çevre (mm)	I (mm)	L (mm)	Numune 1			
					Yuvarlaklık *	Yassılık **	Aspect Oranı ***	Küresellik ****
Ortalama (0-5)	46.04	26.17	3.38	3.42	0.83	1.01	1.05	0.91
Ortalama (5-12)	216.55	57.46	7.06	6.88	0.82	1.05	0.99	0.91
Ortalama (12-15)	318.66	69.11	11.17	9.12	0.83	1.28	0.85	0.91
Karışım Oranı	160.23	45.36	6.32	5.78	0.83	1.09	0.98	0.91

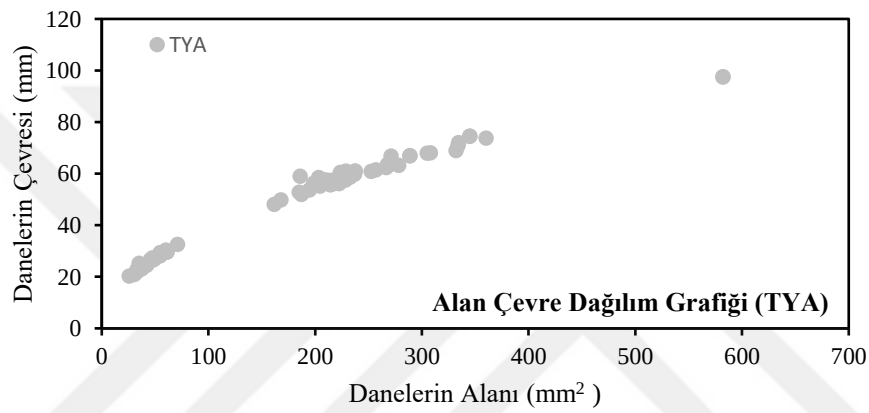
* Yuvarlaklık = $4\Pi A/(P^2)$ formülü ile hesaplanmıştır.

** Yassılık = I/L formülü ile hesaplanmıştır.

*** Aspect Oranı = L/I formülü ile hesaplanmıştır.

**** Küresellik = $2(\Pi A)^{(1/2)}/P$ formülü ile hesaplanmıştır.

ÇKA ve YKA zemin numunelerinde olduğu gibi, Numune 2'ye ait zemin Cox (1927), tarafından geliştirilen ve Şekil 2.4'de görüntüsü mevcut olan şekil faktörleri göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmaya göre yarı köşeli agrega olarak isimlendirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan bu çok köşeli agrega (YKA) zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği ise Şekil 4.6'da verilmiştir.



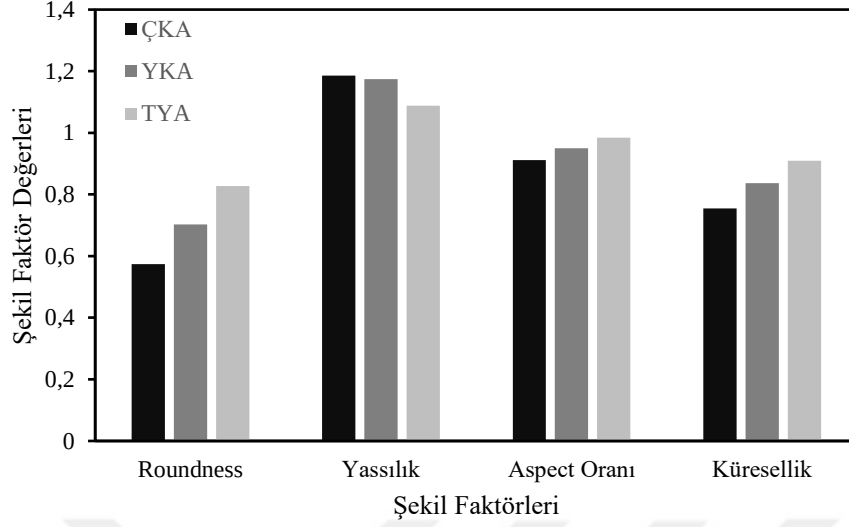
Şekil 4.6. TYA zemin numunesine ait alan-çevre dağılım grafiği

4.1.4. Zemin numunelerinin şekilsel özelliklerinin karşılaştırması

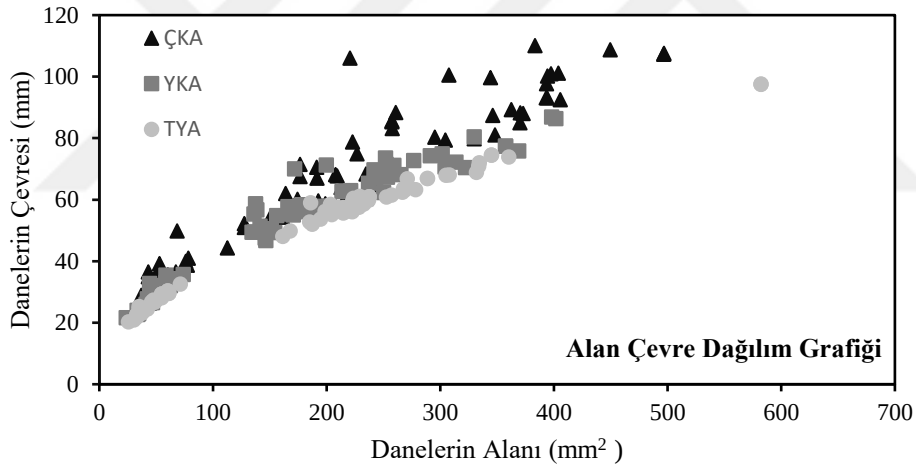
Zemin numunelerine ait şekil faktörü değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 4.7'de ve Şekil 4.7'de sırasıyla verilmiştir. Ek olarak, ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerine ait alan-çevre dağılım bilgileri tek bir grafik olacak şekilde Şekil 4.8'de verilmiştir.

Tablo 14.7. Numunelerin karşılaştırmalı şekilsel özellikleri

Zemin	Yuvarlaklık Değeri	Yassılık	Aspect Oranı	Küresellik	Yuvarlaklık Sınıfı
Numune 1 (ÇKA)	0.57	1.19	0.91	0.75	Çok Köşeli
Numune 2 (YKA)	0.702	1.17	0.95	0.84	Yarı Köşeli
Numune 3 (TYA)	0.83	1.09	0.98	0.91	Tam Yuvarlak



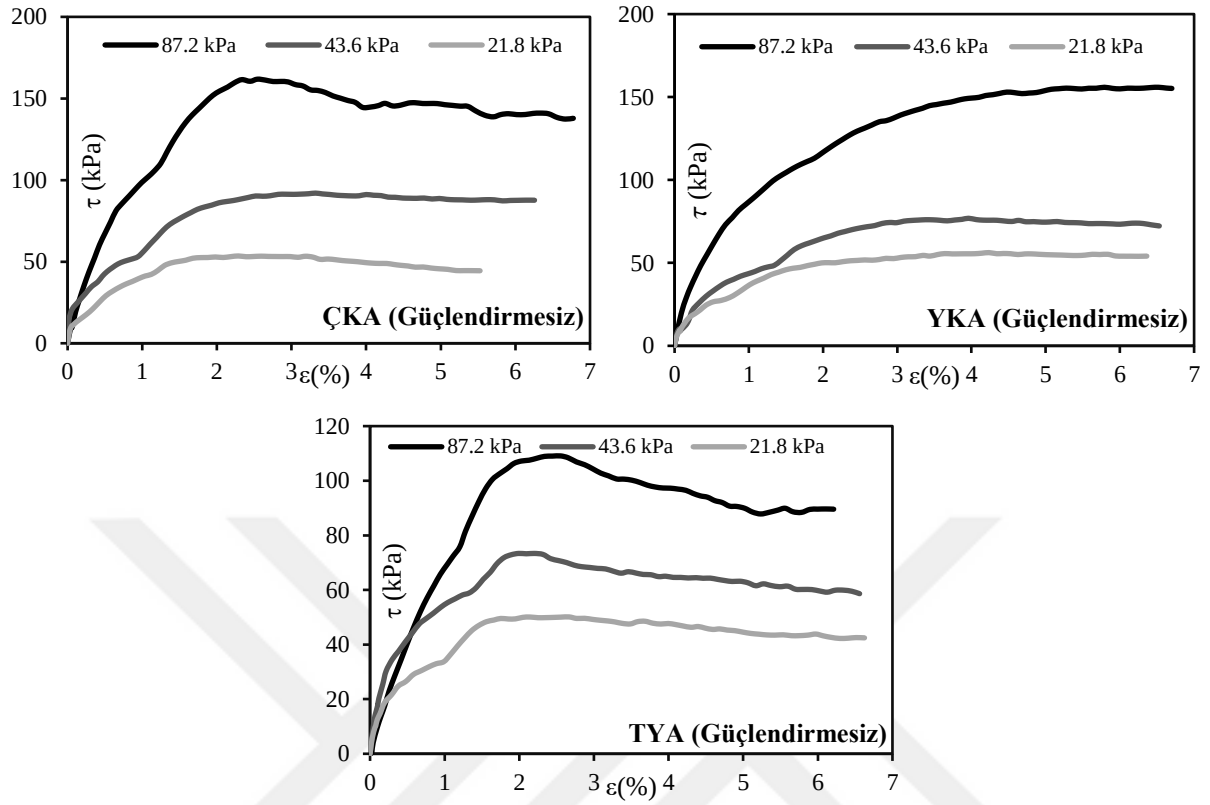
Şekil 4.7. Tüm zemin numunelerine ait karşılaştırmalı şekil faktör değerleri



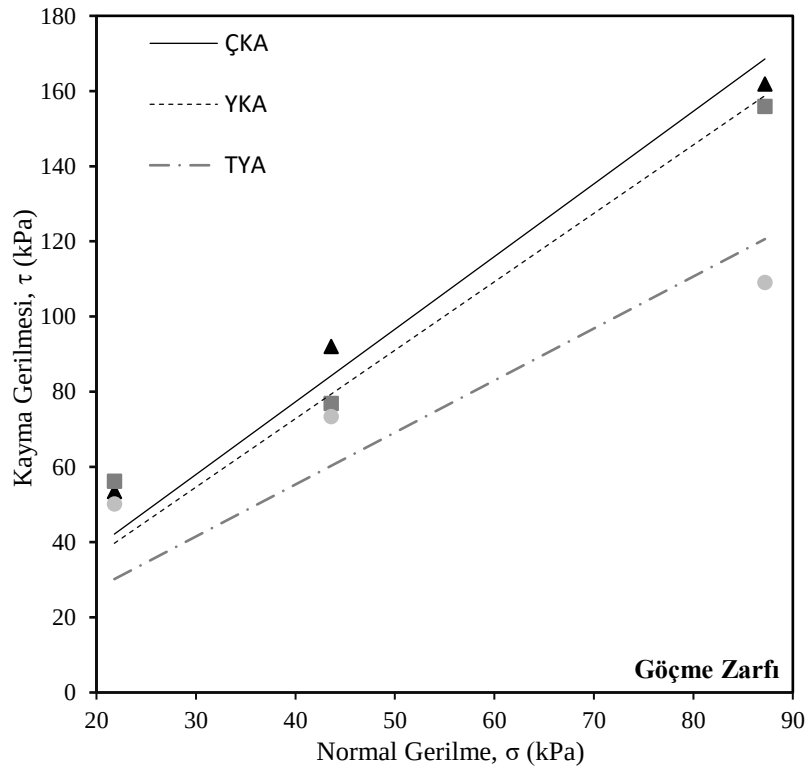
Şekil 4.8. Tüm zemin numunelerine ait alan-çevre dağılım grafiği

4.2. Danelerin şekilsel özelliklerinin kayma dayanımına etkisi

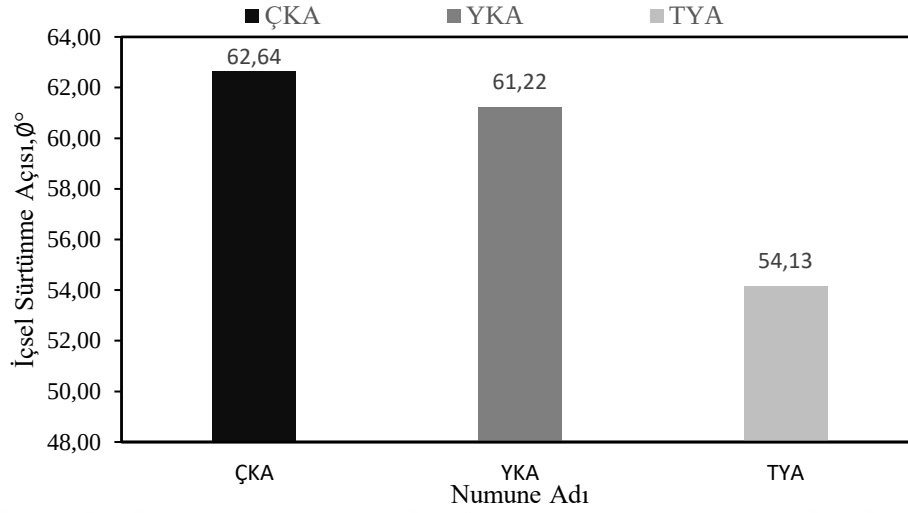
Tez çalışması kapsamında, morfolojik özellikleri farklı ve dolgularda kullanılmaya eleverişli olan iri daneli granüler zeminler üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilerek zeminlerin kayma mukavemet parametreleri araştırılmıştır. Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açılarına ait bilgilerin mevcut olduğu sütun grafiği Şekil 4.11’de gösterilirken şekil faktörünün dayanıma etkisinin incelendiği grafik ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



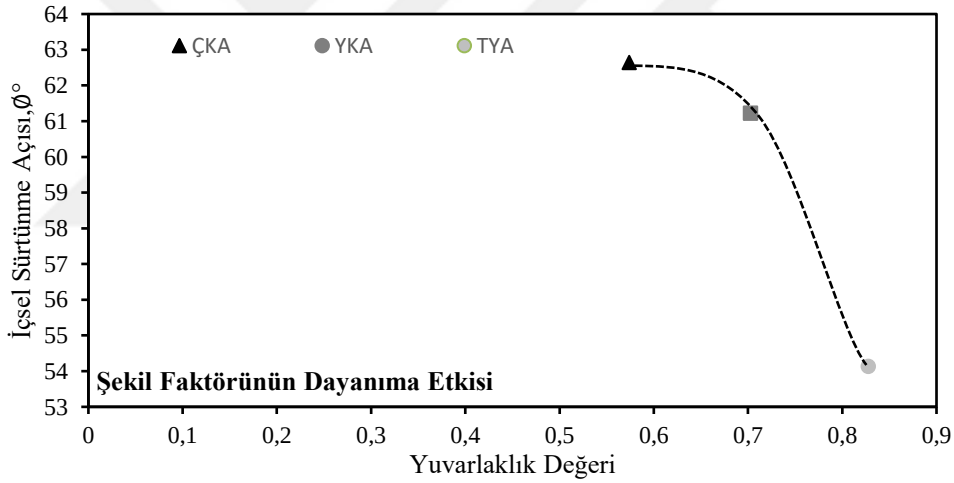
Şekil 4.9.Zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.10.Zemin numunelerinin göçme zarfı



Şekil 4.11. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açıları



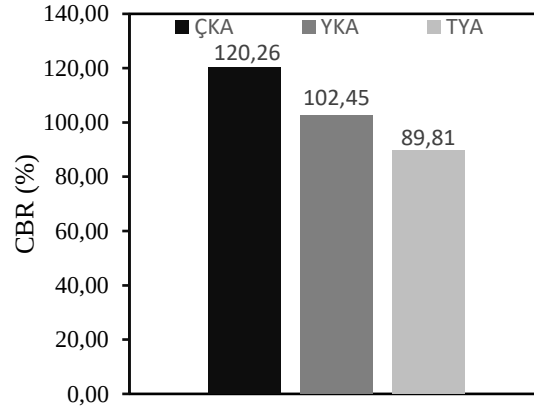
Şekil 4.12. Şekil faktörünün dayanıma etkisi

Dolgularda kullanılmak üzere uygun gradasyona getirilen ÇKA, YKA ve TYA zemin numuneleri optimum su içeriği sağlanacak şekilde büyük ölçekli kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuştur. Sayısal görüntü analizleri sonucu şekil faktörleri elde edilen ve bu doğrultuda sınıflandırılan zemin numunelerin, şekilsel özelliklerinin kayma mukavemeti parametrelerine olan etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri; ÇKA zemin numunesi için 62.64°, YKA zemin numunesi için 61.22° iken TYA zemin numunesi için ise 54.13° olarak elde edilmiştir. ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerinin yuvarlaklık değerleri sırası ile 0.57, 0.702 ve 0.83 olarak bilindiğinden, yuvarlaklık değerinin artması ile zemin numunesinin içsel sürtünme açısında ve dayanımında bir düşüşün söz konusu olduğu

açıkça gözlemlenmiştir. Zemin danelerinin yuvarlaklık grubu Çok Köşeli'den Yarı Köşeli'ye değiştiğinde yuvarlaklık değerindeki yaklaşık %16 azalma ile içsel sürtünme açısı yaklaşık %2.3 azalmıştır. Bununla birlikte zemin danelerinin yuvarlaklık grubu Yarı Köşeli'den Tam Yuvarlak'a değiştiğinde yuvarlaklık değerindeki yaklaşık %16 azalma ile içsel sürtünme açısı yaklaşık %11.6 azalmıştır. Bu duruma ÇKA ve YKA zemin numunelerinde, agregaların birbirine kenetlenerek daha fazla sürtünme kuvveti yaratmasını sebep olduğu düşünülmektedir. Bu kenetlenme etkisinin özellikle YKA zemin numunesinin sahip olduğu yuvarlaklık değerinden daha büyük değerlere sahip olan numuneler için hızla azaldığı tahmin edilmektedir.

4.3. Danelerin şekilsel özelliklerinin CBR'a etkisi

Şekil faktörünün granüler zemin dayanımına etkisini değerlendirmek için çalışma kapasasında elde edilen üç farklı granüler zemin numunesi CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen şekil faktörleri ile CBR değişimi Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Buna göre ÇKA, YKA ve TYA numunelerinin CBR değerleri sırası ile 120.26, 102.45 ve 89.81 olarak elde edilmiştir. ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerinin yuvarlaklık değerleri sırası ile 0.57, 0.702 ve 0.83 olarak bilindiğinden, yuvarlaklık değerinin artması ile zemin numunelerinin CBR değerinde ve dayanımında bir düşüşün söz konusu olduğu açıkça gözlemlenmiştir. CBR değerleri yuvarlaklık, küresellik ve aspect oranı ile yaklaşık doğrusal olarak bir azalma eğilimine sahipken yassılık ile artma eğilimine sahip olmuştur. Zemin danelerinin yuvarlaklık grubu Çok Köşeli'den Yarı Köşeli'ye değiştiğinde yuvarlaklık değerindeki yaklaşık %16 azalma ve Yarı Köşeli'den Tam Yuvarlak'a değiştiğinde yuvarlaklık değerindeki yaklaşık %16 azalma için CBR değerleri sırası ile %14.8 ve %12.3 azalma olmuştur. Standard dolgu malzemelerinde CBR değerinin %100 olması beklendiği düşünüldüğünde çalışmada araştırılan TYA zemin numunesinin standardı karşılamadığı ancak ÇKA ve YKA numunelerinin standardı sağlayabileceği görülmüştür.



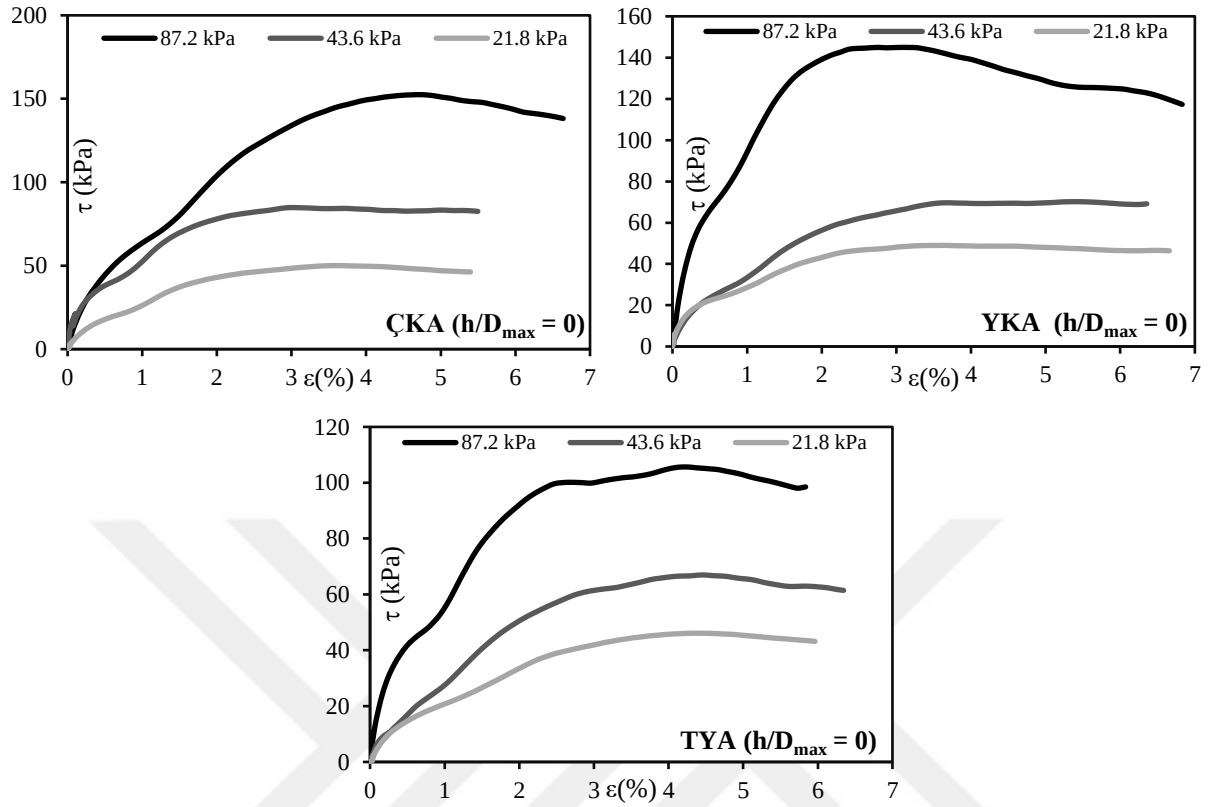
Şekil 4.13.Şekil faktörünün CBR’a etkisi

4.4. Danelerin şekilsel özelliklerinin zemin-geogrid ile kenetlenme ilişkisi

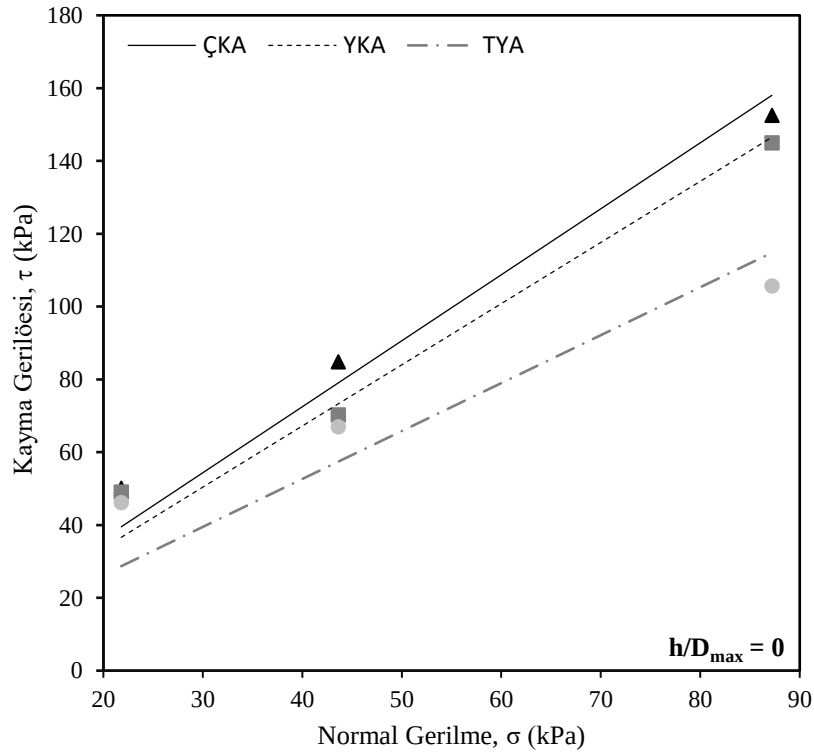
Danelerin şekilsel özelliklerinin zemin - geogrid kenetlenme mekanizmasına olan etkilerin araştırılması için Tablo 3.1’de fiziksel özellikleri verilmiş olan 3 eksenli geogrid donatı kullanılarak üç farklı morfolojik özelliklere sahip granüler zemin numuneleri üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, donatının kesme yüzeyinde, kesme yüzeyinin altında ve kesme yüzeyinin üstünde olacak şekilde farklı deney yöntemleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Kenetlenme mekanizmasının tam anlamı ile anlaşılıp yorumlanması için bu yöntemler uygun görülmüştür. Aynı zamanda, dane şeklinin zemin-donatı kenetlenme derinliğine etkisini araştırmak için kesme kutusunun alt tarafında (kesme yüzeyinin altına) farklı derinliklere geogrid donatı yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte donatının altındaki zemin-donatı kenetlenme mekanizmasını araştırmak için kesme kutusunun üst tarafında (kesme yüzeyinin üstüne) farklı derinliklere geogrid donatı yerleştirilerek de deneyler yapılmıştır. Çalışmada elde edilen granüler zemin numunelerinin maksimum dane çapı (D_{max}) 15 mm olduğu için 150 mm uzunluğa, 150 mm genişliğe ve 120 mm yüksekliğe sahip büyük ölçekli kesme kutusu kullanılmıştır. Donatının kesme yüzeyine uzaklığı (h), D_{max} değerine oranlanarak verilmiştir (h/D_{max}).

4.4.1. Donatının kesme yüzeyine yerleştirilmesi

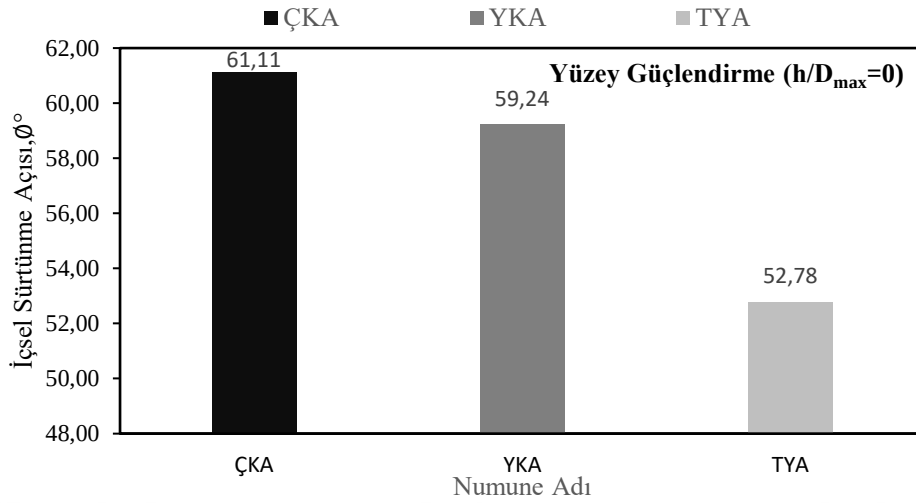
Farklı şekil özelliklerine sahip üç granüler zemin numunesi üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri geogrid donatı kesme yüzeyine yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te gösterilmiştir. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açılarına ait bilgilerin mevcut olduğu sütun grafiği Şekil 4.16’da sunulmuştur.



Şekil 4.14. Zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.15. Zemin numunelerinin göçme zarfı



Şekil 4.16. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açıları

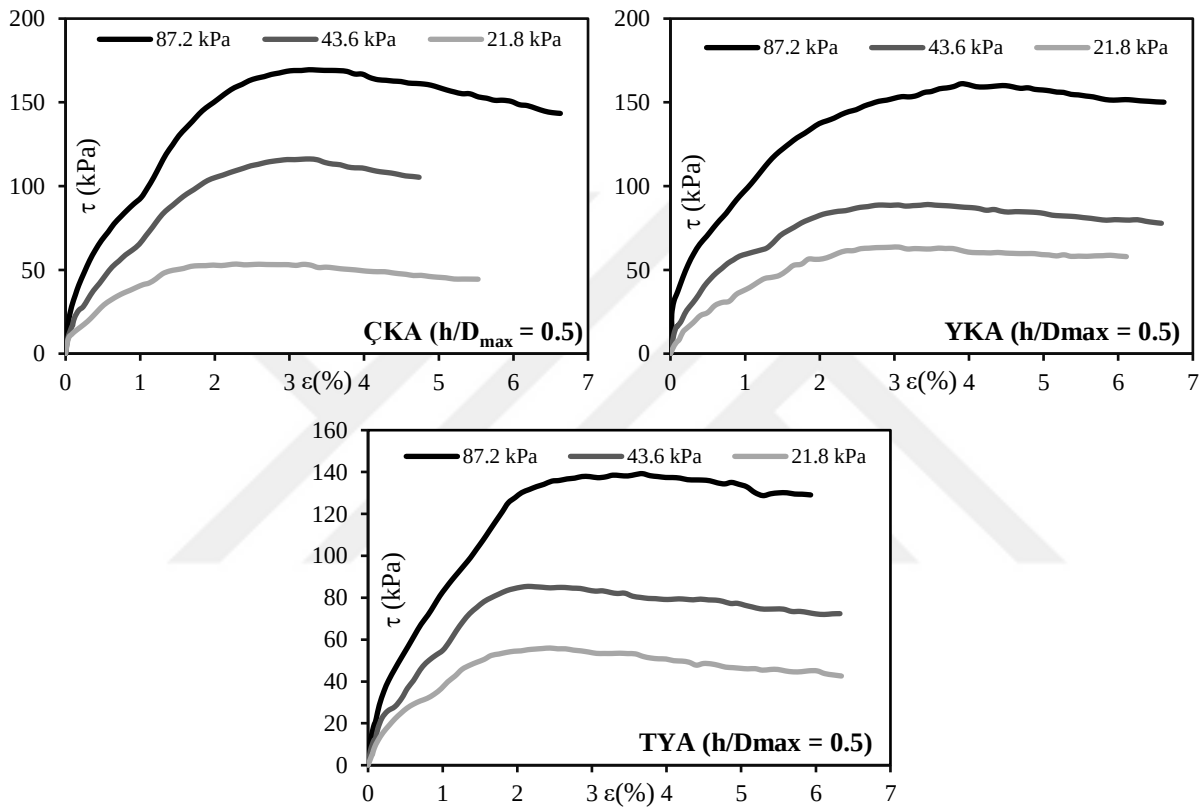
Geogrid donatının kesme yüzeyine yerleştirilerek yapılan analizler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri; ÇKA zemin numunesi için 61.11° , YKA zemin numunesi için 59.24° iken TYA zemin numunesi için ise 52.78° olarak elde edilmiştir. Geogrid güçlendirmeli durumunda, tıpkı güçlendirmesiz durumda olduğu gibi yuvarlaklık değerinin artması ile geogrid ile güçlendirilmiş zeminlerin kayma mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Kesme kutusu deneyinde, geogrid güçlendirmenin kesme yüzeyine yerleştirilmesi sonucunda geogrid donatıda kayma ve/veya burkulma gibi etkiler meydana gelebilmektedir (Arujarah ve diğerleri, 2014). Ayrıca donatının kesme yüzeyine yerleştirilmesi durumunda düz bir kesme yüzeyi de oluşabilmektedir (Arujarah ve diğerleri, 2014). Dolayısı ile donatı kesme yüzeyine yerleştirildiğinde donatıda oluşabilecek etkiler ve düz bir yüzey oluşturma durumu zemin-donatı kayma dayanımını düşürebilmektedir. Bu değerler ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerinin geogrid donatı kullanılmadan gerçekleştirilen deneylerinden elde edilen veriler ile kıyaslandığında sırası ile %2.44, %3.23 ve %6.98 oranında düşüş söz konusu olduğu açıkça görülebilmektedir.

4.4.2. Donatının kesme yüzeyinin altına yerleştirilmesi

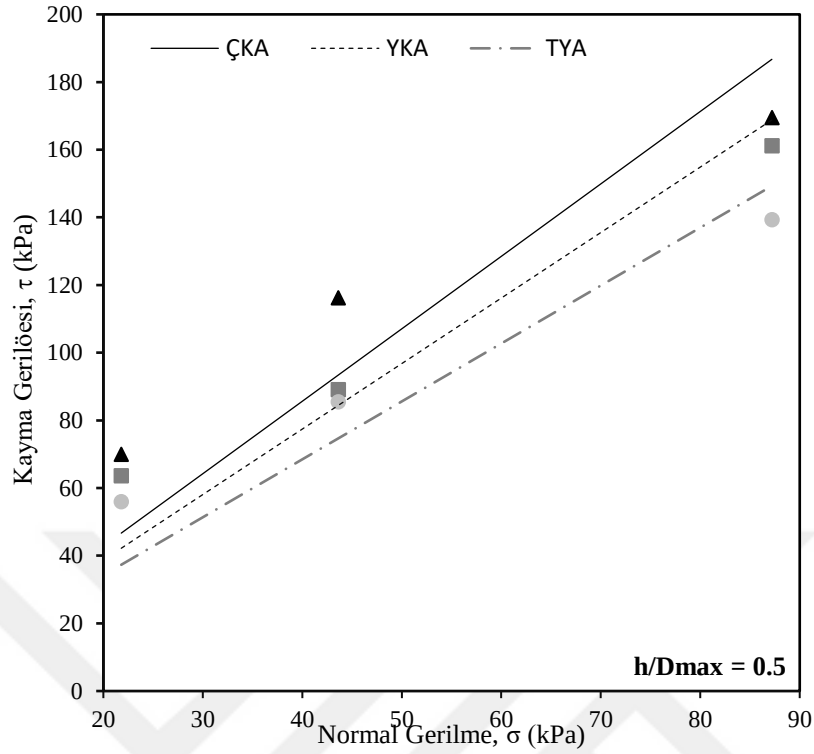
Geogrid donatılar, kenetlenme mekanizmasına ait etki derinliğinin net ve açık bir şekilde anlaşılması için kesme yüzeyinin altına $h/D_{\max}=0.5$, $h/D_{\max}=1.0$, $h/D_{\max}=2.0$, ve $h/D_{\max}=3.0$ olmak üzere 4 farklı derinliğe yerleştirilerek büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı şekil özelliklerine sahip üç granüler zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen bu deneylere ait veriler aşağıdaki başlıklarda sunulmuştur.

4.4.2.1. $h/D_{max}=0.5$ deneyleri

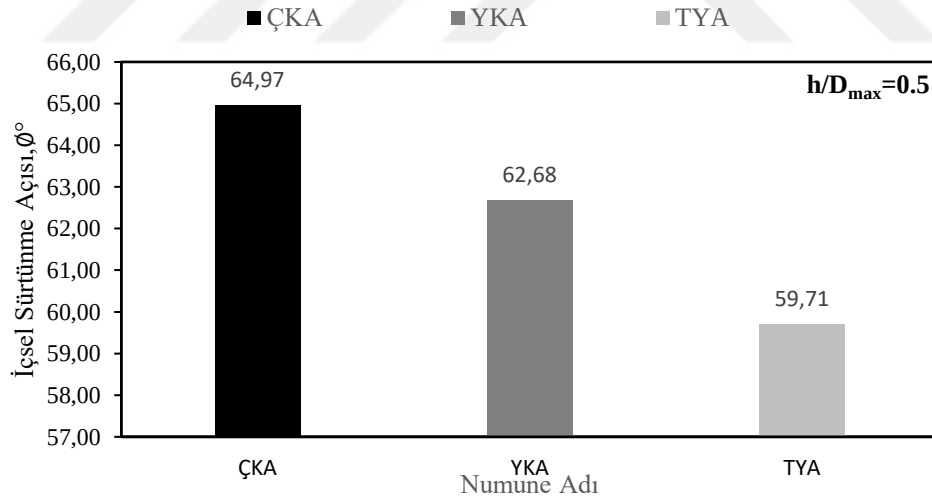
Tez çalışması kapsamında, kesme yüzeyinin $h/D_{max}=0.5$ oranında altına geogrid güçlendirme yerleştirilme durumunda elde edilen kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açılarının bilgilerin mevcut olduğu sütun grafiği Şekil 4.18’de sunulmuştur.



Şekil 4.16. $h/D_{max}=0.5$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.17. $h/D_{max}=0.5$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı



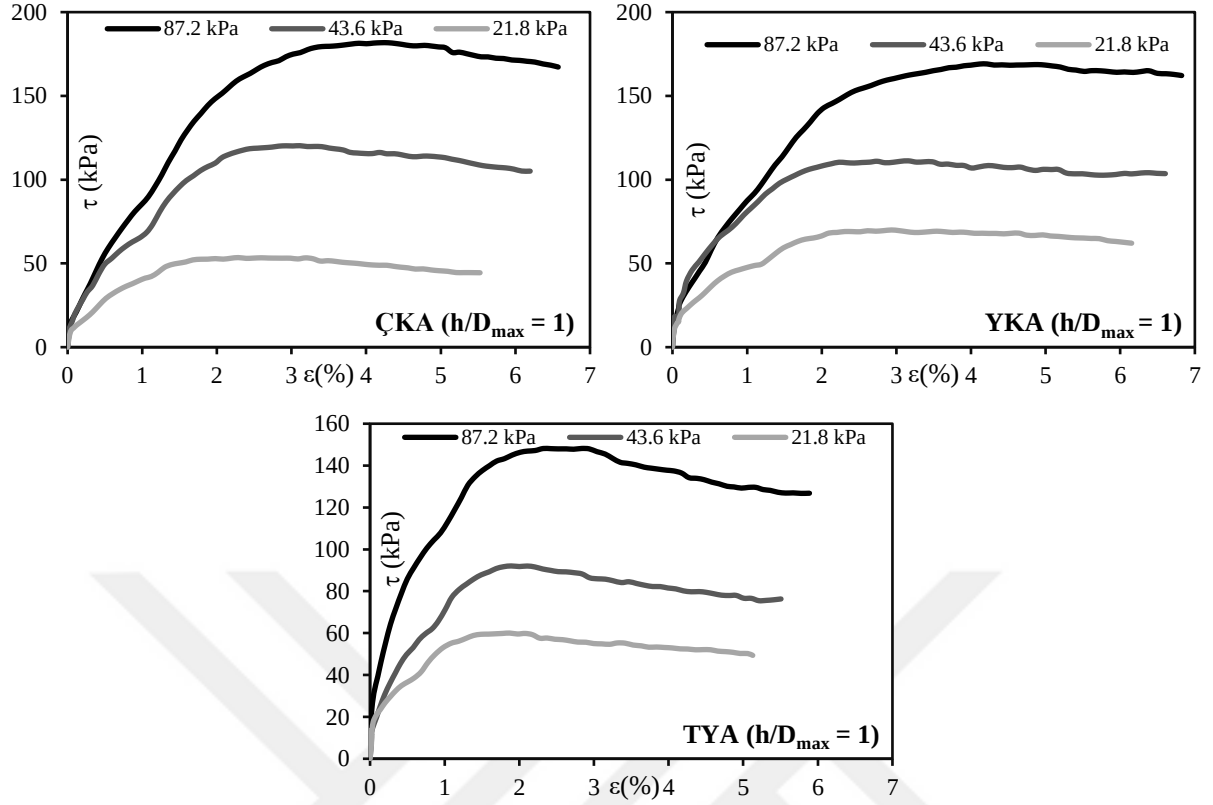
Şekil 4.18. $h/D_{max}=0.5$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin içsel sürtünme açıları

Yapılan analizler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri; ÇKA zemin numunesi için 64.97° , YKA zemin numunesi için 62.68° iken TYA zemin numunesi için ise 59.71° olarak elde edilmiştir. Geogrid güçlendirmenin kesme yüzeyinin $h/D_{max}=0.5$ oranında altına yerleştirilmesi durumunda, tıpkı güçlendirmesiz ve yüzey güçlendirmeli durumda olduğu gibi yuvarlaklık değerinin artması ile kayma mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu değerler ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerin geogrid kullanılmadan gerçekleştirilen

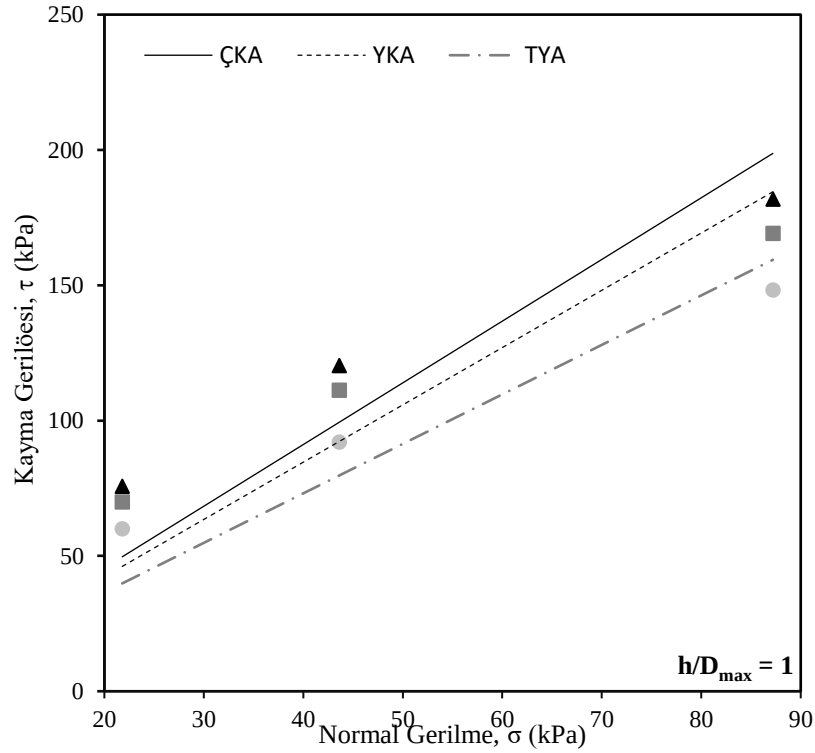
deneyler ile kıyaslandığında sırası ile %3.58, %2.32 ve %9.34 oranında bir artış söz konusu iken yüzey güçlendirmeli deneylerden elde edilen veriler ile kıyaslandığında sırası ile %5.94, %5.49 ve %11.61 oranında bir artış söz konusu olmuştur. Geogrid güçlendirmenin kesme yüzeyine yerleştirilmesi sonucunda geogrid donatıda meydana gelen kayma, burkulma ve düz bir yüzey oluşma durumlarından dolayı zemin-donatı kayma dayanımında karşılaşılan düşüş, kesme yüzeyinin $h/D_{max}=0.5$ oranında altına yerleştirilmesi durumunda karşılaşılmamıştır. Birçok araştırmacıya göre, kesme kutusu testleri, kesme düzleminin altında rijit bir bölge oluşturmaktadır, bu da maksimum ve rezidüel kesme gerilmelerini yükseltir (Konietzky ve diğerleri 2004; McDowell ve diğerleri 2006; Arulrajah ve diğerleri 2014). Bu nedenle, geogridi kesme düzleminin altına yerleştirerek, gerçek saha koşullarını temsil eden daha gerçekçi bulguların elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

4.4.2.2. $h/D_{max}=1.0$ deneyleri

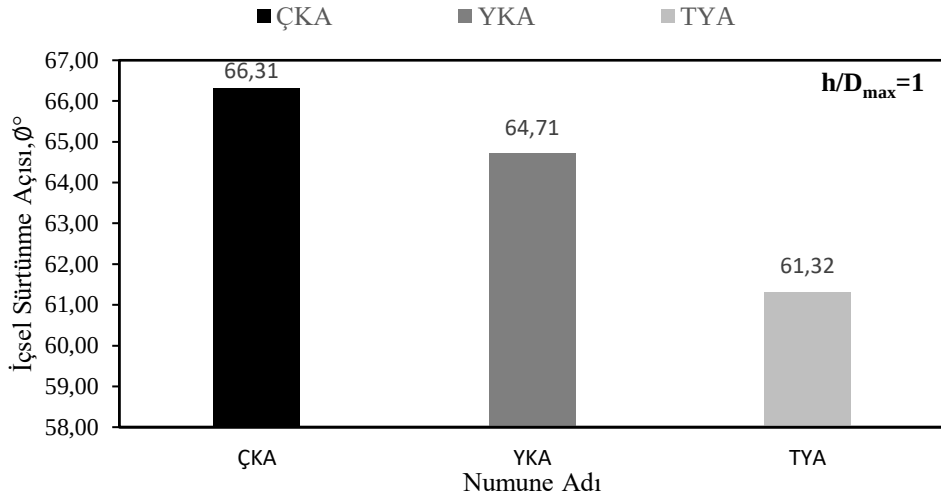
Tez çalışması kapsamında, kesme yüzeyinin $h/D_{max}=1$ oranında altına geogrid güçlendirme yerleştirilme durumunda elde edilen kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açılarına ait bilgilerin mevcut olduğu sütun grafiği Şekil 4.21’de sunulmuştur.



Şekil 4.19. $h/D_{max}=1$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.20. $h/D_{max}=1$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı

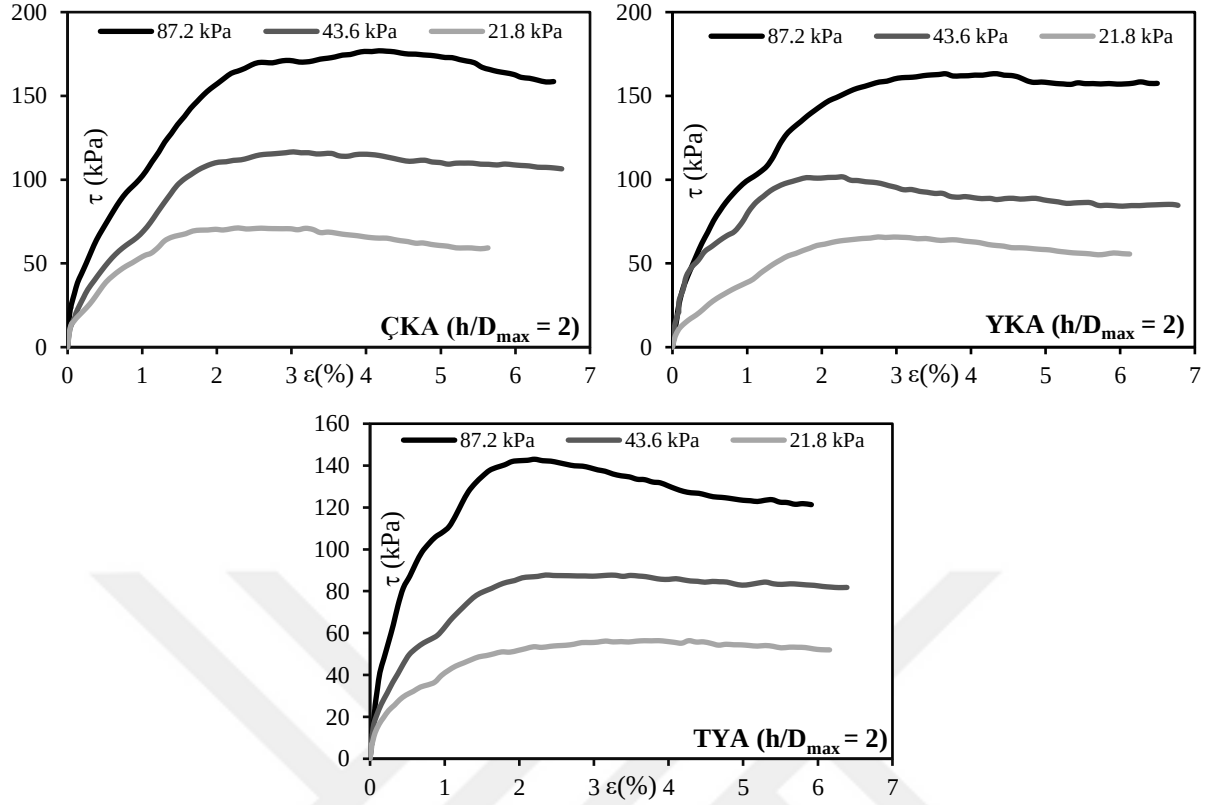


Şekil 4.21. $h/D_{\max}=1$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin içsel sürtünme açıları

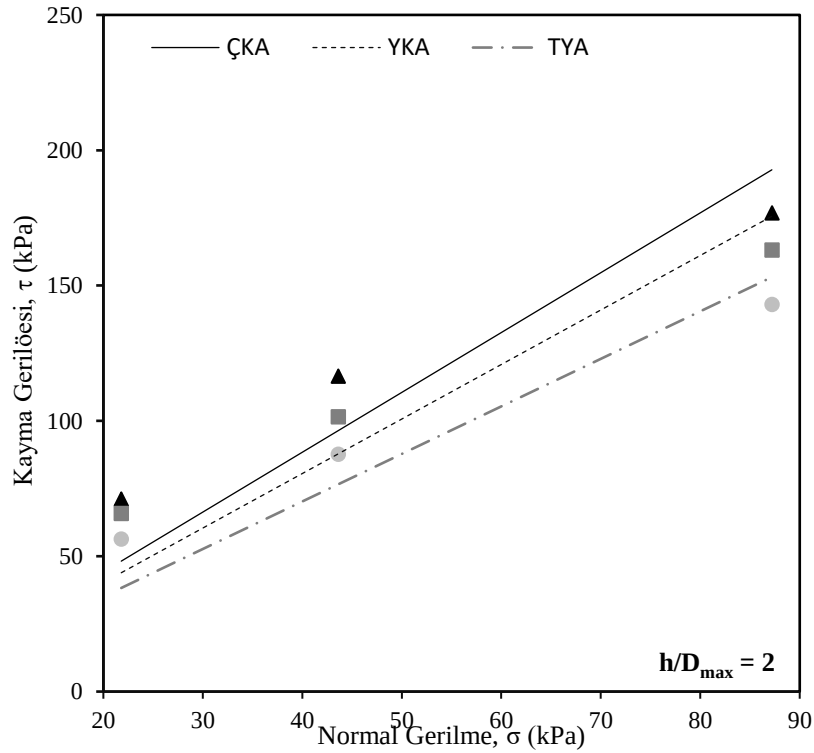
Yapılan analizler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri; ÇKA zemin numunesi için 66.31° , YKA zemin numunesi için 64.71° iken TYA zemin numunesi için ise 61.32° olarak elde edilmiştir. Geogrid güçlendirmenin kesme yüzeyinin $h/D_{\max}=1$ oranında altına yerleştirilmesi durumunda, tıpkı güçlendirmesiz, yüzey güçlendirmeli ve $h/D_{\max}=0.5$ oranında güçlendirme durumunda olduğu gibi yuvarlaklık değerinin artması ile kayma mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu değerler ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerinin geogrid kullanılmadan gerçekleştirilen deneyleri ile kıyaslandığında sırası ile %5.53, %5.39 ve %11.72 oranında bir artış söz konusu olmuştur, yüzey güçlendirmeli deneylerden elde edilen veriler ile kıyaslandığında sırası ile %7.84, %8.45 ve %13.93 oranında bir artış gözlemlenirken $h/D_{\max}=0.5$ oranında güçlendirme deneylerinden elde edilen veriler ile kıyaslandığında kıyaslandığında sırası ile %2.02, %3.13 ve %2.62 oranında bir artış gözlemlenmiştir.

4.4.2.3. $h/D_{\max}=2.0$ deneyleri

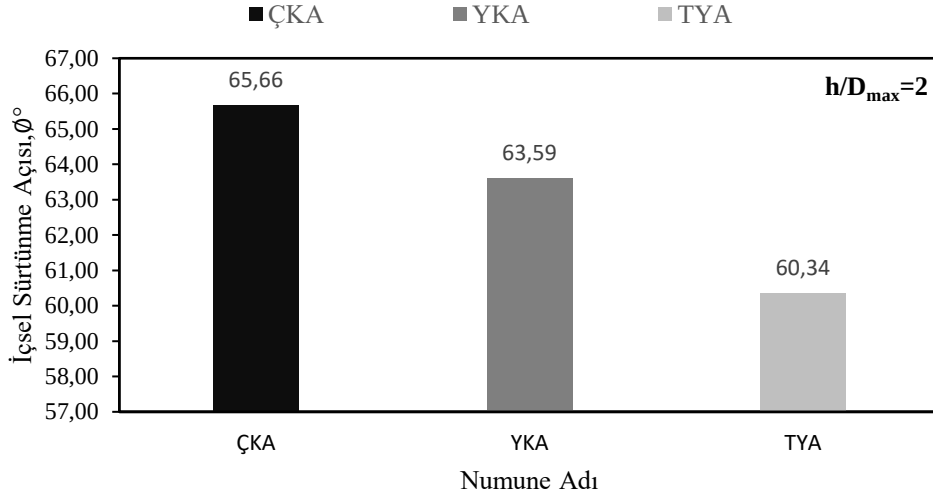
Tez çalışması kapsamında, kesme yüzeyinin $h/D_{\max}=2$ oranında altına geogrid güçlendirme yerleştirilme durumunda elde edilen kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri sırasıyla Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açılarına ait bilgilerin mevcut olduğu sütun grafiği Şekil 4.24’de sunulmuştur.



Şekil 4.22. $h/D_{max}=2$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.23. $h/D_{max}=2$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı

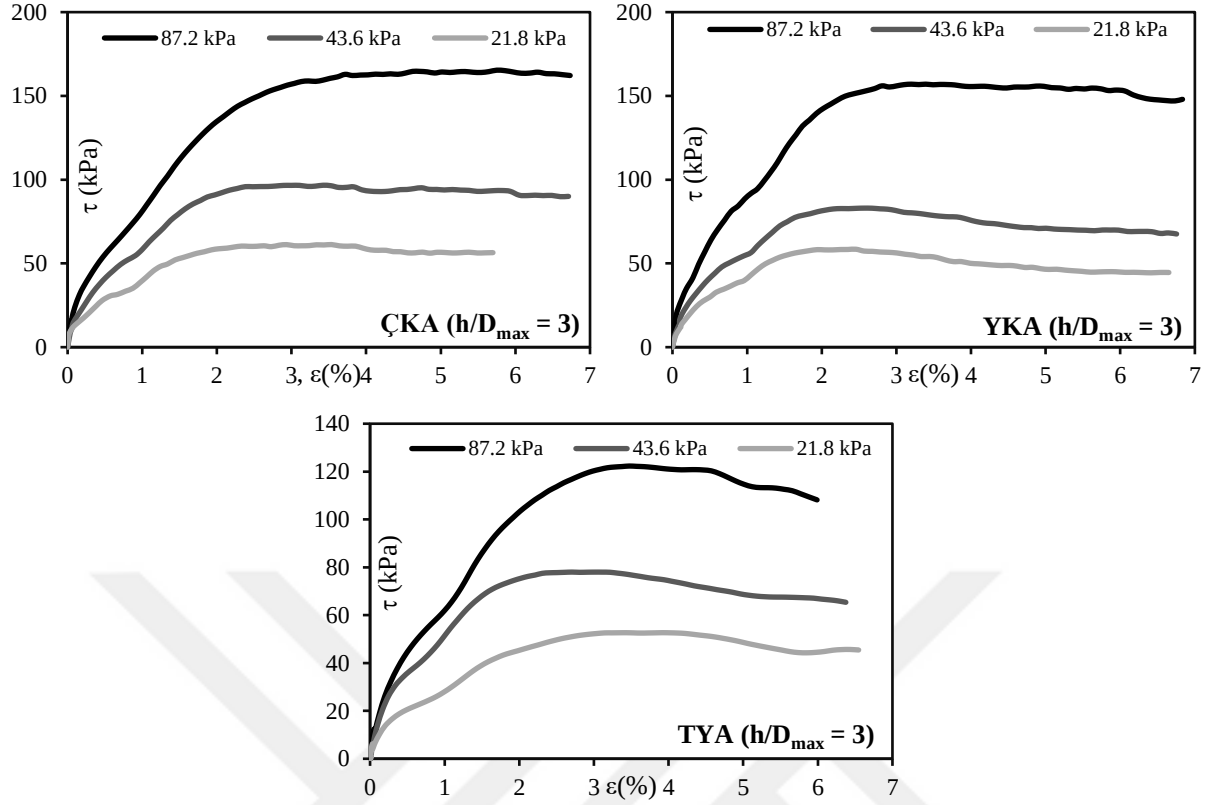


Şekil 4.24. $h/D_{\max}=2$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin içsel sürtünme açıları

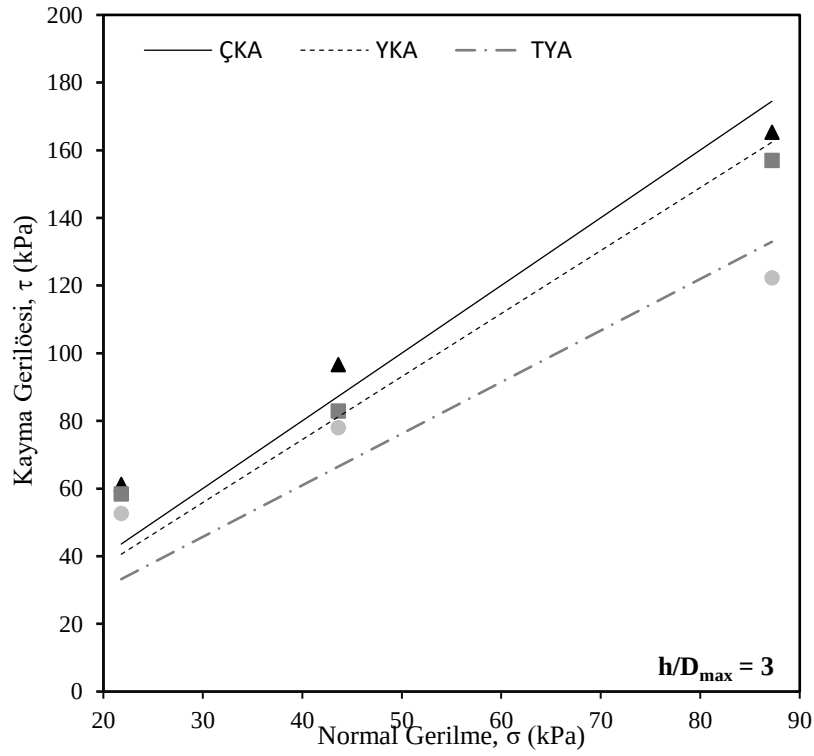
Yapılan analizler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri; ÇKA zemin numunesi için 65.66° , YKA zemin numunesi için 63.59° iken TYA zemin numunesi için ise 60.34° olarak elde edilmiştir. Geogrid güçlendirmenin kesme yüzeyinin $h/D_{\max}=2$ oranında altına yerleştirilmesi durumunda, tıpkı güçlendirmesiz, yüzey güçlendirmeli, $h/D_{\max}=0.5$ oranında güçlendirme durumunda ve $h/D_{\max}=1$ oranında güçlendirme durumunda olduğu gibi yuvarlaklık değerinin artması ile kayma mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu değerler ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerin geogrid kullanılmadan gerçekleştirilen deneyler ile kıyaslandığında sırası ile %4.60, %3.73 ve %10.29 oranında bir artış söz konusu olmuştur, yüzey güçlendirmeli deneylerden elde edilen veriler ile kıyaslandığında sırası ile %6.93, %6.85 ve %12.53 oranında bir artış gözlemlenmiştir, $h/D_{\max}=0.5$ oranında güçlendirme deneylerinden elde edilen veriler ile kıyaslandığında kıyaslandığında sırası ile %1.06, %1.44 ve %1.05 oranında bir artış gözlemlenirken, $h/D_{\max}=1$ oranında güçlendirme deneylerinden elde edilen veriler ile kıyaslandığında kıyaslandığında sırası ile %0.99, %1.75 ve %1.62 oranında bir düşüş söz konusu olmuştur.

4.4.2.4. $h/D_{\max}=3.0$ deneyleri

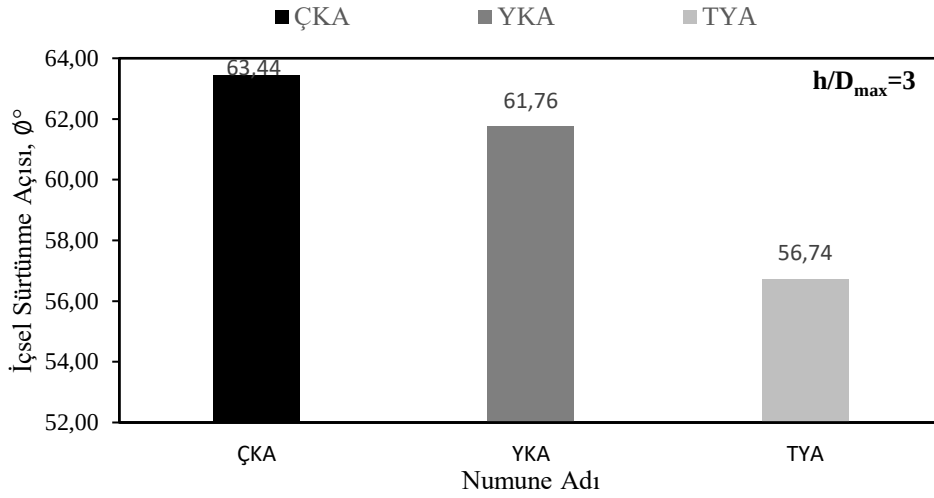
Tez çalışması kapsamında, kesme yüzeyinin $h/D_{\max}=2$ oranında altına geogrid güçlendirme yerleştirilme durumunda elde edilen kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Zemin numunelerinin içsel sürtünme açılarına ait bilgilerin mevcut olduğu sütun grafiği Şekil 4.27’de sunulmuştur.



Şekil 4.25. $h/D_{max}=3$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.26. $h/D_{max}=3$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin göçme zarfı



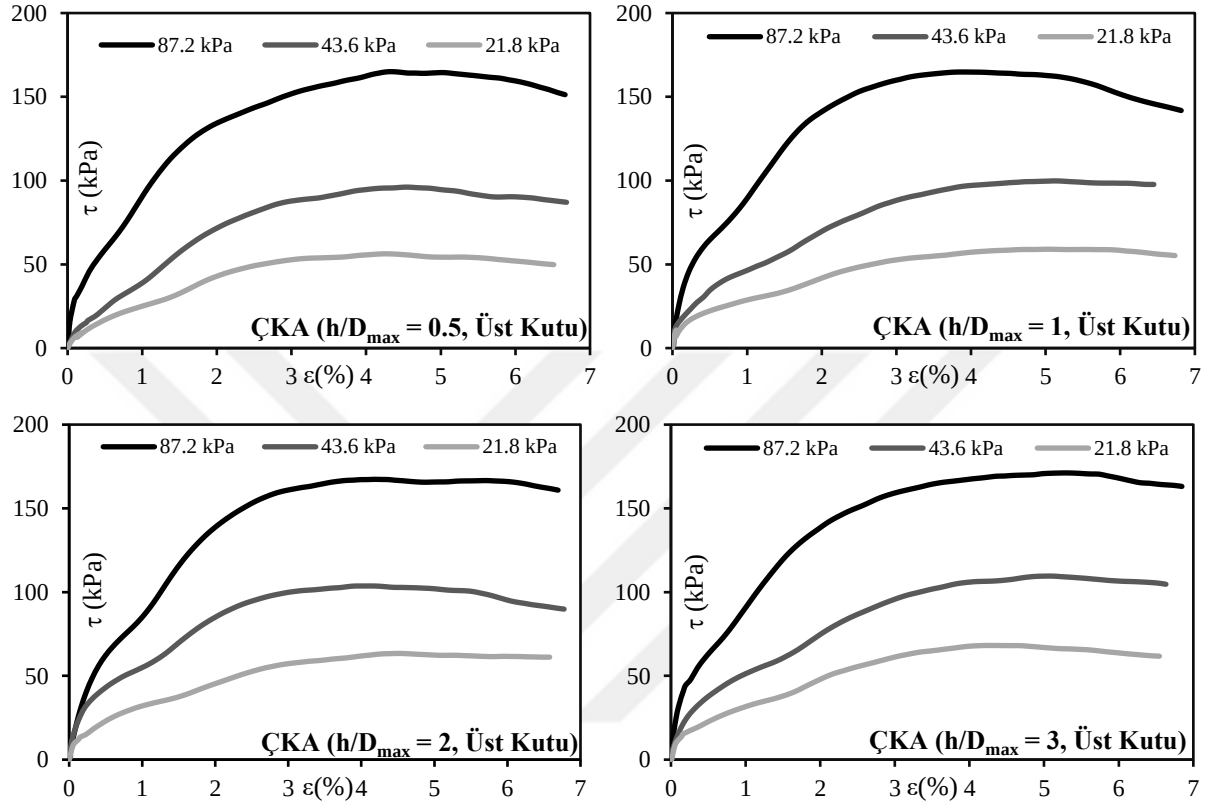
Şekil 4.27. $h/D_{\max}=3$ oranında güçlendirmeli zemin numunelerinin içsel sürtünme açıları

Yapılan analizler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri; ÇKA zemin numunesi için 63.44° , YKA zemin numunesi için 61.76° iken TYA zemin numunesi için ise 56.74° olarak elde edilmiştir. Geogrid güçlendirmenin kesme yüzeyinin $h/D_{\max}=3$ oranında altına yerleştirilmesi durumunda, tıpkı güçlendirmesiz, yüzey güçlendirmeli, $h/D_{\max}=0.5$ oranında güçlendirme durumunda, $h/D_{\max}=1$ oranında güçlendirme durumunda ve $h/D_{\max}=2$ oranında güçlendirme durumunda olduğu gibi yuvarlaklık değerinin artması ile kayma mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu değerler ÇKA, YKA ve TYA zemin numunelerinin geogrid kullanılmadan gerçekleştirilen deneyler ile kıyaslandığında sırası ile %1.26, %0.88 ve %4.60 oranında bir artış söz konusu olmuştur, yüzey güçlendirmeli deneylerden elde edilen veriler ile kıyaslandığında sırası ile %3.67, %4.08 ve %6.97 oranında bir artış gözlemlenmiştir, $h/D_{\max}=0.5$ oranında güçlendirme deneylerinden elde edilen veriler ile kıyaslandığında kıyaslandığında sırası ile %2.39, %1.48 ve %5.24 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir, $h/D_{\max}=1$ oranında güçlendirme deneylerinden elde edilen veriler ile kıyaslandığında kıyaslandığında sırası ile %4.51, %4.77 ve %8.08 oranında bir düşüş söz konusu olurken, $h/D_{\max}=1$ oranında güçlendirme deneylerinden elde edilen veriler ile kıyaslandığında kıyaslandığında sırası ile %3.49, %2.97 ve %6.35 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir.

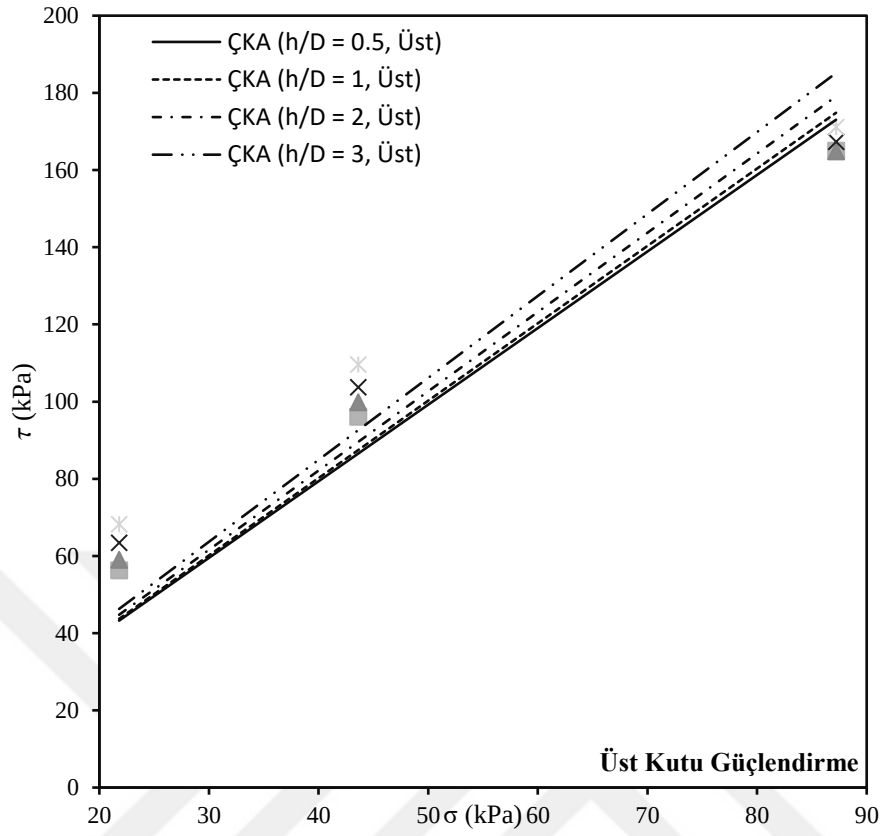
4.4.3. Donatının kesme yüzeyinin üzerine yerleştirilmesi

Tez çalışması kapsamında, kesme yüzeyinin üzerine geogrid güçlendirme yerleştirilme durumunda elde edilen ÇKA zemin numunesine ait kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da

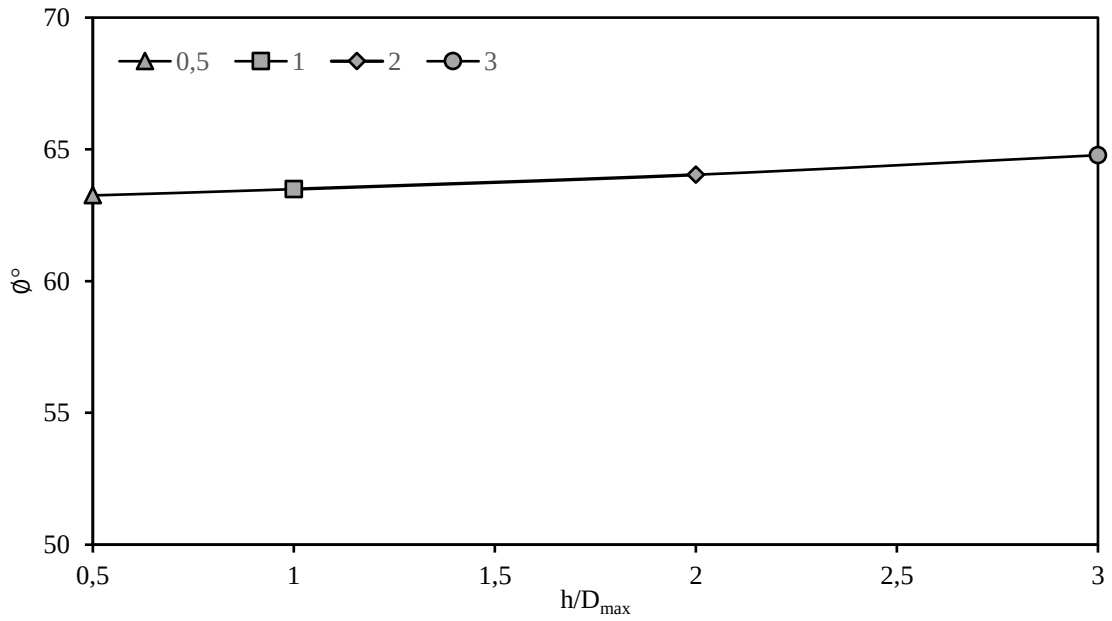
gösterilmiştir. Ayrıca, kesme yüzeyinin üzerinde güçlendirilen ÇKA zemin numunesinin $h/D_{\max} - \phi$ ilişkisi içeren grafik Şekil 4.30’da gösterilirken içsel sürtünme açlarına ait bilgilerin mevcut olduğu sütun grafiği Şekil 4 .31’de sunulmuştur.



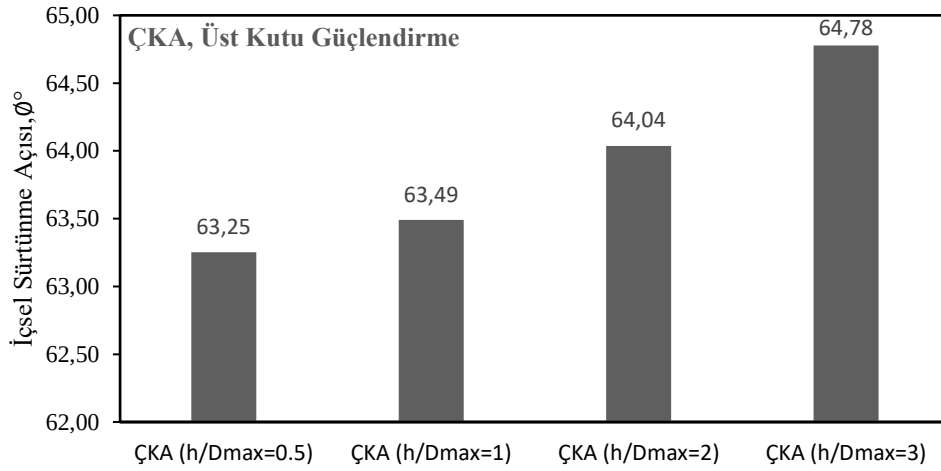
Şekil 4.28.Üst kutu güçlendirmeli ÇKA zemin numunesinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.29.Üst kutu güçlendirmeli ÇKA zemin numunesinin göçme zarfı



Şekil 4.30.Üst kutu güçlendirmeli ÇKA zemin numunesinin $h/D_{\max}$ - ϕ ilişkisi



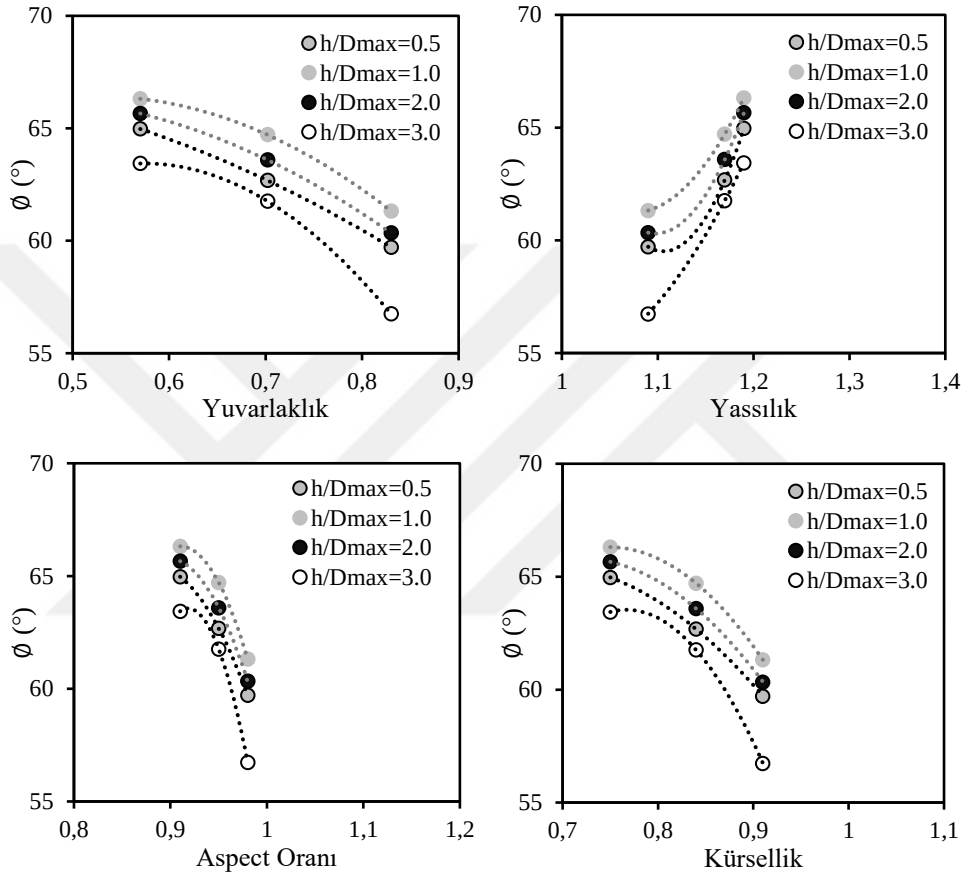
Şekil 4.31. Üst kutu güçlendirmeli ÇKA zemin numunesinin içsel sürtünme açıları

Yapılan analizler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri; ÇKA zemin numunesinin üst kutu güçlendirme verileri $h/D_{\max}=0.5$ oranı için 63.25° , $h/D_{\max}=1$ için 63.49° , $h/D_{\max}=2$ için 64.04° iken $h/D_{\max}=3$ için ise 64.78° olarak elde edilmiştir. $h/D_{\max}$ oranının artması ile sürekli bir artış söz konusu olmuştur fakat bu artışın çok yüksek değerler olmadığı gözlemlenmiştir. ÇKA zemin numunesinin $h/D_{\max}=0.5$ oranında üst kutu güçlendirmeli deneyinden elde edilen veri ile aynı numunenin geogrid donatı kullanılmadan gerçekleştirilen deneylerinden elde edilen veri kıyaslandığında yaklaşık olarak %0.97 bir artış söz konusu olmuştur. $h/D_{\max}$ oranının 0.5’den 1’e arttırılması sonucunda, içsel sürtünme açısında %0.38’lik bir artış gözlemlenmiş, bu oranın 1’den 2’ye arttırılması ile yaklaşık %0.88’lik bir artış gözlenirken 2’den 3’e arttırılması ile ise yaklaşık %1.18’lik bir artış söz konusu olmuştur. Kesme kutusunun üst tarafında geogrid güçlendirme kullanılması durumunda içsel sürtünme açısında azda olsa sürekli bir artış söz konusu olduğundan optimum bir değere rastlanılamamıştır.

4.4.4. Donatılı deneylerin karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında, kesme yüzeyine ve kesme yüzeyinin $h/D_{\max}=0.5$, $h/D_{\max}=1$, $h/D_{\max}=2$ ve $h/D_{\max}=3$ oranında altına geogrid güçlendirme yerleştirilme durumunda elde edilen veriler bu başlık altında incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen şekil faktörlerine göre içsel sürtünme açısı değişimleri Şekil 4.32’de gösterilmektedir. Yuvarlaklık, aspect oranı ve kürsellik değerleri içsel sürtünme açısı ile ters orantılı yassılık değeri ise doğru orantılı olarak bir değişim göstermiştir. Yuvarlaklık değeri yaklaşık 0.7, aspect oranı değeri yaklaşık 0.95 ve kürsellik değeri yaklaşık 0.85’den daha düşük değerlerde içsel sürtünme açısı artışı

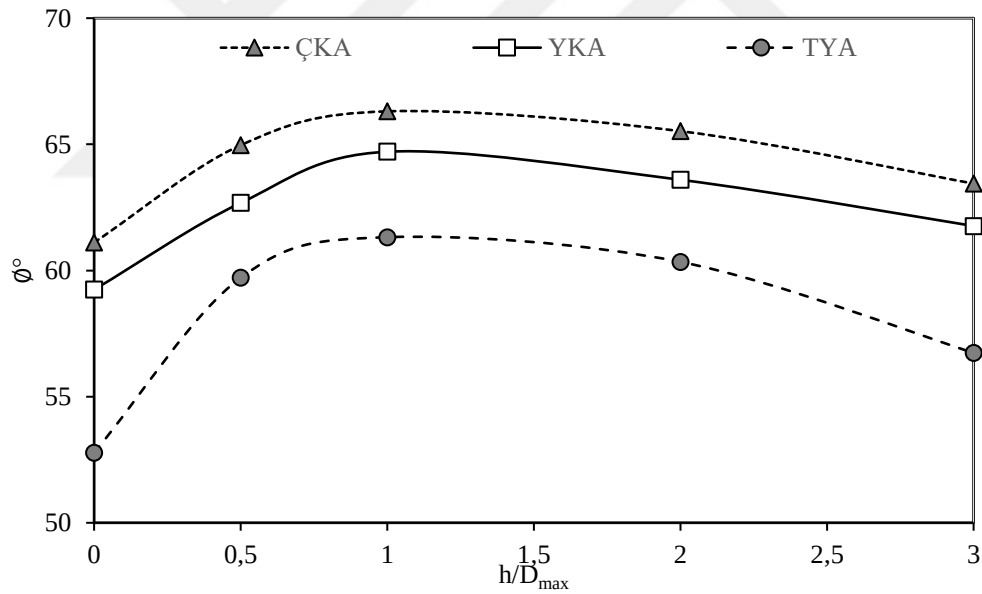
düşmektedir. Yassılık değeri ise yaklaşık 1.15'ten daha fazla değerlerde içsel sürtünme açısı artışı düşmektedir. Bu değerlerden zemin danelerinin yuvarlaklık sınıfı çok köşeliden yarı köşeliye değiştiğinde elde edilecek içsel sürtünme açısı kazancı zemin danelerinin yuvarlaklık sınıfı yarı köşeliden çok köşeliye değiştiğinde elde edilecek içsel sürtünme açısı kazancından daha fazla olduğu çıkarılmıştır.



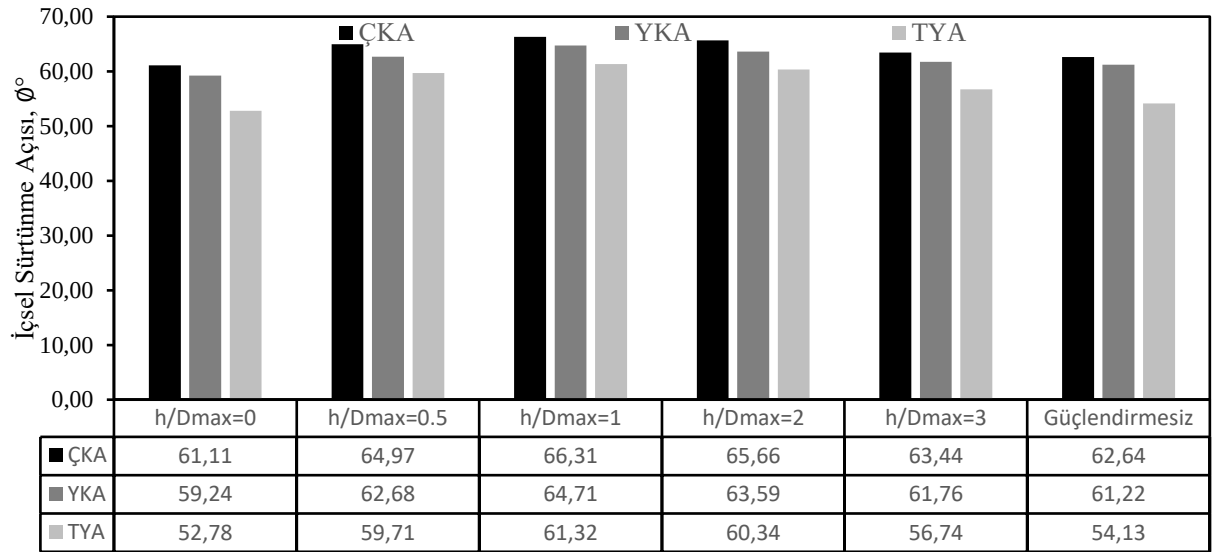
Şekil 4.32. Geogrid kesme yüzeyinin altında olması durumunda dane şekil özellikleri ile ϕ değişimi

Granüler zeminler için kesme yüzeyi ile kesme yüzeyi altına yerleştirilen geogrid güçlendirme arasındaki mesafenin içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisi Şekil 4.33'de gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar geogirdsiz deneylerin sonuçları ile birlikte Şekil 4.34'de sunulmuştur. Granüler zemin numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme grafiği ise Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Buna göre kesme yüzeyi ile geogrid arasındaki mesafe maksimum dane çapı mesafesi olana kadar ($h/D_{max} < 1.0$) içsel sürtünme açısı artmıştır. Maksimum içsel sürtünme açısı değerleri geogirdin kesme yüzeyinin maksimum dane çapı kadar altına ($h/D_{max} = 1.0$) yerleştirilmesi durumunda elde edilmiştir. Bu sonuçlar kesme yüzeyinin altında oluşması beklenen rijit bölgeyi doğrulamaktadır (Konietzky et al. 2004; McDowell et al. 2006;

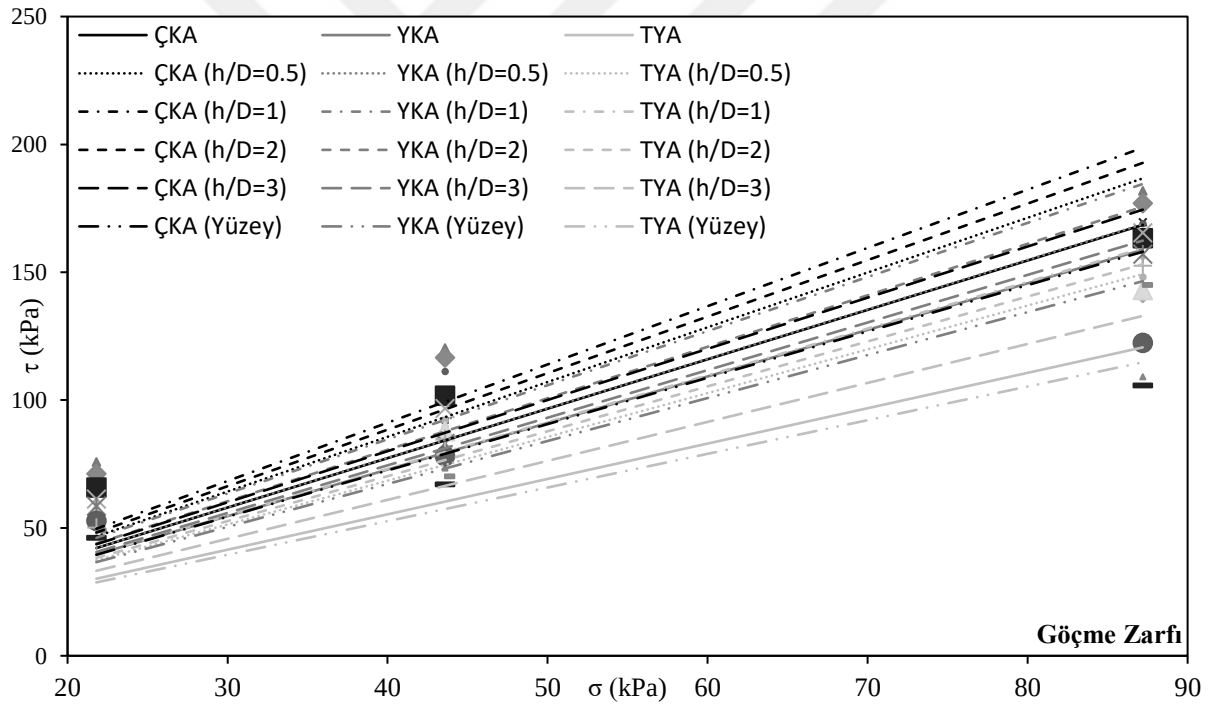
Arulrajah et al. 2014). Bununla birlikte bu sonuçlar ayrıca geogird ile zemin daneleri arasındaki kenetlenme mekanizmasının en iyi şekilde görülebilmesi için maksimum dane çapı kadar bir derinliğin gerekli olabileceğini ifade etmektedir. Bu durumda içsel sürtünme açısı donatısız duruma göre ÇKA ve YKA için yaklaşık 3.5 derece artarken TYA için artış yaklaşık 7 derece artmıştır. Bu durumu donatısız zeminde TYA'nın içsel sürtünme açısı değerlerinin ÇKA ve YKA'dan sırası ile yaklaşık 8.5 ve 7 derece gibi büyük bir oranda düşük olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca deney sonuçlarından TYA'nın geogrid takviyesi ile ÇKA ve YKA'nın kayma dayanımlarını yakalayabilecek bir performansa ulaşabileceği de elde edilmiştir. Kesme yüzeyi ile geogrid arası mesafe maksimum dane çapı mesafeyi geçtikten sonra ($h/D_{max} > 1.0$) içsel sürtünme açılarının düştüğü görülmüştür. Kesme yüzeyi ile geogrid arası mesafe maksimum dane çapının üç katı olması durumunda ($h/D_{max} = 3.0$) elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri geogridsiz durumda elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri ile yakın olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.33. h/D_{max} ile içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki



Şekil 4.34. Güçlendirmeli ve güçlendirmesiz deney sonuçları



Şekil 4.35. Granüler zemin numunelerine ait kayma gerilmesi – normal gerilme grafiği

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada ilk olarak sayısal görüntü işleme analizleri ile şekil faktörleri belirlenen üç farklı granüler zeminin zemin numunesinin kayma dayanımı ve CBR değerleri büyük ölçekli kesme kutusu ve CBR testleri ile belirlenmiştir. Daha sonra geogrid kesme yüzeyinin altına ve üzerine farklı dört kademeye yerleştirilerek büyük ölçekli kesme kutusu testleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen çarpıcı sonuçları aşağıda listelenmiştir.

- Granüler zemin numunesinin içsel sürtünme açısı ve CBR değeri yuvarlaklık, küresellik ve aspect oranı ile ters orantılı iken yassılık ile doğru orantılı olarak değişir.
- Danelerin yuvarlaklık grupları yarı köşeliden tam yuvarlak sınıfına değişimi içsel sürtünme açısı üzerinde çok köşeliden yarı köşeli sınıfına değişiminden daha kritik değişikliklere yol açmıştır. Bu bakıma granüler zeminler için danelerin yuvarlaklık değeri yaklaşık 0.70, aspect oranı değeri yaklaşık 0.95, küresellik değeri yaklaşık 0.85 kritik değerler olarak görülebilir. Dolgularda kullanılacak granüler zeminler için danelerin şekil faktörlerinin yukarıda belirtilen kritik değerlerden düşük olması önerilmektedir. Bu kritik değer yassılık için yaklaşık 1.15 olup dolgularda kullanılacak granüler zeminlerin yassılık değerinin 1.15'ten yüksek olması önerilmektedir.
- Danelerin yuvarlaklık grubu çok köşeli ve yarı köşeli olan granüler zemin numuneleri CBR bakımından dolguda kullanmak için uygun bir performans göstermiş ancak yuvarlaklık grubu tam yuvarlak olan granüler zemin numuneleri CBR bakımından yeterli performans gösterememiştir. Bu bakıma yuvarlaklık grubu tam yuvarlak olan granüler zeminlerin güçlendirilerek kullanılması daha uygun olabilir.
- Geogrid kesme yüzeyine yerleştirildiğinde geogridsiz duruma göre içsel sürtünme açısı yaklaşık %3 düşmüştür. Geogridin kesme yüzeyine yerleştirildiği durumda düz bir yüzey oluşturduğu düşünülmektedir.
- Geogird kesme yüzeyinin altına veya üstüne yerleştirildiği tüm durumlarda ise geogridsiz duruma göre daha yüksek içsel sürtünme açısı değerleri elde edilmiştir. Bu durumlarda iyileştirme zemin-geogrid kenetlenme etkisinden kayanmaktadır.
- Geogridin kesme yüzeyinin maksimum dane çapı kadar altına yerleştirilmesi durumunda maksimum içsel sürtünme açısı değerleri elde edilmiştir. Bu durumda kesme yüzeyi altında oluşan rijit bölgenin de etkisi olduğu düşünülmektedir.

- Geogrid ile güçlendirme yapılan durumlarda geogrid takviyesi ile oluşturulan kısmen daha rijit zemin bölgesinin tahmini içsel sürtünme açısı için donatı altındaki ve üstündeki zemin bölgelerinin içsel sürtünme açılarının ortalamaları tasarımda kullanmak için bir ölçü olabileceği düşünülmektedir.



6. ÖNERİLER

Farklı şekil parametrelerine sahip granüler zemin numunelerin geogrid donatı ile güçlendirilerek kullanıldığı geoteknik mühendisliği projelerin artması için zemin ile donatı arasındaki kenetlenme mekanizmasının tam anlamı ile anlaşılması hayati önem taşımaktadır. Bu tez çalışması referans alınarak, yapılabilecek çalışmalar için öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak arazi deneylerinin de eklenmesi çalışmayı ileri bir seviyeye taşıyarak dane şekil faktörleri ile geogrid güçlendirme arasındaki kenetlenme mekanizmasının daha rahat bir şekilde anlaşılabilmesine yardımcı olabilir.
- Bu tez çalışması kapsamında farklı şekil faktörlerine sahip üç granüler zemin kullanılmasına rağmen numune sayısı arttırılarak ileri çalışmalar yapılabilir.
- Farklı açıklık boyutuna ve dayanıma sahip geogrid güçlendirmeler kullanılarak çalışma zenginleştirilip zemin-geogrid kenetlenme mekanizması farklı ve geniş bir perspektiften bakılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdi, M.R., Gonbad, M.S.S. 2019. Effect of roughness on soil-geogrid interaction in direct shear mode. 11th National Congress on Civil Engineering, May, Shiraz, Iran.
- Alias, R., Kasa, A., Taha, M.R. 2014. Particle size effect on shear strength of granular materials in direct shear test. *International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering*, 8(11), 1144–1147.
- Alshibli, Khalid A.; Alsaleh, Mustafa I. 2004. Characterizing Surface Roughness and Shape of Sands Using Digital Microscopy. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1), 36–45.
- Arasan, S. (2011). Görüntü Analizi ile Granüler Zeminlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi. Ulusal Tez Merkezi. (284223).
- ASTM C 127-01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2001.
- ASTM C 128-01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2001.
- ASTM C 131-03. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2003.
- ASTM C136-01. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, ASTM International PA; 2014.
- ASTM D 2487-11. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). West Conshohocken, USA: ASTM International; 2011.
- ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2011.

- ASTM D 4253-16. Standard method for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2016.
- ASTM D 4254-00. Standard test method for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2002.
- ASTM D 7382. Test Methods for Determination of Maximum Dry Unit Weight and Water Content Range for Effective Compaction of Granular Soils Using a Vibrating Hammer. West Conshohocken, USA: ASTM International; 2008.
- Athanasopoulos, G. A. 1993. Effect of particle size on the mechanical behaviour of sandgeotextile composites. *Geotextiles and Geomembranes*, 12(3), 255–273.
- Bahaaddini, M. (2017). Effect of boundary condition on the shear behaviour of rock joints in the direct shear test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(5), 1141-1155.
- Bahaaddini, M., Hagan, P. C., Mitra, R., & Khosravi, M. H. (2016). Experimental and numerical study of asperity degradation in the direct shear test. *Engineering Geology*, 204, 41-52.
- Bareither, C.A., Benson, C.H., Edil, T.B. 2008. Comparison of shear strength of sand backfills measured in small-scale and large-scale direct shear tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(9), 1224–1236.
- Anubhav, Basudhar, P.K. 2010. Modeling of soil–woven geotextile interface behavior from direct shear test results. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(4), 403-408.
- Cerato, A. B., & Lutenecker, A. J. 2006). Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands. *Geotechnical Testing Journal*, 29(6), 507-516.
- Coulomb, C.A., 1776. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, 7, 343–382.
- Cox, E.A., 1927. A method for assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *J. Paleontol.*, 1, 179–183.

- Dadkhah, R., M. Ghafoori, R. Ajalloeian, and G. Lashkaripo. The Effect of Scale Direct Shear Test on the Strength Parameters of Clayey Sand in Isfahan City, Iran. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 10, No. 18, 2010, pp. 2027–2033.
- Das, B.M., Sobhan, K. 2010. *Principles of Geotechnical Engineering Eighth Edition*, SI. USA: Cengage Learning. Lampiran, 1.
- Haeri, S.M., Noorzad, R., Oskoorouchi, A.M. 2000. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(6), 385–402. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(00\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(00)00005-4).
- Han, B., Ling, J., Shu, X., Gong, H., Huang, B. 2017. Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Building Materials*, 158, 1015-1025.
- Infante, D.J.U., Martinez, G.M.A., Arrua, P.A., Eberhardt, M. 2016. Shear strength behavior of different geosynthetic reinforced soil structure from direct shear test. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(17), 1-16.
- Kayadelen, C., Önal, T. Ö., & Altay, G. (2018). Experimental study on pull-out response of geogrid embedded in sand. *Measurement*, 117, 390–396.
- Kim, D., Ha, S. 2014. Effects of particle size on the shear behavior of coarse grained soils reinforced with geogrid. *Materials*, 7, 963–979.
- Kuo, C., Freeman, R.B. 2000. Imaging indices for quantification of shape, angularity, and surface texture of aggregates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1721, 57–65.
- Mamo, B.G., Dey, A. 2016. Strain rate and scale effects on stress-strain behavior of sand. *International conference on the advancements of science and technology in civil and water resources engineering*, At Bahir Dar, Ethiopia.
- Mirzaeifar, H., Abouzar, A., Abdi, M.R. 2013. Effects of direct shear box dimensions on shear strength parameters of geogrid-reinforced sand. 66th Canadian Geotechnical Conference and the 11th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, September, Montreal, Quebec, Canada.

- Mitchell, James K. and Soga, Kenichi 2005. “Fundamentals of soil behavior”. Third edition. WILEY.
- Mora, C.F., Kwan, A.K.H. 2000. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 351–358.
- Naeini, S.A., Khalaj, M., Izadi, E. 2013. Interfacial shear strength of silty sand–geogrid composite. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 166(1), 67–75.
- Ok B., *Geosentetiklerle Güçlendirilmiş İnşaat ve Yıkıntı Atığı Dolguların Statik ve Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi (Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018).*
- Okman, C. (2013). *Zemin Mekaniği*. Ankara Üniversitesi, 273. Ankara, Türkiye.
- Palmeira, E. M., & Milligan, G. W. E. (1989). Scale effects in direct shear tests on sand. In *Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations*. 12 (pp. 739-742).
- Parihar, N.S., Shukla, R.P., Gupta, A.K. 2015. Effect of reinforcement on soil. *International Journal of Applied Engineering Research*. 10(55). 4147-4151.
- Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *J. Sed. Petrol.*, 23, 117–119.
- Reddy, Madhusudhan. (2018). An Experimental Study for Evaluation of Shear Strength Parameters with Geosynthetic Materials and Clay by Using Large-Scale Direct Shear Test Box.
- Reza Ziaie Moayed, Mahdi Alibolandi & Amir Alizadeh (2016): Specimen size effects on direct shear test of silty sands, *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Shakri, S. M., J. M. Noor, T. A. Nazaruddin, and A. M. Hafez. Effects of shear Box Size on Shear Strength between Modified Sand-Column (PFA-Sand Mixture) and Soft Soil. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, Vol. 6, No. 1, 2017, pp. 13–18

- Sneed, E.D., Folk, R.L., 1958. Pebbles in the Lower Colorado River, Texas: a study in particle morphogenesis. *J. Geol.*, 66, 114–150.
- Stacho, J., Sulovska, M., Slavik, I. 2020. Determining the shear strength properties of a soil-geogrid interface using a large-scale direct shear test apparatus. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(4), 989–998.
- Stathas, D., Wang, J. P., Ling, H. I. 2017. Model geogrids and 3D printing. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6), 688-696.
- Sweta, K., & Hussaini, S. K. K. (2018). Effect of shearing rate on the behavior of geogrid-reinforced railroad ballast under direct shear conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(3), 251–256.
- Sympatec (2008) Germany windox 5.4.1.0 — operating instructions. 475–476.
- Uzuner, B. A. (2007). *Temel Zemin Mekaniği*. Derya Kitapevi, 740. Trabzon, Türkiye
- Vangla, Prashanth; Latha, Gali Madhavi (2015). Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(1), 6.
- Wadell, H., 1932. Volume, shape, and roundness of rock particles. *J. Geol.*, 40, 443– 451.
- Wentworth, C.K., 1919. A laboratory and field study of cobble abrasion. *J. Geol.*, 27, 507–521.
- Wu, P.-K.; Matsushima, K.; Tatsuoka, F. Effects of specimen size and some other factors on the strength and deformation of granular soil in direct shear tests. *Geotech. Test. J.* 2008,31, 1–20.
- Zhou, Q., Shen, H.H., Helenbrook, B.T. Zhang, H. 2009. Scale dependence of direct shear tests. *Chinese Science Bulletin*. 54, 4337–4348.
- Zingg, T., 1935. Beitrag zur schotteranalyse. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 15, 39– 140.