



**GRANÜLER ZEMİNLERDE ŞEKİLSEL
PARAMETRELERİN ZEMİNİN TAŞIMA GÜCÜNE
ETKİSİNİN MODEL LABORATUVAR DENEYLERİ
İLE ARAŞTIRILMASI**

Babak KARIMI GHALEHJOUGH

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Prof. Dr. Suat AKBULUT
2017
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**GRANÜLER ZEMİNLERDE ŞEKİSEL PARAMETRELERİN
ZEMİNİN TAŞIMA GÜCÜNE ETKİSİNİN MODEL
LABORATUVAR DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Babak KARIMI GHALEHJOUGH

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



TEZ ONAY FORMU

**GRANÜLER ZEMİNLERDE ŞEKİSEL PARAMETRELERİN ZEMİNİN TAŞIMA
GÜCÜNE ETKİSİNİN MODEL LABORATUVAR DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Prof. Dr. Suat AKBULUT danışmanlığında, Babak KARIMI GHALEHJOUGH tarafından hazırlanan bu çalışma, 18/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.**

Başkan: Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM

İmza :

Üye : Prof. Dr. Suat AKBULUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Sadri ŞEN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **03.08/2017** tarih ve **31/.../13** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

GRANÜLER ZEMİNLERDE ŞEKİSEL PARAMETRELERİN ZEMİNİN TAŞIMA GÜCÜNE ETKİSİNİN MODEL LABORATUVAR DENEYLERİ İLE ARAŞTIRILMASI

Babak KARIMI GHALEHJOUGH

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Prof.Dr Suat AKBULUT

Granüler zeminler ve malzemeler, inşaat mühendisliğinde, genellikle geo-malzeme olarak kullanılmaktadırlar. Zeminlerin dane özellikleri, zeminin mukavemeti ve davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Danelerin büyüklüğü, şekli, pürüzlülüğü ve dağılımı gibi şekilsel özellikler granüler zeminlerin mühendislik özelliklerini belirler. Temelin altında yer alan zeminin nihai taşıma kapasitesi ve kırılma mekanizması zeminin rölatif sıklığı, zemin tane şekli, zemin tanelerinin morfolojik özellikleri gibi faktörlere bağlıdır.

Bu çalışmada farklı yuvarlaklıklarda, farklı rölatif sıklıklarda ve farklı granülometriye sahip zeminler üzerine oturan model bir şerit temelin taşıma kapasitesi ve kırılma mekanizmaları incelenmiştir. Köşeli zemin laboratuvara taşındıktan sonra, Los Angeles aleti kullanılarak yuvarlak ve yarı yuvarlak duruma getirilmiştir. Daha sonra farklı eleklerden geçirilerek 0,30-4,75 mm tane çapı aralığında 6 farklı granülometreye sahip zemin elde edilmiştir. Deneyler 3 farklı rölatif sıklıkta ($Dr=30\%$, 50% ve 70%) yapılmıştır. Deney süresince fotoğraflar çekilmiş ve çekilen fotoğraflar parçacık görüntülü hız ölçümü yöntemi (PIV) ile analiz edilerek temelin atındaki zeminin yer değişimi gözlenmiştir.

Zeminin taşıma kapasitesinin, dane boyutu ve rölatif sıklığın artmasıyla arttığı yapılan deneysel çalışmalarda görülmüştür. Aynı zamanda zeminin yuvarlaklığının artmasıyla taşıma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Taşıma kapasitesi sonuçlarından, köşeli zemin, yarı yuvarlağa dönüştürüldüğü zaman zeminin taşıma gücü azalmıştır. Aynı zamanda yarı yuvarlak zemin yuvarlak hale dönüştürüldüğünde taşıma kapasitesi azalmaya devam etmiştir. Köşeli zeminde $Dr=30\%$ rölatif sıklıktaki zeminde zımbalama, $Dr=50\%$ rölatif sıklıktaki zeminde bölgesel ve $Dr=70\%$ rölatif sıklıktaki zeminde genel kayma kırılması meydana gelmiştir. Aynı rölatif sıklıkta, köşeli zeminden yuvarlağa doğru gittiği zaman, taşıma kapasitesi azalmakta ve genel kayma kırılması, bölgesel veya zımbalamaya doğru gitmektedir. Artan rölatif sıklıklarda ($Dr=70\%$), yuvarlaklığın zeminin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

2017, 160 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tane şekli, Taşıma kapasitesi, PIV, Kayma kırılma mekanizması

ABSTRACT

PhD Thesis

MODEL LABORATORY TEST INVESTIGATION ON EFFECT OF SHAPE PARAMETERS OF GRANULAR SOILS ON BEARING CAPACITY OF SOIL

Babak KARIMI GHALEHJOUGH

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Civil Engineering
Geotechnical Division

Supervisor: Prof. Dr. Suat AKBULUT

Generally granular soils and materials are used as geo-materials in civil engineering sector. Particles properties of soils play important role on soil strength and behavior. Some shape properties such as size of particles, shape, roughness and distribution determine engineering properties of granular soils. Ultimate bearing capacity and shear failure mechanism of soil under footing depends on some factor such as relative density of soil, shape of particles and morphologic properties of soil.

At this study bearing capacity and shear failure mechanism of a model strip footing placed on a soil has been investigated at different roundness, different relative densities and different granulometry. After taking angular soil to laboratory, it was changed to rounded and well-rounded soil by use of Los Angeles machine. Later, soil with 6 different granulometry between 0.30 to 4.75 mm was gained by sieving from different sieves. Tests were done at 3 different relative densities ($D_r=30\%$, 50% and 70%). Pictures were taken from soil during tests. Displacement of soil beneath under footing was determined by analyzing captured images with Geo-PIV program.

By increasing particle size and relative density, increasing bearing capacity of soil have been seen at experimental works. At the same time by increasing roundness of soil, decreasing bearing capacity of soil was detected. From bearing capacity values, bearing capacity of soil was decreased while granular soil was changed to rounded. At the same time decreasing bearing capacity of soil continued while rounded soil was changed to well-rounded. Shear failure mechanism of granular soil was punching at relative density of $D_r=30\%$, local at relative density of $D_r=50\%$ and general at relative density of $D_r=70\%$. Bearing capacity of soil was decreasing at constant relative density while angular soil was going toward well-rounded and general shear failure mechanism was changing to local or punching. It found that roundness has more effect on bearing capacity of soil at bigger relative densities ($D_r=70\%$).

2017, 160 pages

Keywords: Particle shape, Bearing capacity, PIV, Shear failure mechanism

TEŞEKKÜR

Doktora Tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratvarında yapılmıştır. Bu çalışma süresince değerli bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın her aşamasına katkıda bulunan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Suat AKBULUT'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin hazırlanmasında, tez çalışmam ve deney süresince deneyimlerinden yararlandığım ve karşılaştığım problemlerin çözümünde yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Semet ÇELİK' den teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda tez izleme jürimde olan hocamız Sayın Prof. Dr. Sadri ŞEN' den teşekkürlerimle anmak isterim.

Sayın Yrd. Doç. Dr. Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK' dan ve Sayın Bilge AKSU ALCAN'dan tezin okumasında ve Türkçe düzeltmeler kısmında ki yardımlarından dolayı teşekkür ediyorum.

Ayrıca, çalışmam süresince beni destekleyen aileme, özellikle babam Jamshid KARIMI ve amcam Mehdi KARIMI'ye gösterdikleri sabır ve anlayış için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın değişik aşamalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine, Araştırma Görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Babak KARIMI GHALEHJOUGH

Temmuz, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Temel.....	4
2.1.1. Yüzeysel temellerin göçme türleri	4
2.2. Yüzeysel Temellerin Taşıma Gücü	6
2.2.1. Terzaghi taşıma gücü teorisi.....	6
2.3. Granüler Zeminler	10
2.4. Daneilerin Şekilsel Özellikleri	11
2.4.1. Form	17
2.5. Şekil Faktörü (F_s)	19
2.5.1. Uzanımlık	19
2.5.2. Aspect oranı.....	20
2.5.3. Hacim indisi	20
2.5.4. İncelik.....	20
2.5.5. Yuvarlaklık (R).....	21
2.5.6. Köşelilik	22
2.6. Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü Yöntemi (PIV)	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal.....	27
3.1.1. Deneylerde kullanılan zemin.....	27
3.1.2. Tank ve deney düzeneği	27
3.1.3. Kesme kutusu deney aleti.....	33
3.2. Yöntem	35
3.2.1. Zeminlerin hazırlanması.....	35

3.2.2. Parçacık görüntülü hız ölçümü yöntemi (Geo-PIV).....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	44
4.1. Malzeme Özellikleri	44
4.2. Taban Basınç-Oturma Eğrileri	50
4.3. Geo-PIV Sonuçları	77
4.4. Zeminin Kayma Mukavemeti.....	95
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	97
KAYNAKLAR	101
EKLER.....	107
EK 1.....	107
ÖZGEÇMİŞ	161

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Zeminin kayma kırılma türleri: a: genel kayma kırılması, b: bölgesel kayma kırılması, c: zımbalama kayma kırılması.....	5
Şekil 2.2. Zeminin üç farklı kayma kırılmasında oturma-yük eğrileri	5
Şekil 2.3. Yüzeysel temelin altında olan zeminin göçme mekanizması	7
Şekil 2.4. İki farklı tabakalı zeminde, şerit temelin altında meydana gelen kayma kırılması yüzeyleri.....	8
Şekil 2.5. Ölçeği göz önüne alınarak dane şekil tanımlaması.....	12
Şekil 2.6. Dane şeklinin sınıflandırılması.....	13
Şekil 2.7. Dane boyutlarının gösterimi	13
Şekil 2.8. Dört farklı dane şekli	14
Şekil 2.9. Üç farklı dane şekli.....	14
Şekil 2.10. Granüler zeminler için önerilmiş abaklar	15
Şekil 2.11. Granüler zeminler için önerilmiş abaklar	16
Şekil 2.12. Dane şekli sınıflandırması	16
Şekil 2.13. Dane şekli abağı.....	17
Şekil 2.14. Sayısal yuvarlaklık değerleri ile görsel ifadelerin karşılaştırılması.....	21
Şekil 2.15. Zeminin yük altında yer değiştirme mekanizması.....	24
Şekil 2.16. PIV yönteminin prensipi.....	25
Şekil 2.17. Geo-PIV ile yapılan istinat duvarın hareket analizi.....	26
Şekil 3.1. Deney tankı	28
Şekil 3.2. Hidrolik pompa kontrol ünitesi.....	29
Şekil 3.3. Hızı ayarlanabilen yükleme sistemi.....	29
Şekil 3.4. Yük hücresi	30
Şekil 3.5. 75 mm'lik potansiyometrik cetveller	31
Şekil 3.6. Veri toplama sistemi	32
Şekil 3.7. Model temel plakası.....	32
Şekil 3.8. Deney düzeneği	33
Şekil 3.9. Orta ölçekli kesme kutusu deney aleti	34
Şekil 3.10. Los Angeles cihazı.....	36

Şekil 3.11. Firmadan laboratvara getirilmiş zemin.....	37
Şekil 3.12. 6 Farklı grupta danelerin görüntüsü.....	37
Şekil 3.13. Deney düzeneği	38
Şekil 3.14. Geo-PIV programının kodları.....	40
Şekil 3.15. Fotoğrafları küçük parçalara bölünmesi	41
Şekil 3.16. Zeminin yer değiştirmesinin vektörel şeklinde gösterilişi.....	42
Şekil 3.17. Zeminin yer değiştirmesinin renk ölçekli şeklinde gösterilişi.....	42
Şekil 4.1. Köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminlerin granülometri eğrileri	44
Şekil 4.2. Dane çapına bağlı olarak minimum boşluk oranının değişimi	46
Şekil 4.3. Dane çapına bağlı olarak maksimum boşluk oranının değişimi.....	46
Şekil 4.3. Yuvarlaklığa bağlı minimum boşluk oranının değişmesi.....	47
Şekil 4.4. Yuvarlaklığa bağlı maksimum boşluk oranının değişmesi.....	47
Şekil 4.5. Deneyden alınan veriler	51
Şekil 4.6. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı- oturma eğrileri	52
Şekil 4.7. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı- oturma eğrileri	53
Şekil 4.8. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı- oturma eğrileri	54
Şekil 4.9. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı- oturma eğrileri	54
Şekil 4.10. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı- oturma eğrileri	55
Şekil 4.11. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı- oturma eğrileri	55
Şekil 4.12. Köşeli zeminde nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi	57
Şekil 4.13. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	58
Şekil 4.14. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	59

Şekil 4.15. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	60
Şekil 4.16. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	61
Şekil 4.17. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	62
Şekil 4.18. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	63
Şekil 4.19. Yarı Yuvarlak zeminde nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi	64
Şekil 4.20. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	65
Şekil 4.21. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	66
Şekil 4.22. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	67
Şekil 4.23. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	68
Şekil 4.24. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	68
Şekil 4.25. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri	69
Şekil 4.26. Yuvarlak zeminde nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi	70
Şekil 4.27. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (0,30-1,18 mm).....	71
Şekil 4.28. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (1,18-1,40 mm).....	72
Şekil 4.29. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (1,40-2,36 mm).....	73
Şekil 4.30. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (2,36-2,80 mm).....	73

Şekil 4.31. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıkılığa bağlı olarak değişimi (2,80-3,35 mm).....	74
Şekil 4.32. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıkılığa bağlı olarak değişimi (3,35-4,75 mm).....	74
Şekil 4.33. Zeminin yuvarlaklık ve tane çapı aralığına bağlı olarak nihai taşıma kapasitesinin değişimi ($Dr=30\%$).....	75
Şekil 4.34. Zeminin yuvarlaklık ve tane çapı aralığına bağlı olarak nihai taşıma kapasitesinin değişimi ($Dr=50\%$).....	76
Şekil 4.35. Zeminin yuvarlaklık ve tane çapı aralığına bağlı olarak nihai taşıma kapasitesinin değişimi ($Dr=70\%$).....	76
Şekil 4.36. 0,30-1,18 mm boyutta ve $Dr=30\%$ köşeli zeminde Geo-PIV programıyla incelenen alan.....	78
Şekil 4.37. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin 30% rölatif sıkılıkta yer değişimi	78
Şekil 4.38. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin 30% rölatif sıkılıkta yer değişimi	79
Şekil 4.39. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin 50% rölatif sıkılıkta yer değişimi	80
Şekil 4.40. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin 70% rölatif sıkılıkta yer değişimi	80
Şekil 4.41. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminin 30% rölatif sıkılıkta yer değişimi	81
Şekil 4.42. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminin 50% rölatif sıkılıkta yer değişimi	81
Şekil 4.43. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminin 70% rölatif sıkılıkta yer değişimi	82
Şekil 4.44. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminin 30% rölatif sıkılıkta yer değişimi	83
Şekil 4.45. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminin 50% rölatif sıkılıkta yer değişimi	83
Şekil 4.46. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminin 70% rölatif sıkılıkta yer değişimi	84

Şekil 4.47. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %30 rölatif sıkılıkta yer değişimi	84
Şekil 4.48. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıkılıkta yer değişimi	85
Şekil 4.49. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıkılıkta yer değişimi	85
Şekil 4.50. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıkılıkta yer değişiminin vektörel gösterimi.....	86
Şekil 4.51. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminin %30 rölatif sıkılıkta yer değişimi	87
Şekil 4.52. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıkılıkta yer değişimi	87
Şekil 4.53. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıkılıkta yer değişimi	88
Şekil 4.54. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminin %30 rölatif sıkılıkta yer değişimi	88
Şekil 4.55. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıkılıkta yer değişimi	89
Şekil 4.56. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıkılıkta yer değişimi	89
Şekil 4.57. Köşeli zeminde meydana gelen kayma kırılmaları.....	90
Şekil 4.58. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıkılıklarda yer değişimleri	91
Şekil 4.59. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıkılıklarda yer değişimleri	92
Şekil 4.60. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıkılıklarda yer değişimleri	92
Şekil 4.61. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıkılıklarda yer değişimleri	93
Şekil 4.62. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıkılıklarda yer değişimleri	94

Şekil 4.63. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıkılıklarda yer değişimleri	94
Şekil 4.64. Farklı yuvarlaklığa ve tane çapına bağlı olarak İçsel sürtünme açılarının değişimi	95
Şekil 5.1. Köşeli zeminin farklı rölatif sıkılıklarda ve boyutlarda yer değiştirme mekanizması.....	98
Şekil 5.2. Üç farklı rölatif sıkılıkta ve yuvarlaklıkta 2,80-3,35 mm tane çapı aralığında olan zeminlerin yer değişimleri	99
Şekil 5.3. Zeminin nihai taşıma kapasitesi, farklı yuvarlaklıkta, boyutta ve rölatif sıkılıkta	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Tez çalışmasının Aşamaları	2
Çizelge 2.1. Farklı ölçülerde zemin sınıflandırması	11
Çizelge 3.1. Yük hücresinin özellikleri.....	31
Çizelge 3.2. Deney programı	39
Çizelge 4.1. Zeminlerin yuvarlaklık değerleri ve sınıflandırması	44
Çizelge 4.2. Maksimum ve minimum boşluk oranları.....	45
Çizelge 4.3. Köşeli zeminin geoteknik özellikleri	48
Çizelge 4.4. Yarı Yuvarlak zeminin geoteknik özellikleri	49
Çizelge 4.5. Yuvarlak zeminin geoteknik özellikleri.....	49
Çizelge 4.6. Farklı boyutlarda ve rölatif sıkılıklarda zeminlerin birim hacim ağırlığı ...	50
Çizelge 4.7. Köşeli zeminin nihai taşıma kapasitesi.....	57
Çizelge 4.8. Yarı Yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesi	63
Çizelge 4.9. Yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesi	70
Çizelge 4.10. Zeminin teorik olarak hesaplanan taşıma kapasitesi değerleri	96
Çizelge 4.11. Teorik ve deneysel nihai taşıma kapasitesi değerleri	96

1. GİRİŞ

Granüler zeminler ve malzemeler, inşaat mühendisliğinde genellikle geo-malzeme olarak kullanılmaktadırlar. Bu zeminler ince daneli zeminlere göre suyu daha hızlı drene etmesi, oturma miktarlarının daha az olması ve daha yüksek dayanımlı olmaları sebebi ile dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler yol temelinde ve güçlendirilmiş zemin şevlerinde kullanılabilirler. Granüler zeminlerde kayma mukavemeti açısı zeminin en önemli özelliği sayılabilir (Edil *et al.* 2007). Kalker, dünyada en çok bulunan kaya türlerinden biridir (İbrahim *et al.* 2009). Kalker dolgu malzemesi olarak, asfaltta, betonda ve yollarda temel malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Goodman 1993; Korkanç ve Tuğrul 2004).

Geoteknik mühendisliğinde, temellerin davranışı ve temelin altında olan zeminin taşıma gücü önemli bir konudur. Zeminlerin dane özellikleri, zeminlerin mukavemeti ve davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Danelerin büyüklüğü, şekli, pürüzlülüğü ve dağılımı gibi şekilsel özellikler granüler zeminlerin mühendislik özelliklerini belirler (Lambe and Whitman 1969; Holtz and Kovaks 1981; Mitchell and Soga 2005). Bu nedenle bu tür granüler zeminlerde dane morfoloji özelliklerini belirleyerek bazı mühendislik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilir.

Danelerin şekilsel parametrelerini daha iyi anlamak için köşelilik veya yuvarlaklık gibi terimler formüle edilir ve bu formüllerden faydalanarak zeminlerin şekilsel parametreleri sayısal bir değere dönüştürülür. Bu değerleri hesaplamada, partiküllerin düzgün geometrik şekillerden oluşmaması sebebiyle, hesaplamalar belirli bir yaklaşıkla yapılır.

Temelin altında yer alan zeminin nihai taşıma kapasitesi ve kırılma mekanizması, zeminin rölatif sıklığı, zemin tane şekli, zemin tanelerinin morfolojik özellikleri gibi faktörlere bağlıdır.

Temelin şekli, zeminin mühendislik özellikleri ve buna benzer diğer faktörler zemin ve temelin davranışını etkileyebilirler. Zeminin temel altında hareketini gözlemlemek için

farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri Parçacık görüntülü hız ölçümü (PIV) kullanarak zeminin hareketinin incelenmesidir.

Geo-PIV zeminlerin yer değiştirmesinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bir Matlab modülüdür. White *et al.* (2001) tarafından daneli zemin malzemesinin hareketinin belirlenmesi için yazılan bir programdır. Bu programda deney süresi boyunca seri olarak çekilen fotoğraflar programa tanıtılır. Ardından program her resmi küçük parçalara bölerek, her parçayı sırayla ilk fotoğraftan son fotoğrafa kadar bir önceki fotoğraf ile karşılaştırır ve sonunda küçük parçanın nihai yer değişmesini bulur.

Bu çalışmada farklı yuvarlaklıklarda, farklı rölatif sıkılıklarda ve farklı granülometriye sahip zeminler üzerine oturan model bir şerit temelin taşıma kapasitesi ve kırılma mekanizmaları incelenmiştir. Çalışma 8 aşamada tamamlanmıştır ve Çizelge 1.1’ görünmektedir.

Çizelge 1.1. Tez çalışmasının Aşamaları

Aşama	Yapılan Çalışmalar
1	Literatür araştırması, malzeme temini ve deney düzeneğinin kurulması,
2	Ocaktan getirilen köşeli zeminlerin yıkanıp kurutulması, 6 farklı granülometriye sahip zemin elde edilmesi ve granülometri parametrelerinin belirlenmesi,
3	$Dr=30\%$, 50% , 70% rölatif sıkılıklarda ön deneylerin yapılması,
4	3 farklı rölatif sıkılıkta ($Dr=30\%$, 50% , 70%) ve 6 farklı granülometriye sahip zeminler üzerinde düzlem deformasyon koşullarında model taşıma kapasitesi deneylerinin yapılması, taban basıncı oturma grafiklerinin elde edilmesi ve deney süresince çekilen fotoğraflardan hareketle kayma yüzeyinin belirlenmesi
5	Köşeli zemin danelerinin Los Angeles aşındırma cihazı kullanılarak yarı yuvarlak hale getirilmesi, yıkanıp kurutulması ve yukarıdaki 2,3 ve 4’teki aşamaların tekrar edilmesi,

Çizelge 1.1. (devam)

6	Yarı yuvarlak zemin danelerinin Los Angeles aşındırma cihazı kullanılarak yuvarlak hale getirilmesi, yıkanıp kurutulması ve yukarıdaki 2,3 ve 4'teki aşamaların tekrar edilmesi,
7	Üç farklı rölatif sıkılık ve 6 farkı granülometriye sahip köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminlerin kayma mukavemetlerinin hesaplanması ve dane şeklinin kayma mukavemeti üzerindeki etkisinin araştırılması,
8	Danelerin şekilsel özelliklerinin, zeminlerin kayma yüzeyleri ve taşıma kapasitesi üzerinde olan etkisinin araştırılması ve deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Temel

Yapıdan gelen yükleri zemine aktaran elemana temel adı verilir.

Temeller iki gruba ayrılırlar:

1. **Yüzeysel Temeller:** Yapıdan gelen yükü zemin yüzeyine veya zemin yüzeyine yakın olan derinliklere aktarır. Tekil temeller, radye temeller ve şerit temeller yüzeysel temel grubuna girerler (Uzuner 2007).
2. **Derin Temeller:** Yapıdan gelen yükleri derinde olan sağlam zemin tabakasına taşırlar. Ayaklar, kazıklar ve kesonlar bu grupta yer alırlar (Uzuner 2007).

2.1.1. Yüzeysel temellerin göçme türleri

Yüzeysel temeller yapısal yükleri yüzeye veya zemin yüzeyine yakın olan tabakalara iletirler ve bu yük iletim esnasında zeminde basınç ve kayma gerilmeleri oluşur. Zeminde taşıma kapasitesi göçmelerinin esnasında üç farklı kırılma meydana gelebilir.

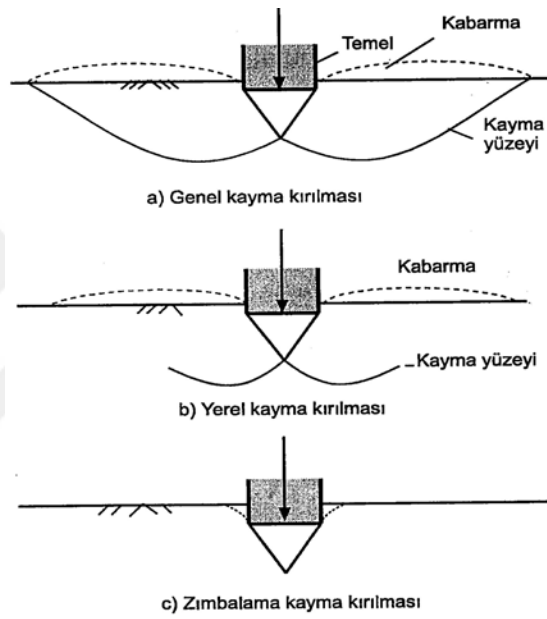
Zımbalama kayma kırılması: Temel yük aldığı zaman temelin kenarlarında kabarma veya kırılma yüzeyleri görülmeden temel oturur ve zeminde sadece temelin alt kısmında oturmalar ve hareket oluşur. Bu tür göçmede taban basınç-oturma eğrisinde kırılma noktası belirgin değildir. Zımbalama kayma kırılması gevşek veya çok gevşek kumlarda (Rölatif sıkılık = $Dr < \%30$) görülen göçme tipidir (Uzuner 2007).

Bölgesel kayma kırılması (Yerel): Bu tür kırılmada kırılma yüzeyleri belirgin olmayıp aynı zamanda taban basıncı-oturma eğrisinde kırılma noktası belirgin değildir. Orta sıkı-gevşek kumlarda ($\%30 < Dr < \%70$) görülen göçme tipidir (Uzuner 2007).

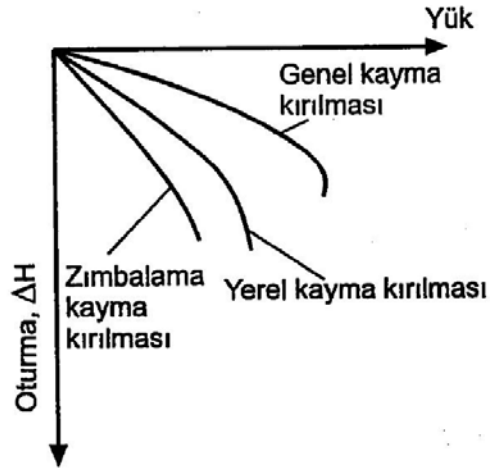
Genel kayma kırılması: En yaygın göçme şekli genel kayma kırılmasıdır. Kırılma yüzeyleri belirgin halde zemin yüzeyine kadar uzanıp temelin kenarlarında ve yanlarda kabarma meydana gelir. Aynı zamanda taban basıncı-oturma eğrisinde pik nokta kırılma

noktası olarak belirlenir. İçsel sürtülme açısı $\phi > 30^\circ$ olduğu zaman veya rölatif sıkılık (D_r) %67 den büyük olduğu zaman genel kayma kırılmasının meydana geldiği tespit edilmiştir (Uzuner 2007; Coduto 2001).

Şekil 2.1’de zeminin üç göçme türü gösterilmiştir. Zeminin üç farklı kayma kırılması davranışı için oturma-yük eğrisi Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Zeminin kayma kırılma türleri: a: genel kayma kırılması, b: bölgesel kayma kırılması, c: zımbalama kayma kırılması (Uzuner 2007)



Şekil 2.2. Zeminin üç farklı kayma kırılmasında oturma-yük eğrileri (Uzuner 2007)

2.2. Yüzeysel Temellerin Taşıma Gücü

Yüzeysel temeller, binalarda maliyeti düşük ve yapımı kolay olduğu için en çok kullanılan temel tipidir. Yüzeysel temellerin taşıma kapasitesini daha iyi analiz etmek için aşağıdaki değişkenlerin tanınması ve bilinmesi daha doğru analiz elde edilmesini sağlamaktadır (Demiröz 2008)

- Zeminin özellikleri ve türü
- Yük koşulları
- Temelin boyut ve derinliği
- Yer altı su seviyesi
- Temelin taban pürüzlülüğü

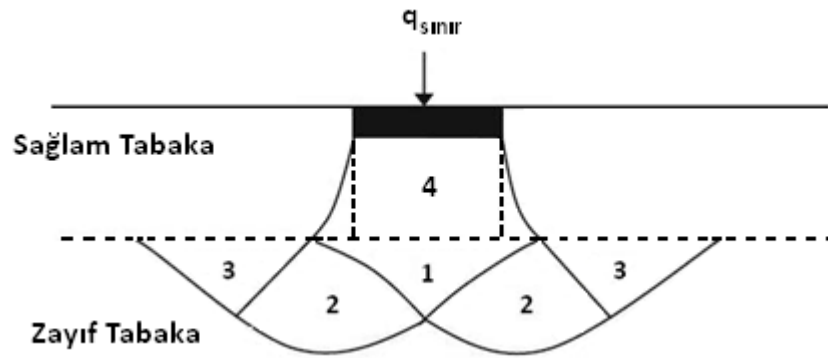
Zeminlerin taşıma kapasitesini belirlenmesi için birçok araştırmacı tarafından farklı yöntemler ve teoriler geliştirilmiştir. Literatürde yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi için en çok kullanılan teoriler, Terzaghi 1943, Meyerhof 1951-1963, Brinch-Hansen 1961 ve Vesic 1975 teorileridir.

2.2.1. Terzaghi taşıma gücü teorisi

Yaygın olan taşıma gücü teorilerinden biri Terzaghi taşıma gücü teorisidir. Bu teori sürekli temeller için geliştirilmiştir (Uzunluk/Genişlik oranı çok büyüktür). Teorik çözümde genel kayma kırılması ve sürekli bir temel esas alınmıştır (Çelik 1997). Temel yüklendiğinde plastik denge durumunda temelin altında olan zeminin kayma yüzeyi 5 bölgeye bölünür. Bu bölgeler; bir aktif bölge (ABC), iki geçiş bölgesi (ACD) ve iki pasif bölge (ADE) şeklindedir. Bu bölgeler Şekil 2.3'de görülmektedir (Terzaghi 1943; Meyerhof 1951; Uzuner 2007).

- N_c , N_q ve N_γ : içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayıları,
 c : kohezyon,
 γ : Zeminin birim hacim ağırlığı,
 B : Temel genişliği
 D_f : Temel derinliği
 γD_f : Zemin yüzeyinden aşağıdaki D_f de efektif düşey gerilmedir.

Zeminin veya temelin koşullarının değişimiyle zeminde meydana gelen kayma kırılması davranışında değişme meydana gelmektedir (Ahmadi and Bonab 2012). Bir temelin kayma kırılması normal bir zemin üzerinde Şekil 2.3'deki gibidir. Ancak iyileştirilmiş veya sağlam bir zemin, katı zayıf bir tabaka üzerinde oturduğu zaman zeminde meydana gelen kayma kırılması davranışı sağlam tabakadan alttaki zayıf tabakaya taşınmakta ve üst tabakadaki zeminde meydana gelen kırılmalar farklı bir davranış göstermektedir. Diğer bir kelimeyle temele gelen yük Şekil 2.4'de görüldüğü gibi bölge 4 ve 1 de zımbalama şeklinde aşağıya doğru taşınır ve zayıf tabakada zeminin şartlarına bağlı olarak bölgesel kırılma veya genel kayma kırılma yüzeyleri meydana gelebilir.



Şekil 2.4. İki farklı tabakalı zeminde, şerit temelin altında meydana gelen kayma kırılması yüzeyleri (Meyerhof and Hanna 1978)

Temellerin taşıma kapasitesi ve yük-oturma davranışı farklı araştırmalarda incelenmiştir. Literatürde bulunan çalışmalarda temel ve zemin değiştirilerek farklı durumlarda araştırmalar yapılmıştır.

Toyosawa *et al.* (2012) temel boyutlarıyla partiküllerin arasındaki olan ilişkinin zeminin nihai taşıma kapasitesi üzerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışmada bir dairesel temel üzerinde 37 farklı deney yapılmıştır. Deneylerde tanelerin ortalama boyutları 0,6 mm olarak alınmış ve temel boyutu 5 mm ile 40 mm arasında seçilmiştir. Temel/tane boyut oranı 8,3 ile 66,7 aralığında hesaplanarak deneyler yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında temel/dane boyut oranı 50 den fazla olduğu zaman zeminin nihai taşıma kapasitesinde bir fark olmadığı görülmüştür.

Yumuşak kil üzerinde olan temelin taşıma kapasitesi, sıkıştırılmış kum ya da çakıl tabakasıyla iyileştirilebilir. İsmail İbrahim (2014) Mohr Coulomb modelin kullanarak, dairesel temel üzerinde bir sayısal analiz yapmıştır. Zeminin nihai taşıma kapasitesi, granüler zeminin içsel sürtünme açısıyla doğru orantılı bir iletişimde dir. Bu çalışmada kumlu bir zemin kil zemin üzerine yerleştirilmiş ve zeminin taşıma kapasitesi incelenmiştir. Granüler zeminin kalınlığı ‘H’, temel derinliği ‘D’ ve temelin genişliği ‘B’ iken, $D/B=0$ ve $H/B>2$ olduğu durumda, granüler zemin orta sıkı halden çok sıkı hale geldiği zaman zeminin taşıma kapasitesinde %67’lik bir artış gözlenmiştir. Kayma kırılma mekanizmasında üst tabakada (Granüler zemin) zımbalama olduğu görülmüştür.

Temellerin taşıma kapasitesi farklı yöntemlerle iyileştirilebilir. Choudhary *et al.* 2104 çalışmalarında uçucu külden teşkil edilen bir şev, geogrid ile donatılandırılmış ve üzerinde yer alan şerit temelin taşıma kapasitesi incelenmiştir. Yapılan çalışmada bir laboratvar ortamında donatısız ve donatılı zemin üzerinde deneyler yapılmıştır. Geogrid donatı malzemesi olarak farklı derinliklerde ve farklı tabaka kullanılmış ve farklı temeller şevin kenarından yer aldığı mesafeye bakılarak deneyler yapılmıştır. Aynı zamanda şevin açısı değiştirilerek daha farklı koşullar oluşturulmuş ve araştırılmıştır. Sonuçlar donatı tabakalarının sayısının temelin taşıma kapasitesi ve oturması üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiş, temel şevin kenarından daha uzak bir noktada yer aldığı zaman daha çok yük taşıdığı elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tankın boyutları 2400x310 mm ve derinliği 1200 mm dir. Model temeller 300 mmx100 mm (temel uzunluğu/temel genişliği >2), 300 mmx150 mm (temel uzunluğu/temel genişliği = 2) ve

300 mmx200 mm (temel uzunluğu/temel genişliği <2) boyutlarına sahiplerdir (Choudhary *et al.* 2104).

Benzer çalışmayı Yoo (2001) de şerit temel üzerinde yaparak geogrid donatılı kumlu bir zemin şevi laboratuvarında modelleyip taşıma kapasitesi üzerinde araştırma yapmıştır. Deney yapılan model tankın boyutları 1,8x0,5 m ve ucalığı 1,2 m göze alınmıştır. Bu çalışmada temelin genişliği 80 mm olup tank tam rijit bir yapıya sahiptir.

Azzam ve Nasr (2015), Cascone ve Casablanca (2016), Chen ve Abu-Farsakh (2015) şerit temel üzerinde yapılan çalışmalardan bazılarıdır. Bu çalışmalarda farklı donatılar kullanılarak temelin davranışı, taşıma kapasitesi ve oturması incelenmiştir.

2.3. Granüler Zeminler

Kum ve çakıl zeminlere kaba daneli veya granüler zeminler adı verilmektedir. Geoteknik mühendisliğinde yıllardan beri granüler zeminler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Terzaghi tarafından yapılan ilk araştırmalar 1925 yıllarına kadar gitmektedir. Ayrıca bir dayanma duvarları üzerinde ilk yapılan çalışmalardan birinde kaba daneli zeminlerin mukavemet özellikleri incelenmiştir (Coulomb 1776). Bu çalışmaların devamında zeminler üzerinde birçok araştırmalar yapıldığı ve mukavemet özelliklerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur (Hennes 1952; Bishop 1954; Lee 1970; Acar *et al.* 1982; Arasan 2011).

Son yıllarda şerit temeller üzerinde yüzlerce araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda farklı zeminler sayısal veya pratik olarak bilgisayarda ve laboratuvarında modellenerek zeminlerin davranışı farklı koşullarda incelenmiştir (Lee and Eun 2009; Chakraborty and Kumar 2016; Naderi and Hataf 2014; Bungenstab and Bicalho 2014).

Zeminler, dane çapına ve boyutlarına göre farklı ölçülerde sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma Çizelge 2.1'de bulunmaktadır. Bu tabloda, Birleştirilmiş Zemin

Sınıflandırması Sistemi (USCS), ASTM (Amerikan Standart Test Metodu), MIT (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü) ve BS (İngiliz Standartları) ölçüleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı ölçülerde zemin sınıflandırması

Adı	USCS		ASTM D, mm	MIT D, mm	BS D, mm
	Elek No	D,mm			
Blok	-	>300	>300	>200	>200
Taş	3"	300-76,2	300-76,2	200-60	200-60
Çakıl	3"-4 No	76,2-4,76	76,2-4,76	60-2	60-2
Kum	4No-200No	4,76-0,074	4,76-0,074	2-0,08	2-0,06
Silt	<200 No	<0,074	0,074-0,0002	0,08-0,002	0,06-0,002
Kil			<0,002	<0,002	<0,002

Zeminleri tane çapına göre sınıflandırdıktan sonra, onların bazı fiziksel özelliklerini laboratuvarında elde edip, bu sonuçlardan faydalanarak zeminin mühendislik özelliklerini formüller yardımıyla bulabiliriz. Zeminin granülometre eğrisi, zeminin boşluk oranı, rölatif sıkılık, birim hacim ağırlığı, su içeriği ve diğer özellikler bahsettiğimiz özelliklerden sayılabilir.

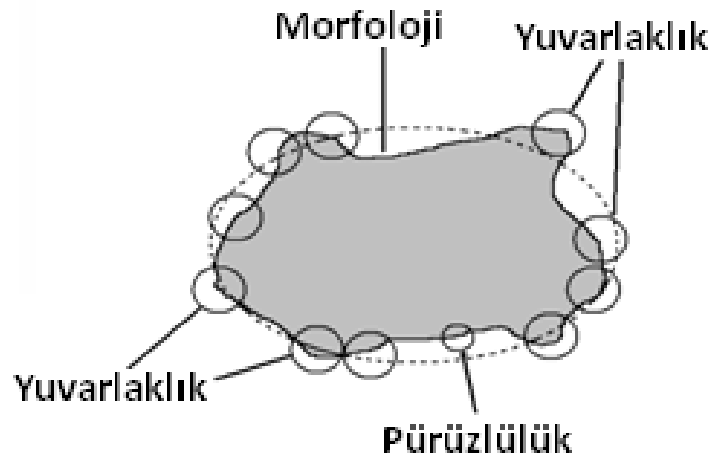
Bir zeminin fiziksel ve geoteknik özelliklerinin değişmesi sonucu zeminin davranışı da değişmektedir. Bu konuda farklı çalışmalar yapılmaktadır. Tadao (2016) zemin sınıfı ve partikül özelliklerinin etkisini, granüler zeminin küçük gerilme davranışı üzerinde incelemiştir. Bu çalışmada drenajlı üç eksenli deneyler yapılarak farklı granüler zeminlerin mühendislik davranışları test edilmiştir.

2.4. Danelerin Şekilsel Özellikleri

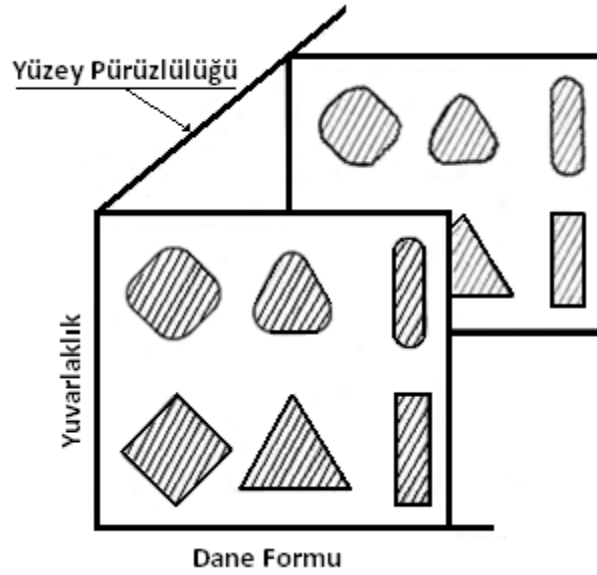
İlk olarak Mackie (1897) ve Dunn (1911) danelerin şekilsel özellikleri üzerinde çalışmışlardır. İlerleyen yıllarda diğer benzer araştırma ve çalışmalar devam etmiştir (Wentworth 1919, 1922a, 1922b, 1922c Cox 1927; Pentland 1927; Tickell 1931; Wadell 1932, 1933, 1935; Russel and Taylor 1937; Riley 1941; Krumbein 1941; Corey 1949; Pettijohn 1949; Pye and Pye 1943; Rittenhouse 1943; Grogan 1945; Cailleux

1947; Arasan 2011). Bu çalışmalar özellikle sedimantoloji biliminin pratik uygulamalarında yoğunlaşmıştır. Devam eden çalışmalarda danelerin diğer şekilsel parametreleri tarif edilmiştir. Bu parametrelerden danelerin küreselliği, köşelilik ve yuvarlaklık, uzanımılık ve diğer morfolojik özelliklerini sunabiliriz (Powers 1953; Folk 1955; Lüttig 1956; Aschenbrenner 1956; Kuenen 1956; Snedd and Folk 1958; Holmes 1960; Krumbein and Sloss 1963; Lees 1964a, 1964b; Flemming 1965; Janke 1966; Griffiths 1967; Schwarcz and Shane 1969; Drake 1970; Dobkins and Folk 1970; Ehrlich and Weinberg 1970; Pryor 1971; Whalley 1972; Swan 1974; Teller 1976; Meloy 1977; Barrett 1980; Powers 1982; Ballantyne 1982; Fisher and Bringland 1986; Clark 1987; Beddow 1989; Howard 1992; Benn and Ballantyne 1993; Thomas *et al.* 1995; Janoo 1998; Drolon *et al.* 2000; Bowman *et al.* 2001; Drevin 2006; Yu *et al.* 2007; Arasan 2011).

Tanelerin morfolojik özellikleri yani dane büyüklüğü, dane şekli ve pürüzlülüğü gibi şekilsel özellikler tanelerin ölçeğine bağlıdır (Barrett 1980; Mitchell and Soga 2005). Tanelerde ölçek dikkate alındığı zaman tane şekli üç gruba ayrılır (Barrett 1980). Ölçeği göz önüne alınarak dane şekil tanımlaması Şekil 2.5’de, ve dane şeklinin sınıflandırılması Şekil 2.6’da görülmektedir.

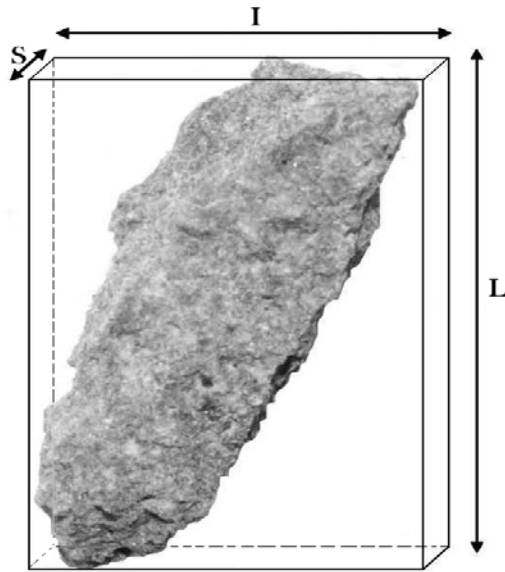


Şekil 2.5. Ölçeği göz önüne alınarak dane şekil tanımlaması (Barrett 1980; Mitchell and Soga 2005)



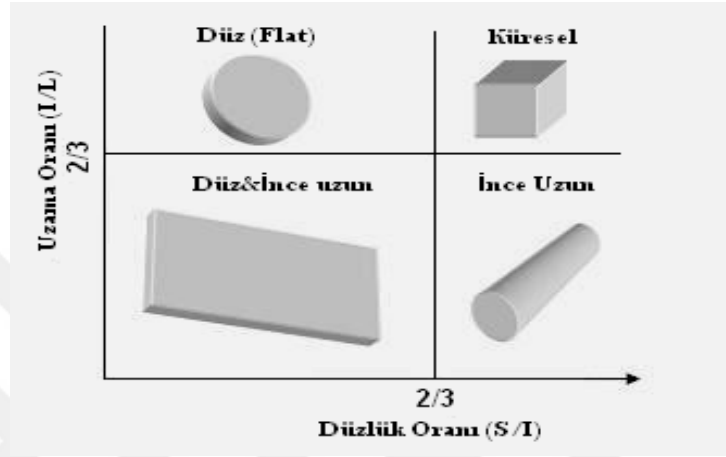
Şekil 2.6. Dane şeklinin sınıflandırılması (Barrett 1980)

Büyük ölçeklerde bir danenin formunu belirlemek için danenin her üç (uzun, orta ve kısa) boyutuna ihtiyaç vardır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, danenin uzun boyutunu L , orta boyutu I ve kısa boyutu S ile gösterilmektedir (Arasan 2011).



Şekil 2.7. Dane boyutlarının gösterimi (Arasan 2011)

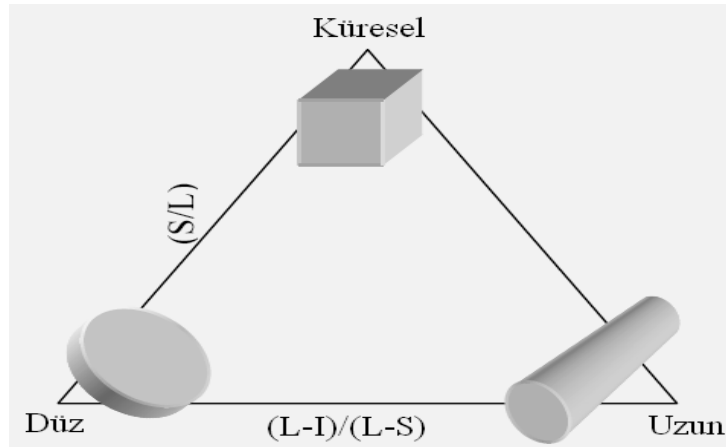
Daneleri sınıflandırmak için onların üç boyutu kullanılabilir. Bu sınıflandırma ilk kez Şekil 2.8’de görüldüğü gibi Zingg (1935) tarafından yapılmıştır. Yıllar sonra Sneed ve Folk (1958) danelerin şekil sınıflandırması için yeni bir diyagram önermişlerdir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8. Dört farklı dane şekli (Zingg 1935; Arasan 2011)

Sneed ve Folk (1985) diyagramına bakarak limit üç formdan oluşturulmuştur.

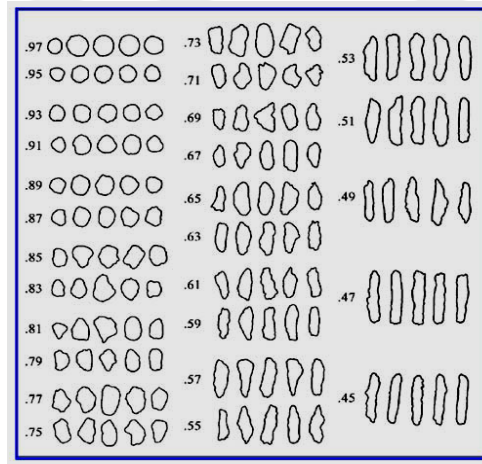
- Küresel ($L=I=S$)
- Büyük boyutları uzamış küresel ($L=I>S$)
- Küçük boyutlar uzamış küresel ($L>I=S$)



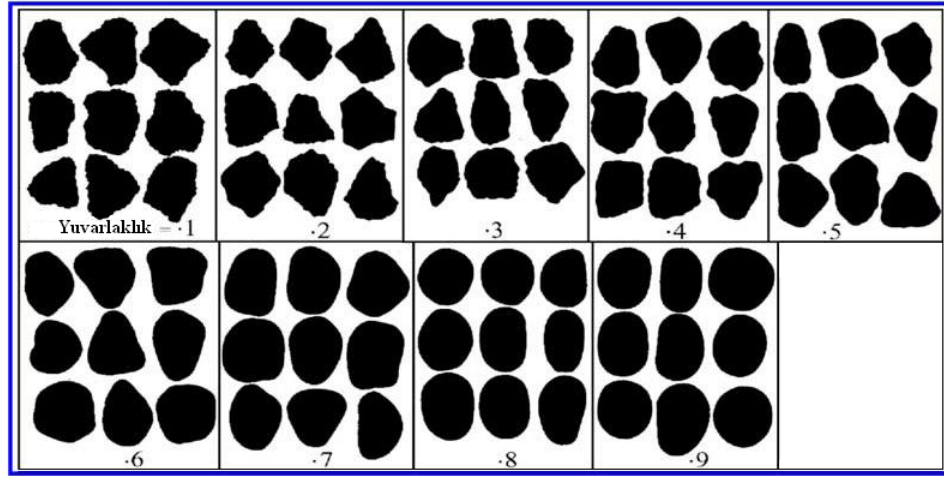
Şekil 2.9. Üç farklı dane şekli (Sneed and Folk 1958; Arasan 2011)

Diğer araştırmacılar Zingg (1935), Sneed ve Folk (1958) diyagramları üzerinde çalışıp, bilgisayarlardan da faydalanarak yeni diyagramlar önermişlerdir. Blott ve Pye (2008) dane sınıflarını ifade etmek için uzun, düz ve küresel gibi farklı isimler kullanmışlardır.

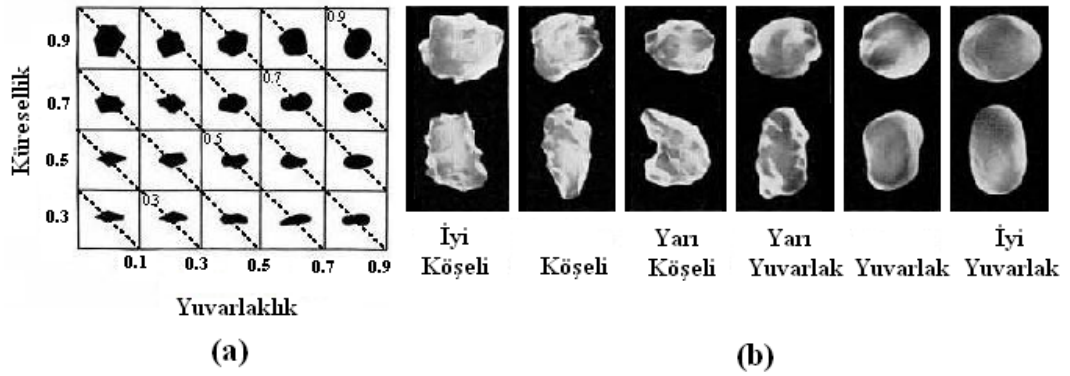
Küçük ölçeklerde köşe ve kenarların yuvarlaklığı ve yüzey pürüzsüzlüğü gibi lokal özelliklerini gösteren doku önemlidir. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de görülen abaklar yuvarlaklık ve köşelilik dane şeklini tarif etmede kullanılmaktadır. Orta ölçekte yuvarlaklık dokusu iyi yuvarlak, yuvarlak, yarı yuvarlak, yarı köşeli ve köşeli olmak üzere beş seviyede ifade edilir (Lambe and Whitman 1969; Mitchell and Soga 2005; Arasan 2011). İlk kez Krumbein (1941) danelerin yuvarlaklığı ile ilgili çalışmalar yapmaya başlamıştır. Daha sonra Rittenhouse (1943), Powers (1953), Krumbein ve Sloss (1963) un çalışmaları ve önerdikleri abaklar ile devam etmiştir. Bu araştırmacılara ilave olarak Powers (1982) ve Alshibli ve Alsaleh (2004) nin önerdiği abaklar Şekil 2.12 ve 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Granüler zeminler için önerilmiş abaklar (Rittenhouse 1943; Arasan 2011)



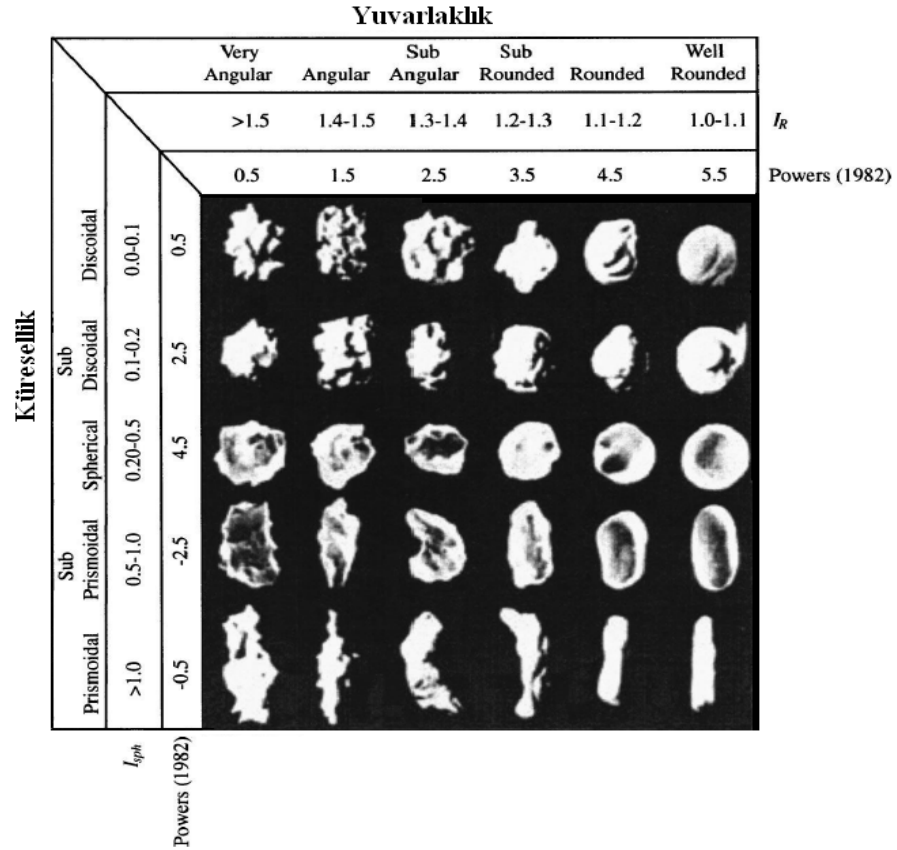
Şekil 2.11. Granüler zeminler için önerilmiş abaklar (Krumbein 1941; Arasan 2011)



Şekil 2.12. Dane şekli sınıflandırması (Arasan 2011)

(a) Krumbein and Sloss (1963), (b) Powers (1953)

Çalışmalarda zemin partikülleri küçük, orta ve büyük ölçekteki özellikleri incelenerek formüle edilmiştir.



Şekil 2.13. Dane şekli abağı (Alshibli ve Alsaleh, 2004; Arasan 2011)

2.4.1. Form

Form danenin temel şeklini ifade eden büyük ölçek özelliğidir.

Küresellik: Mitchell ve Soga (2005) tarifine göre, küresellik eşit hacimli kürenin çapının, dış kürenin çapına oranı olarak ifade edilir ve büyük ölçüde uzanıma bağlıdır. Küresellik formülleri farklı kaynaklardan bulunmuş ve bağıntılarda verilmiştir.

$$\text{Küresellik} = \sqrt[3]{\frac{SI}{L^2}} \quad (2.4)$$

S, I ve L sırayla danenin kısa, orta ve uzun kenarlarıdır (Krumbein 1941; Mora and Kwan 2000; Quiroga and Fowler 2004; Erdoğan 2005).

$$\text{Küresellik} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.5)$$

V_1 =Danenin hacmi ve V_2 =Dış kürenin hacmi olarak tanınmaktadır (Mitchell and Soga 2005).

$$\text{Küresellik} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.6)$$

R_1 eşit hacimli kürenin çapı ve R_2 , dış kürenin çapıdır (Wadell 1935).

$$\text{İzdüşüm Küresellik} = \frac{A_1}{A_2} \quad (2.7)$$

A_1 =Danenin alanı (dış çizgiden) ve A_2 =En büyük dış çizgi uzunluğunun çapına eşit olduğu dairenin alanı (Mitchell and Soga 2005; Arasan 2011)

$$\text{İç Daire Küreselliği} = R_L/R_S \quad (2.8)$$

R_L ve R_S sıra ile en büyük iç dairenin çapı ve en küçük iç dairenin çapıdır (Mitchell and Soga 2005).

$$(S) = \frac{De}{L} \quad (2.9)$$

$De = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$ L =Uzunluk (De =Danenin eşdeğer çapı) ve V danenin hacmidir (Das 1998)

$$\text{Küresellik} = A_Y/A_E \quad (2.10)$$

A_Y ve A_E sıra ile kürenin yüzey alanı ve küreyle eş hacme sahip dairenin alanıdır (Önalp 2002).

2.5. Şekil Faktörü (F_s)

En çok kullanılan indekslerden biridir ve dane morfolojisi ile ilgilidir. Aşağıda birçok araştırmacı tarafından şekil faktörü için verilen formüllerin bazıları verilmiştir.

$$F_s = \frac{\frac{C}{B}}{\frac{B}{A}} \quad (2.11)$$

- A orta boyut
- B en küçük boyut
- C en büyük boyuttur ve B/A uzunluk oranıdır (Önalp 2002).

Diğer bir formülde (Kuo *et al.* 1996; Quiroga ve Fowler 2004), S, I ve L sırayla danenin kısa, orta ve uzun kenarı olarak kabul edildiği zaman:

$$\text{Şekil Faktörü } (F_s) = \frac{S}{\sqrt{I.L}} \quad (2.12)$$

2.5.1. Uzanımlık

Diğer önemli morfolojik özelliklerden biri uzanımlıktır. Uzanım özellikle dane boyu dağılımlarına etkisi vardır.

$$Uzanımlık = \frac{I}{L} \quad (2.13)$$

I ve L sırayla danenin orta ve uzun kenarıdır (Mora *et al.* 1998).

$$Uzanımlık = 1 - \frac{W}{L} \quad (2.14)$$

Bu formülde L uzunluk ve W, genişlik olarak tanımlanıyor (Mora and Kwan 2000; Quiroga and Fowler 2004).

Mitchell and Soga (2005)' göre:

$$\text{Uzanımlık} = \frac{\text{en küçük çap}}{\text{en küçük çapın düşey çapı}} \quad (2.15)$$

2.5.2. Aspect oranı

I ve L sırayla danenin orta ve uzun kenarı olduğu zaman

$$\text{Aspect Oranı} = \frac{L}{I} \quad (2.16)$$

Şeklinde tarif edilir (Kuo and Freeman 2000).

2.5.3. Hacim indisi

$D_{\max}$ danenin maksimum boyutu ve V bu daneyi içine alabilen bir kürenin hacmi olarak kabul edilirse:

$$VC = \frac{6V}{D_{\max}^3} \quad (2.17)$$

VC miktarının azalması danenin küresellikten saptığı anlamına gelmektedir.

2.5.4. İncelik

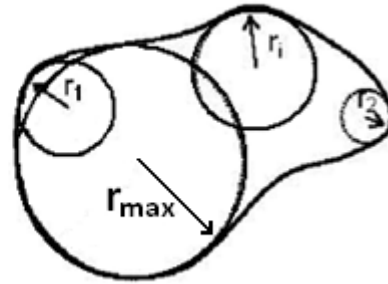
İncelik aşağıdaki formülle tanımlanır (Mitchell and Soga 2005).

$$\text{İncelik} = \frac{\text{Maksimum boyut}}{\text{Minimum boyut}} \quad (2.18)$$

2.5.5. Yuvarlaklık (R)

Yuvarlaklık danelerin köşelerinin değişimini ifade eden parametredir ve orta ölçekli morfolojik özelliklerdendir. Dane kenarları ve köşelerinin ortalama eğrilik yarıçapının, en büyük iç kürenin yarıçapına oranına denir (Wadell 1932; Mitchell and Soga 2005). Yuvarlaklık küresellikten farklı bir morfolojik özelliktir. Power (1953) formülüne göre sayısal değerleri kullanarak bir danenin yuvarlaklığını belirleyebiliriz. Bu değerler Şekil 2.14’de gösterilmiştir.

Sınıflandırma	Yuvarlaklık
Tam Köşeli	0.12-0.17
Köşeli	0.17-0.25
Yarı Köşeli	0.25-0.35
Yarı Yuvarlak	0.35-0.49
Yuvarlak	0.49-0.70
İyi Yuvarlak	0.70-1.00



Şekil 2.14. Sayısal yuvarlaklık değerleri ile görsel ifadelerin karşılaştırılması (Powers 1953; Arasan 2011)

$$R = \frac{r_1}{r_2} \quad (2.19)$$

r_1 ve r_2 sıra ile yüzey özelliklerinin ortalama eğrilik yarıçapı ve en büyük iç dairenin yarıçapıdır (Wentworth 1919; Wadell 1932; Powers 1953; Mitchell and Soga 2005). Şekil 2.14’de gösterilen değerler Wentworth (1919) ve Wadell (1932) nin geliştirdiği değerlendirmelerdir.

2.5.6. Köşelilik

Yuvarlaklığın zıttı ve danelerin uçlarındaki köşelerinin keskinliğinin bir ölçüsüdür ve orta ölçekte olan bir morfolojik özelliktir (Mora and Kwan 2000; Arasan 2011). Das (1998)' e göre:

$$A = \frac{r_a}{r_m} \quad (2.20)$$

A: Köşelilik,

r_a : Köşe ve kenarların ortalama yarıçapı ve

r_m : En büyük iç dairenin yarıçapıdır.

Kuo ve Freeman (2000) yuvarlaklığın hesaplaması için aşağıdaki formülü önermişlerdir.

$$A = \left(\frac{\text{Çevre}_{\text{konveks}}}{\text{Çevre}_{\text{Eşitdaire}}} \right)^2 \quad (2.21)$$

2.5.7. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey dokusunun bir ölçüsü olarak danelerin küçük ölçekte morfolojik özelliklerinden biridir. Yüzey pürüzlülüğü dane sınırlarındaki dişlerin keskinliği, büyüklüğü ve çıkıntısı olarak ölçülebilir (Mora and Kwan 2000; Arasan 2011).

Kuo ve Freeman (2000) ve Wenzel (1949) pürüzlülüğü hesaplamak için sırayla aşağıdaki formülleri önermişlerdir.

$$\text{Pürüzlülük} = \left(\frac{\text{Çevre}}{\text{Çevre}_{\text{konveks}}} \right)^2 \quad (2.22)$$

ve

$$R = \frac{A}{a} \quad (2.23)$$

A= Danenin gerçek alanı,

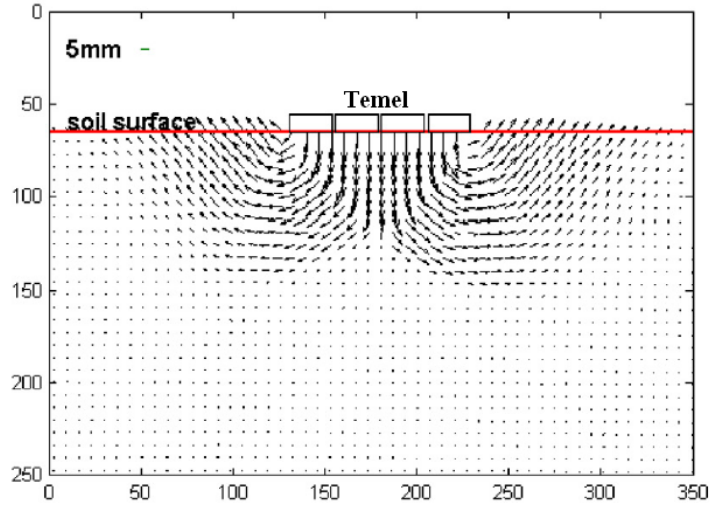
a= Danenin görünür alanı

2.6. Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü Yöntemi (PIV)

PIV yöntemi akışa müdahalesiz anasal bir hız ölçüm yöntemidir. White *et al.* (2001) PIV yönteminde bazı değişiklikler yaparak bu yöntemi geoteknik alanında olan çalışmalara uygun hale getirmişlerdir.

Granüler malzemelerde zeminin yer değiştirmesini elde etmek için Geo-PIV kullanılarak zemin deformasyonu hesaplanmaktadır. Rashid *et al.* (2015) donatılmış zayıf bir zemin davranışını parçacık görüntülü hız ölçümü yöntemi ile incelemişlerdir. Bu çalışmada çimentoyla kum karışımı kolonların etkisi sert ve esnek temel altında gözlenmiştir. Zeminin programdan elde edilen yer değişmesi Şekil 2.15’da görülmektedir.

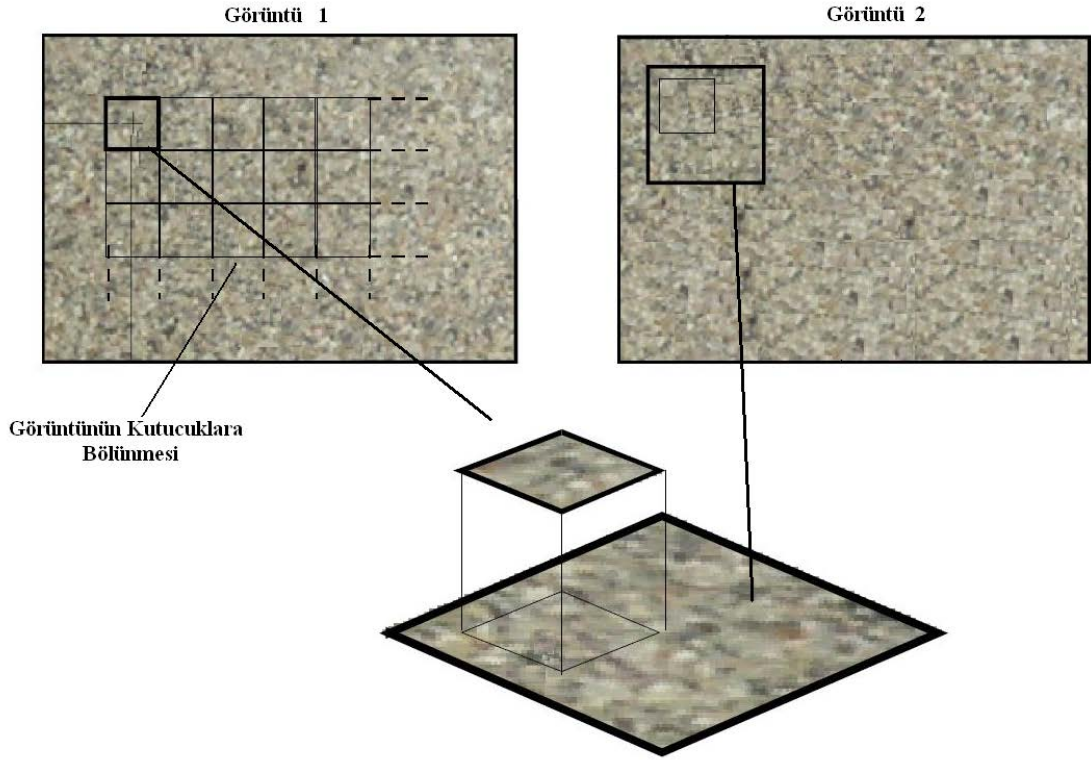
Bu çalışmada PIV yöntemi yüzeysel bir temelin altındaki gevşek, orta sıkı ve sıkı bir zeminde meydana gelen yer değiştirmeleri tanımlayabilmek ve gözleyebilmek amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada yüksek çözünürlüğe sahip olan bir fotoğraf makinesi kullanılarak her 30 saniyede bir fotoğraf alarak deneyin sonuna kadar zeminin yer değişmesi gözlenmiştir. Zeminin yer değiştirmesinin deneyden sonra belirlenebilmesi için ilk fotoğraf deneye başlamadan önce çekilmiştir.



Şekil 2.15. Zeminin yük altında yer değiştirme mekanizması

Deney süresince fotoğraf çekerken oluşabilecek titreşimleri engellemek için fotoğraf makinesi sağlam bir tripod üzerinde sabitlenmiştir. Geo-PIV8 programını kullanarak önce ilk fotoğrafta bir alan seçip onu ağa bölerken sonraki fotoğrafta ilk kutucuğu arayarak en yüksek benzerliği yakaladığı anda hareket vektörü elde edilmiştir. Bu işlem son fotoğrafa kadar devam etmiş ve toplam hareket vektörü elde edilmiştir.

Başlangıçta PIV yöntemi akışkanlar mekaniği alanında kullanılan bir hız ölçüm tekniğidir. Geoteknik deneylerinde PIV uygulamak için modifiye edilmiş bir yaklaşım kullanılmıştır. PIV yönteminde bir fotoğrafı kutucuklara bölerek birinci fotoğraftaki kutucuğu ikinci fotoğrafta karşılaştırmış ve böylece program kutucukta meydana gelen yer değişmeyi elde edip bütün kutucukların hareketini yan yana koyarak iki resmin arasında olan hareket farkını elde edebilmiştir. Bu işlem ile ikinci ve üçüncü fotoğraf arasında, üçüncü ve dördüncü fotoğraf arasında ve bu şekilde son resme kadar devam ederek ilk ve son resmin arasında olan fark, daha doğrusu hareket meydana çıkmaktadır. Yapılan görüntü işlemi Şekil 2.16’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16. PIV yönteminin prensipi (White *et al.* 2001)

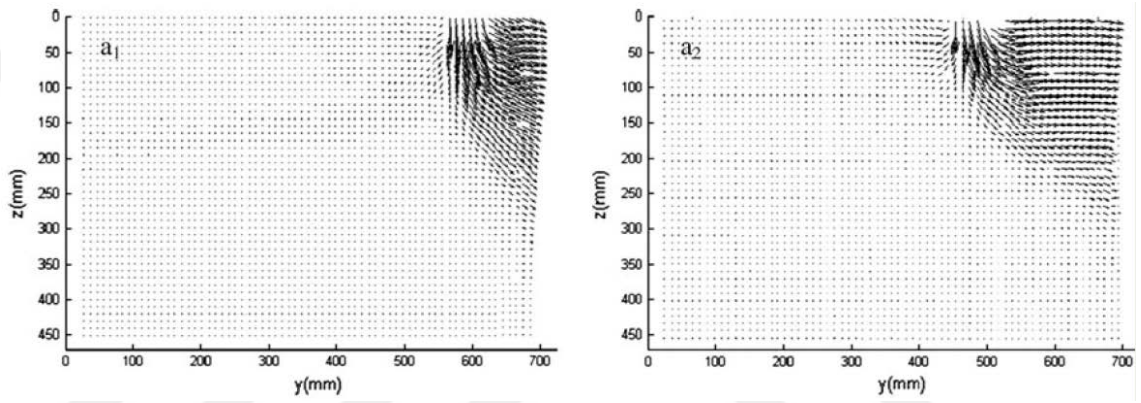
Aşağıdaki faktörler PIV sonuçları üzerinde etki gösterebilir.

- Zeminin görünümü ve tipi
- PIV de tarif edilen kutucukların boyutu
- Hareket mesafesi

İnşaat mühendisliğinde farklı araştırmalar PIV yöntemiyle yapılmıştır. Lackner *et al* (2013) jeosentetik ile ön gerilmiş donatılı bir zemin üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada donatılı toprak yapılarının deformasyonu araştırılmıştır. Aynı zamanda zeminin yer değişmesi ve hareketi PIV yöntemiyle incelenmiştir. PIV araştırmaları, çevrimsel yükleme esnasında meydana gelen yer değiştirmelerin azaltılabileceğini göstermektedir.

Ahmadi ve Hajjalilue (2012) bir esnek istinat duvarı üzerinde araştırma yaparak donatılı kum zeminde bir şerit temelin taşıma kapasitesini incelemişlerdir. Bu çalışma küçük

ölçekteki model temel üzerinde deneysel ve analitik olarak yapılmıştır. İstinat duvarının arkasında olan zemin donatılı ve donatısız halde test edilmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Donatı olarak geotekstil kullanılmış ve tabakaların sayısı, tabakaların arasında olan düşey mesafe ve şerit temelin duvarda olan mesafesi deneylerde değişen parametreler olarak seçilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde duvarın dönmesi ve zeminin sınır taşıma kapasitesi, tabakaların sayısının artmasıyla önemli miktarda artmıştır. Geo-PIV ile yapılan görüntü analizi Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Geo-PIV ile yapılan istinat duvarın hareket analizi

Faizi *et al.* (2015) kazık etrafında olan zeminlerin deformasyonu üzerinde çalışarak meydana gelen deformasyonu tahmin etmeye çalışmışlardır. Aynı zamanda bu çalışma çekme kuvvetleri altındaki yapıların güvenli dizaynına katkı sağlamıştır. Araştırmada 1, 2, 3, 4 ve 5 santimetre çapında olan kazıkların kaldırma dirençlerini araştırırken küçük ölçekte model deneyler yapılmıştır. Yakından fotoğraf çekerek ve PIV yöntemini kullanarak, kazıkların kaldırma kuvvetlerinden meydana gelen kırılma yüzeyleri gözlenmiştir. Analizler zemin yüzeyine yakın dıştan hafif kavisli kayma bölgeleri göstermiştir. laboratvarda yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Plaxis 2D ve 3D programı ve analitik yöntemler ile doğrulanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Deneylerde kullanılan zemin

Bu çalışmada kireçtaşı (Kalker) kullanılmıştır. Zemin Erzurum ilinde bulunan Ergünler İnşaat firmasından temin edilmiştir. 0,30 mm ile yaklaşık 7 mm aralığında boyuta sahip olan malzeme Atatürk Üniversitesinin Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına taşınmış ve deneyler yapılmıştır. Kimyasal bileşiminde asgari %90 kalsiyum karbonat (CaCO_3) bulunan tortul kayalar kireçtaşı veya kalker olarak adlanır. Genelde kalkerlerin özgül ağırlığı 2,5-2,7 gr/cm^3 ve sertlik derecesi 3' dür. Tatlı sularda veya denizler de kimyasal, organik veya mekanik çökelme şeklinde oluşur. Yeraltı sularında da travertenler şeklinde kalker yatakları oluşur (Anonim, 1996). Zemin, laboratvara taşındıktan sonra yıkanmış ve açık havada bekletilerek kurutulmuştur. ASTM D 854-14 standardına göre malzeme özgül ağırlık deneyi yapılmış ve 2,7 olarak bulunmuştur.

3.1.2. Tank ve deney düzeneği

Bu çalışmada farklı yuvarlaklıklara ve granülometreye sahip zeminler üzerine oturan şerit bir temelin taşıma kapasitesi davranışı incelenmiştir. Ayrıca yükleme sırasında oluşan kayma yüzeylerde araştırılmıştır. Deney düzeneği tank, yük hücresi, potansiyometrik cetveller ve bir şerit temelden oluşmaktadır.

Deney Tankı: Deneylerde kullanılan tank 100 cm uzunluk, 10 cm genişlik ve 100cm yükseklik boyutlarına sahiptir. Tankın ön tarafında 20 mm kalınlığında bir fiber plaka, arka ve yan yüzeylerde ise 5 mm çelik sac bulunmaktadır. Ayrıca deney süresince herhangi bir hareketi ve şekil değiştirmeyi engellemek için deney tankı, kutu ve L profillerle desteklenmiştir. Tankın önünde olan Fiber-glas şeffaf yüzey zeminin

hareketini izlememize ve takip etmemize olanak sağlamaktadır. Model tank Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Deney tankı

Yükleme Sistemi: Deneylerde model temel 2 mm/dakika (<2 mm/dakika) hızla yüklenmiştir. Bunun için 5 ton kapasiteli yüklem hızı ayarlanabilen bir hidrolik krik o kullanılmıştır. Yüklem düzeneği tankın üst tarafında olan reaksiyon kirişe monte edilmiştir. Hidrolik pompa kontrol ünitesi ve yüklem sistemi Şekil 3.2 ve 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Hidrolik pompa kontrol ünitesi



Şekil 3.3. Hızı ayarlanabilen yükleme sistemi

Yük Hücresi: Deneylerde model temele gelen yükleri belirlemek için 5000 kg kapasitesinde yük hücresi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan yük hücresi Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Kullanılan yük hücresinin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Yük hücresi

Çizelge 3.1. Yük hücresinin özellikleri

Teknik özellikler	Açıklama
Model	SBA-5T
Kapasite (kg)	5000
Toplam Hata (%)	<0.020
Minimum Ölçüm Aralığı (Vmin) (kg)	0,82
Yük Hücresi Malzemesi	Çelik

Potansiyometrik Cetvel: Deneyler sırasında meydana gelen yer değiştirmeler dijital potansiyometrik cetveller kullanarak ölçülmüştür. Temelin merkezi yükleme koşullarını kontrol etmek için iki çapraz köşesine iki tane potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Potansiyometrik cetvelleri kullanarak 0,01 mm hassasiyetinde okuma yapmak mümkün olmuştur. Bu çalışmada Şekil 3.5’de görüldüğü gibi, 75 mm’lik potansiyometrik cetveller kullanılmış ve potansiyometrik cetvellerin okumaları farklı olduğu zaman merkezi yükleme şartı sağlanmadığından dolayı deneyler tekrar edilmiştir.

**Şekil 3.5.** 75 mm’lik potansiyometrik cetveller

Veri Toplama Sistemi: Potansiyometrik cetveller ve yük hücresinden alınan veriler, 8 kanallı TESTBOX 1001 veri toplama cihazına atılarak bilgisayara aktarılmıştır. Verileri toplama cihazının fonksiyonu, sensorlardan gelen sinyalleri dijital veriye çevirip bilgisayar ortamına aktarmaktır. Deneyler başlamadan önce her bir sensor veri toplama cihazına tanıtılarak kalibre edilmiştir. Veri toplama cihazı Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Veri toplama sistemi

Model Temel: Deneylerde kullanılan model temel bir rijit polyamid temeldir. Model temelin genişliği 5 cm, yüksekliği 4 cm ve uzunluğu 9,8 cm seçilmiştir (Şekil 3.7). Temelin deney boyunca şekil değiştirmesini engellemek için malzeme rijit seçilmiştir.



Şekil 3.7. Model temel plakası

Bilgisayar: Deney süresince elde edilen verileri kaydetmek için Windows işletim sistemine sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Deney düzeneği

Kamera: Zeminin yer değişmesini gözlemlemek için deney sırasında belirli zaman aralıklarında zeminden fotoğrafları çekilmiştir. Kamera bir tripod vasıtasıyla tankın önüne kurulmuştur. Zeminin yer değiştirme formu ilk ve son fotoğrafları karşılaştırmasıyla ortaya çıkmaktadır. Kameranın deney boyunca hareketsiz kalması yer değişme analizinin etkilenmemesi için önemlidir.

3.1.3. Kesme kutusu deney aleti

Çalışma kapsamında zeminin yuvarlaklığının, zeminin kayma mukavemeti açısı üzerindeki etkisinin incelenmesi için kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Takada (1993),_Yasin *et al.* (1999) ve Wu *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmaları göz

önünde bulundurarak deney sonuçlarının daha güvenli olması için kesme kutusu deneyleri orta ölçekli kesme kutusu deney aletinde yapılmıştır. Orta ölçekli kesme kutusu deney aleti Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Orta ölçekli kesme kutusu deney aleti

Orta ölçekli kesme kutusu hücresi 15x15 cm ebatlarındadır.

ASSHTO T 236 ve ASTM D 3080M-11’e göre deneye tabi tutulacak maksimum dane çapının kare kesme aparatının kenarına oranı en az 1/10 olmalıdır. Standart olan kurala göre bu aparat kullanılarak en fazla 15 mm büyüklüğüne kadar zemin denenebilir (Arasan 2011)

Ayrıca, ASSHTO T 236 ve ASTM D 3080M-11’de maksimum dane çapı ile numune kalınlığı arasında en az 1/6 oranı ve numune genişliği ile kalınlığı arasında 2:1 oranının olması gerektiği ifade edilmiştir. Bunun yanında, Hight ve Leroueil (2003) ve Cerato ve Lutenegeer (2006) yaptıkları çalışmalarda, ASSHTO T236 ve ASTM D 3080 ve standartlarının numune genişliği ile kalınlığı arasında bulunması gereken 2:1 oranının kayma düzleminin tam oluşabilmesi için artırılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Tüm

bunlar dikkate alınarak, çalışma kapsamında yapılacak deneylerde numune kalınlığı 5 cm olarak seçilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Zeminlerin hazırlanması

Ocaktan getirilen granüler malzemenin, Cox (1927) denklemi, Power (1953) grafiği ve Arasan (2011) da belirtilen kriterler dikkate alındığında köşeli zemin sınıfına girdiği belirlenmiştir. Köşeli zeminleri yarı yuvarlak ve yuvarlak kalker haline getirmek için Arasan (2011) referans alınarak, Los Angeles cihazı (Şekil 3.10) kullanılarak zemin yarı yuvarlak ve yuvarlak hale getirilmiştir.

Zemin laboratuvara taşındıktan sonra, Los Angeles aleti kullanılarak 3 farklı yuvarlaklığa sahip duruma getirilmiştir. Daha sonra farklı eleklerden geçirilerek 6 farklı granülometreye sahip zemin elde edilmiştir.

Köşeli zemin yarı yuvarlak hale getirmek için, bilyeleri çıkardıktan sonra yaklaşık 10 kg köşeli zemin Los Angeles cihazına yerleştirilmiş ve cihaz 50000 (Elli bin) devir çalıştırılmıştır. Zeminin taneleri birbirine sürtünerek zemin yarı yuvarlak hale getirilmiştir. Yarı yuvarlak hale gelen zemin yeniden yıkanıp laboratvarda açık havada kurutulduktan sonra elenerek önceden bahsedildiği gibi tane çapına göre 6 sınıfa ayrılmıştır.



Şekil 3.10. Los Angeles cihazı

Aynı işlem yarı yuvarlak zemini yuvarlak hale getirmek için de yapılmıştır. Bunun için köşeli zemin Los Angeles cihazın 100000 devir, yarı yuvarlak zemin ise 50000 devir yaptırılarak, yuvarlak hale dönüştürülmüştür. Yuvarlak zemin yıkanıp kuruduktan sonra elenip deney için hazırlanmıştır.

Köşeli zemin firmadan laboratuvara taşındıktan sonra yıkanmış, normal havada kurutulmuş ve 6 farklı boyutta elenmiştir. Şekil 3.11’de zemin gösterilmiştir. Elekler sırayla 0,30 mm, 1,18 mm, 1,40 mm, 2,36 mm, 2,80 mm, 3,35 mm ve 4,75 mm olarak küçükten büyüğe üst üste koyulup eleme yapılarak 6 farklı gruba ayrılmıştır (Şekil 3.12). Sonraki aşamada her grupta zeminin maksimum ve minimum boşluk oranı standartlara göre bulunmuştur. Aynı zamanda zemin özgül ağırlığı belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Firmadan laboratvara getirilmiş zemin

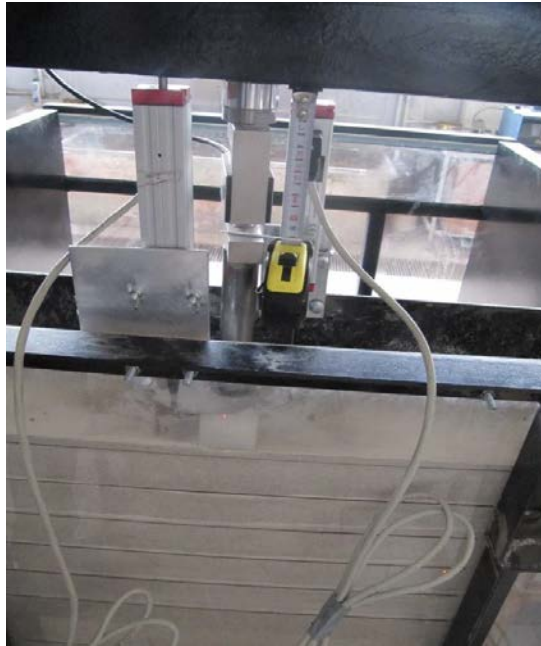


Şekil 3.12. 6 Farklı grupta danelerin görüntüsü

Model deneyler üç farklı $D_r = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölâtif sıkılıkta ve 6 farklı granülometriye sahip zeminler üzerinde yapılmıştır. Her rölâtif sıkılık için ve her tane çapı aralığında zeminin boşluk oranı bulunmuştur

Zeminler tankta istenilen rölâtif sıkılığa getirilerek deneyler yapılmıştır. Zeminin $D_r = \%30$ rölâtif sıkılıkta yerleştirilebilmesi için huniyle tankın içine alçaktan dökülüp üstü düzleştirilerek deneye hazırlanmıştır. $D_r = \%50$ ve $\%70$ rölâtif sıkılıklarda zemin tankta yerleştikten sonra çizdiğimiz hattan daha yukarıda kaldığı için plastik bir çekikle tankın önüne ve arkasına bir iki defa vurarak zemin istenilen sıkılığa getirilip deneyler yapılmıştır.

Tank, hızı 2 mm/dakika olan bir pompa, iki tane potansiyometrik cetvel ve bir tane yük hücresinden oluşturularak bilgisayara bağlanmış bir düzenektir. Zemin tanka yerleştirildikten sonra şerit temel zeminin üzerine koyularak iki çapraz köşesine potansiyometrik cetveller monte edilmiştir. Bu arada temelin tam düz olmasına ve potansiyometrik cetvellerin tam dik olmalarına dikkat edilmiştir. Şekil 3.13' de deney düzeneği görünmektedir.



Şekil 3.13. Deney düzeneği

Zeminin ve temelin yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra tankın önüne tripod üstüne sabit bir kamera yerleştirilmiştir. Bu kameranın deney boyunca sabit kalması ve hareket etmemesi amacıyla kamera bir kumandayla kontrol edilmiş ve böylece kameraya temas etmeden fotoğraflar çekimi sırasında kameranın titreşmesi önlenmiştir.

Her deneyde ilk fotoğraf deneye başlamadan önce çekilmiş, temel yüklendikten 30 saniye sonra ikinci fotoğraf çekilerek deney bitene kadar her 30 saniyede bir fotoğraf çekilmiştir.

Şerit temelin yüklenmesiyle oturma meydana gelmiştir. Yük ve oturma verileri veri toplama ünitesi yardımıyla bilgisayara taşınarak her deneyin verileri ayrı kayıt edilmiştir. Aynı zamanda her bir deneyde temelin yer değişmesi seri olarak fotoğraflar çekilerek incelenmiştir.

Fotoğraflar Geo-PIV programında incelenerek zeminin yer değiştirmesi elde edilmiştir. İlk deney serisi köşeli zemin üzerinde yapıldıktan sonra, aynı deneyler yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminler üzerinde de yapılmıştır. Her bir deney sonuçlardan emin olmak için en az 3 kere tekrarlanmıştır. Bu çalışmada 54 farklı deney yapılmıştır. Deney programı Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

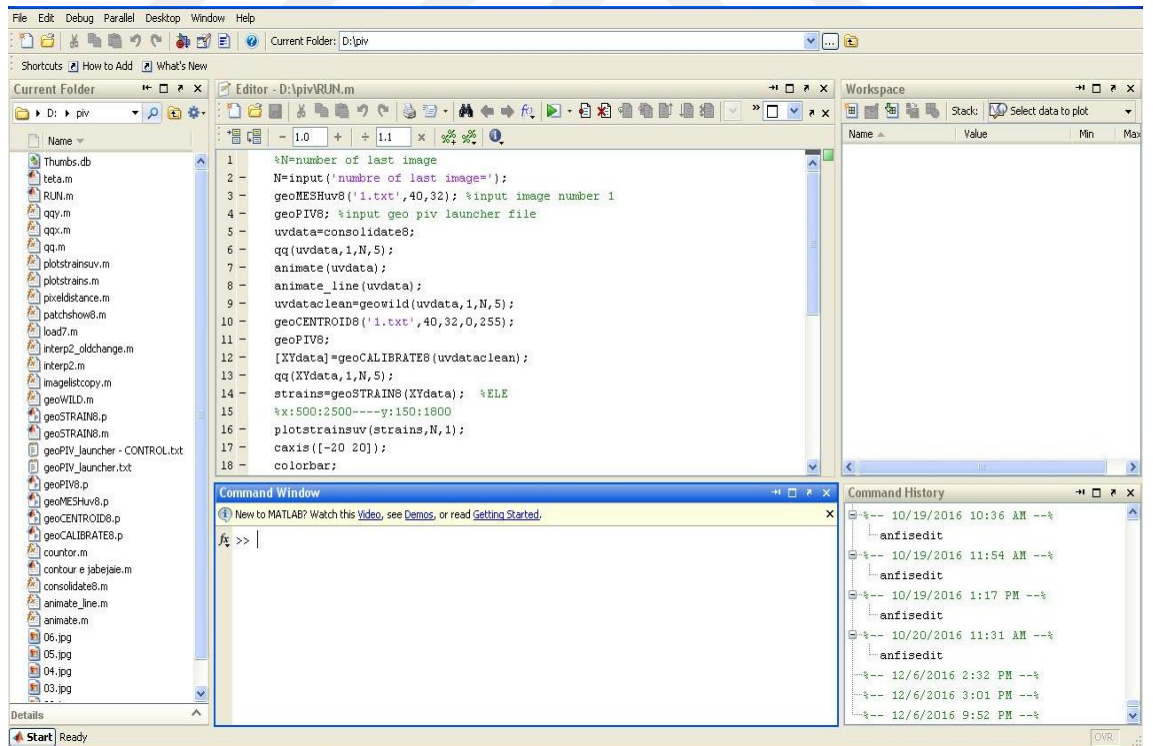
Çizelge 3.2. Deney programı

Zemin Boyutu (mm)	Rölatif Sıkılık (%)	Yuvarlaklık
0,30-1,18	30 - 50 - 70	Köşeli, Yarı Yuvarlak, Yuvarlak
1,18-1,40	30 - 50 - 70	Köşeli, Yarı Yuvarlak, Yuvarlak
1,40-2,36	30 - 50 - 70	Köşeli, Yarı Yuvarlak, Yuvarlak
2,36-2,80	30 - 50 - 70	Köşeli, Yarı Yuvarlak, Yuvarlak
2,80-3,35	30 - 50 - 70	Köşeli, Yarı Yuvarlak, Yuvarlak
3,35-4,75	30 - 50 - 70	Köşeli, Yarı Yuvarlak, Yuvarlak

Model deneyler tamamlandıktan sonra her bir zemin boyutu için üç farklı rölatif sıklıkta ve üç farklı yuvarlaklıkta kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Böylece boyut, rölatif sıklık ve yuvarlaklığın içsel sürtünme açısı üzerinde ki etkisi de incelenmiştir.

3.2.2. Parçacık görüntülü hız ölçümü yöntemi (Geo-PIV)

Geo-PIV Matlab programında çalışan bir modüldür. Bu program White *et al.* (2001) tarafından daneli zeminlerinin hareketini belirlemek için üretilmiş bir programdır. Bu programda, deney süresince seri olarak çekilen fotoğraflar programa tanıtılır, sonra tanıtılan bu fotoğraflar program küçük parçalara bölerek her parçayı sırayla ilk fotoğraftan başlayarak son fotoğrafa kadar bir önceki fotoğraf ile karşılaştırır ve sonunda küçük parçanın nihai yer değiştirmesini bulur. Şekil 3.14’de programın kodları görünmektedir.



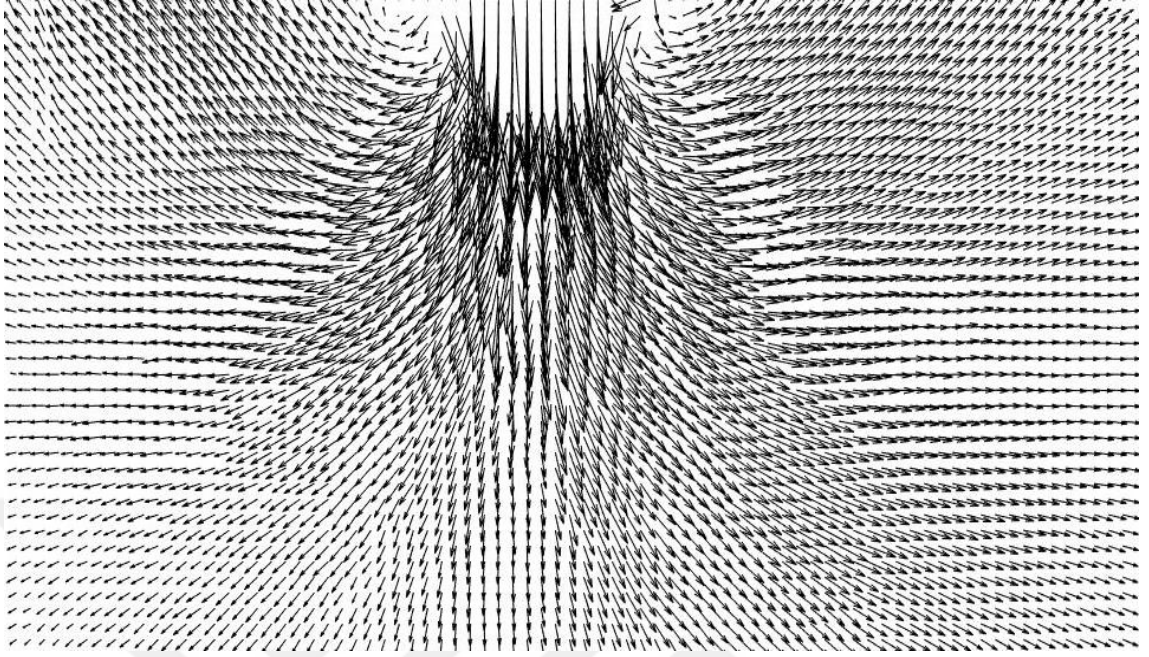
Şekil 3.14. Geo-PIV programının kodları

Program çalıştırılmadan önce ilk fotoğrafın adresi verilir, ikinci aşamada program çalıştırıp son resmin numarası verilerek fotoğraf sayısı belirlenir. Sonra ilk fotoğraf seçilerek fotoğraf küçük parçalara bölünür. Bu bölme Şekil 3.15’de gösterilmektedir.

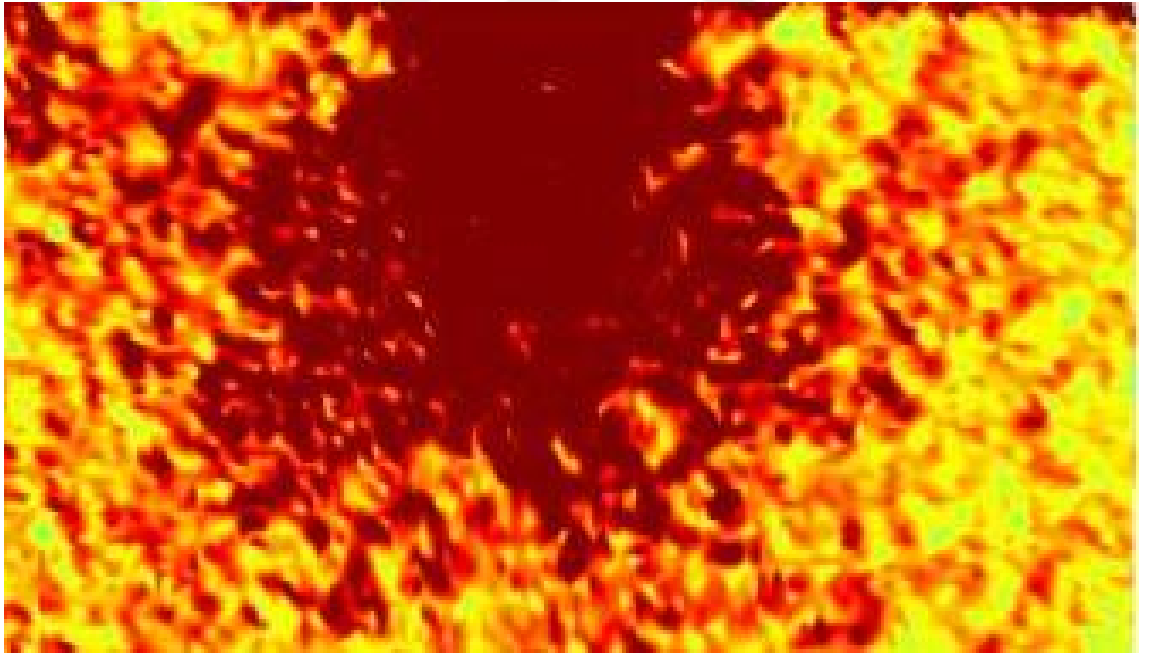
Böylece her fotoğraf küçük parçalara bölünür ve her bir parça ilk fotoğrafta sonraki fotoğraf ile karşılaştırılarak, ilk ve ikinci fotoğraf arasındaki fark ortaya çıkarılır. Bu durum son fotoğrafa kadar devam eder. Yani ikinci fotoğraf üçüncü fotoğraf ile, üçüncü dördüncü ile kıyaslanır ve bu işlem sona kadar devam ederek, ilk ve son fotoğraf farkı her bir parçada ortaya çıkarılmış olur. Böylelikle tüm parçaların yer değiştirmesi yan yana koyularak tüm zeminin hareketi elde edilebilir. Bu hareket hem vektörel şekilde hem de renk ölçek ile gösterilebilir (Şekil 3.16 ve 3.17).



Şekil 3.15. Fotoğrafları küçük parçalara bölünmesi



Şekil 3.16. Zeminin yer değiştirmesinin vektörel şeklinde gösterilişi



Şekil 3.17. Zeminin yer değiştirmesinin renk ölçekli şeklinde gösterilişi

Geo-PIV yöntemi granüler zeminlerin hareketini daha iyi belirlemek için deney boyunca fotoğraf çekerken ışık değişimi olmaması gerekmektedir. Yani deney süresince

güneşin batması ya da zemine gölge düşmesi sonuçları etkileyebilir. Bunun nedeni programın fotoğrafları inceleme tarzından kaynaklanır. Yani program fotoğrafta olan gölgeleri göze alarak bu gölgeleri her parçada karşılaştırarak zemin danelerinin yer değişimini bulur. Bu sebeple zeminin üzerine gelen ışığın açısı değiştiğinden program yanlış hesaplama yapabilir. Bu nedenle deney süresince zemine gelen ışığın sabit kalması çok önemlidir. Projektör veya kuvvetli ışık kullanarak deney esnasında ışığın değişmesi engellenmiştir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

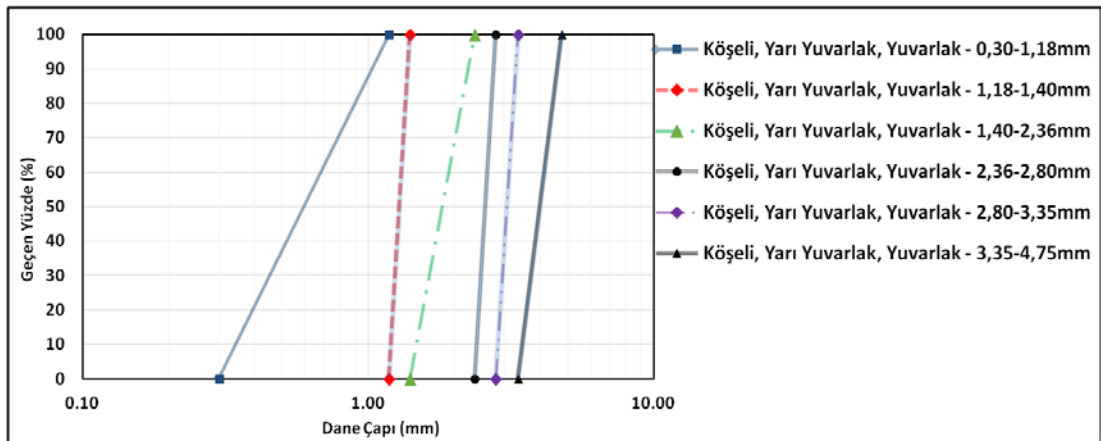
4.1. Malzeme Özellikleri

Zeminin yuvarlaklık değeri ve sınıflandırılması Cox (1927) denklemi, Power (1953) grafiği ve Arasan (2011) a göre Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Zemin kurutulduktan sonra dane çapına göre 6 farklı gruba ayrılmış ve her zeminin geoteknik özellikleri bulunmuştur. Kullanılan elek çapları sırasıyla 0,30, 1,18, 1,40, 2,35, 2,80, 3,35 ve 4,75 mm dir. Köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminin ASTM D 6913-04 standardına göre çizilen granülometri eğrileri Şekil 4.1’de görülmektedir. 6 farklı granülometriye sahip zeminler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre kötü derecelenmiş kum (SP) zemin sınıfına girmektedir.

Çizelge 4.1. Zeminlerin yuvarlaklık değerleri ve sınıflandırması

Numune	Yuvarlaklık Değeri	Yuvarlaklık Sınıfı
Köşeli Kalker	0,693-0,744	Köşeli - Yarı Köşeli
Yarı Yuvarlak Kalker	0,786-0,803	Yarı Yuvarlak - Yuvarlak
Yuvarlak Kalker	0,834-0,854	Yuvarlak - İyi Yuvarlak

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminlerin granülometri eğrileri aynı elek serileri kullanıldığı için aynıdır.



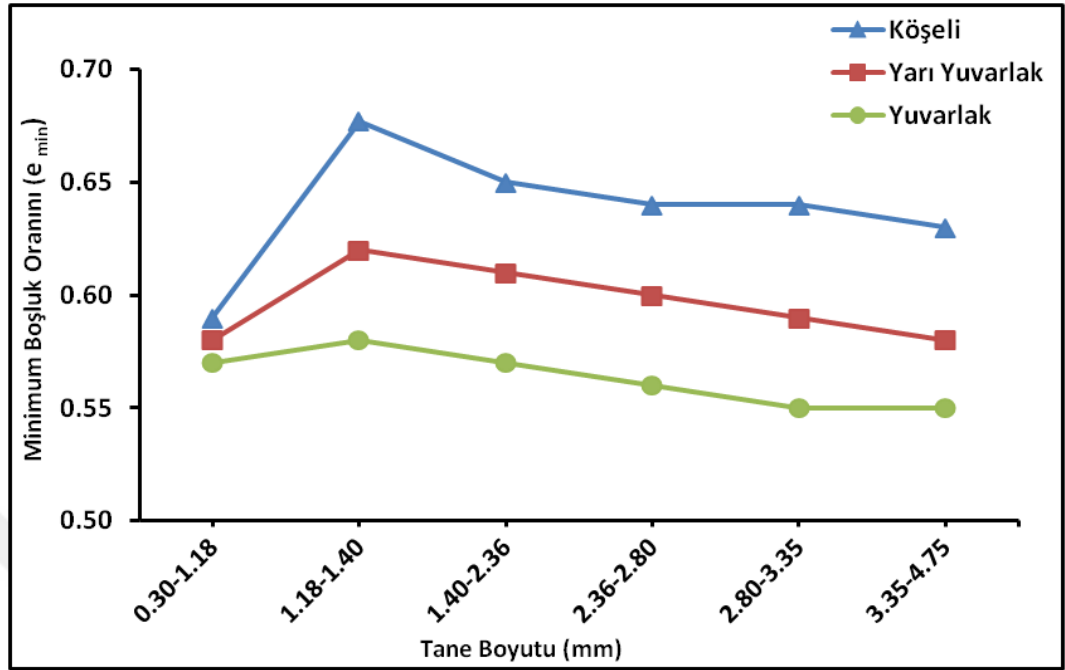
Şekil 4.1. Köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminlerin granülometri eğrileri

ASTM D 854-14 standardına uygun olarak yapılan deneyler sonucunda zeminin özgül ağırlığı 2,7 olarak belirlenmiştir. Maksimum ve minimum boşluk oranları ASTM D4253-16 ve ASTM D4254-16 standartlarına göre yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen maksimum ve minimum boşluk oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

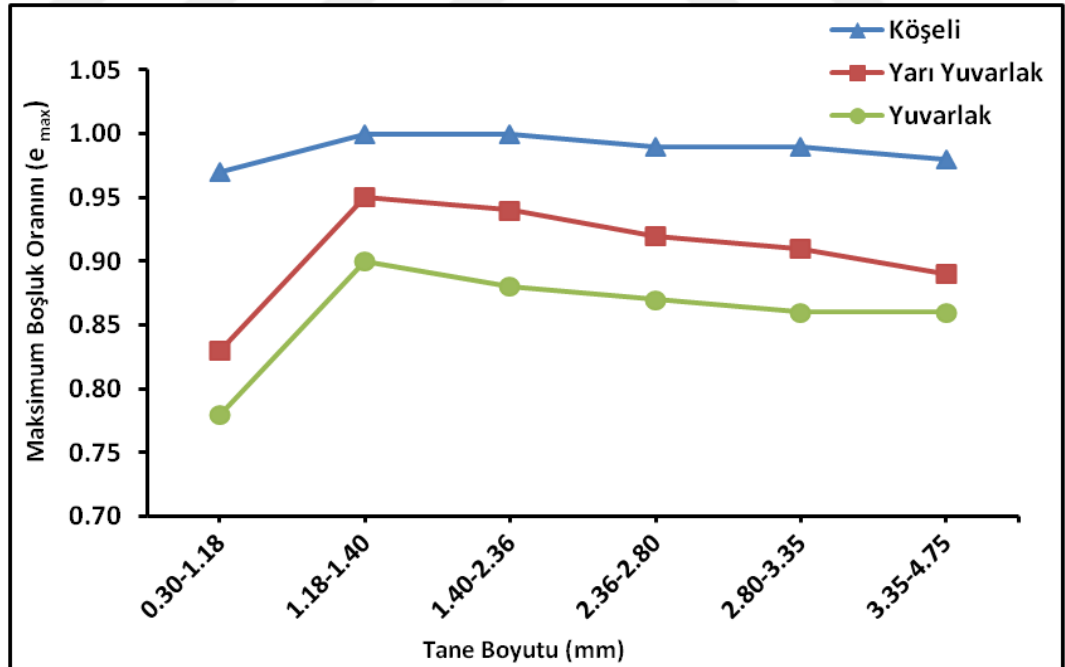
Çizelge 4.2. Maksimum ve minimum boşluk oranları

Dane Çapı (mm)	Köşeli		Yarı Yuvarlak		Yuvarlak	
	e_{maks}	e_{min}	e_{maks}	e_{min}	e_{maks}	e_{min}
0,30-1,18	0,97	0,59	0,83	0,58	0,78	0,57
1,18-1,40	1	0,677	0,95	0,62	0,90	0,58
1,40-2,36	1	0,65	0,94	0,61	0,88	0,57
2,36-2,80	0,99	0,64	0,92	0,60	0,87	0,56
2,80-3,35	0,99	0,64	0,91	0,59	0,86	0,55
3,35-4,75	0,98	0,63	0,89	0,58	0,86	0,55

Çizelge 4.2 incelendiğinde zeminin tane çapı büyüdükçe maksimum ve minimum boşluk oranı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Minimum ve maksimum boşluk oranının, tane boyutunun artması ile değişimi sırasıyla Şekil 4.2 ve 4.3’de gösterilmektedir. Şekil 4.2 ve 4.3 incelendiğinde tane çapı büyüdükçe maksimum ve minimum boşluk oranı değerlerinin düştüğü görülmektedir.

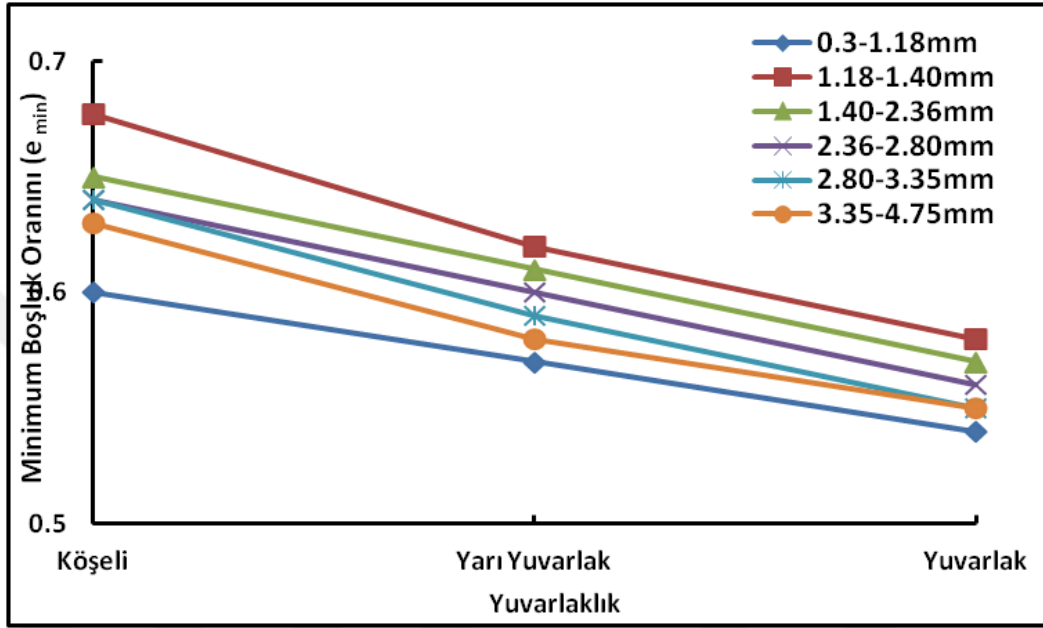


Şekil 4.2. Dane çapına bağlı olarak minimum boşluk oranının değişimi

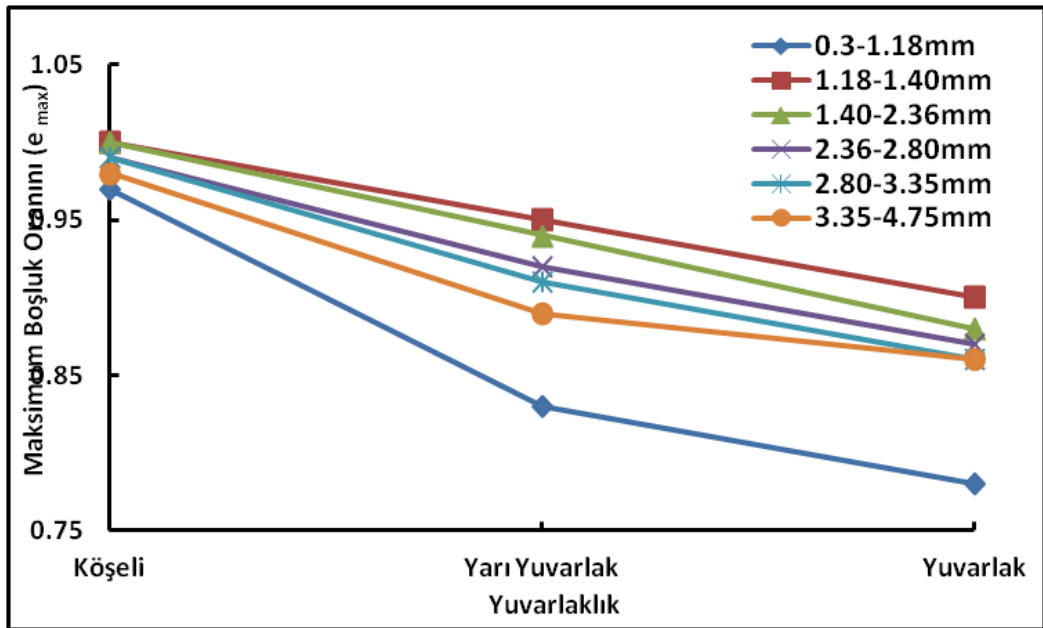


Şekil 4.3. Dane çapına bağlı olarak maksimum boşluk oranının değişimi

Minimum ve maksimum boşluk oranlarının zeminin yuvarlaklığının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Şekil 4.3 ve 4.4’de sırasıyla minimum ve maksimum boşluk oranların yuvarlaklığa bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Yuvarlaklığa bağlı minimum boşluk oranının değişmesi



Şekil 4.4. Yuvarlaklığa bağlı maksimum boşluk oranının değişmesi

Deneylerde köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak olmak üzere üç tür zemin kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan zeminlerin bazı geoteknik özellikleri Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Köşeli zeminin geoteknik özellikleri

Köşeli Zeminin Özellikleri							
İsim	Birim	Boyut					
		0,30-1,18	1,18-1,40	1,40-2,36	2,36-2,80	2,80-3,35	3,35-4,75
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmax})	kN/m ³	16,9	16,1	16,3	16,3	16,4	16,5
Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmin})	kN/m ³	13,7	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6
Maksimum Boşluk Oranı (e_{max})	-	0,97	1,0	1,0	0,99	0,99	0,98
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	-	0,59	0,677	0,65	0,64	0,64	0,63
% 30 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{%30}$)	kN/m ³	14,5	14,2	14,2	14,3	14,3	14,3
% 50 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{%50}$)	kN/m ³	15,1	14,7	14,8	14,8	14,8	14,9
% 70 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{%70}$)	kN/m ³	16	15,2	15,3	15,4	15,4	15,4
% 30 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr30\%}$)	-	0,86	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88
% 50 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr50\%}$)	-	0,78	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81
% 70 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr70\%}$)	-	0,71	0,77	0,75	0,75	0,75	0,74
Zeminin Yüzde Onunun Geçtiği Çap (D_{10})	mm	0,388	1,202	1,496	2,404	2,855	3,490
Zeminin Yüzde Otuzunun Geçtiği Çap (D_{30})	mm	0,564	1,038	1,688	2,492	2,965	3,770
Zeminin Yüzde Altmışının Geçtiği Çap (D_{60})	mm	0,828	1,312	1,976	2,624	3,13	4,190
Uniformluluk Katsayısı (C_u)	-	2,13	1,09	1,321	1,091	1,096	1,200
Derecelenme Katsayısı (C_c)	-	0,990	0,683	0,964	0,984	0,984	0,972
Zemin Sınıfı	-	SP	SP	SP	SP	SP	SP

Çizelge 4.4. Yarı Yuvarlak zeminin geoteknik özellikleri

Yarı Yuvarlak Zeminin Özellikleri							
İsim	Birim	Boyut					
		0,30-1,18	1,18-1,40	1,40-2,36	2,36-2,80	2,80-3,35	3,35-4,75
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmax})	kN/m ³	17,0	16,6	16,7	16,8	17,0	17,0
Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmin})	kN/m ³	14,8	13,8	13,9	14,1	14,0	14,3
Maksimum Boşluk Oranı (e_{max})	-	0,83	0,95	0,94	0,92	0,91	0,89
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	-	0,58	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58
% 30 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{\%30}$)	kN/m ³	15,3	14,6	14,6	14,8	14,8	15,0
% 50 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{\%50}$)	kN/m ³	15,8	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5
% 70 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{\%70}$)	kN/m ³	16,2	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1
% 30 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr30\%}$)	-	0,75	0,85	0,84	0,82	0,82	0,80
% 50 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr50\%}$)	-	0,71	0,78	0,78	0,75	0,75	0,73
% 70 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr70\%}$)	-	0,66	0,72	0,71	0,69	0,69	0,67
Zeminin Yüzde Onunun Geçtiği Çap (D_{10})	mm	0,388	1,202	1,496	2,404	2,855	3,490
Zeminin Yüzde Otuzunun Geçtiği Çap (D_{30})	mm	0,564	1,038	1,688	2,492	2,965	3,770
Zeminin Yüzde Altmışının Geçtiği Çap (D_{60})	mm	0,828	1,312	1,976	2,624	3,13	4,190
Uniformluluk Katsayısı (C_u)	-	2,13	1,09	1,321	1,091	1,096	1,200
Derecelenme Katsayısı (C_c)	-	0,990	0,683	0,964	0,984	0,984	0,972
Zemin Sınıfı	-	SP	SP	SP	SP	SP	SP

Çizelge 4.5. Yuvarlak zeminin geoteknik özellikleri

Yuvarlak Zeminin Özellikleri							
İsim	Birim	Boyut					
		0,30-1,18	1,18-1,40	1,40-2,36	2,36-2,80	2,80-3,35	3,35-4,75
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmax})	kN/m ³	17,2	15,0	17,2	17,2	17,4	17,4
Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmin})	kN/m ³	15,1	14,2	14,5	14,5	14,3	14,5
Maksimum Boşluk Oranı (e_{max})	-	0,78	0,90	0,86	0,86	0,88	0,86
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	-	0,57	0,58	0,57	0,57	0,55	0,55
% 30 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{\%30}$)	kN/m ³	15,7	14,9	15,2	15,2	15,3	15,3
% 50 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{\%50}$)	kN/m ³	16,1	15,5	15,7	15,7	15,9	15,8
% 70 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($Dr_{\%70}$)	kN/m ³	16,5	16,1	16,2	16,2	16,4	16,4
% 30 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr30\%}$)	-	0,72	0,80	0,77	0,77	0,76	0,77
% 50 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr50\%}$)	-	0,67	0,74	0,71	0,71	0,70	0,70
% 70 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr70\%}$)	-	0,63	0,676	0,66	0,66	0,64	0,64
Zeminin Yüzde Onunun Geçtiği Çap (D_{10})	mm	0,388	1,202	1,496	2,404	2,855	3,490
Zeminin Yüzde Otuzunun Geçtiği Çap (D_{30})	mm	0,564	1,038	1,688	2,492	2,965	3,770
Zeminin Yüzde Altmışının Geçtiği Çap (D_{60})	mm	0,828	1,312	1,976	2,624	3,13	4,190
Uniformluluk Katsayısı (C_u)	-	2,13	1,09	1,321	1,091	1,096	1,200
Derecelenme Katsayısı (C_c)	-	0,990	0,683	0,964	0,984	0,984	0,972
Zemin Sınıfı	-	SP	SP	SP	SP	SP	SP

Çizelge 4.6’da deneylerde kullanılan zeminin birim hacim ağırlıkları farklı rölatif sıklıklar için gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı boyutlarda ve rölatif sıklıklarda zeminlerin birim hacim ağırlığı

YUVARLAKLIK		Birim	0,30-1,18	1,18-1,40	1,40-2,36	2,36-2,80	2,80-3,35	3,35-4,75
Köşeli Zemin	(Dr _{%30})	kN/m ³	14,5	14,2	14,2	14,3	14,3	14,3
	(Dr _{%50})	kN/m ³	15,1	14,7	14,8	14,8	14,8	14,9
	(Dr _{%70})	kN/m ³	16	15,2	15,3	15,4	15,4	15,4
Yarı Yuvarlak Zemin	(Dr _{%30})	kN/m ³	15,3	14,6	14,6	14,8	14,8	15
	(Dr _{%50})	kN/m ³	15,8	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5
	(Dr _{%70})	kN/m ³	16,2	15,7	15,8	15,9	16	16,1
Yuvarlak Zemin	(Dr _{%30})	kN/m ³	15,7	14,9	15,2	15,2	15,3	15,3
	(Dr _{%50})	kN/m ³	16,1	15,5	15,7	15,7	15,9	15,8
	(Dr _{%70})	kN/m ³	16,5	16,1	16,2	16,2	16,4	16,4

4.2. Taban Basınç-Oturma Eğrileri

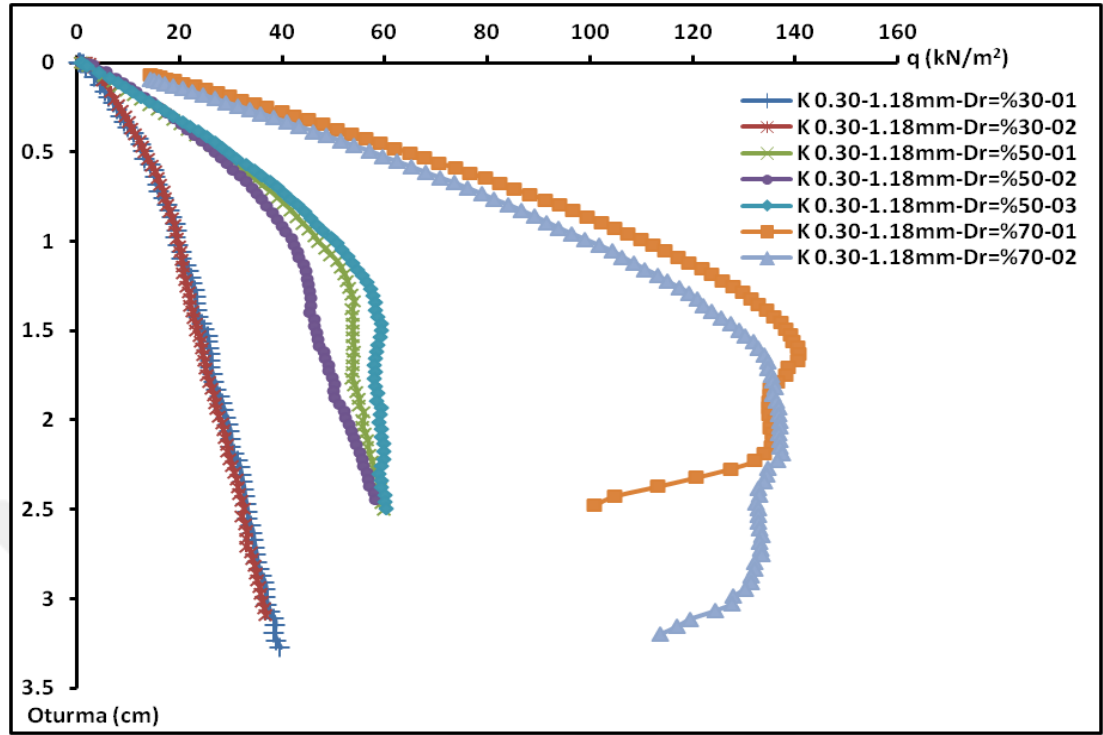
Zemin model tanka istenilen rölatif sıklıkta yerleştirildikten sonra, model şerit temel zemin üzerine yerleştirilmiş ve su terazisiyle temelin yatay olması kontrol edilmiştir. İki potansiyometrik cetvel temelin iki çapraz köşesine yerleştirilmiştir. Bir kamera tripod üzerinde sabit bir şekilde tankın önüne yerleştirilmiştir. İlk fotoğraf deneye başlamadan önce ve diğer fotoğraflar deneye başladıktan sonra her 30 saniyeden bir deney bitene kadar çekilmiştir. Daha sonra temel <2 mm/dakika hızıyla yüklenmiştir. Deneyden alınan veriler, veri toplam cihazıyla bilgisayara aktarılmıştır. Veriler, zamana bağlı olarak 2 potansiyometrik cetvelin verileri ve temele gelen yükü göstermektedir. Şekil 4.5’de deneyden alınan veriler ham halinde gösterilmektedir.

	A	B	C	D	E
1	Zaman(s)	1211()	1212()	1213()	
2	0	-0.00049223	-0.00121242	-0.649436	
3	9.999	-0.00123057	-0.00290982	-0.811795	
4	19.997	-0.00344559	-0.00703206	-1.13651	
5	29.996	-0.00984453	-0.0184288	-1.46123	
6	39.996	-0.0248574	-0.0453446	-3.24718	
7	49.995	-0.0506993	-0.0822023	-5.52021	
8	59.994	-0.0701423	-0.112028	-7.30616	
9	69.993	-0.0883547	-0.137489	-8.76739	
10	79.993	-0.107798	-0.165132	-10.391	
11	89.854	-0.129209	-0.19132	-11.8522	
12	99.854	-0.15259	-0.217751	-13.4758	
13	109.852	-0.176217	-0.246849	-15.0994	
14	119.851	-0.202059	-0.275705	-16.5606	
15	129.851	-0.226424	-0.302378	-18.5089	
16	139.85	-0.252758	-0.329294	-19.9702	
17	149.849	-0.281554	-0.362757	-21.269	
18	159.848	-0.31281	-0.39234	-22.4056	

Şekil 4.5. Deneyden alınan veriler

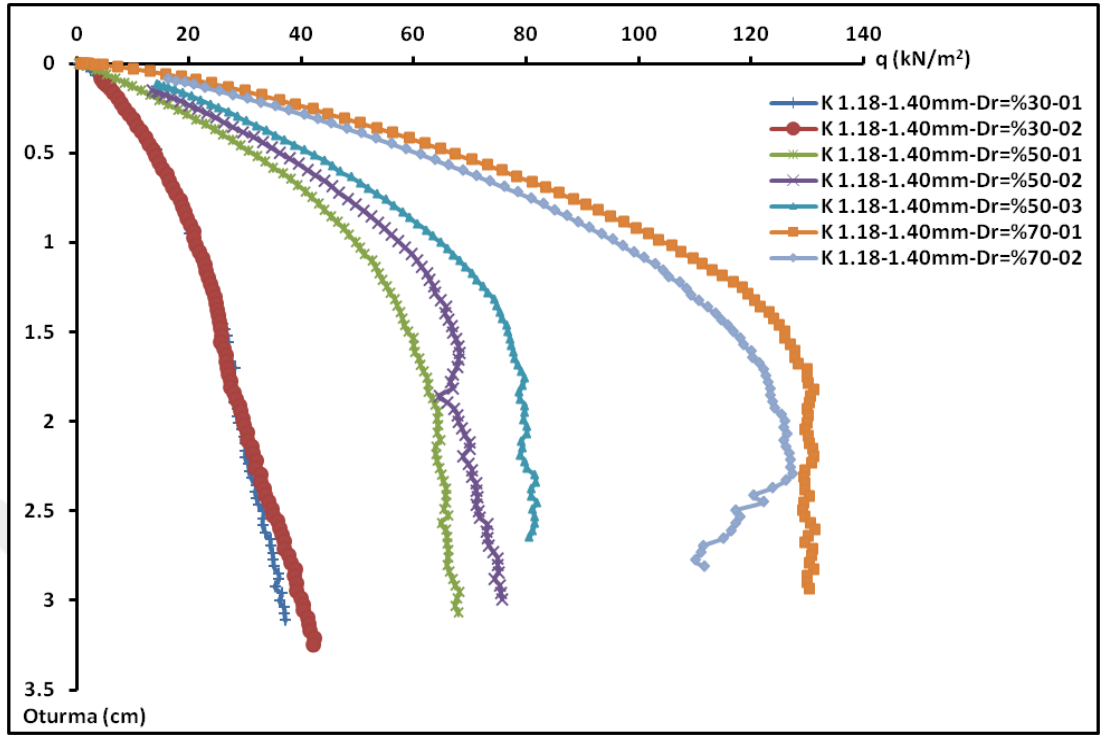
Verilerde ilk sütun zamanı saniye biriminde, ikinci ve üçüncü sütunlar oturmaları santimetre biriminde ve dördüncü sütun temele gelen yükü, kg biriminde göstermektedir.

İki potansiyometrik cetvelden elde edilen oturmaların ortalaması temelin oturması olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda temele gelen yükü temelin taban alanına bölerek temel taban basıncı değeri elde edilmiştir. Böylece taban basıncı-oturma eğrileri her bir zemin aralığı, rölatif sıklık ve yuvarlaklık için ayrı ayrı elde edilmiştir. Şekil 4.6'da tane çapı 0,30-1,18 mm aralığı olan köşeli zeminin taban basıncı-oturma eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

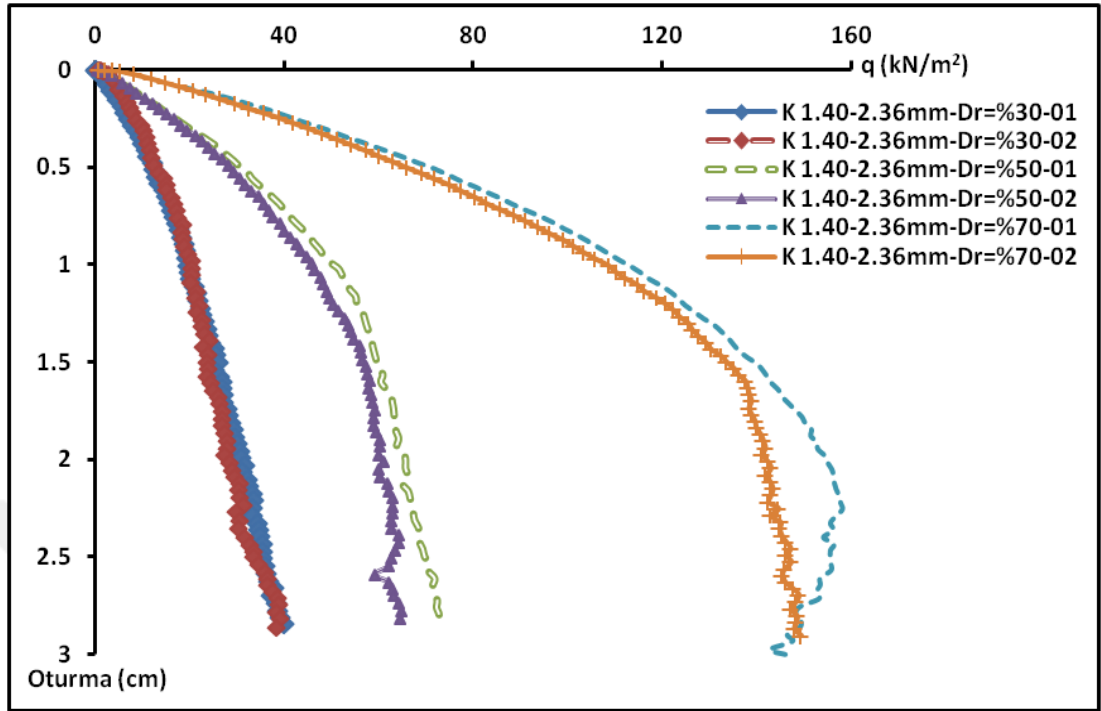
Şekil 4.6'dan Vesic (1975) ve Das (1998)'de anlatıldığı şekilde nihai taşıma güçleri (q_u) bulunmuştur. Dr= %70 rölatif sıkılıkta, nihai taşıma kapasitesi yaklaşık 140 kN/m^2 olarak grafikten belirlenmiştir. Pik nokta zeminin nihai taşıma kapasitesi olarak (q_u) tanımlanmaktadır. Dr= %50 rölatif sıkılıkta taban basıncı-oturma eğrisinde 50 kN/m^2 'de grafik eğiminde değişme meydana gelmiştir. Eğrinin başlangıç eğim ile son eğimin teğetlerin çizildiği zaman zeminin nihai taşıma kapasitesi yaklaşık 50 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.7'de tane çapı 1,18 ile 1,40 mm aralığı olan köşeli zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri görülmektedir.



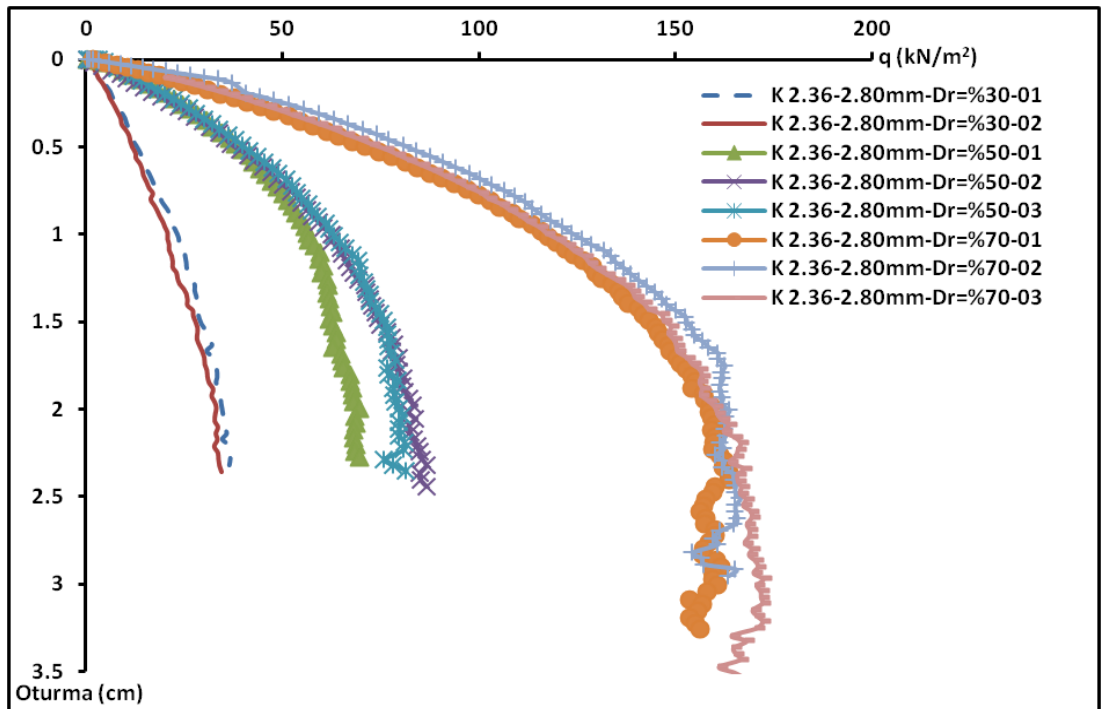
Şekil 4.7. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi $Dr = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölatif sıkılıklarda zeminin taban basıncı-oturma davranışı birbirinden farklıdır. $Dr = \%70$ rölatif sıkılığa sahip olan zeminde taban basıncı-oturma eğrisinde kırılma noktası belli olduğu için nihai taşıma kapasitesi 130 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde $Dr = \%50$ rölatif sıkılığa sahip olan zeminde nihai taşıma kapasitesi yaklaşık 55 kN/m^2 bulunmuştur. Zeminin rölatif sıkılığı $\%30$ olduğu zaman $q_u = 18 \text{ kN/m}^2$ olarak elde edilmiştir.

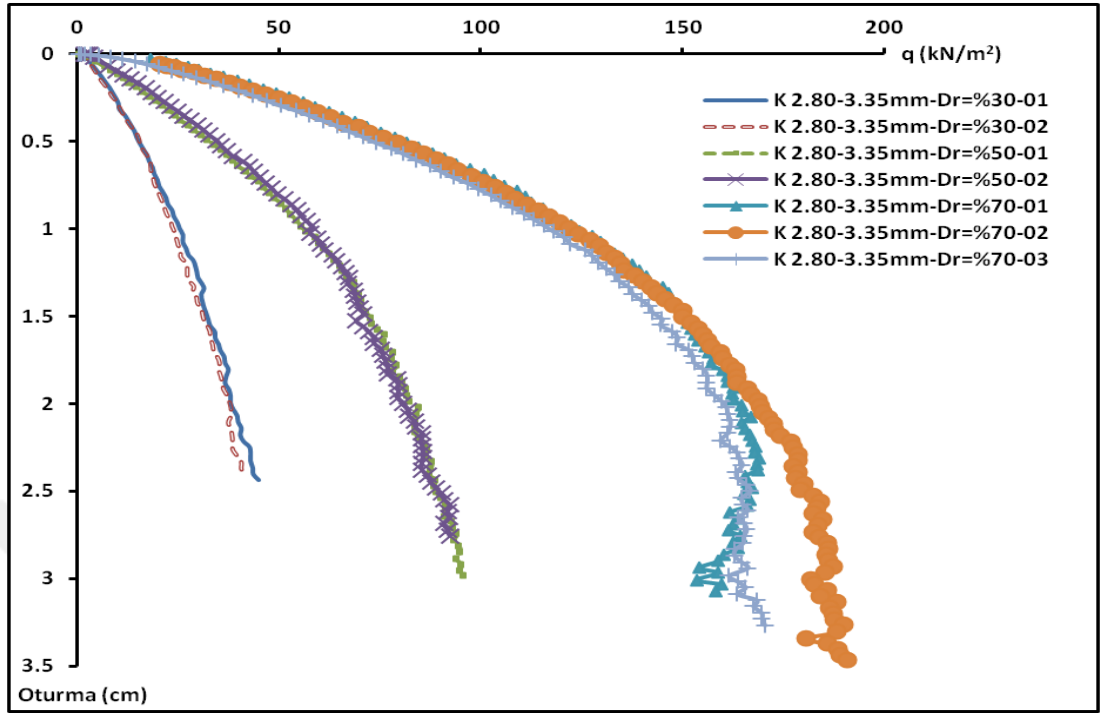
Tane çapı 1,40-2,36 mm, 2,36-2,80 mm, 2,80-3,35 mm ve 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminler için çizilmiş olan taban basıncı-oturma eğrileri Şekil 4.8’ - Şekil 4.11’ de gösterilmiştir.



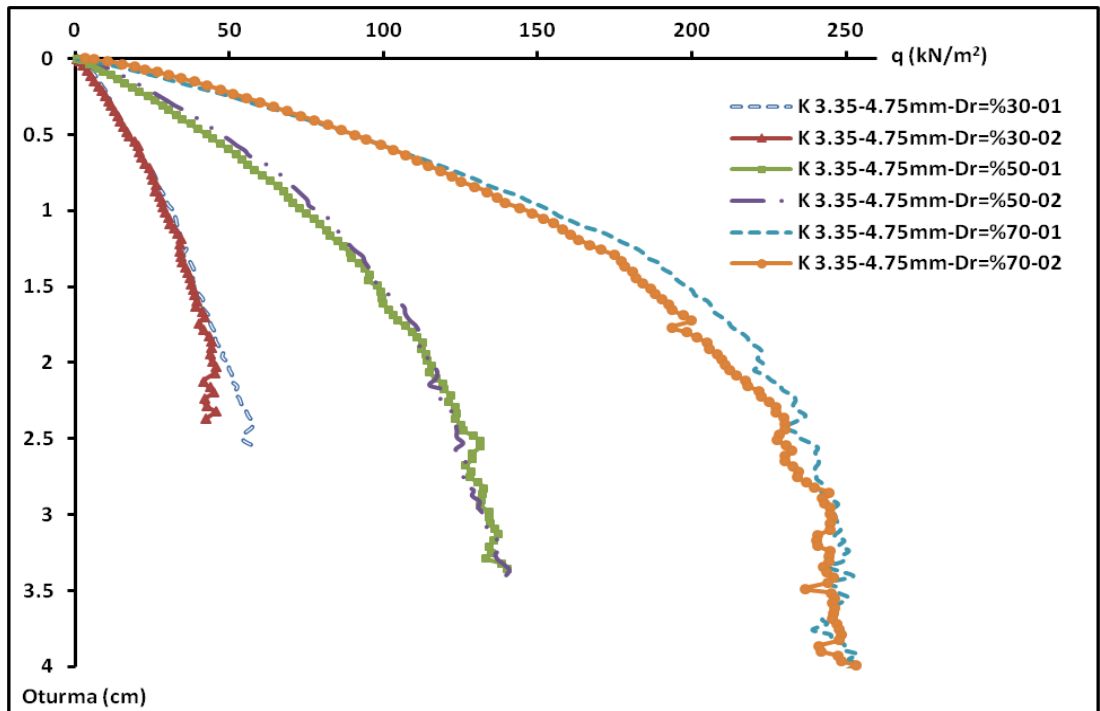
Şekil 4.8. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri



Şekil 4.9. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri



Şekil 4.10. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri



Şekil 4.11. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

Şekil 4.8, - 4.11' deki grafikler incelendiğinde aynı rölatif sıklılıkta tane boyutu artıkça zeminin taşıma gücünün de arttığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip olan zemin $Dr = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölatif sıklılıklarda en düşük nihai taşıma kapasitesine sahipken, 3,35-4,75 mm tane çapı aralığına sahip olan zeminde en yüksek taşıma kapasitesine sahiptir. Rölatif sıklılıkları karşılaştırdığımız zaman en az taşıma kapasitesinin $Dr = \%30$ rölatif sıklılıkta olduğu ve en yüksek taşıma kapasitesinin de $Dr = \%70$ rölatif sıklılıkta olduğu görülmektedir.

$Dr = \%70$ rölatif sıklılıkta 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip olan köşeli zeminde nihai taşıma kapasitesi 130 kN/m^2 iken, 3,35-4,75 mm tane çapı aralığı olan köşeli zeminde 250 kN/m^2 ye kadar çıkmıştır. Diğer bir ifadeyle zeminin tane çapı aralığı 0,30-1,18 mm'den 3,35-4,75 mm'e çıktığında q_u değeri yaklaşık 2 kat artmıştır. $Dr = \%50$ rölatif sıklılık ise nihai taşıma kapasitesi 50 kN/m^2 den 110 kN/m^2 'ye çıkmıştır.

$Dr = \%30$ rölatif sıklılıkta, taban basıncının artmasıyla temel plakanın oturması artmış ve taban basıncı-oturma eğrileri yaklaşık doğrusal bir davranış sergilemiştir. $Dr = \%50$ rölatif sıklılıkta, taban basınç eğrisi iki farklı eğri sergilemiştir. Zeminin davranışı $Dr = \%70$ rölatif sıklılıkta tamamen farklı olup, taban basıncı-oturma eğrilerinde pik nokta belli olduğu için nihai taşıma kapasitesi kolay bir şekilde hesaplanmıştır.

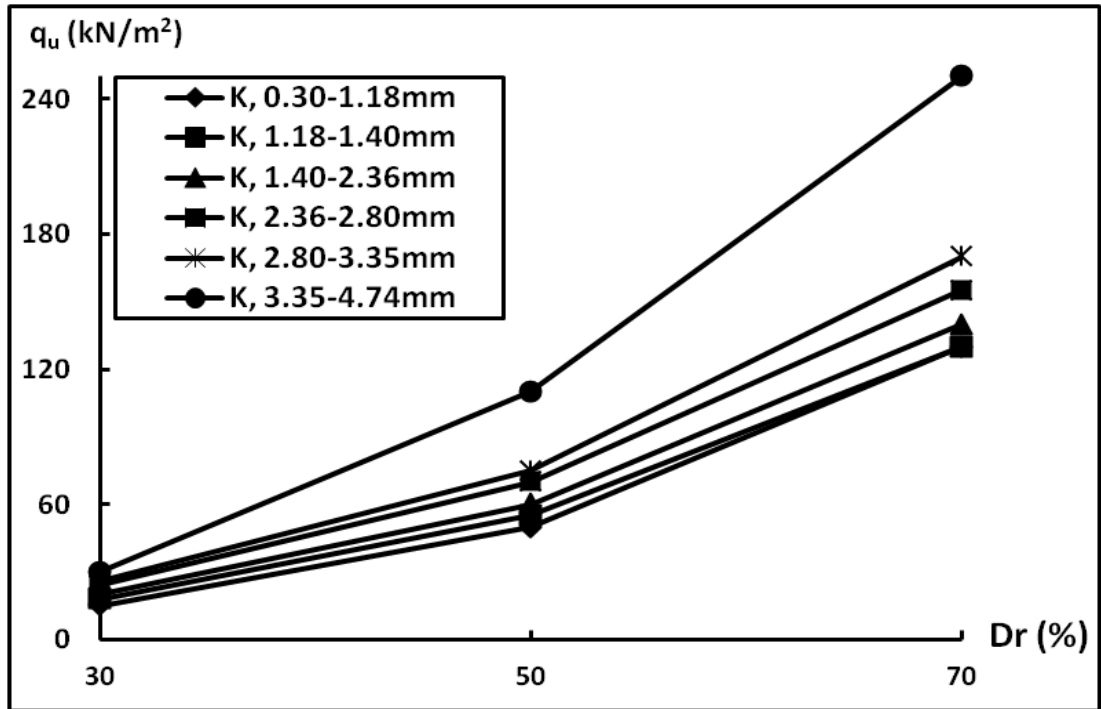
Çizelge 4.7'de köşeli zeminlerin nihai taşıma kapasitesi değerleri görülmektedir. Çizelge 4.7 değerlendirildiğinde en düşük taşıma kapasitesi, 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip olan zeminde $Dr = \%30$ rölatif sıklılıkta 15 kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Köşeli zeminlerde tane çapı büyüdükçe nihai taşıma kapasitelerinin arttığı Çizelge 4.7' de gösterilmiştir. Tane çapının 0,30 mm den 4,75 mm' e artmasıyla nihai taşıma kapasitesi yaklaşık 2 kat arttığı artmıştır.

$Dr = \%50$ rölatif sıklılığa sahip olan köşeli zemin, 0,30-1,18 mm tane çapı aralığında olan zeminde 50 kN/m^2 iken tane çapı arttığında sırasıyla 55, 60, 70, 75 ve 110 kN/m^2 ye kadar artmıştır.

Çizelge 4.7. Köşeli zeminin nihai taşıma kapasitesi

Dane Çapı (mm)	Köşeli, q_u (kN/m ²)					
	0,30-1,18	1,18-1,40	1,40-2,36	2,36-2,80	2,80-3,35	3,35-4,75
Dr=%30	15	18	20	24	26	30
Dr=%50	50	55	60	70	75	110
Dr=%70	130	130	140	155	170	250

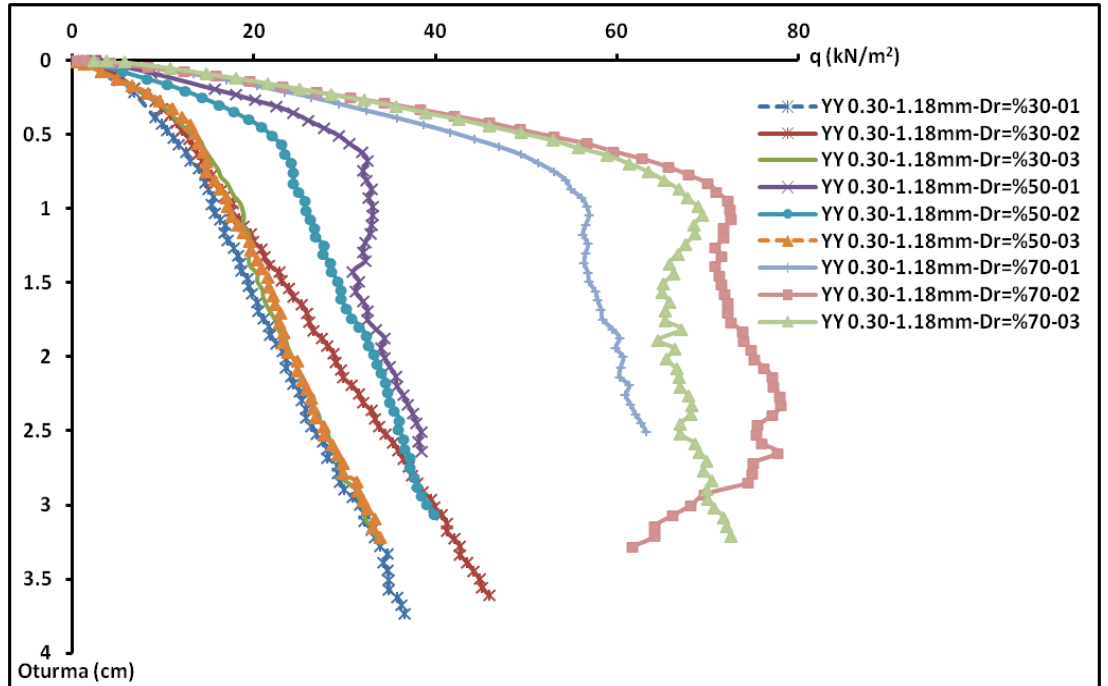
Rölatif sıkılık %70 olduğunda 0,30-1,18 mm tane çapı aralığındaki zeminin nihai taşıma kapasitesi 130 kN/m² olarak belirlenmiş ve tane çapı artarken nihai taşıma kapasitesi de (130, 140, 155, 170 ve 250 kN/m²) artmıştır. Dr=%30 ve Dr=%70 rölatif sıkılıkta, 3,35-4,75 mm tane çapı aralığına sahip zeminin nihai taşıma kapasitesi, 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip zeminin nihai taşıma kapasitesinden yaklaşık 2 kat fazla çıkmıştır. Bu artış Dr=%50 rölatif sıkılığa sahip olan köşeli zeminde 2,20 kat olmuştur. Rölatif sıkılık ve zeminin tane çapı göz önüne alınarak çizilen taşıma kapasitesi grafikleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

**Şekil 4.12.** Köşeli zeminde nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıkılığa bağlı olarak değişimi

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.12'deki değerlere bakıldığında, rölatif sıkılığın artmasıyla q_u değerinin arttığını görülmektedir. Rölatif sıkılığın %30'dan %50'ye artmasıyla 0,30-1,18 mm, 1,18-1,40 mm, 1,40-2,36 mm, 2,36-2,80 mm, 2,80-3,35 mm ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığında olan zeminlerde nihai taşıma kapasitesinde sırasıyla 3,33- 3- 3- 2,8- 3 ve 3,66 kat artış meydana gelmiştir. Yukarıdaki değerlere göz önüne alındığında, tane çapı büyük olan zeminlerde rölatif sıkılığın %30'dan %50'ye artması ile nihai taşıma kapasitesi daha fazla artmıştır.

Rölatif sıklık %50'den %70'e çıktığı zaman nihai taşıma kapasitesi, 6 farklı tane çapına sahip zeminlerde sırasıyla 2,60 - 2,36- 2,33- 2,21- 2,26 ve 2,27 kat artmıştır. Rölatif sıkılığın %50'den %70'e artmasının küçük çaplı zeminlerde nihai taşıma kapasitesini daha çok etkilediği belirlenmiştir.

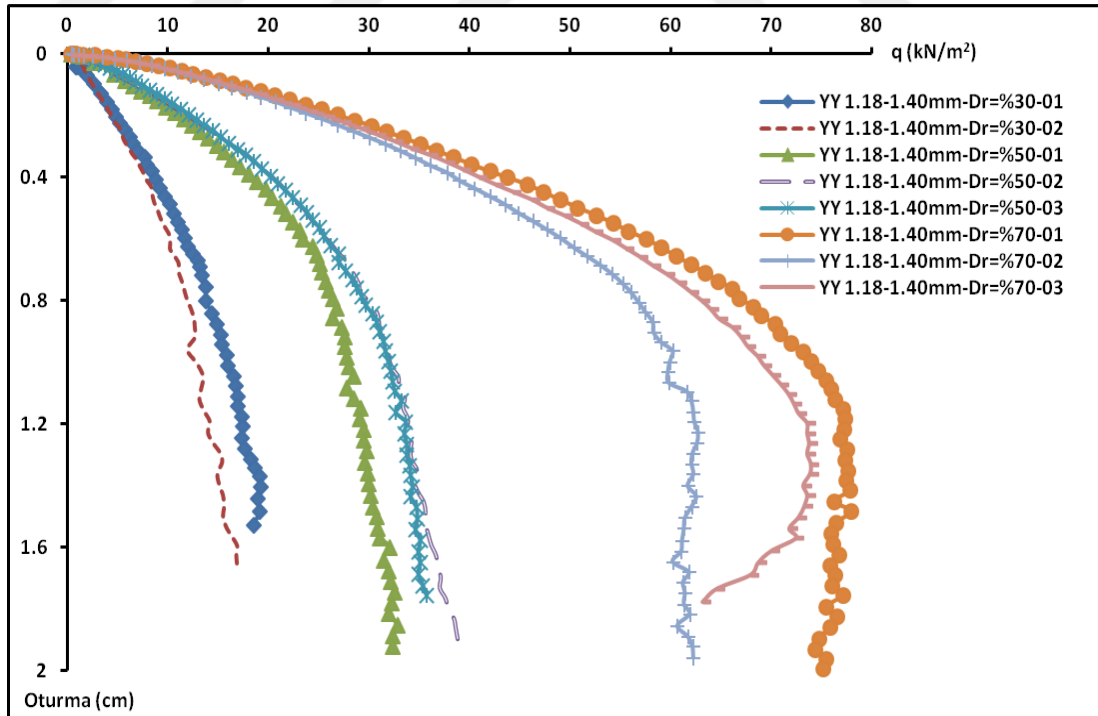
Şekil 4.13'de 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip yarı yuvarlak zeminin taban basıncı-oturma eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.13. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

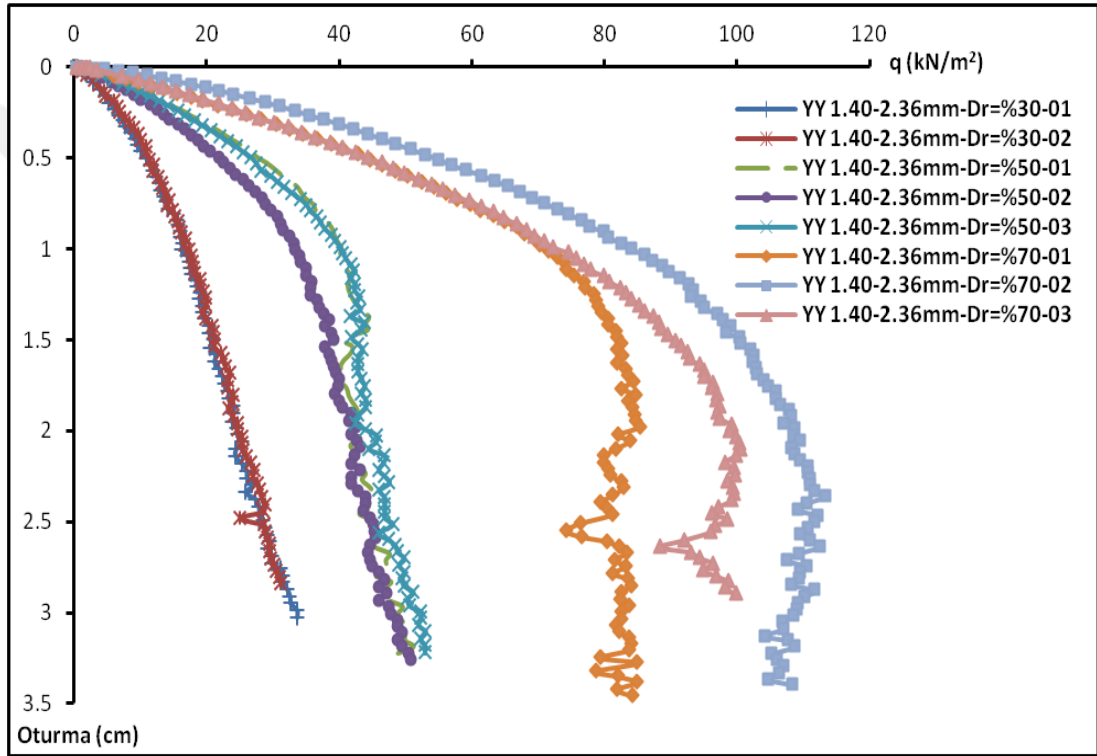
Şekil 4.13 incelediğinde 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip zeminin, $Dr=70\%$ rölatif sıkılıkta nihai taşıma kapasitesi yaklaşık $65-70 \text{ kN/m}^2$, $Dr=50\%$ rölatif sıkılıkta nihai taşıma kapasitesi 25 kN/m^2 ve $Dr=30\%$ rölatif sıkılıkta nihai taşıma kapasitesi yaklaşık 12 kN/m^2 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.6’da verilen aynı tane çapına sahip köşeli zeminle karşılaştırdığımız zaman, zeminin köşeliden yarı yuvarlak hale geçtiğinde taşıma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir.

0,30-1,18 mm tane çapı aralığındaki köşeli zeminde, $Dr=70\%$ rölatif sıkılıkta, zeminin nihai taşıma kapasitesi 130 kN/m^2 iken, yarı yuvarlak zeminde bu değer 65 kN/m^2 ye düşmüştür. 0,30-1,18 mm tane çapı aralığındaki diğer rölatif sıkılıklar da, zeminin köşeliden yarı yuvarlak haline geçmesiyle nihai taşıma kapasitesinin azaldığı Şekil 4.6’da ve Şekil 4.13’de verilen grafiklerden görülebilir. Şekil 4.14’de 1,18-1,40 mm tane çapı aralığında olan yarı yuvarlak zeminin taban basıncı-oturma eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

Şekil 4.14'den 1,18-1,40 mm tane çapı aralığına sahip zeminin nihai taşıma kapasiteleri D_r =%30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda sırasıyla 15, 30 ve 75 kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Bu değerler köşeli zemin değerleri ile karşılaştırıldığında, aynı tane çap aralığında ve aynı rölatif sıkılıkta yarı yuvarlak zeminde taşıma kapasitesini azaldığı görülmüştür. Şekil 4.15'de 1,40-2,36 mm tane çapı aralığına sahip yarı yuvarlak zeminin taban basıncı-oturma eğrileri görülmektedir.

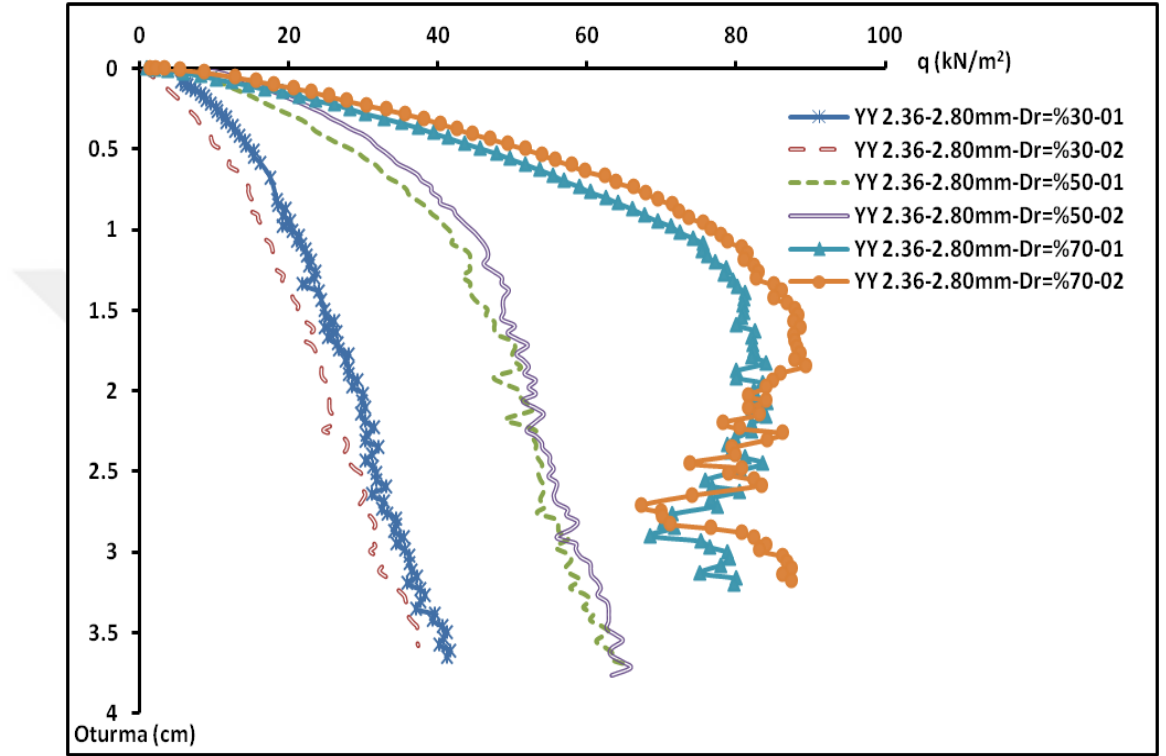


Şekil 4.15. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

Şekil 4.15 incelediğinde, 1,40-2,36 mm tane çapı aralığında olan zeminin nihai taşıma kapasiteleri D_r =%30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklar için sırasıyla 16, 45 ve 85 kN/m^2 olarak bulunmuştur.

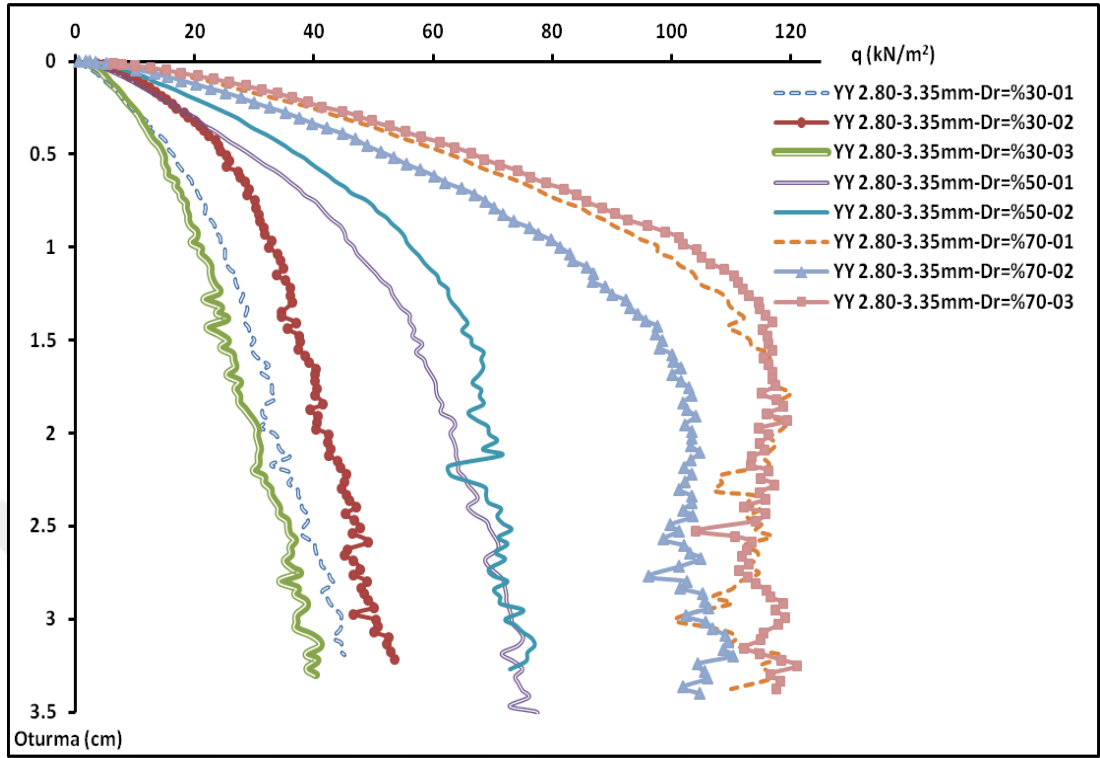
Şekil 4.16'da 2,36-2,80 mm tane çapı aralığında olan yarı yuvarlak zeminin taban basıncı-oturma eğrileri verilmiştir. Şekil 4.16 incelediğinde, 2,36-2,80 mm tane çapı aralığında olan zeminin nihai taşıma kapasiteleri D_r =%30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklar

için sırasıyla 18, 50 ve 90 kN/m² olarak elde edilmiştir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de sırasıyla 2,80-3,35 mm ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığındaki yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri görülmektedir.



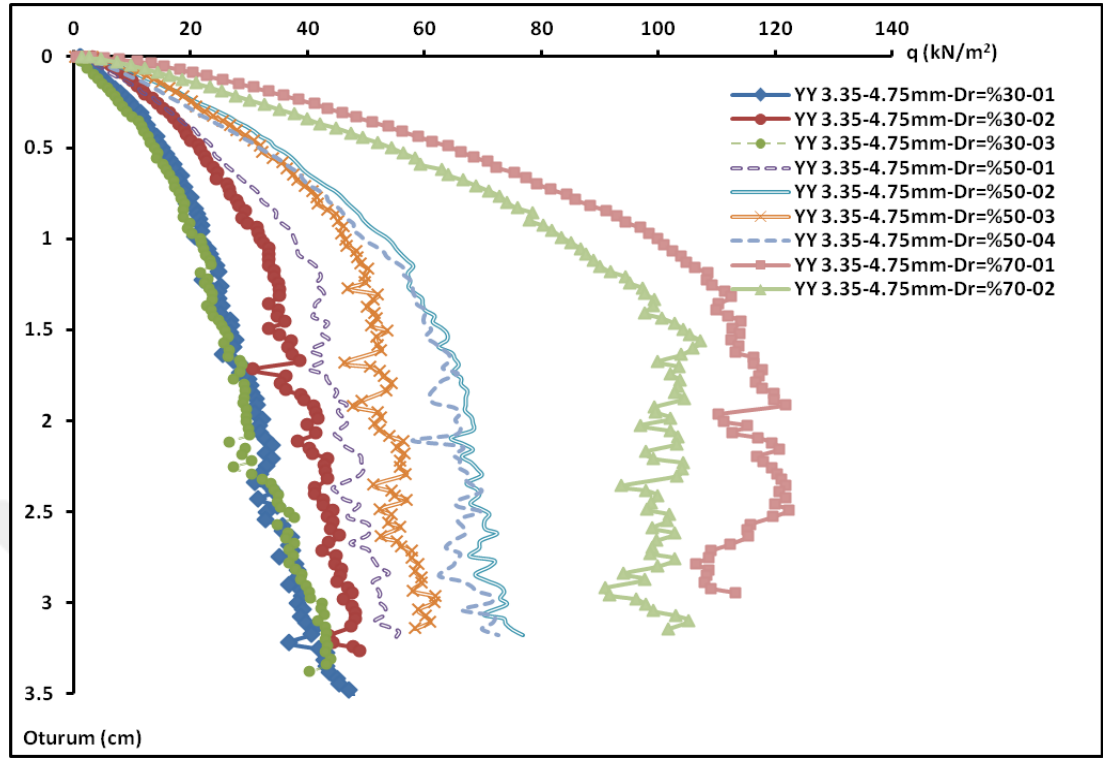
Şekil 4.16. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

2,80-3,35 mm tane çapı aralığına sahip olan zeminde, üç farklı rölatif sıkılıkta nihai taşıma kapasiteleri sırasıyla 25, 55 ve 100 kN/m² olarak bulunmuştur.



Şekil 4.17. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

Şekil 4.18'den 3,35-4,75 mm tane çapı aralığına sahip yarı yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesinin üç farklı Dr =%30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda sırasıyla 28, 64 ve 120 kN/m^2 olduğu belirlenmiştir. Dr =%70 rölatif sıkılıkta, 3,35-4,75 mm tane çapı aralığına sahip köşeli zemin yarı yuvarlak hale getirildiğinde nihai taşıma kapasitesi %50 azalmıştır.



Şekil 4.18. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan yarı yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

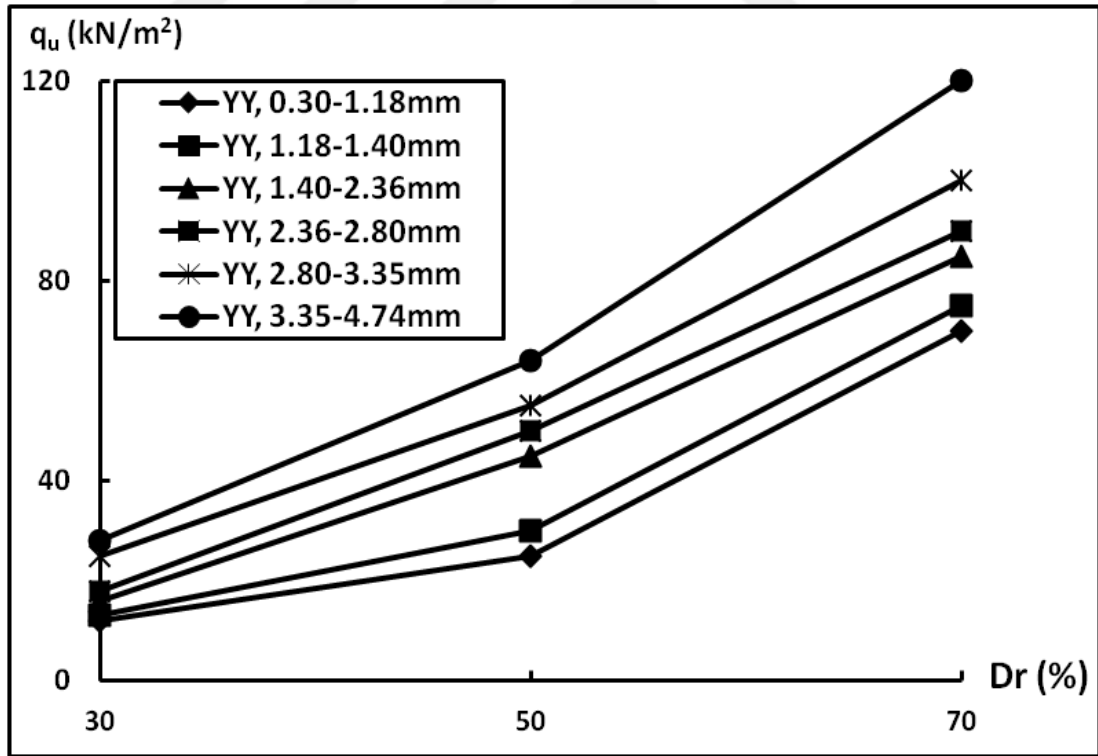
Taban basıncı-oturma eğrilerinden hesaplanan nihai taşıma kapasitesi değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Yarı yuvarlak zeminlerin farklı rölatif sıkılıklarda ve farklı tane çaplarında elde edilen nihai taşıma kapasiteleri Şekil 4.19'da verilmiştir. Çizelge 4.8 incelendiğinde, en düşük nihai taşıma kapasitesinin Dr =%30 rölatif sıkılık ve 0,3-1,18 mm tane çapı aralığında (12 kN/m^2) ve en yüksek nihai taşıma kapasitesinin Dr =%70 ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığında (120 kN/m^2) elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.8. Yarı Yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesi

Dane Çapı (mm)	Yarı Yuvarlak, q_u (kN/m^2)					
	0,30-1,18	1,18-1,40	1,40-2,36	2,36-2,80	2,80-3,35	3,35-4,75
Dr =%30	12	13	16	18	25	28
Dr =%50	25	30	45	50	55	64
Dr =%70	70	75	85	90	100	120

Çizelge 4.8 incelediğinde en fazla nihai taşıma kapasitesi artışının 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip olan zeminin rölatif sıkılığının $Dr=\%50$ 'den $\%70$ 'e çıktığı zaman meydana geldiği görülmektedir. 0,30-1,18 mm tane çapı aralığındaki zeminde rölatif sıkılık $Dr=\%30$ 'dan $\%50$ 'ye çıktığı zaman nihai taşıma kapasitesi 2 kat, rölatif sıkılık $Dr=\%50$ 'den $\%70$ 'e çıktığı zaman nihai taşıma kapasitesi 3 kat artmıştır.

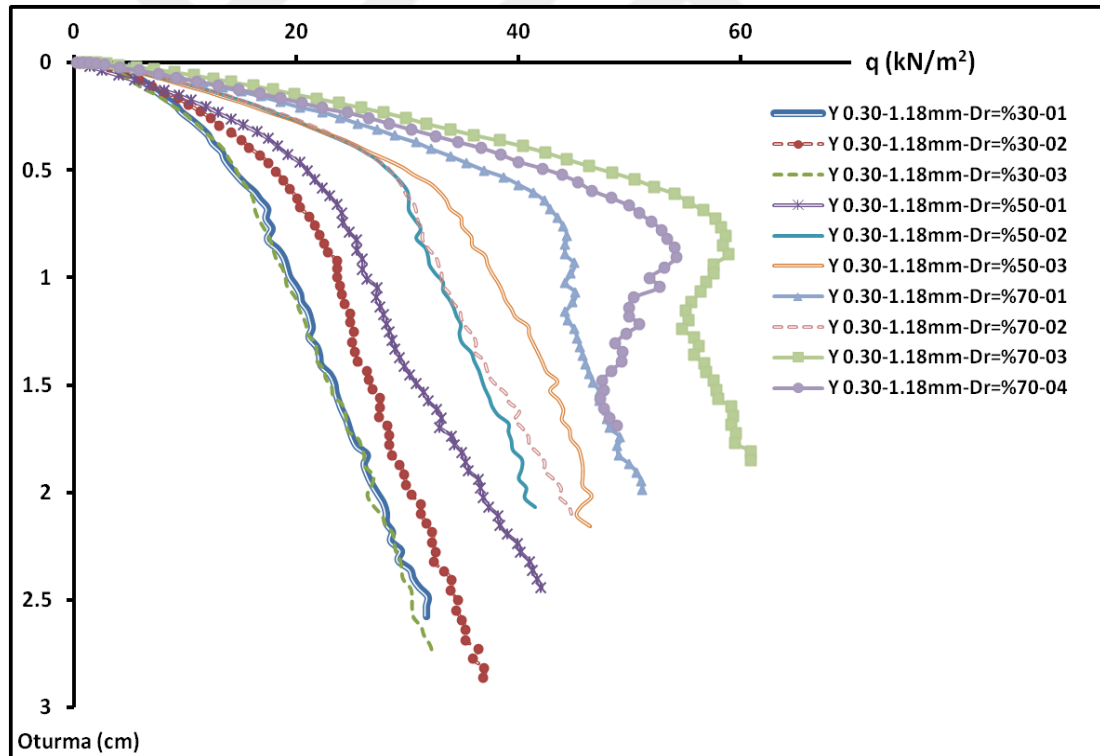
Yarı yuvarlak zeminde, rölatif sıkılığı $Dr=\%30$ 'dan $\%50$ 'ye çıktığı zaman gözlenen nihai taşıma kapasitesindeki artış, $Dr=\%50$ 'den $\%70$ 'e çıktığı zaman gözlenen nihai taşıma kapasitesindeki artışlardan daha fazladır. Rölatif sıkılık $Dr=\%30$ 'dan $\%50$ 'ye çıktığı zaman nihai taşıma kapasitesinde 2 kattan daha fazla artış, ancak rölatif sıkılık $Dr=\%50$ 'den $\%70$ 'e çıktığı zaman nihai taşıma kapasitesindeki artışın 2 kattan daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19. Yarı Yuvarlak zeminde nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıkılığa bağlı olarak değişimi

Deneilerin devamında yarı yuvarlak zemin Los Angeles aletiyle yuvarlak hale getirilmiş ve aynı deneyler yuvarlak zemin üzerinde yapılmıştır. Deneyler 6 farklı grup üzerinde ve her grup için üç farklı (%30, %50 ve %70) rölatif sıkılıkta yapılmıştır. Tane çapı aralığı 0,30-1,18 mm olan yuvarlak zeminin taban basıncı-oturma eğrileri Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

0,30-1,18 mm tane çapı aralığındaki yuvarlak zemini, yarı yuvarlak ve köşeli zemin ile karşılaştırdığımızda nihai taşıma kapasitesinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. 0,30-1,18 mm tane çapı aralığındaki yuvarlak zeminin $D_r = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölatif sıkılıklarda nihai taşıma kapasiteleri sırasıyla 10, 24 ve 50 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

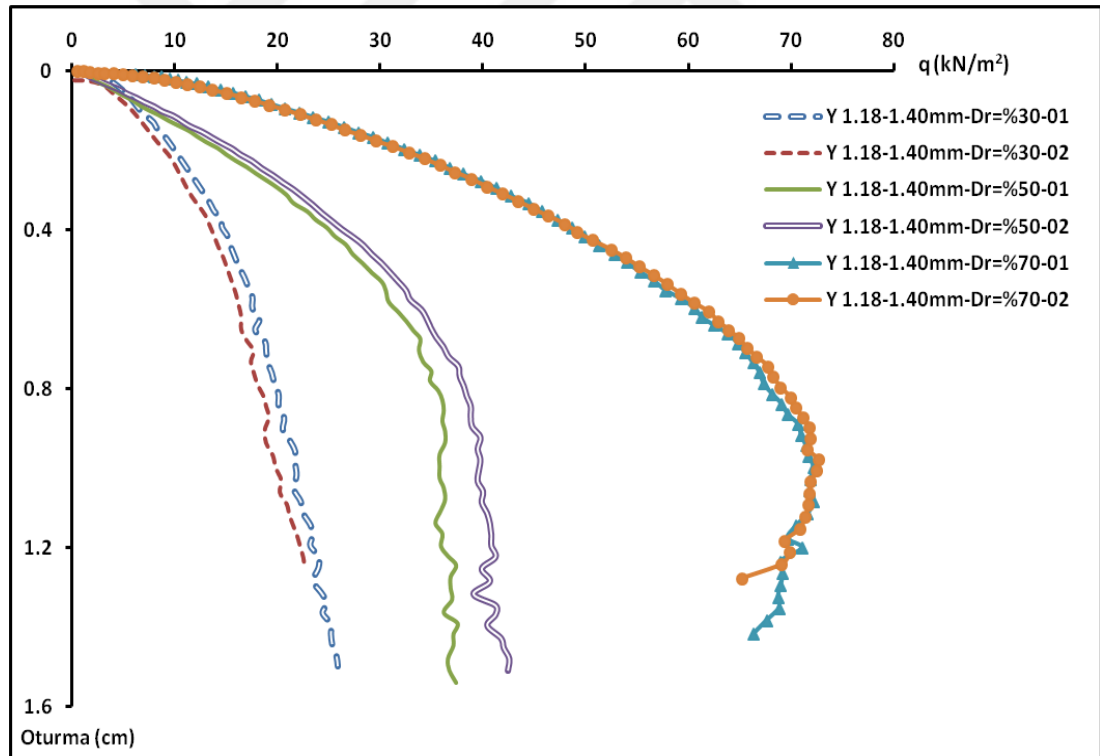


Şekil 4.20. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

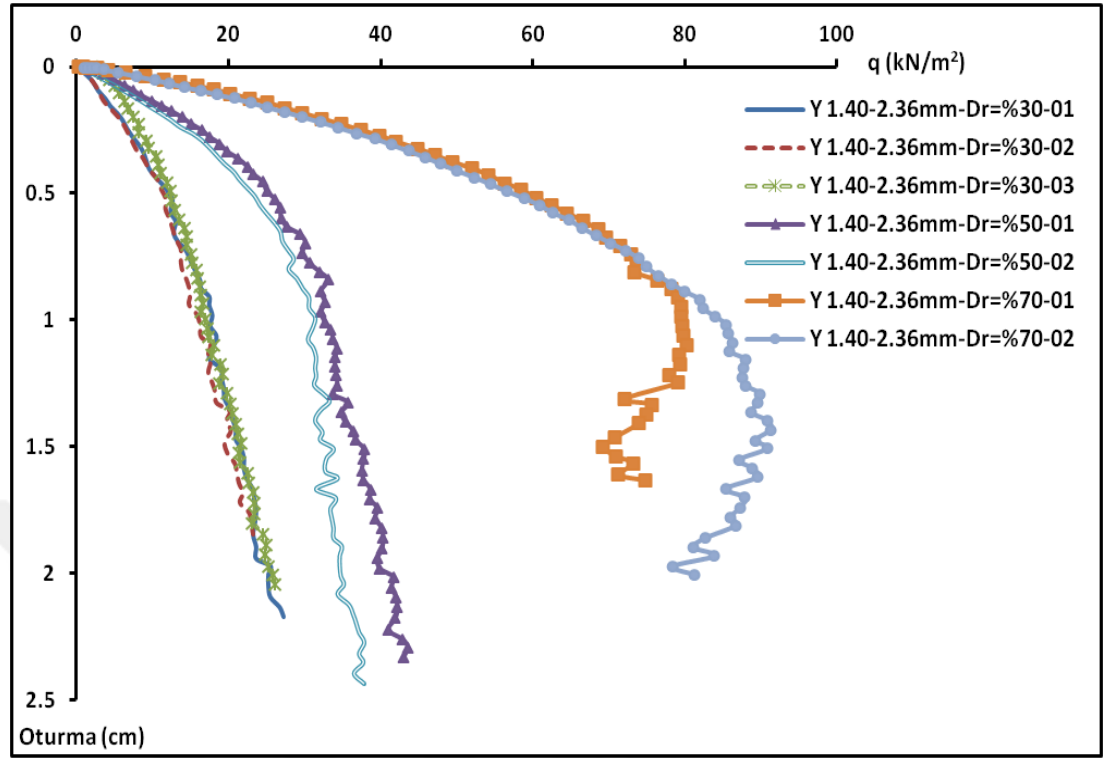
Şekil 4.21, 1,18-1,40 mm tane çapı aralığındaki yuvarlak zeminin taban basıncı-oturma eğrilerin göstermektedir. Bu eğrilerden zeminlerin nihai taşıma kapasiteleri, $D_r = \%30$,

%50 ve %70 rölâtif sıkılıklar için sırasıyla 10, 26 ve 70 kN/m² olarak belirlenmiştir. Köşeli zemin ile yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasiteleri arasında, Dr=%50 ve %70 rölâtif sıkılıklarda yaklaşık 2 kat fark görülmektedir.

Şekil 4.22’de 1,40-2,36 mm tane çapı aralığında olan yuvarlak zeminin taban basıncı-oturma eğrileri görülmektedir. Tane çapı aralığı 1,40-2,36 mm olan yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesi üç farklı rölâtif sıkılıkta sırasıyla 13, 30 ve 80 kN/m² olarak bulunmuştur. Diğer gruplarda olduğu gibi zeminin rölâtif sıkılığı veya tane çapı arttıkça zeminin nihai taşıma kapasitesi de artmaktadır. Aynı zamanda zemin köşeliden yuvarlağa doğru gittiği zaman zeminin nihai taşıma kapasitesi azalmaktadır.

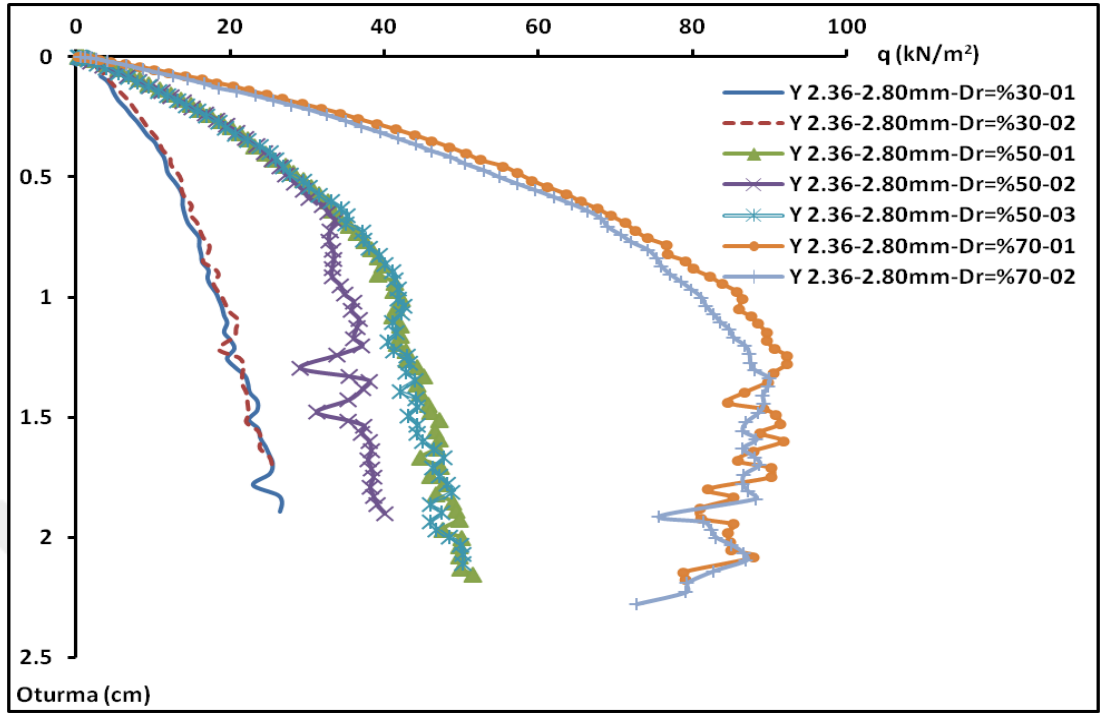


Şekil 4.21. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

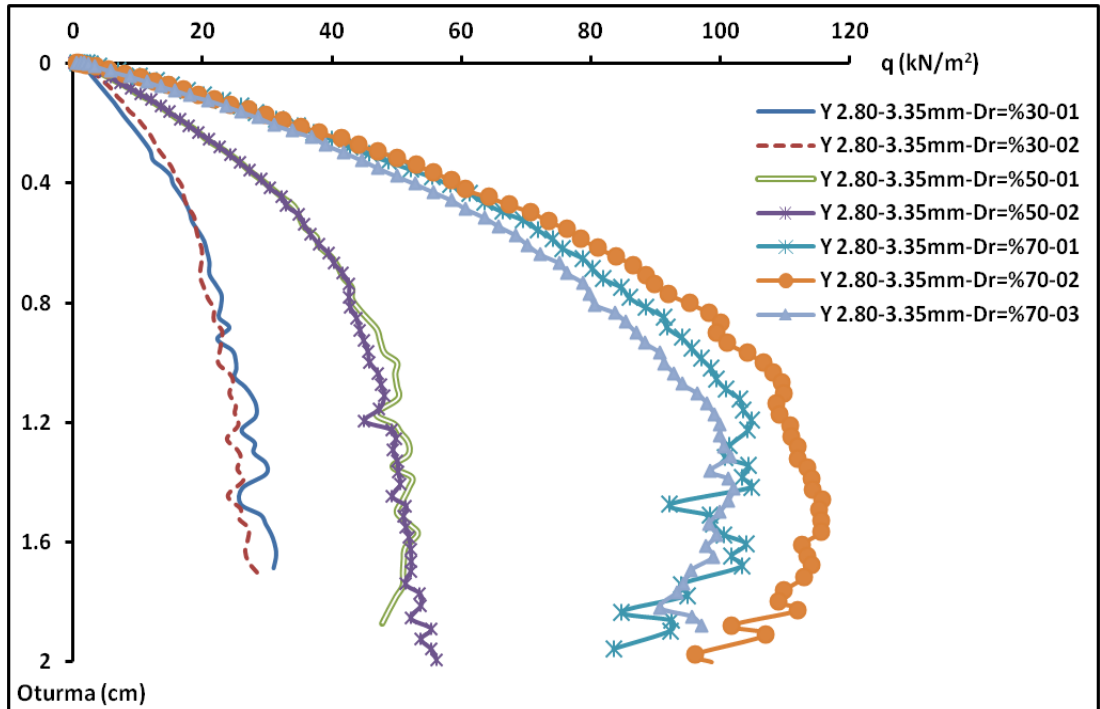


Şekil 4.22. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

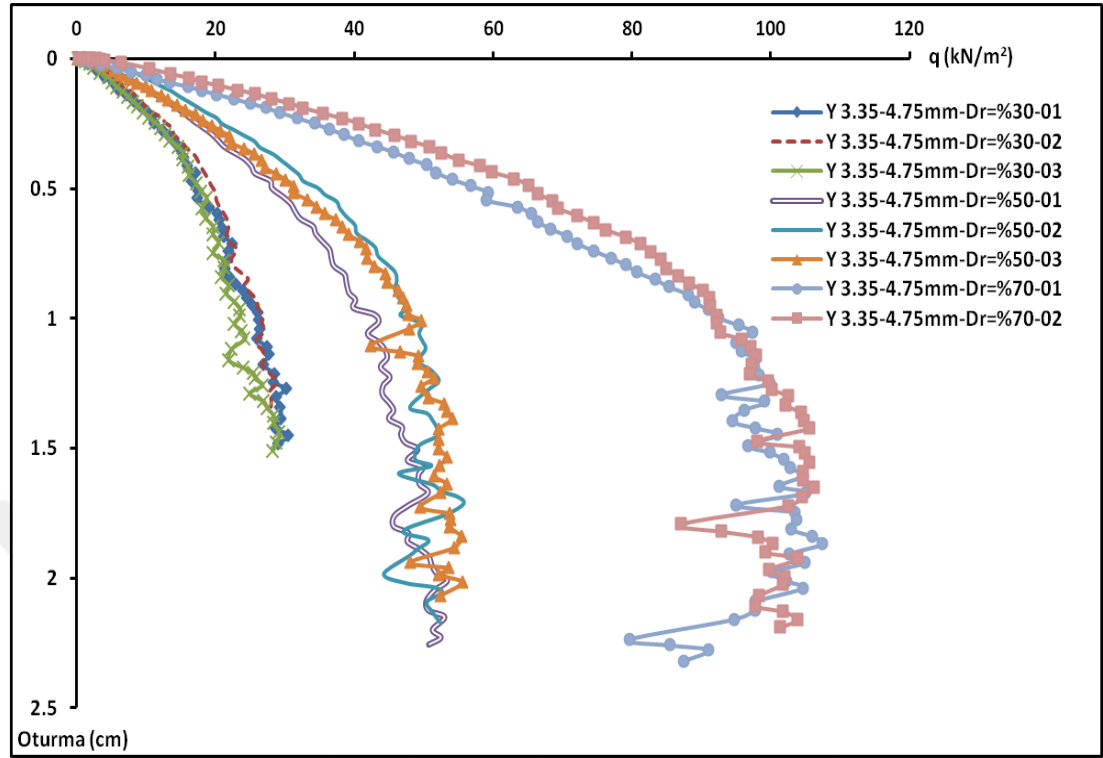
Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de sırasıyla 2,36-2,80 mm, 2,80-3,35 mm ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığındaki yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri görülmektedir. Bu grafiklere bakıldığında 2,36-2,80 mm tane çapı aralığında olan yuvarlak zeminde, Dr =%30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda zeminin nihai taşıma kapasitesi sırasıyla 16, 40 ve 86 kN/m² olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri



Şekil 4.24. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri



Şekil 4.25. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan yuvarlak zeminlerin taban basıncı-oturma eğrileri

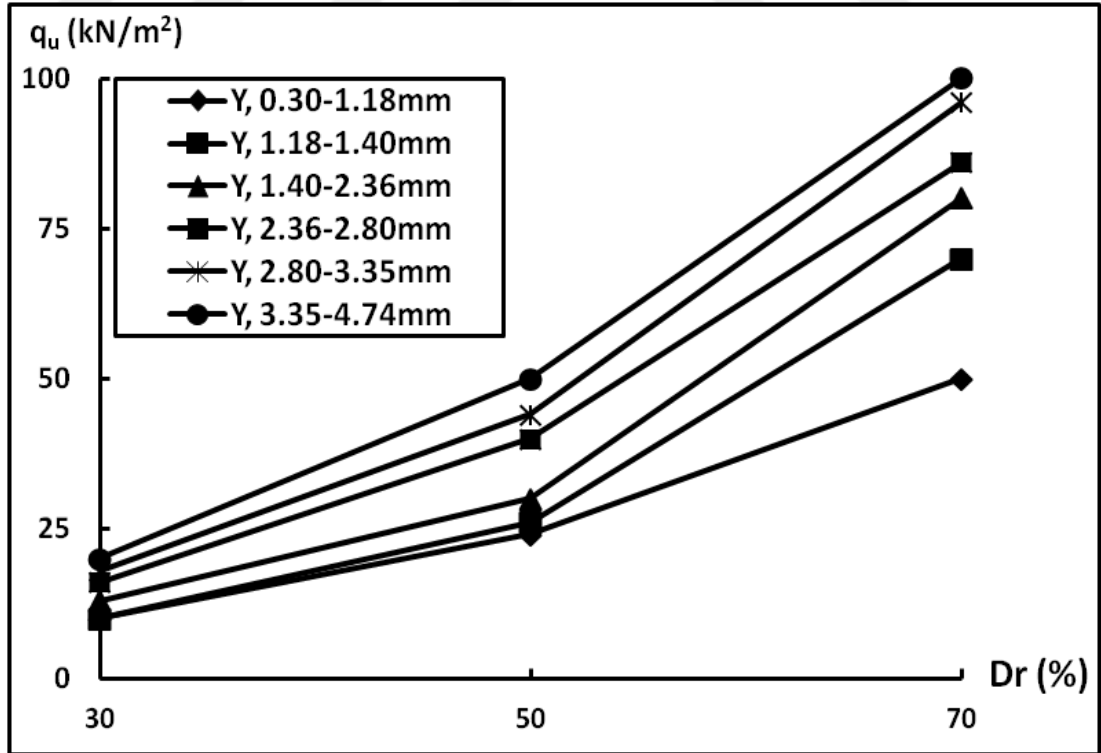
2,80-3,35 mm tane çapı aralığındaki yuvarlak zeminde, zeminin nihai taşıma kapasitesi değerleri, üç farklı rölatif sıkılıkta sırasıyla 18, 44 ve 96 kN/m² ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığına sahip olan zeminde Dr= %30, %50 ve %70 rölatif sıkılıklarda sırasıyla 20, 50 ve 100 kN/m² olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.9’da yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesi değerleri üç farklı (%30, %50 ve %70) rölatif sıkılık ve 6 farklı tane çapı aralığı için verilmiştir. Çizelge 4.9 incelendiğinde, en düşük nihai taşıma kapasitesinin Dr= %30 rölatif sıkılıkta, 0,30-1,18 mm tane çapı aralığında olan zemine ait olduğunu ve en büyük nihai taşıma kapasitesinin Dr= %70 rölatif sıkılıkta ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığında olan zemine ait olduğu görülmektedir.

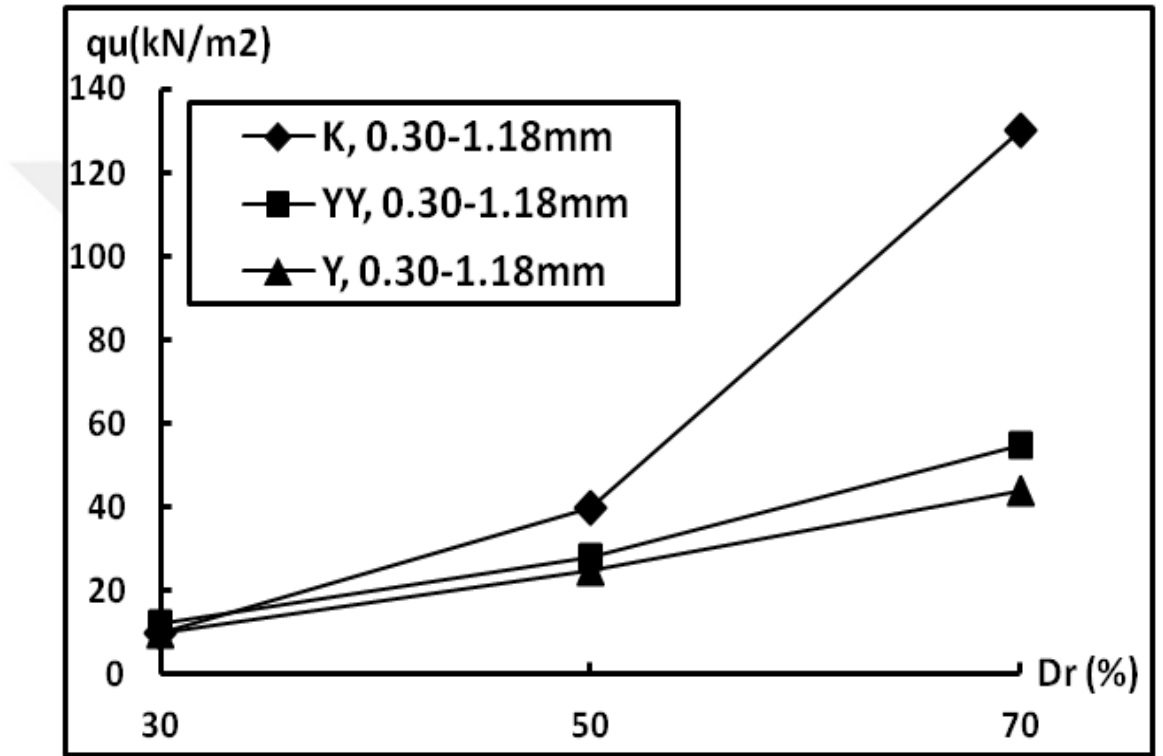
Çizelge 4.9. Yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesi

Dane Çapı (mm)	Yuvarlak, q_u (kN/m ²)					
	0,30-1,18	1,18-1,40	1,40-2,36	2,36-2,80	2,80-3,35	3,35-4,75
Dr=%30	10	10	13	16	18	20
Dr=%50	24	26	30	40	44	50
Dr=%70	50	70	80	86	96	100

Şekil 4.26’da yuvarlak zeminin nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıkılığa bağlı olarak değişimi verilmiştir. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.26 incelendiğinde, zeminin tane çapı aralığı 0,30-1,18 mm’den 3,35-4,75’ mm aralığına arttırıldığında bütün rölatif sıkılıklarda zeminin nihai taşıma kapasitesi değerinde 2 kat artış görülmüştür. Zeminin rölatif sıkılığı Dr= %30’dan Dr= %70’e arttığında aynı tane çapı aralığında nihai taşıma kapasitesi en az 5 kat artmıştır. Rölatif sıkılığın artmasıyla nihai taşıma kapasitesindeki artış en çok 1,18-1,40 mm tane çapı aralığındaki zeminde görülmüştür (7 kat artış).

**Şekil 4.26.** Yuvarlak zeminde nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıkılığa bağlı olarak değişimi

Şekil 4.27’de 0,30-1,18 mm tane çapı aralığındaki zeminin nihai taşıma kapasitesinin üç farklı yuvarlaklık ve üç farklı rölatif sıklık için değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi zeminin yuvarlaklığının artmasıyla, yani köşeliden yarı yuvarlağa veya yuvarlağa doğru gittikçe zeminin nihai taşıma kapasitesi azalmaktadır. Aynı zamanda rölatif sıklığın artmasıyla zeminin nihai taşıma kapasitesi artmaktadır.

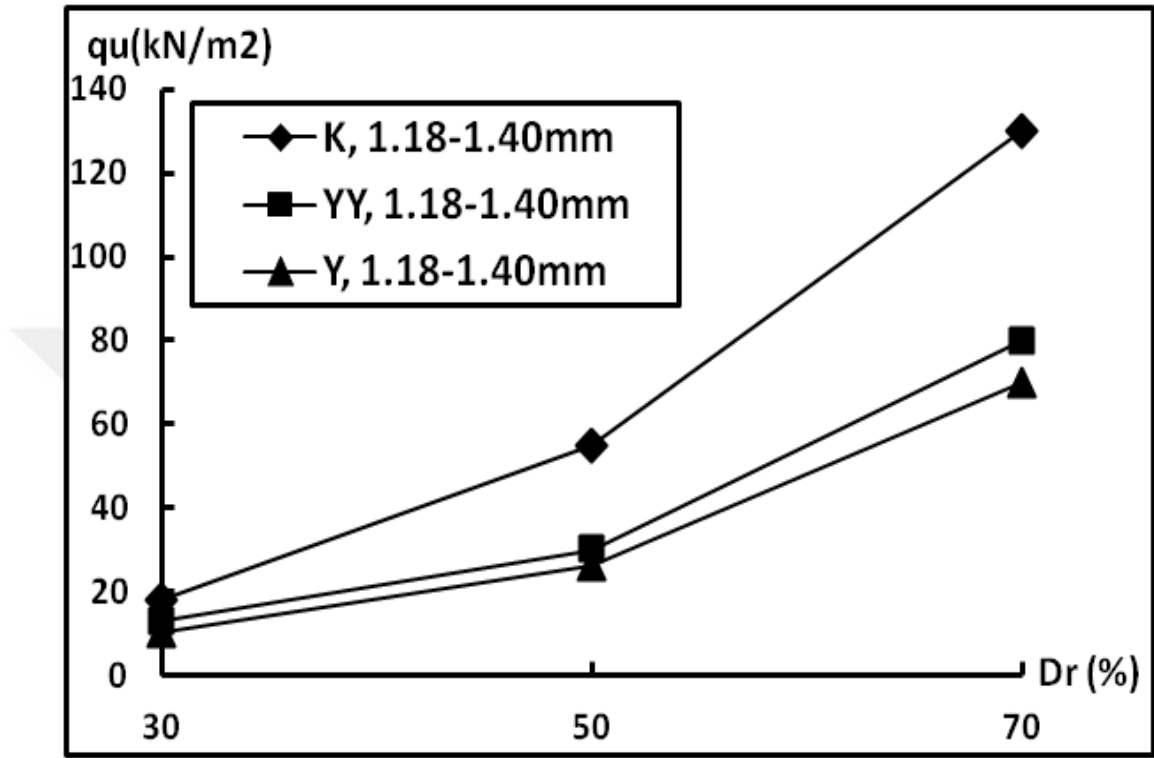


Şekil 4.27. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (0,30-1,18 mm)

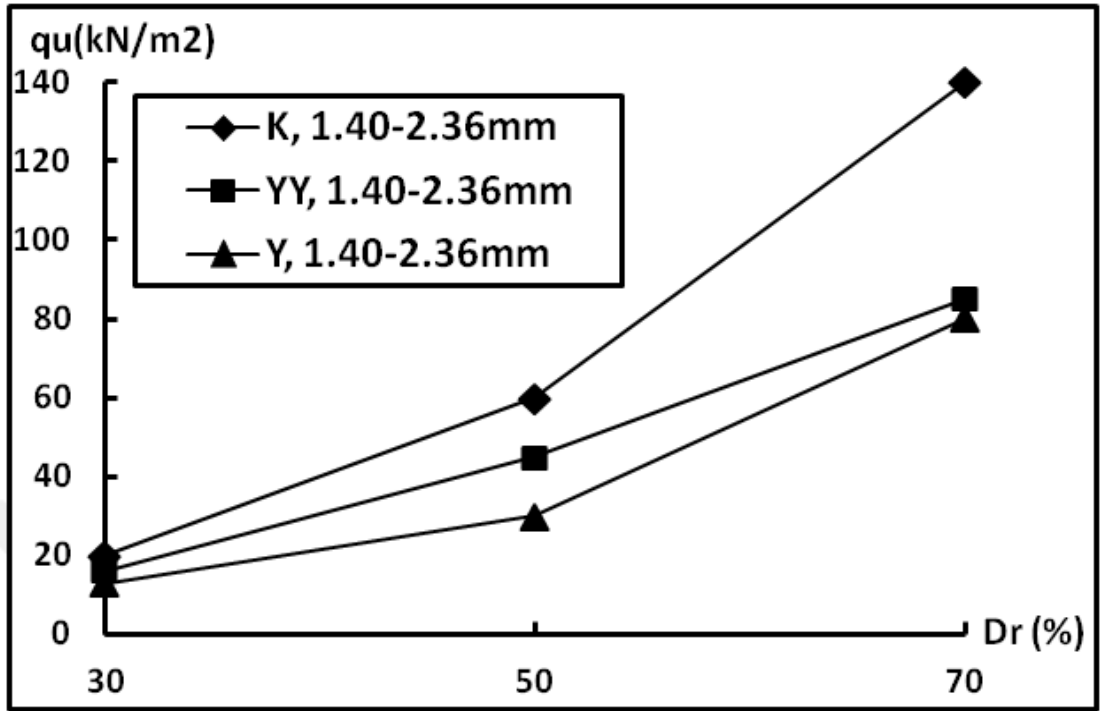
Şekil 4.27’deki eğrilere bakıldığında $Dr=30\%$ rölatif sıklıkta zeminin nihai taşıma kapasitesinin her üç (köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak) zeminde çok yakın değerler aldığı gözlenmektedir. Zeminin yuvarlaklık etkisi rölatif sıklık arttıkça daha çok belirginleşmektedir. Düşük rölatif sıklıklarda nihai taşıma kapasitesi üzerinde yuvarlaklığın etkisi, düşük içsel sürtünme açısından dolayı, çok etkin olmamaktadır.

Şekil 4.28’den Şekil 4.32’ye, sırasıyla 1,18-1,40 mm, 1,40-2,36 mm, 2,36-2,80 mm, 2,80-3,35 mm ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığına sahip olan zeminlerde, nihai taşıma

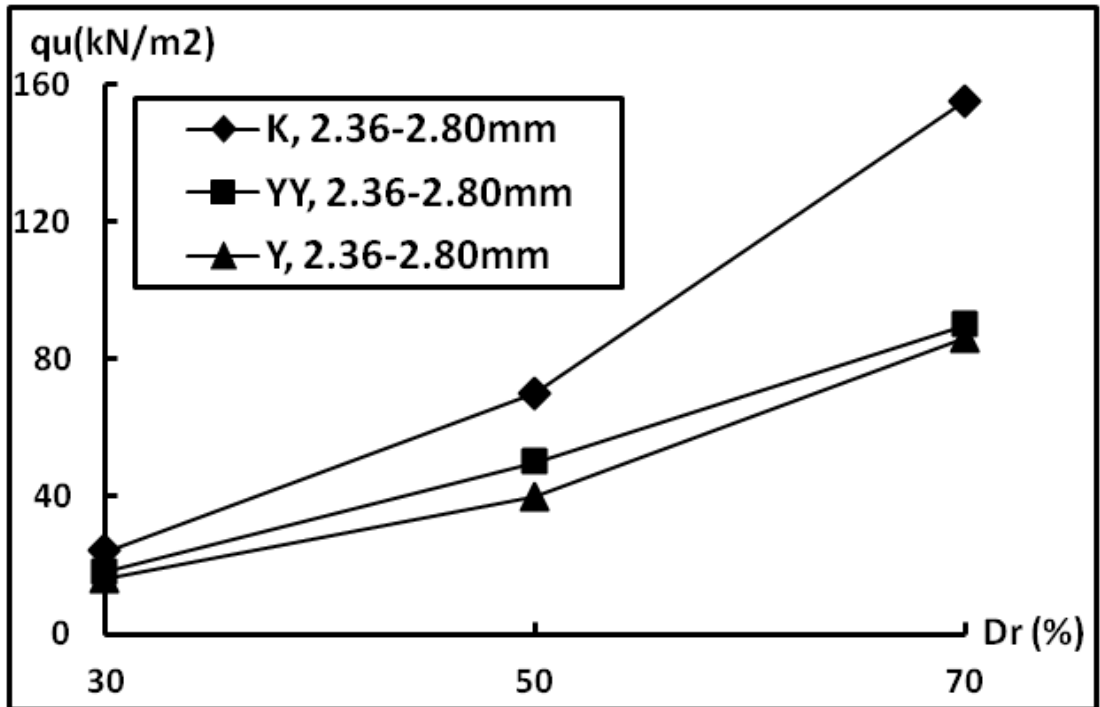
kapasitelerinin üç farklı yuvarlaklık (köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak) ve üç farklı rölatif sıkılık ($Dr = 30\%$, 50% ve 70%) için değişimleri gösterilmektedir.



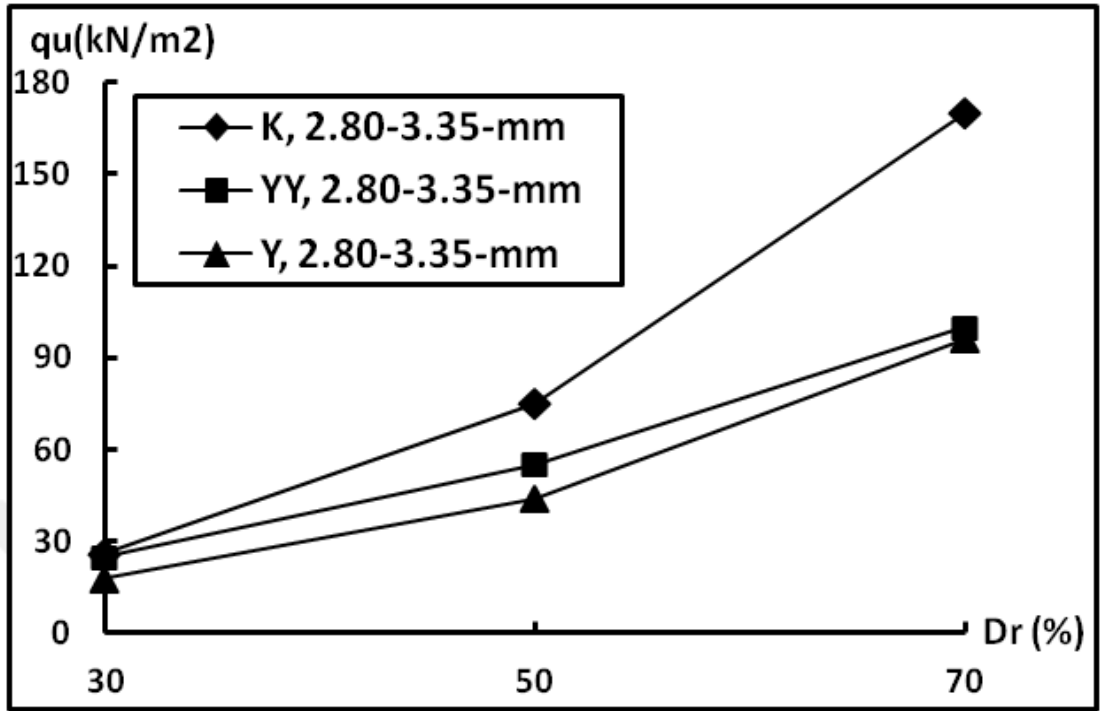
Şekil 4.28. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıkılığa bağlı olarak değişimi (1,18-1,40 mm)



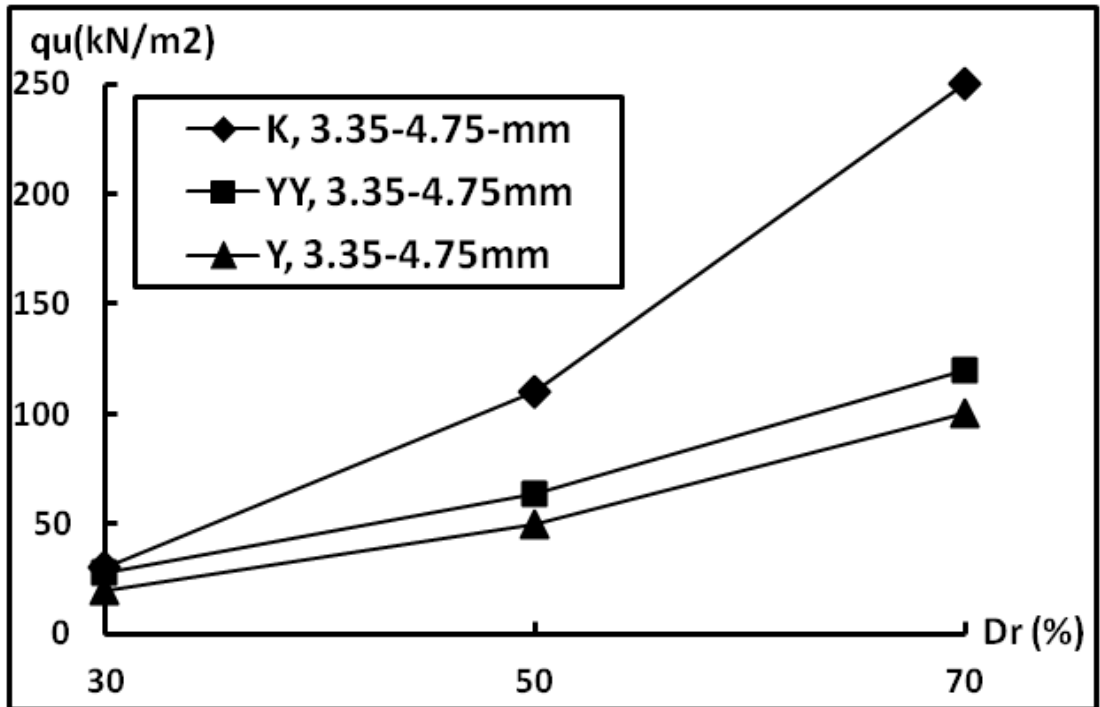
Şekil 4.29. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (1,40-2,36 mm)



Şekil 4.30. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (2,36-2,80 mm)



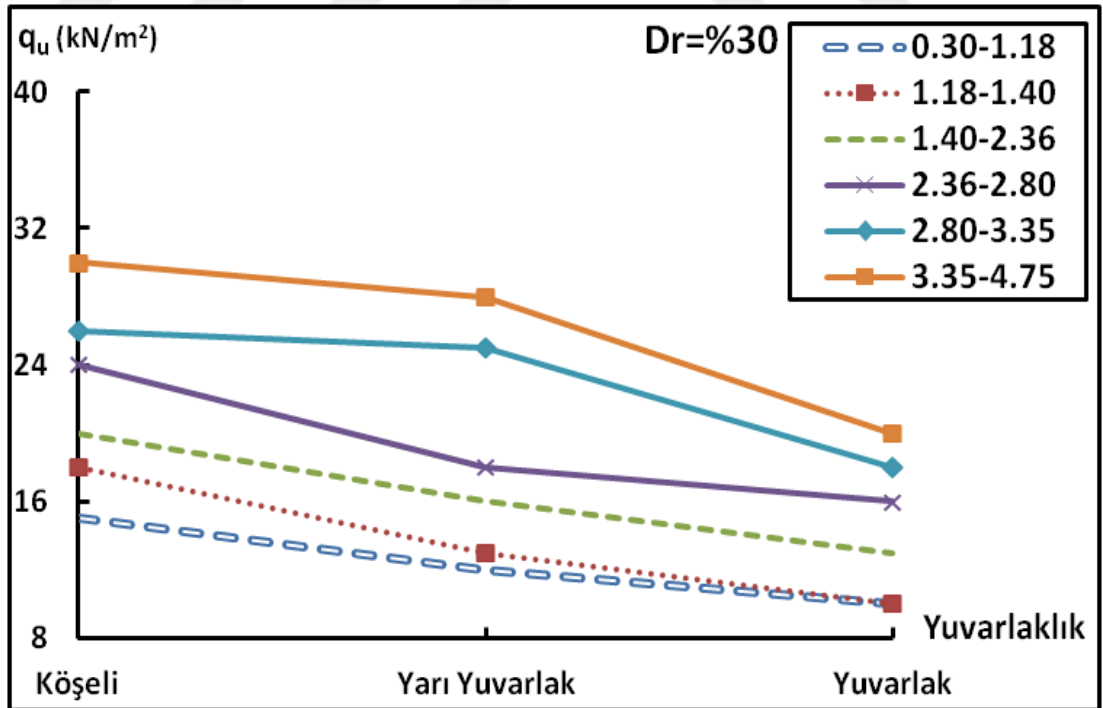
Şekil 4.31. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (2,80-3,35 mm)



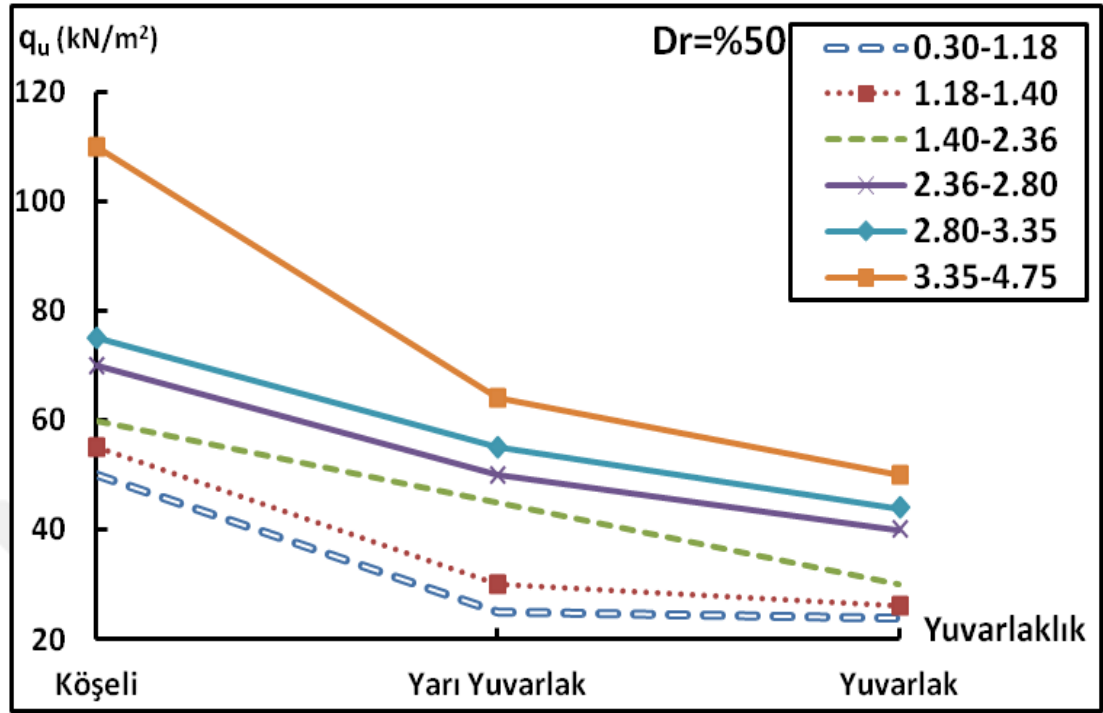
Şekil 4.32. Nihai taşıma kapasitesinin rölatif sıklığa bağlı olarak değişimi (3,35-4,75 mm)

Yukarıdaki grafiklerden, zeminlerin tamamında rölatif sıkılığın artmasıyla nihai taşıma kapasitelerinin de arttığı görülmektedir. Zeminlerin yuvarlaklığının nihai taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi $Dr=\%70$ rölatif sıkılıkta daha çok belirgindir. Zeminlerde rölatif sıkılık arttıkça, tanelerin yuvarlaklık etkisi daha çok görülmektedir. Aynı rölatif sıkılıkta, yuvarlak ve yarı yuvarlak zeminlerde nihai taşıma kapasiteleri birbirine yakındır ve bu zeminler benzer davranış sergilerler. Köşeli zeminlerde rölatif sıkılığın etkisi daha fazla olup, $Dr=\%70$ rölatif sıkılıkta köşeli zeminin nihai taşıma kapasitesinin yarı yuvarlak veya yuvarlak zeminden daha farklı olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle rölatif sıkılık arttıkça köşeli zeminin nihai taşıma kapasitelerindeki artış daha fazla olmaktadır.

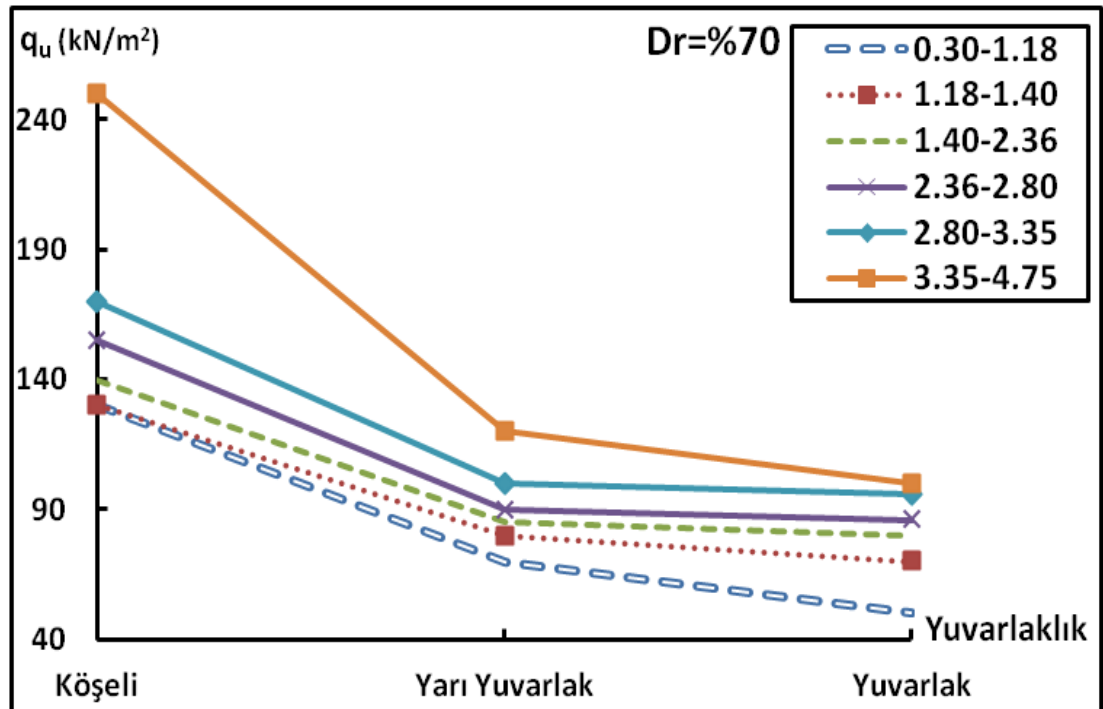
Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de aynı rölatif sıkılıkta, zeminin yuvarlaklık ve tane çapı aralığına bağlı olarak nihai taşıma kapasitesi değerlerinde meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 4.33. Zeminin yuvarlaklık ve tane çapı aralığına bağlı olarak nihai taşıma kapasitesinin değişimi ($Dr=\%30$)



Şekil 4.34. Zeminin yuvarlaklık ve tane çapı aralığına bağlı olarak nihai taşıma kapasitesinin değişimi (Dr=%50)



Şekil 4.35. Zeminin yuvarlaklık ve tane çapı aralığına bağlı olarak nihai taşıma kapasitesinin değişimi (Dr=%70)

Zeminin boyutu artıkça aynı rölatif sıklıkta nihai taşıma kapasitesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda tane çapının etkisinin köşeli zeminde daha etkin olduğu görülmüştür. $Dr=50$ ve 70 rölatif sıklıklarda nihai taşıma kapasitesindeki değişim, köşeli zemin ile yarı yuvarlak zemin arasında, yarı yuvarlak ile yuvarlak zemin arasında olan değişimden daha fazla olduğu görülmektedir. $Dr=30$ rölatif sıklıkta nihai taşıma kapasitesi azalmasının zeminin köşeliden yarı yuvarlağa veya yarı yuvarlaktan yuvarlak hale geldiği zaman, yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir.

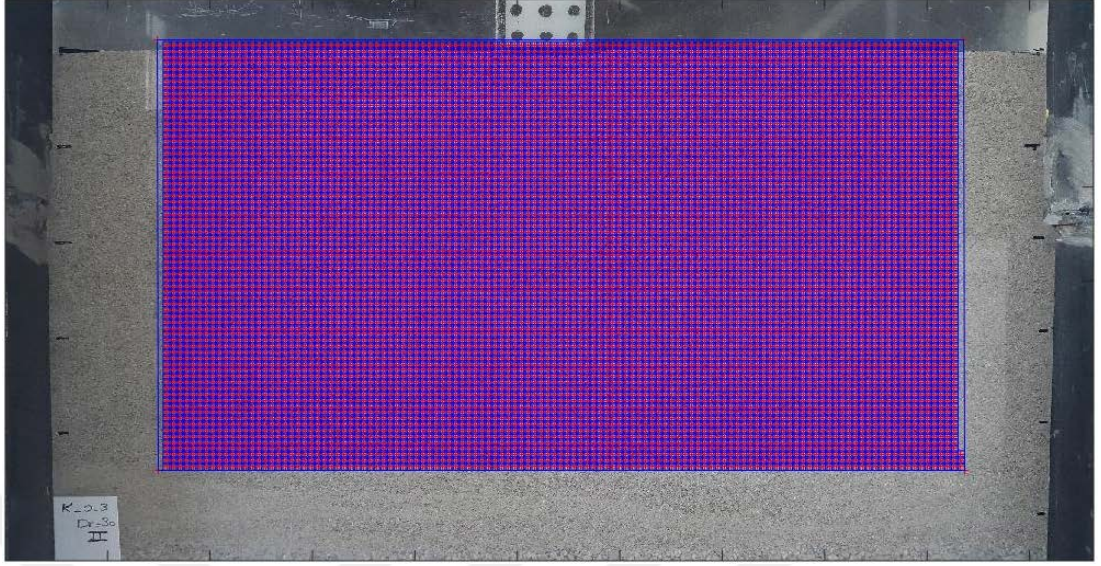
4.3. Geo-PIV Sonuçları

Deneyler bittikten sonra taban basıncı-oturma eğrilerinden den yola çıkarak nihai taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Deney başlamadan önce ve zemin kırıldığı ana kadar 30 saniyede bir fotoğraf çekilmiştir.

Geo-PIV programı kullanılarak kırılma anında zeminin yer değiştirmesi elde edilmiştir. Böylelikle köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminlerde, $Dr=30$, 50 ve 70 rölatif sıklıkta ve 6 tane çapı aralığında sınıflanmış zeminlerde zeminin yer değiştirmesinin ve kayma yüzeyinin nasıl olduğu gözlenmiştir.

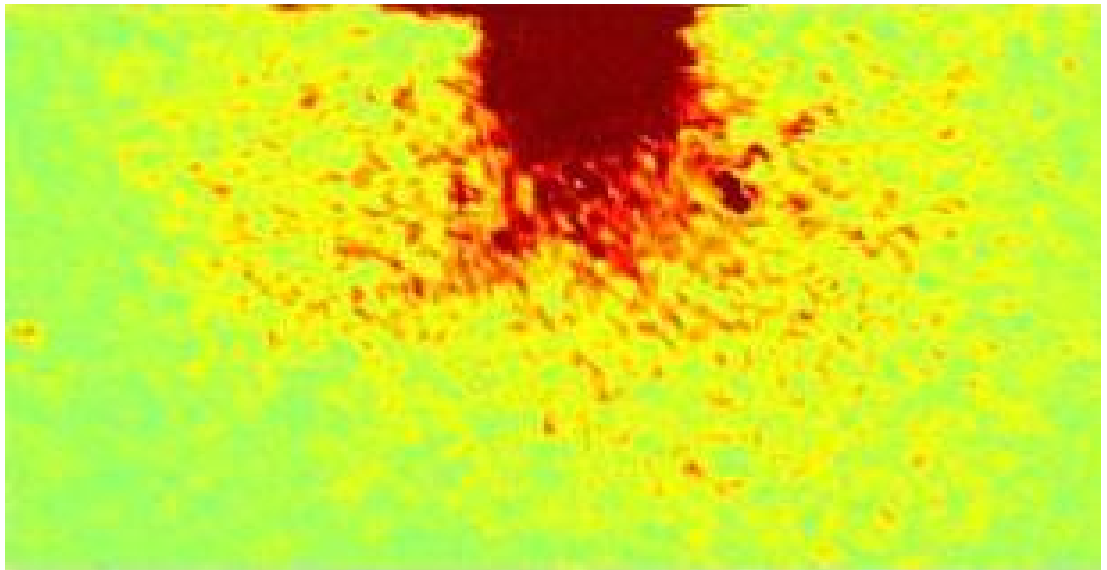
Geo-PIV programından hem renk ölçekli hem de vektörel şeklinde elde edilen yer değiştirmeler incelenerek zeminlerin kırılma mekanizmalarının nasıl olduğu anlaşılma çalışılmıştır.

Şekil 4.36'da $0,30-1,18$ mm tane çapı aralığında ve $Dr=30$ rölatif sıklıkta köşeli zeminin, Geo-PIV programıyla incelenen alanı görülmektedir.



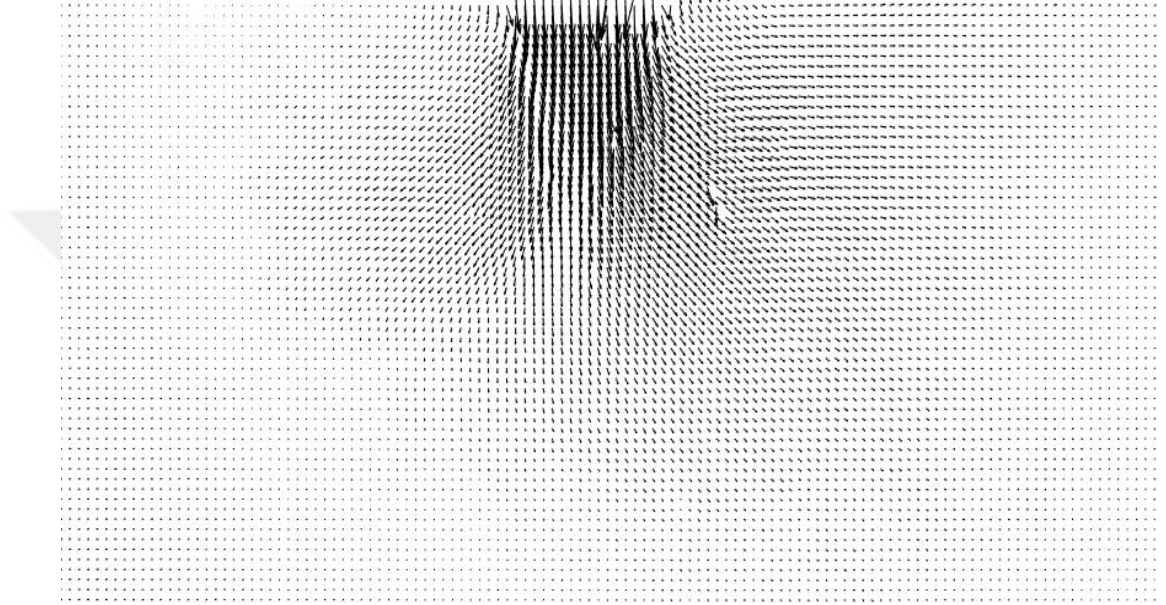
Şekil 4.36. 0,30-1,18 mm boyutta ve $D_r=30\%$ köşeli zeminde Geo-PIV programıyla incelenen alan

Zeminlerin yer değiştirme değişme analizini yapmak için taban basıncı-oturma eğrilerine bakılarak 9 fotoğraf alınmıştır. İlk fotoğraf deneye başlamadan önce ve diğer 8 fotoğraf da deney başladıktan sonra 30 saniyede bir çekilmiştir. Programla analiz yapıldıktan sonra zeminin yer değişimi Şekil 4.37’de gösterilmektedir.



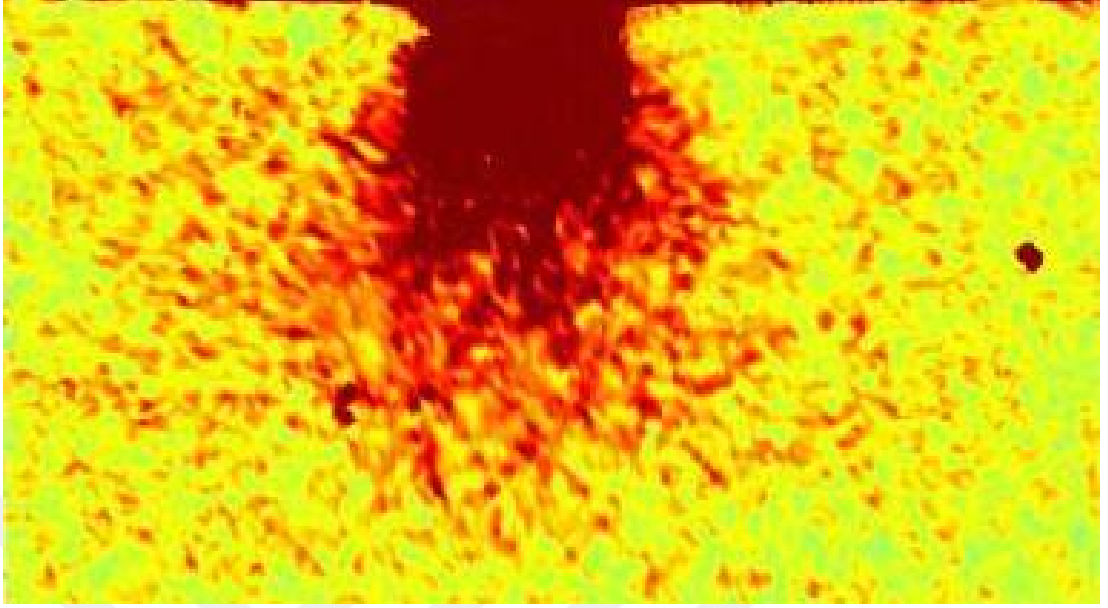
Şekil 4.37. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin 30% rölatif sıkılıkta yer değişimi

Şekil 4.37'ye bakarak zeminin kırılmasının zımbalama şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Geo-PIV programını kullanarak aynı yer değiştirmeyi vektör (ok) şeklinde de görme imkanı vardır. Şekil 4.38'de 0,30-1,18 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminin $Dr=\%30$ rölatif sıkılıktaki yer değiştirmesi vektörel olarak gösterilmektedir.

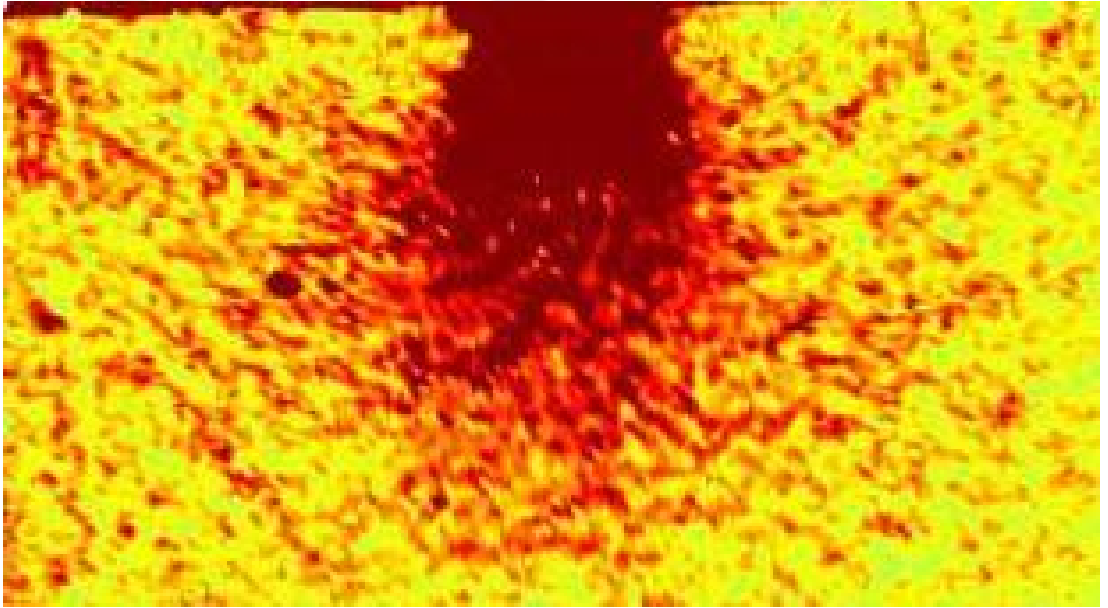


Şekil 4.38. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin $\%30$ rölatif sıkılıkta yer değişimi

Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta 0,30-1,18 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminin $Dr=\%50$ ve $\%70$ rölatif sıkılıkta yer değişimi verilmiştir.



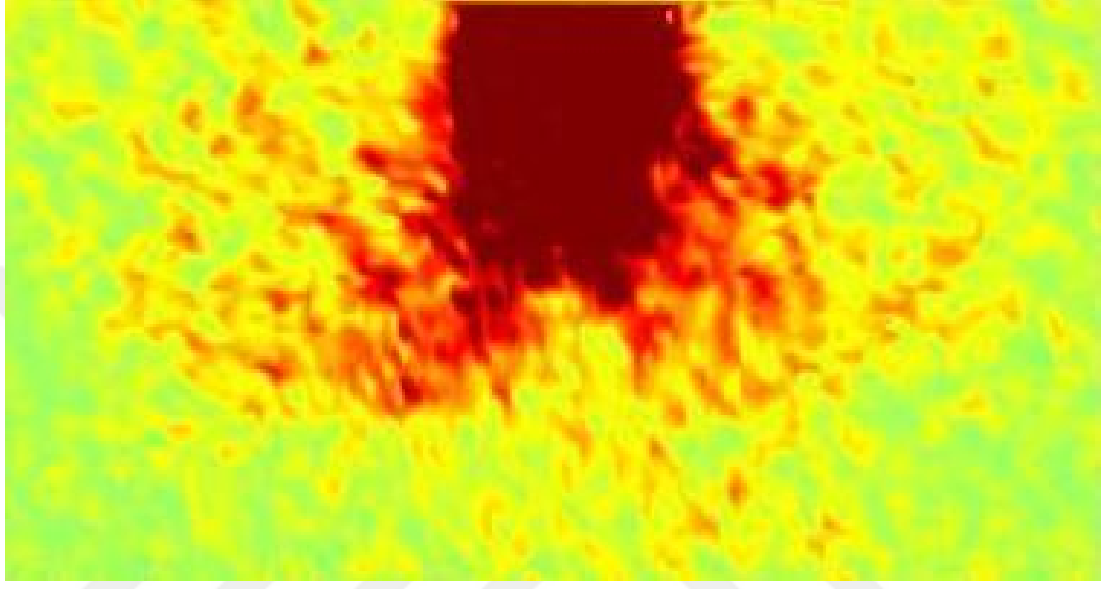
Şekil 4.39. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıklıkta yer değişimi



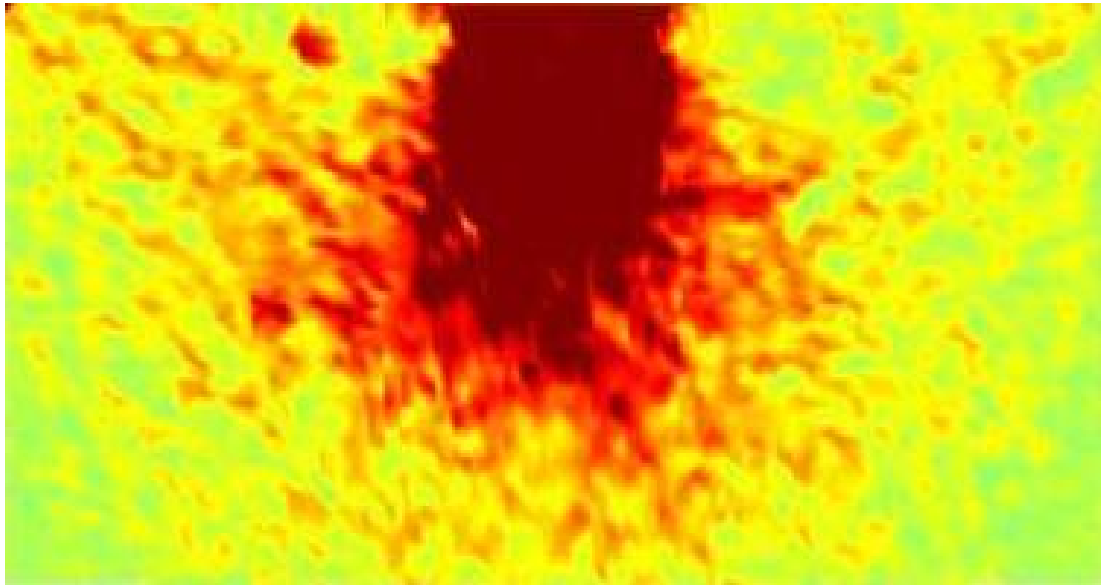
Şekil 4.40. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıklıkta yer değişimi

Şekil 4.37, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'a bakıldığında, 0,30-1,18 tane çapı aralığında köşeli zeminin $D_r = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölatif sıklıklarda sırasıyla zımbalama, bölgesel

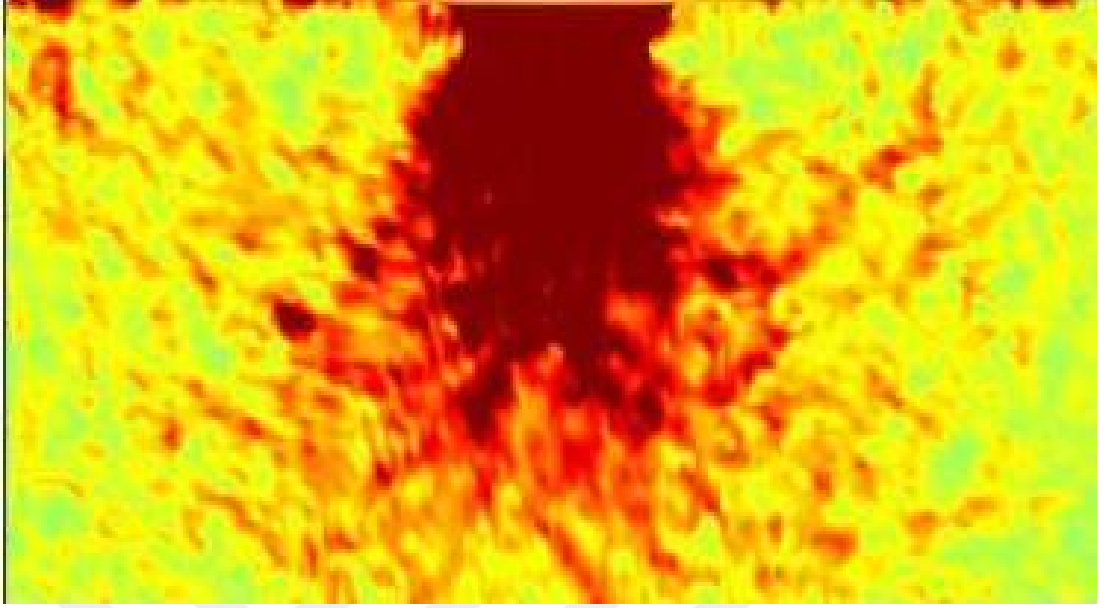
ve genel kırılmaları gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’de sırasıyla 1,18-1,40 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminin $D_r = 30\%$, 50% ve 70% rölatif sıkılıklarında kayma kırılması mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.41. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminin 30% rölatif sıkılıkta yer değişimi

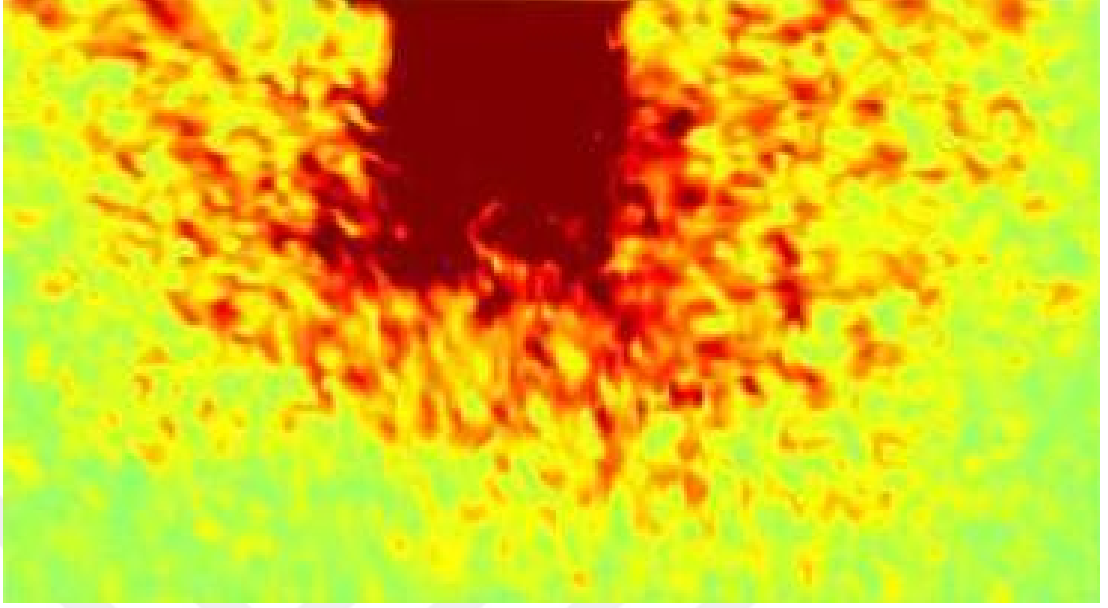


Şekil 4.42. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminin 50% rölatif sıkılıkta yer değişimi

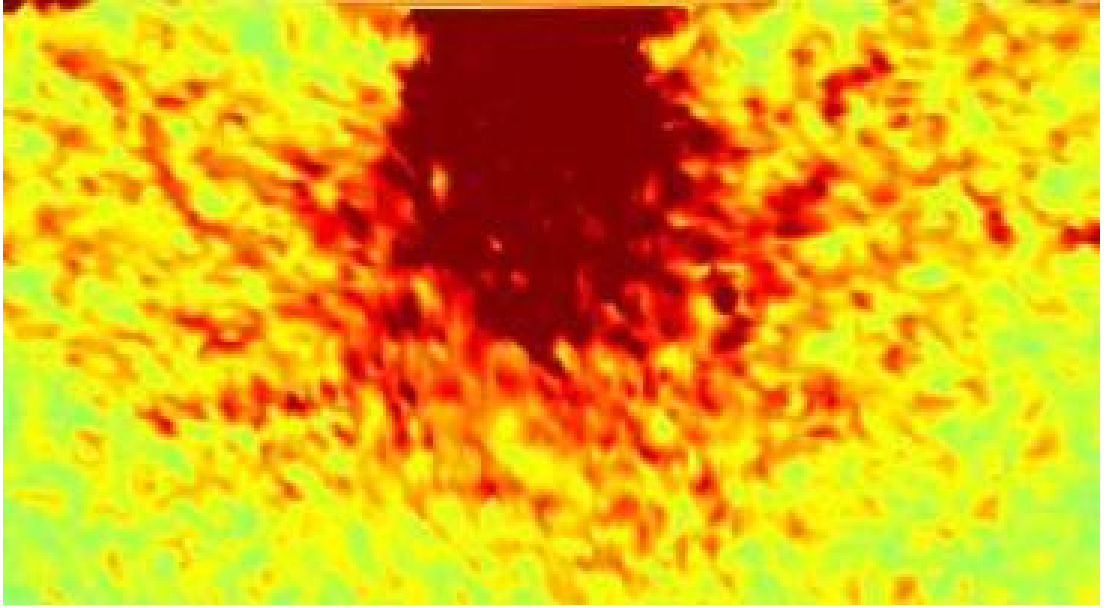


Şekil 4.43. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıkılıkta yer değişimi

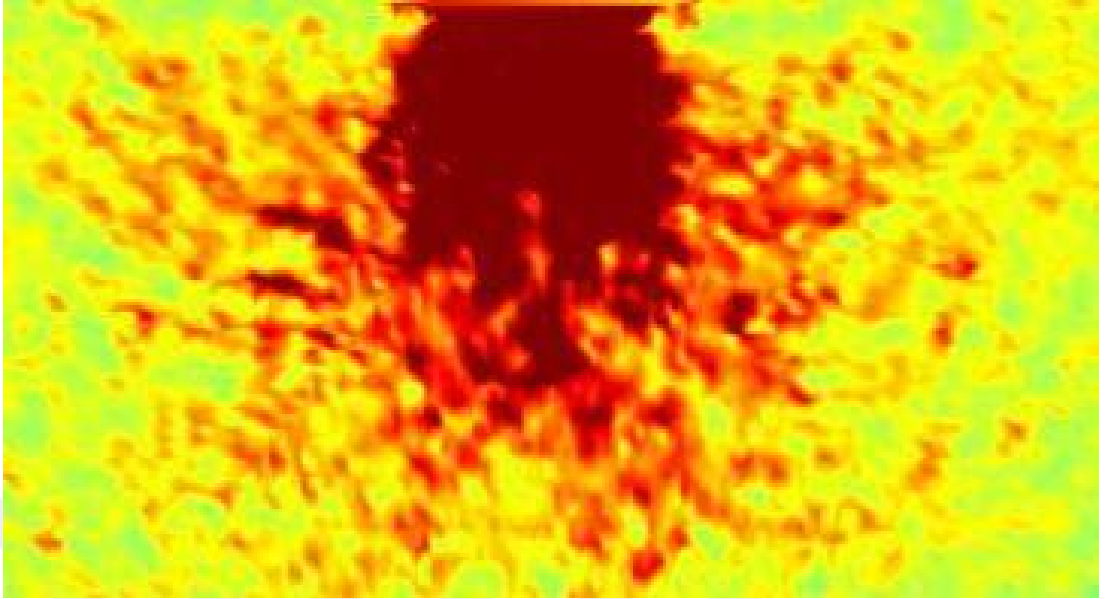
Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43 incelendiğinde zemin taneleri büyüdükçe temelin altında ki yer değiştirme alanının daha da büyüdüğü görülmektedir. 1,18-1,40 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminde, kayma kırılma mekanizması $Dr=30\%$, 50% ve 70% rölatif sıkılıklarda sırasıyla zımbalama, yerel ve genel kayma kırılması şeklinde meydana gelmiştir. Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da, 1,40-2,36 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminin kırılma mekanizması görülmektedir.



Şekil 4.44. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminin %30 rölatif sıklıkta yer değişimi

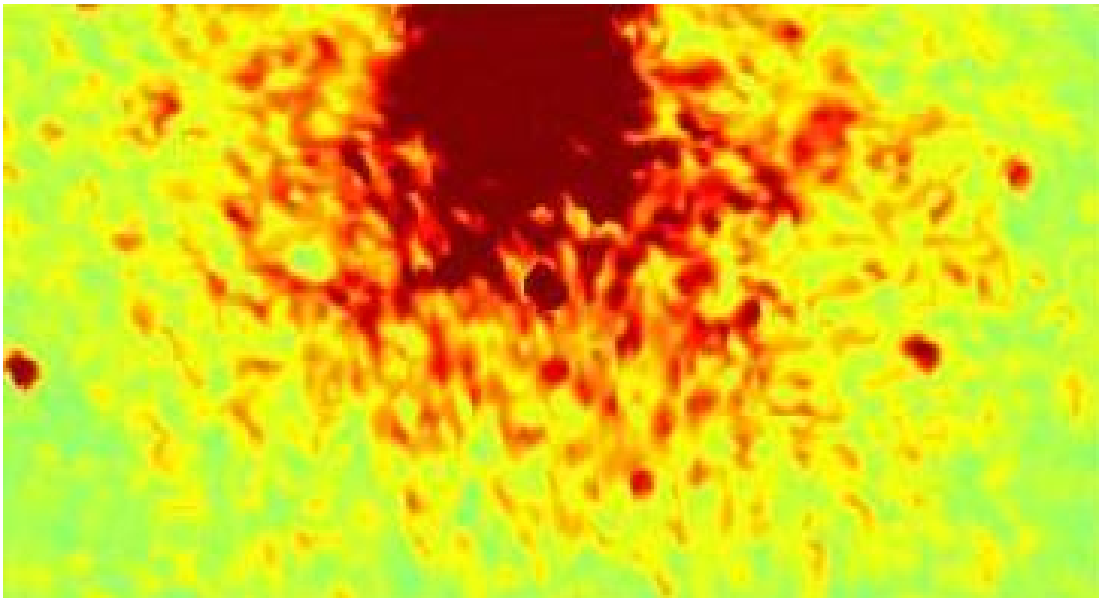


Şekil 4.45. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıklıkta yer değişimi

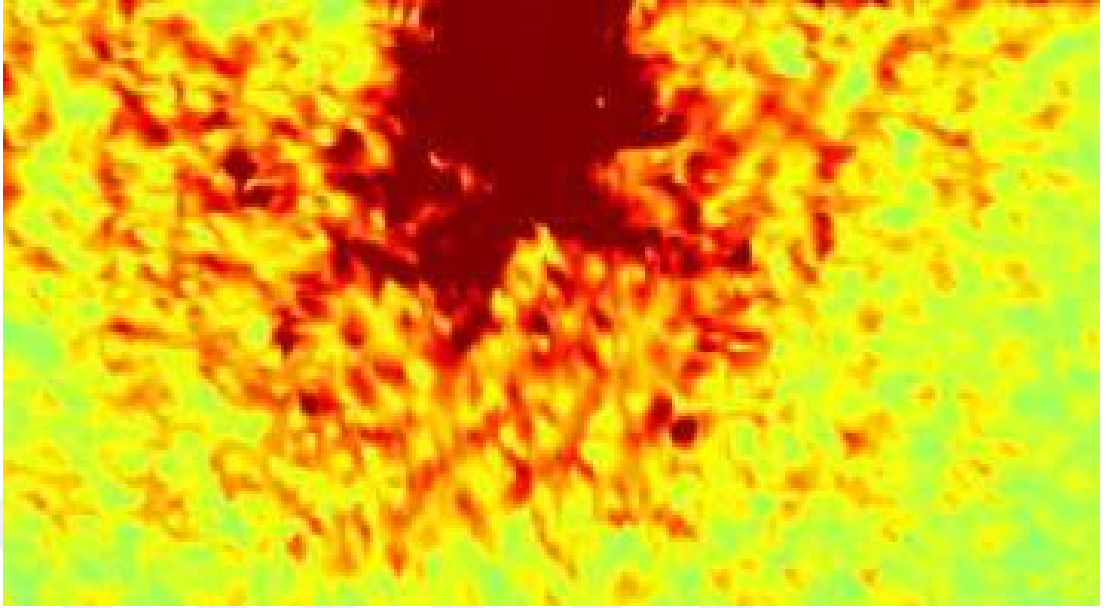


Şekil 4.46. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıklıkta yer değişimi

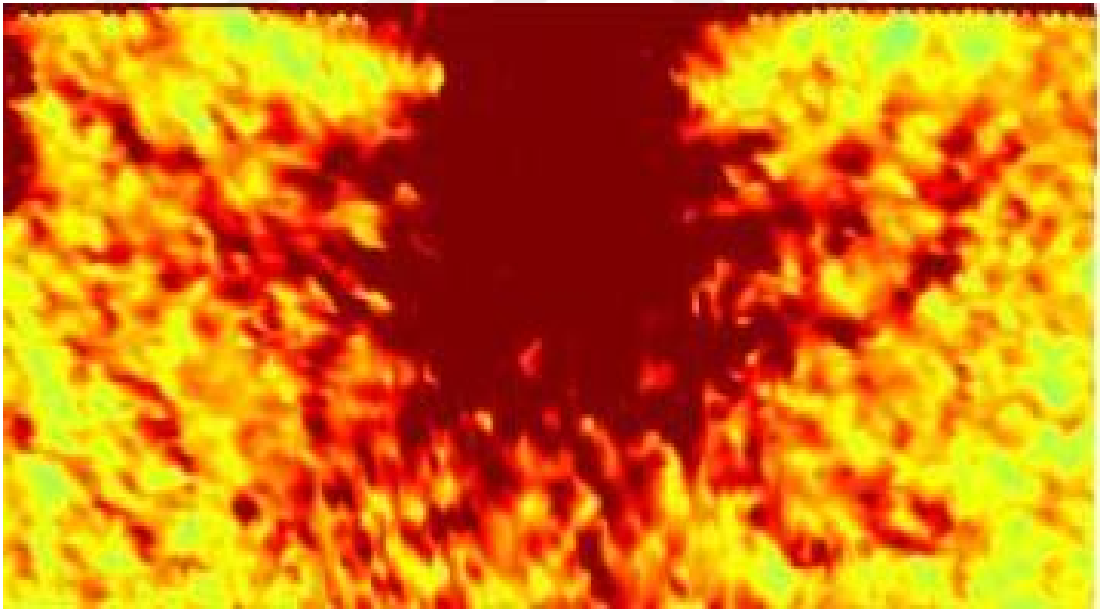
Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'da, 2,36-2,80 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminin $D_r = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölatif sıklıkta meydana gelen kırılma mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 4.47. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %30 rölatif sıklıkta yer değişimi

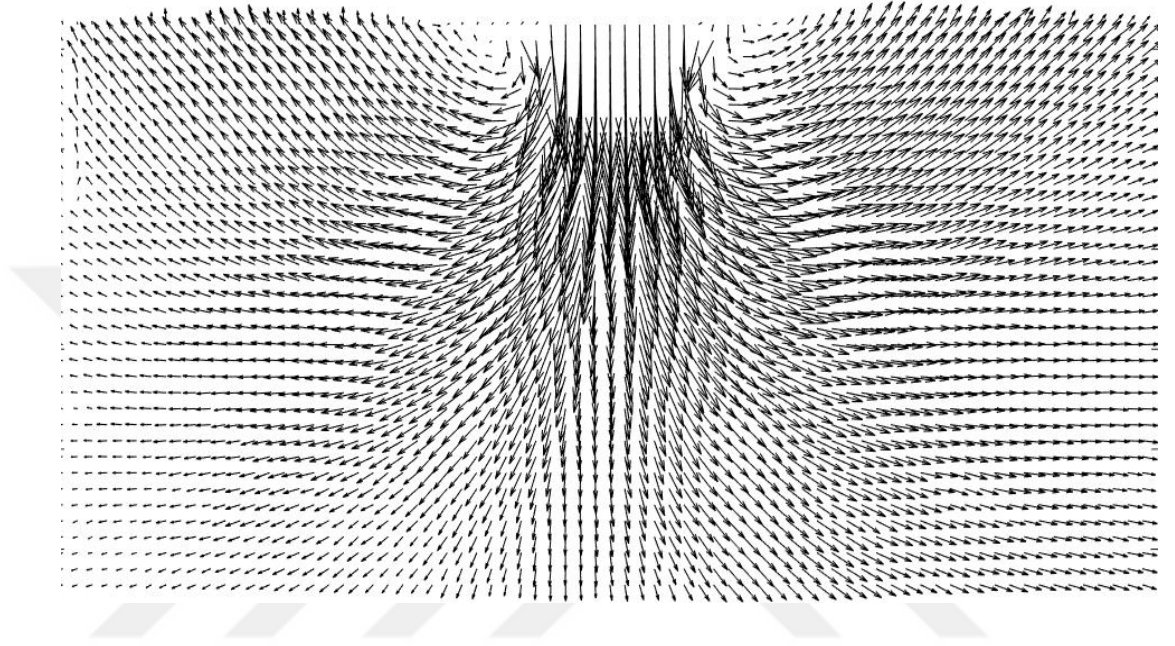


Şekil 4.48. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıklıkta yer değişimi



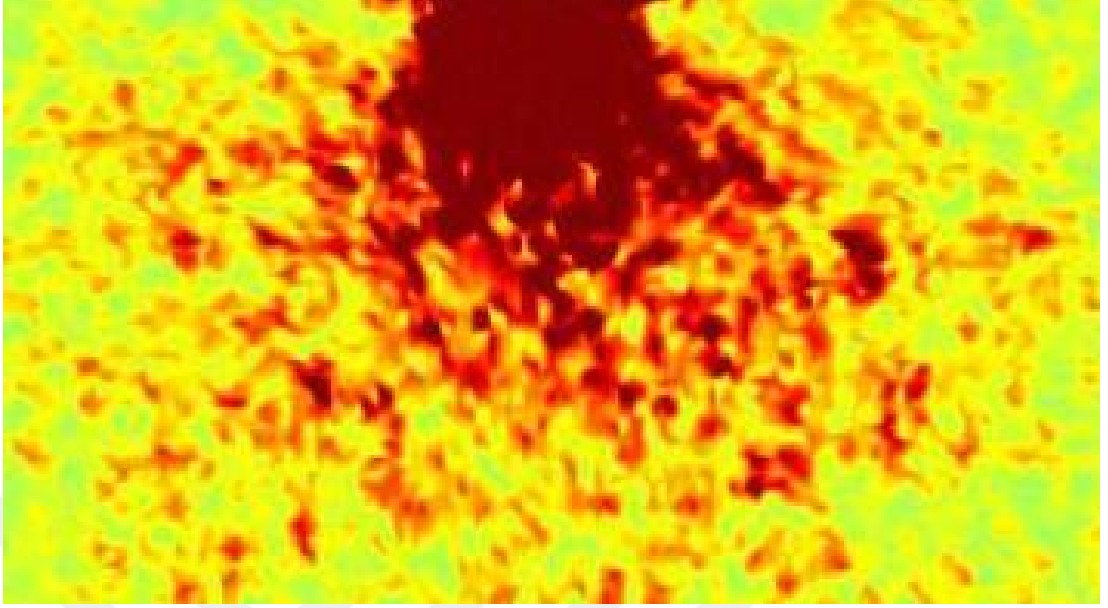
Şekil 4.49. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıklıkta yer değişimi

Şekil 4.50’de 2,36-2,80 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminin kayma kırılma mekanizması vektörel şeklinde gösterilmiştir. Şekil 4.50 incelendiğinde zeminde genel kayma kırılması meydana geldiği ve zeminin kenarlardan kabardığı söylenebilir.

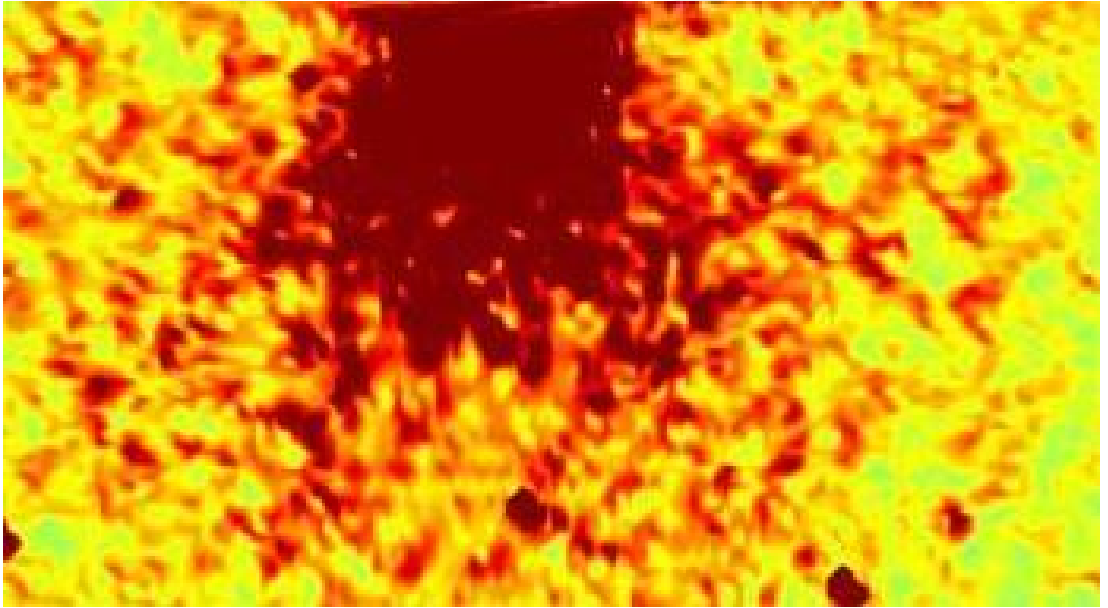


Şekil 4.50. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıkılıkta yer değişiminin vektörel gösterimi

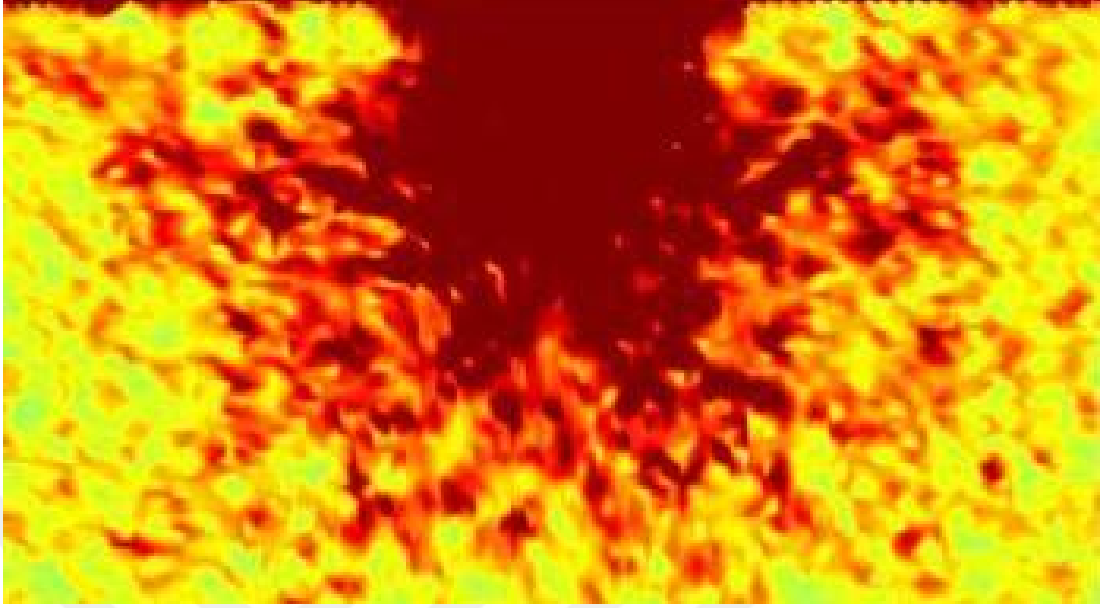
Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53’de 2,80-3,35 mm tane çapı aralığında köşeli zeminin ve Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da 3,35-4,75 mm tane çapı aralığında olan köşeli zeminin kayma kırılma mekanizması sırasıyla $D_r = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölatif sıkılıklar için gösterilmiştir.



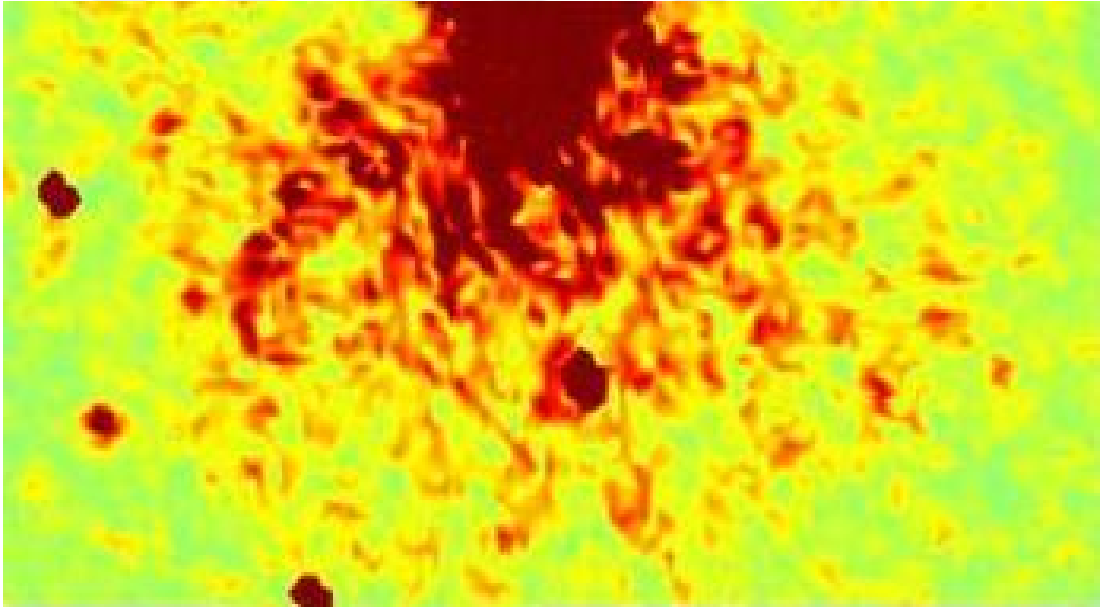
Şekil 4.51. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminin %30 rölatif sıklıkta yer değişimi



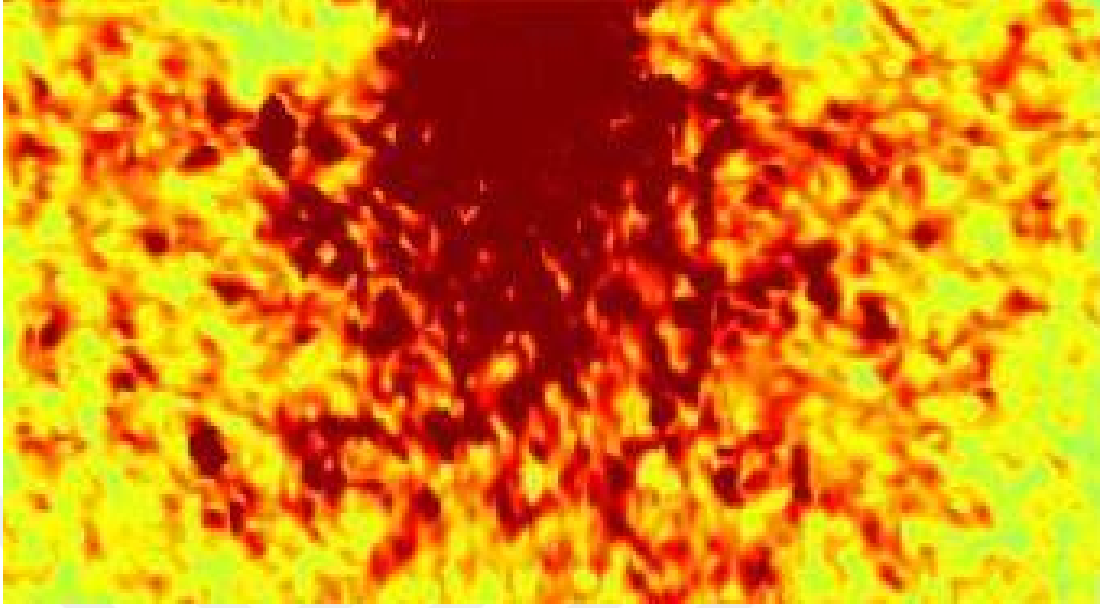
Şekil 4.52. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıklıkta yer değişimi



Şekil 4.53. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıklıkta yer değişimi



Şekil 4.54. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminin %30 rölatif sıklıkta yer değişimi

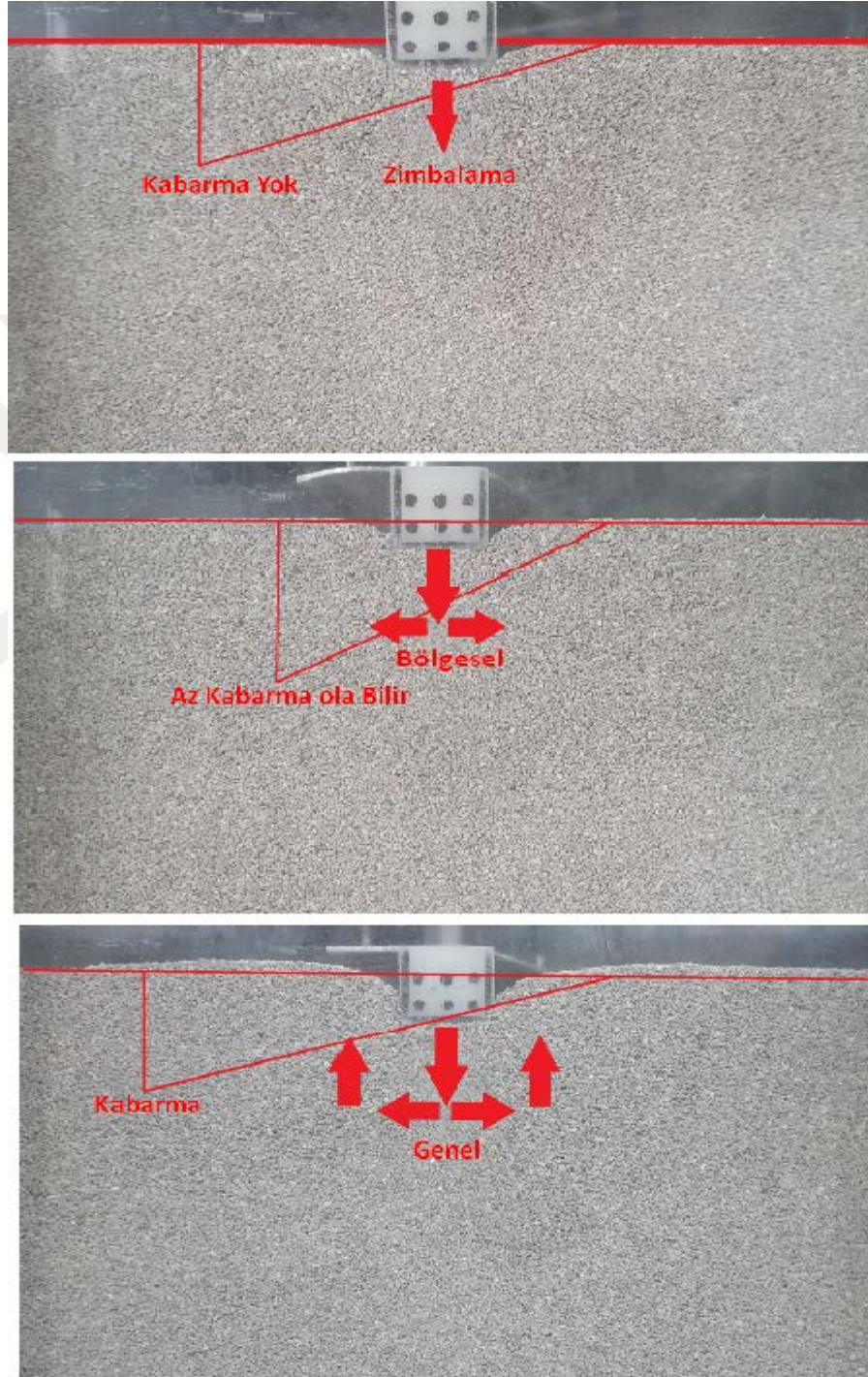


Şekil 4.55. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminin %50 rölatif sıklıkta yer değişimi



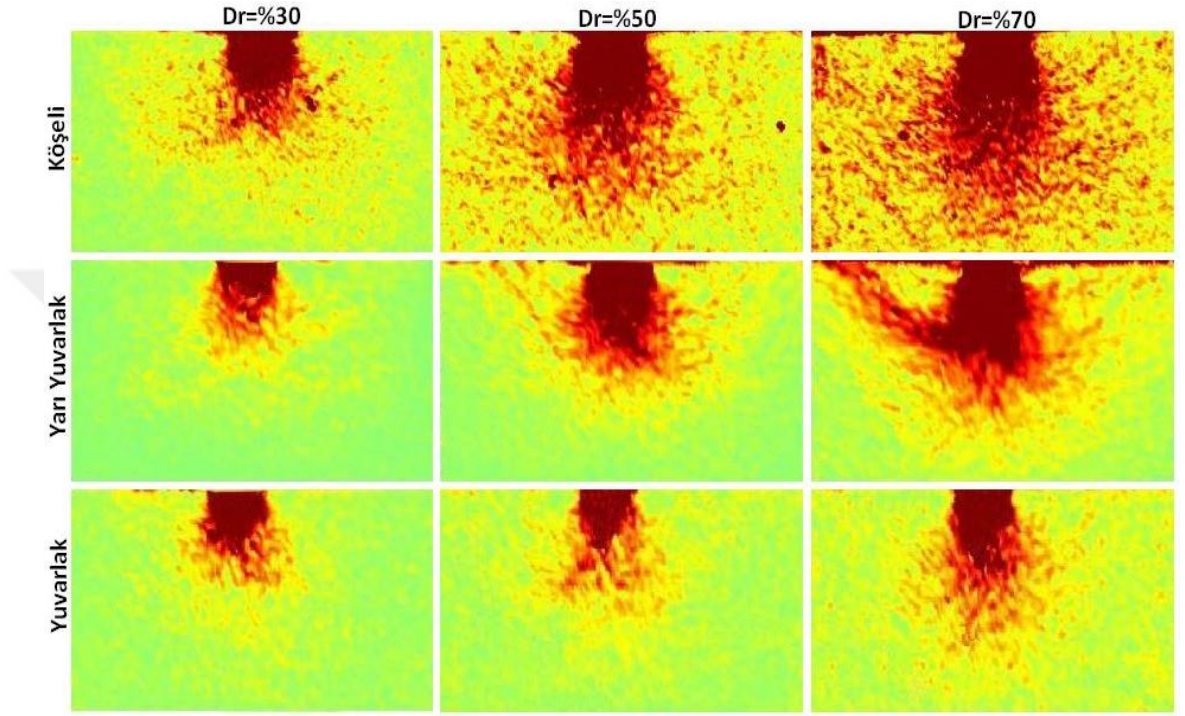
Şekil 4.56. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan köşeli zeminin %70 rölatif sıklıkta yer değişimi

Genel olarak köşeli zeminlerde rölatif sıkılık $D_r = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ ' de sırası ile zımbalama, bölgesel ve genel kayma kırılması meydana gelmektedir (Şekil 4.57).



Şekil 4.57. Köşeli zeminde meydana gelen kayma kırılmaları

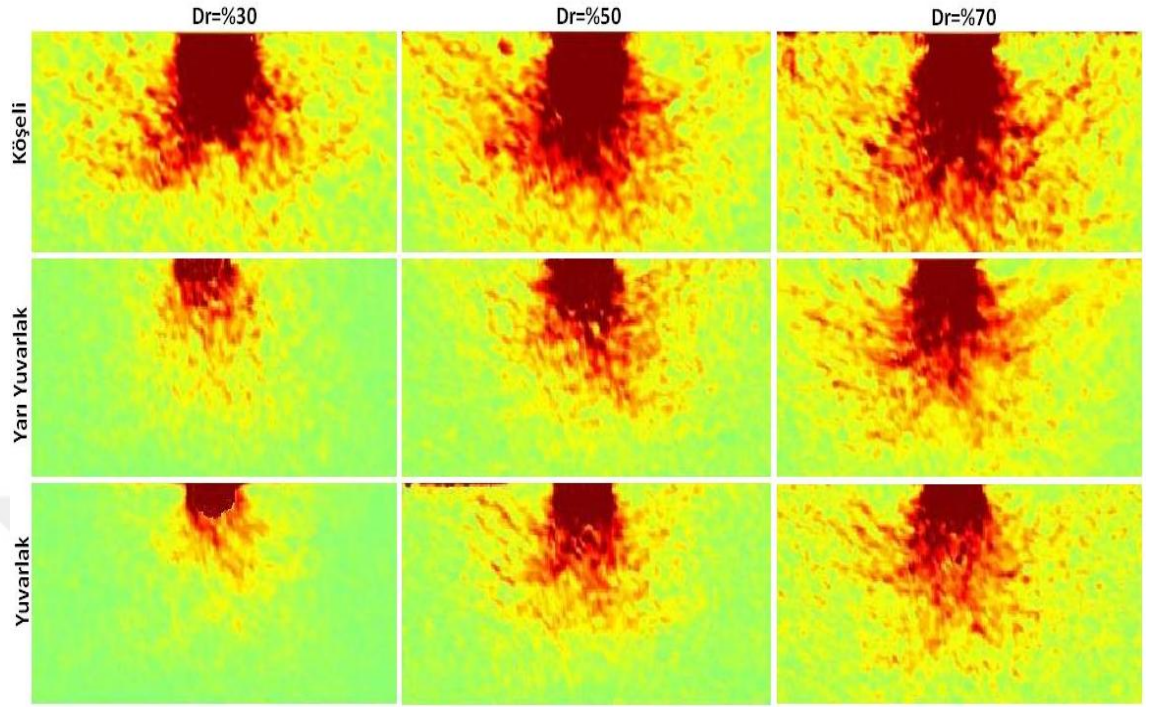
Şekil 4.58’de, 0,30-1,18 mm tane çapı aralığında zeminin köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak olmak üzere üç farklı yuvarlaklıkta ve $Dr = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ rölatif sıklıklarda oluşan zemin yer değiştirmeleri görülmektedir.



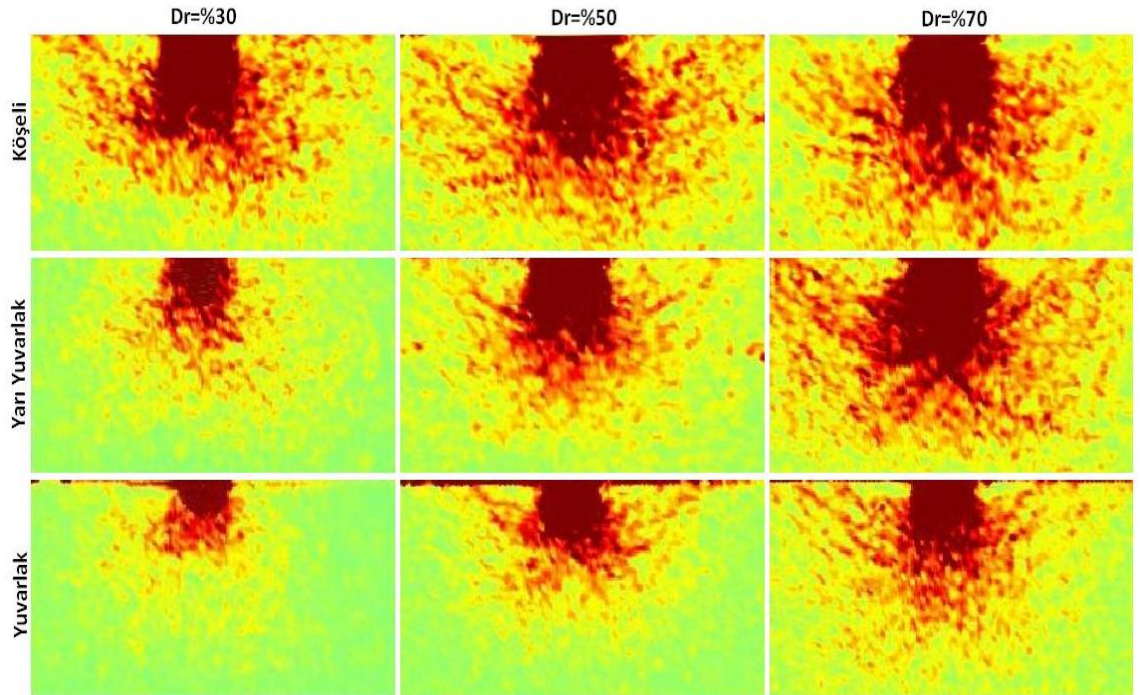
Şekil 4.58. Tane çapı 0,30-1,18 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıklıklarda yer değişimleri

Şekil 4.59’da, 1,18-1,40 mm tane çapı aralığında olan zeminin yer değiştirmesi üç farklı yuvarlaklık ve üç farklı rölatif sıklık, $Dr = \%30$, $\%50$, $\%70$ için gösterilmektedir. Zeminin rölatif sıklığı $Dr = \%30$ olduğu zaman kırılma mekanizması zımbalama şeklinde, rölatif sıklığı $Dr = \%50$ olduğu zaman ise yerel kırılma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Rölatif sıklık $Dr = \%70$ ’e çıktığı zaman genel kayma kırılması meydana gelmektedir. Köşeli zemin yuvarlağa doğru gittiği zaman $Dr = \%70$ rölatif sıklıkta kayma kırılma mekanizması tam genel olmayıp, yerel (bölgesel) ve genel kayma kırılma arasında bir kırılma meydana gelmektedir.

Şekil 4.60’da 1,40-1,25 mm tane çapı aralığındaki zeminin yer değiştirmesi üç farklı yuvarlaklık ve üç farklı rölatif sıklıklar için gösterilmektedir.

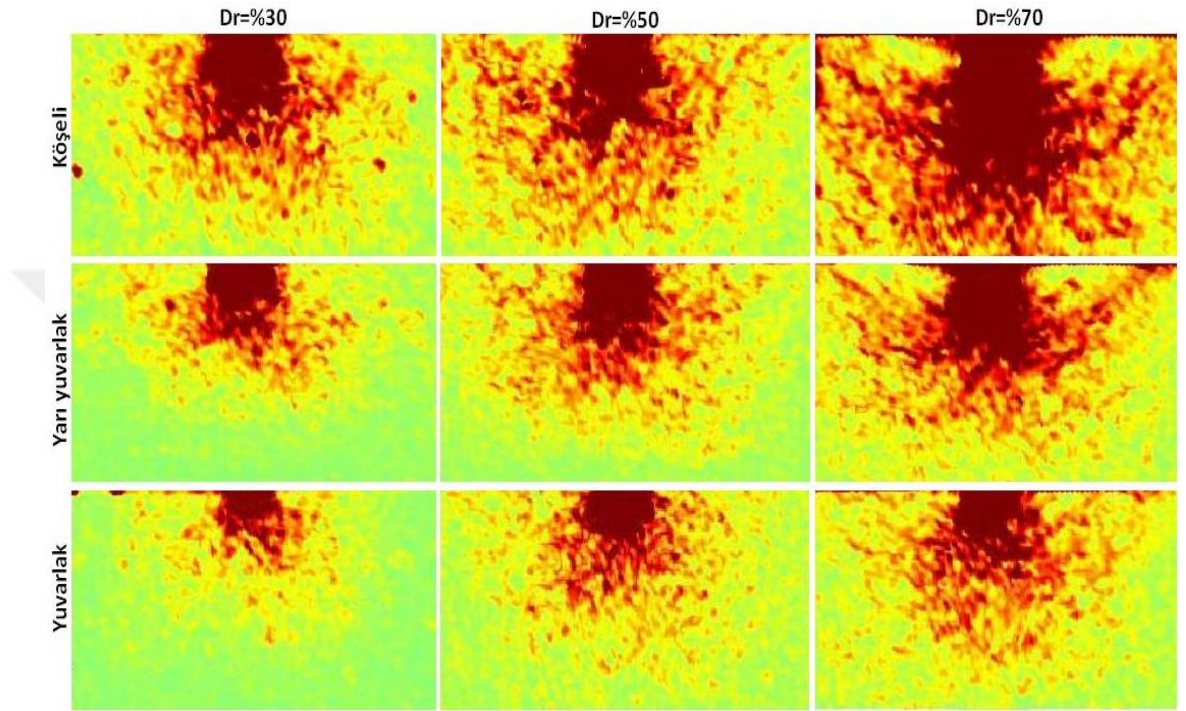


Şekil 4.59. Tane çapı 1,18-1,40 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıklıklarda yer değişimleri

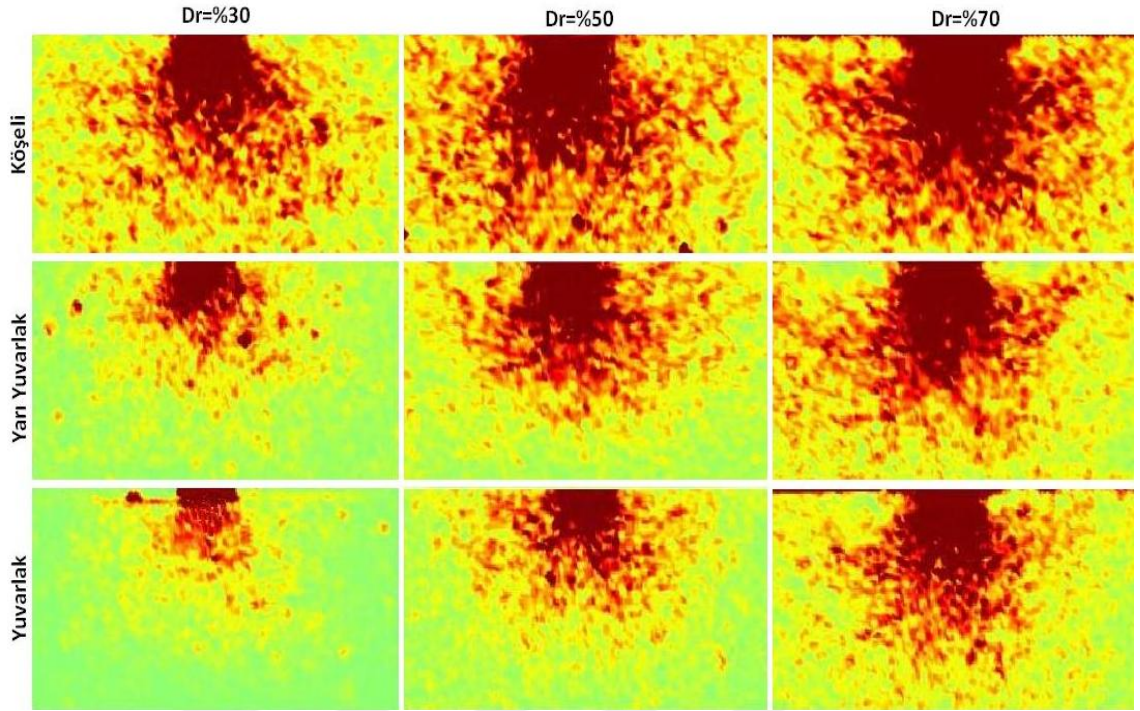


Şekil 4.60. Tane çapı 1,40-2,36 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıklıklarda yer değişimleri

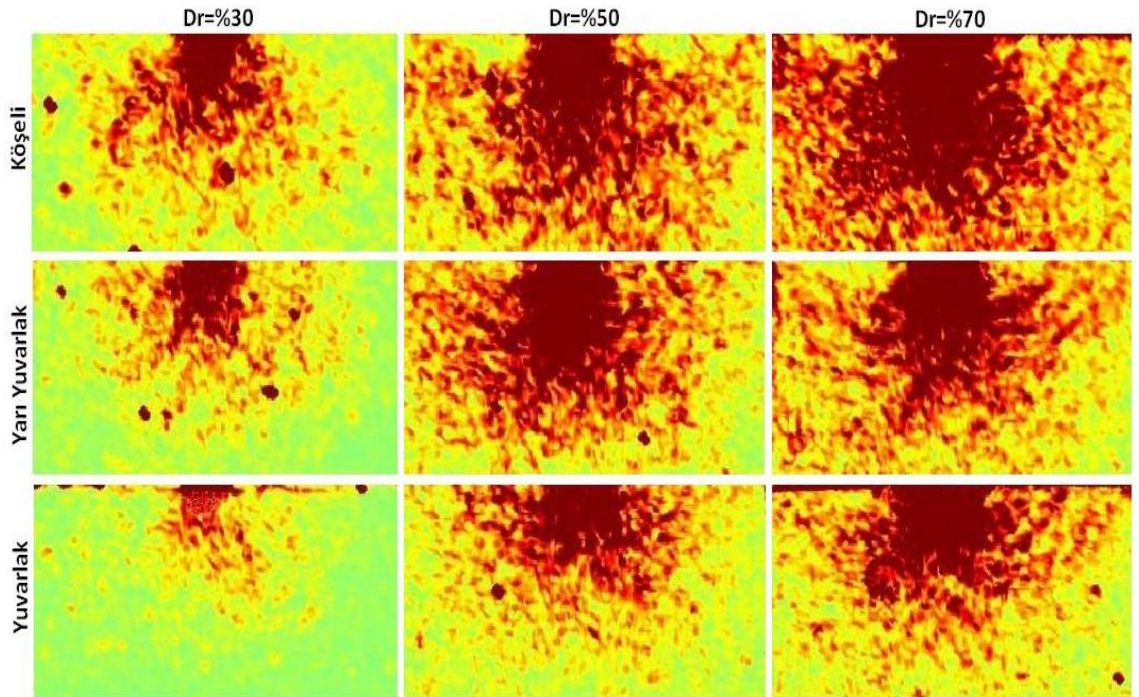
Şekil 4.61, Şekil 4.62 ve Şekil 4.63’de sırasıyla 2,36-2,80 mm, 2,80-3,35 mm ve 3,35-4,75 mm tane çapı aralığındaki zeminlerin kayma kırılma mekanizmaları köşeli, yarı yuvarlak, yuvarlak halde ve $Dr=\%30$, $\%50$, $\%70$ rölatif sıkılıkta gösterilmektedir.



Şekil 4.61. Tane çapı 2,36-2,80 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıkılıklarda yer değişimleri



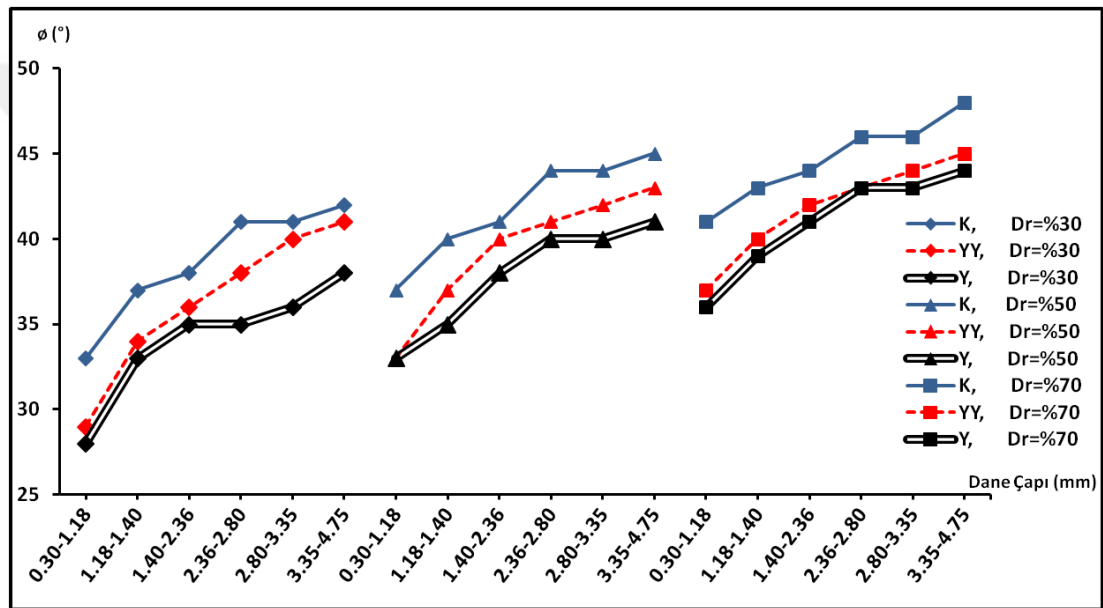
Şekil 4.62. Tane çapı 2,80-3,35 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıklıklarda yer değişimleri



Şekil 4.63. Tane çapı 3,35-4,75 mm aralığında olan zeminin farklı yuvarlaklık ve rölatif sıklıklarda yer değişimleri

4.4. Zeminin Kayma Mukavemeti

Köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminler üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılarak üç farklı yuvarlaklıkta, üç farklı rölatif sıkılıkta ve 6 farklı tane çapı aralığında zeminin içsel sürtünme açısı değerleri bulunmuştur. Yapılan kesme kutusu deneylerin sonucunda bulunan içsel sürtünme açısı değerlerinin, yuvarlaklığa ve tane çapına bağlı olarak değişimi Şekil 4.64’de gösterilmektedir.



Şekil 4.64. Farklı yuvarlaklığa ve tane çapına bağlı olarak İçsel sürtünme açılarının değişimi

Şekil 4.64’de görüldüğü gibi zeminin dane boyutu ve rölatif sıkılık arttıkça içsel sürtünme açısı değeri de artmaktadır. Aynı zamanda zemin köşeliden yuvarlağa doğru gittikçe içsel sürtünme açısı azalmaktadır.

Terzaghi’nin verdiği nihai taşıma kapasitesi formüle göre ($q_u = cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma$) zeminin nihai taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Zeminin hesaplanmış olan nihai taşıma kapasitesi değerleri Çizelge 4,10’da verilmiştir. Zeminin teoriden hesaplanan taşıma kapasitesini deneyden elde edilen değerler ile karşılaştırdığımızda, teorik ve deneysel

sonuçların yaklaşık aynı olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel değerler, Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Zeminin teorik olarak hesaplanan taşıma kapasitesi değerleri

Dane Çapı (mm)	Dr (%)	N γ			γ (kN/m ³)			q _u =CNc+qNq+0.5 γ BN γ		
		Köşeli	Yarı Yuvarlak	Yuvarlak	Köşeli	Yarı Yuvarlak	Yuvarlak	Köşeli	Yarı Yuvarlak	Yuvarlak
0,30-1,18	30	31,9	16,1	13,7	14,5	15,3	15,7	11,5	6,1	5,3
	50	65,2	31,9	31,9	15,1	15,8	16,1	24,6	12,6	12,8
	70	140,5	65,2	54,3	15,7	16,2	16,5	55,4	26,4	22,4
1,18-1,40	30	65,2	38,0	31,9	14,2	14,6	14,9	23,1	13,8	11,9
	50	115,3	65,2	45,4	14,7	15,1	15,5	42,3	24,6	17,6
	70	211,5	115,3	95,0	15,2	15,7	16,1	80,3	45,2	38,2
1,40-2,36	30	78,6	54,3	45,4	14,2	14,6	15,2	27,9	19,8	17,2
	50	140,5	115,3	78,6	14,8	15,2	15,7	51,9	43,8	30,8
	70	261,6	171,9	140,5	15,3	15,8	16,2	100,0	67,9	56,9
2,36-2,80	30	115,3	78,6	45,4	14,3	14,8	15,2	41,2	29,0	17,2
	50	261,6	140,5	115,3	14,8	15,3	15,7	96,7	53,7	45,2
	70	407,1	211,5	211,5	15,4	15,9	16,2	156,7	84,1	85,6
2,80-3,35	30	140,5	115,3	54,3	14,3	14,8	15,3	50,2	42,6	20,7
	50	261,6	171,9	115,3	14,8	15,4	15,9	96,7	66,2	45,8
	70	407,1	261,6	211,5	15,4	16,0	16,4	156,7	104,6	86,7
3,35-4,75	30	171,9	140,5	78,6	14,3	15,0	15,3	61,4	52,6	30,0
	50	325,3	211,5	140,5	14,9	15,5	15,8	121,1	81,9	55,5
	70	650,6	325,3	261,6	15,5	16,1	16,4	252,1	130,9	107,2

Çizelge 4.11. Teorik ve deneysel nihai taşıma kapasitesi değerleri

Dane Çapı (mm)	Dr (%)	q _u (kN/m ²)					
		Köşeli (Teorik)	Köşeli (Deneysel)	Yarı Yuvarlak (Teorik)	Yarı Yuvarlak (Deneysel)	Yuvarlak (Teorik)	Yuvarlak (Deneysel)
0,30-1,18	30	11,6	15	6,2	12	5,4	10
	50	24,6	40	12,6	28	12,9	25
	70	55,4	130	26,4	55	22,4	44
1,18-1,40	30	23,2	18	13,9	13	11,9	12
	50	42,4	45	24,6	34	17,6	28
	70	80,4	130	45,3	80	38,2	72
1,40-2,36	30	27,9	20	19,8	15	17,3	13
	50	52	50	43,8	42	30,9	30
	70	100,1	135	67,9	85	56,9	80
2,36-2,80	30	41,2	24	29,1	22	17,3	16
	50	96,8	70	53,7	44	45,3	40
	70	156,7	155	84,1	88	85,7	86
2,80-3,35	30	50,2	30	42,7	25	20,8	18
	50	96,8	75	66,2	55	45,8	44
	70	156,7	168	104,6	100	86,7	96
3,35-4,75	30	61,5	35	52,7	30	30,1	20
	50	121,2	115	82	64	5,5	50
	70	252,1	250	130,9	120	107,3	100

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

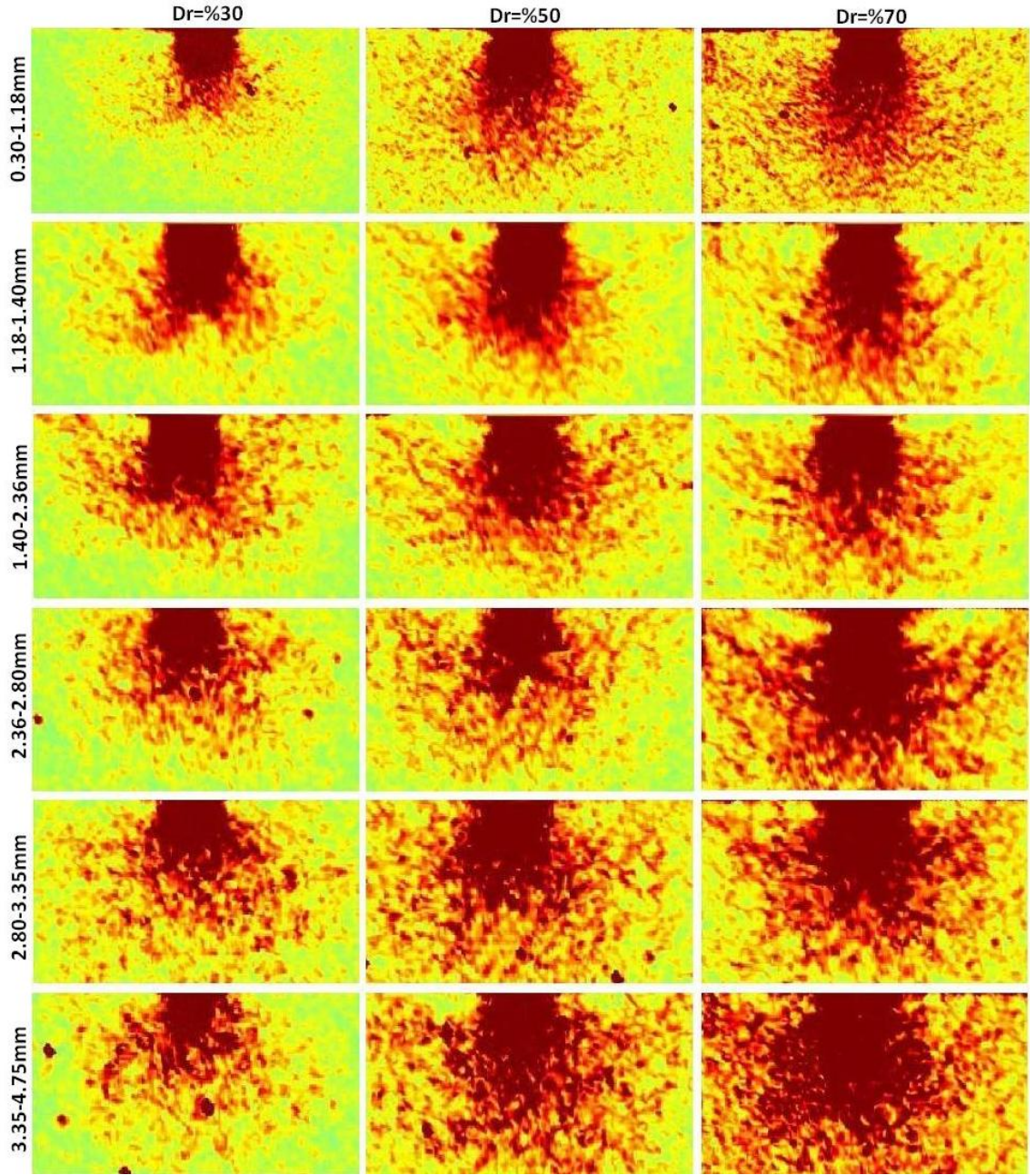
Deneyler yapıldıktan sonra zeminin taşıma kapasitesini ve kayma kırılma yüzeylerini etkileyen üç faktör olduğu görülmüştür. Bunlar;

- Zemin tanelerinin yuvarlaklığı
- Zemin tanelerinin boyutu
- Zeminin rölatif sıkılığıdır.

Genel olarak zeminde rölatif sıkılık arttıkça zeminde meydana gelen kayma kırılma yüzeyleri zımbalamadan, genel kayma kırılmasına doğru gitmektedir. Başka bir ifadeyle, $Dr=30\%$ rölatif sıkılıktaki zeminde zımbalama, $Dr=50\%$ rölatif sıkılıktaki zeminde bölgesel ve $Dr=70\%$ rölatif sıkılıktaki zeminde genel kayma kırılması meydana gelmektedir. Aynı zamanda zeminin rölatif sıkılığı arttıkça taşıma kapasitesinin de arttığı yapılan çalışmalarda görülmektedir. Farklı tane çapı aralığında ve rölatif sıkılıklarda olan köşeli zeminin yük altındaki yer değiştirmesi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

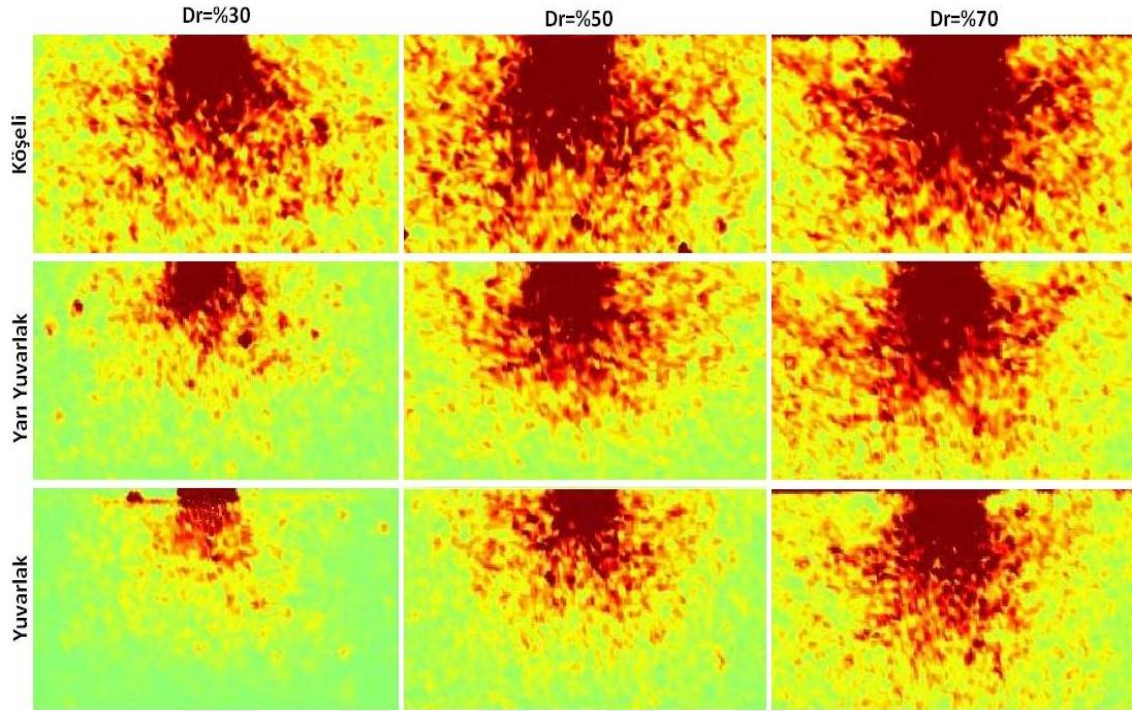
Zemin boyutu arttıkça yük altında etkilenen bölge artmıştır. Örneğin, 0,30-1,18 mm tane çapı aralığına sahip olan köşeli zemin üzerinde $Dr=30\%$ rölatif yaklaşık 1,5B derinliğine kadar zemin yer değiştirmiştir ancak zeminin boyutu 3,35-4,75 mm tane çapı aralığında olduğunda etkilenen derinlik yaklaşık 3B’ye kadar çıkmıştır. Aynı zamanda rölatif sıkılığın arttırılmasıyla aynı boyuttaki zeminde etkilenen bölge 1,5B’den 3,5B hatta 4B’ye kadar çıkmıştır.

Zeminin rölatif sıkılığı köşeli zeminden yuvarlağa doğru gittiği zaman, taşıma kapasitesi azalmakta ve genel kayma kırılma yüzeyleri bölgesel veya zımbalamaya doğru gitmektedir. Örnek olarak Şekil 5.2’de gösterildiği gibi 2,80-3,35 mm tane çapı aralığında köşeli zeminde, $Dr=70\%$ rölatif sıkılıkta gözlenen kayma kırılması genel kayma kırılması şeklinde olurken, aynı boyut ve rölatif sıkılıktaki yuvarlak zeminde gözlenen kayma kırılması şeklinin bölgele daha yakın olduğu görülmüştür.

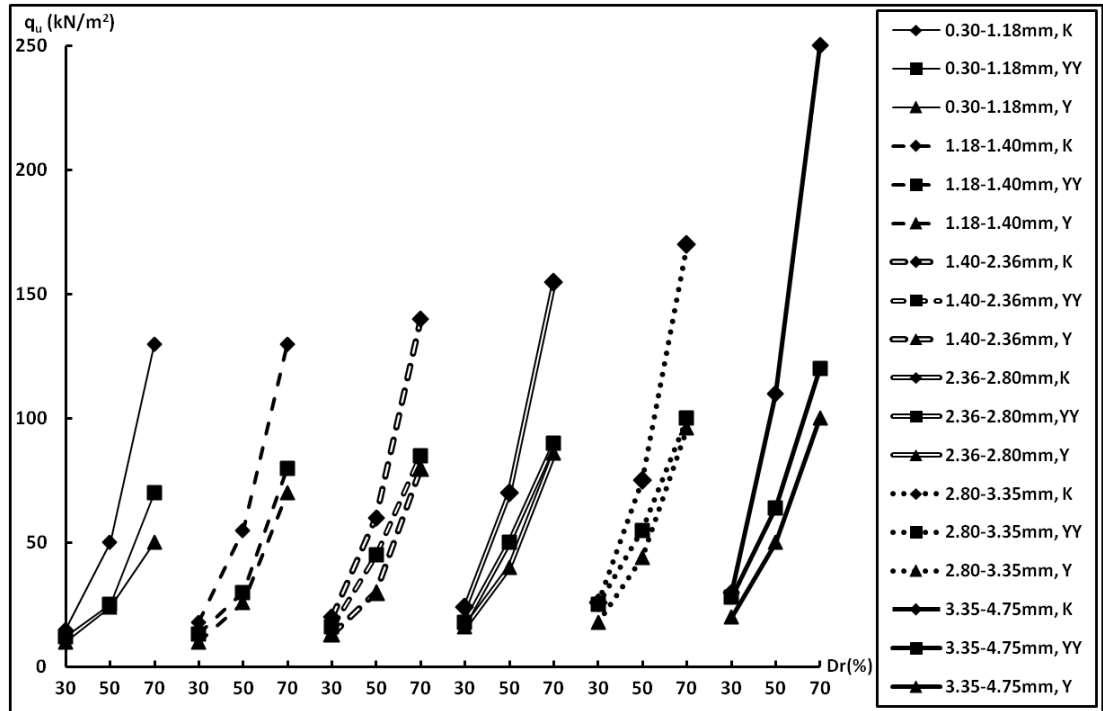


Şekil 5.1. Köşeli zeminin farklı rölatif sıkılıklarda ve boyutlarda yer değiştirme mekanizması

Taşıma kapasitesi değerlerine bakarsak, köşeli zemin yarı yuvarlağa dönüştürüldüğü zaman zeminin taşıma kapasitesi azalmıştır. Aynı zamanda yarı yuvarlak zemin yuvarlak hale dönüştürüldüğünde taşıma kapasitesi azalmaya devam etmiştir. Taşıma kapasitesi sonuçları, farklı tane çapı aralıkları, farklı rölatif sıkılıklar ve farklı yuvarlaklıklar için Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Üç farklı rölatif sıklıkta ve yuvarlaklıkta 2,80-3,35 mm tane çapı aralığında olan zeminlerin yer değişimleri



Şekil 5.3. Zeminin nihai taşıma kapasitesi, farklı yuvarlaklıkta, boyutta ve rölatif sıklıkta

Şekil 5.3 incelendiğinde, yuvarlaklığın değişmesinin büyük rölatif sıkılıklarda ($Dr=70$) nihai taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin daha çok olduğu belirlenmiştir. Köşeli zeminin yuvarlağa dönüştürülmesiyle nihai taşıma kapasitesi, $Dr=30$ rölatif sıkılıkta %33 ve $Dr=50$ rölatif sıkılıkta %40 ve $Dr=70$ rölatif sıkılıkta ise %45 azalmıştır.

Sonuçlara bakıldığında, köşeli zemin yarı yuvarlak hale dönüştürüldüğünde nihai taşıma kapasitesinde meydana gelen azalma oranının, yarı yuvarlak zemin yuvarlak hale dönüştürüldüğünde oluşan azalma oranından daha çok olduğu belirlenmiştir. Örnek olarak, %70 rölatif sıkılıkta ve tüm tane çap aralıklarında nihai taşıma kapasitesindeki azalma oranı, köşeli zemin yarı yuvarlak hale dönüştürüldüğünde yaklaşık %40, yarı yuvarlak zemin yuvarlak hale dönüştürüldüğünde yaklaşık %20 olarak belirlenmiştir.

Özet olarak yük altındaki köşeli zeminin yuvarlak ve yarı yuvarlak zeminle kıyaslandığında, daha büyük bir alanı etkilediği görülmüştür. Bu etki derinliği köşeli zeminde 4B iken yuvarlak zeminlerde 4B'den az olmuştur.

Mühendislik alanında, özellikle temel altındaki zeminin davranışında zeminin yuvarlaklığının önemli rol oynadığı görülmüştür. Yük altındaki köşeli zeminin davranışının yarı yuvarlak ve yuvarlak zeminin davranışında farklı olduğu yapılan çalışmalardan belirlenmiştir. Yuvarlak ve yarı yuvarlak zeminlerin yük altındaki davranışının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Geoteknik alanında, özellikle dolgularda köşeli zemin kullanılmasının daha yüksek mukavemet ve daha az oturmaya sebep olacağı, bu yüzden köşeli zemin tercih edilmesinin daha iyi sonuçlar alınması noktasında önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- AASHTO T 236, 2008. Standard Method of Test for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions. American Association of State Highway and Transportation Officials
- Acar, Y.B., Durgunoğlu, H.T., Tümay, M.T., 1982. Interface properties of sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 108, 648-654.
- Ahmadi. H., Hajialilue-Bonab. M., 2012. Experimental and analytical investigations on bearing capacity of strip footing in reinforced sand backfills and flexible retaining wall. *Acta Geotechnica*. DOI 10.1007/s11440-012-0165-8
- Al-Rousan, T., Masad, E., Tutumluer E., Pan, T., 2007. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics, *Construction and Building Materials* 21, 978–990.
- Alshibli, K.A., Alsales, M.I., 2004. Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18 (1), 36-45.
- Anonim, 1996. Çimento hammaddeleri ve yapı malzemeleri cilt 2: pomza, perlit, kireç, alçıtaşı ve alçı kum-çakıl-mıcır, tuğla-kiremit toprakları, vermikülit. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, yayın no:DPT: 2434–ÖİK: 491.
- Arasan, S., 2011. Görüntü Analizi İle Granüler Zeminlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Aschenbrenner, BC., 1956. A new method of expressing particle sphericity. *J.Sed. Petrol.*, 26, 15–31.
- ASTM D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D4253-16, Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table
- ASTM D4254-16, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density
- ASTM D6913-04, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis
- ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer
- Azzam. W.R., Nasr. A.M., 2015. Bearing capacity of shell strip footing on reinforced sand. *Journal of Advanced Research* 6, 727–737. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2014.04.003>
- Barrett, P.J., 1980. The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology*, 27, 291–303.
- Bishop, A.W., 1954. Correspondence on shear characteristics of saturated soil, measured in triaxial compression, *Geotechnique*, 4, 43-55.
- Blott, S.J., Pye, K., 2008. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology* 55, 31-63.
- Bowman, E.T., Soga, K., Drummond, W., 2001. Particle shape characterization using Fourier descriptor analysis. *Géotechnique*, 51, 545–554

- Brinch Hansen J. 1961. A General formula for bearing capacity. The Danish technical Institute. Bulletin No.11, 38-46
- Bungenstab. F. C., Bicalho, K. V., 2016. Settlement predictions of footings on sands using probabilistic analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 8, 2, 198–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.08.009>
- Cailleux, A., 1947. L'indice d'émousse des grains de sable et grès. *Rev. Géomorph. Dyn.*, 3, 78–87.
- Cascone. E., Casablanca.O., 2016. Static and seismic bearing capacity of shallow strip footings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 84 204–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.02.010>
- Çelik, S., 1997. Geogrid donatılı yüzeysel şerit temellerde, geogridin zemininin taşıma gücüne etkisi. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Cerato, A.B., Lutenecker, A.J., 2006. Shrinkage of Clays. *Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils, ASCE*. 1, 1097-1108.
- Chakraborty. M., Kumar.J., 2016. The size effect of a conical footing on N_{γ} . *Computers and Geotechnics*. 76, 212–221
- Chen.Q., Abu-Farsakh. M., 2015. Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation. *Soils and Foundations*. 55(1) 74–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.006>
- Choudhary, A.K., Jha, J.N., Gill.K.S., 2010. Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on reinforced fly ash slope. *Geotextiles and Geomembranes* 28 393–402
- Çinicioğlu, F., 2005. Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı. Seminer. İMO İstanbul, Türkiye.
- Clark, M. W., 1987. Image analysis of clastic particles, in Marshall, J. R., ed., *Clastic Particles: Scanning Electron Microscopy and Shape Analysis of Sedimentary and Volcanic Clasts*: VanNostrand Reinhold, New York, 256–266.
- Corey, A.T., 1949. Influence of Shape on Fall Velocity of Sand Grains. Unpublished MSc Thesis, Colorado A&M College, pp. 102.
- 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.
- Cubrinovski, M., Ishihara, K., 1999. Empirical correlation between SPT N-values and relative density for sandy soils. *Soil Found.* 40 (4), 103–119.
- Das, B., 1998. *Principles of geotechnical engineering*, Fourth Edition, PWS Publishing Company, Boston, pp.715.
- Demiröz, a., 2008. Geogrid donatılı kum üzerine oturan sürekli temellerde taşıma gücünü etkileyen tasarım faktörlerinin deneysel olarak araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Dobkins, J.E. Jr., Folk, R.L., 1970. Shape development on Tahiti-Nui. *J. Sed. Petrol.*, 40, 1167–1203.
- Donald P Coduto, 2001. *Foundation Design, Principles and Particles*. Prentice Hall, Second Edition, (Book)
- Drake, L.D., 1970. Rock texture, an important factor in clast shape studies. *J. Sedim. Petrol.* 40, 1356-1361.

- Drevin G.R., 2006. Computational Methods for the Determination of Roundness of Sedimentary Particles. *Mathematical Geology*, 38(7), 871-890.
- Drolon, H., Druaux, F., Faure, A., 2000. Particle shape analysis and classification using the wavelet transform. *Pattern Recognition Letters*, 21, 473–482.
- Dunn, E.J., 1911. *Pebbles*. Robertson, Melbourne, 122 pp.
- Ehrlich, R., Weinberg, B., 1970. An exact method for characterization of grain shape. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40 (1), 205–212.
- Erdoğan, S.T., 2005. Determination of Aggregate Shape Properties Using X-ray Tomographic Methods and the Effect of Shape on Concrete Rheology. Doctoral Thesis, The University of Texas at Austin.
- Faizi, K., Kalatehjari, R., Nazir, R. and Rashid, A. S. A., 2015. Determination of pile failure mechanism under pullout test in loose sand. *Department of Geotechnics and Transportation, University Teknologi Malaysia*, 22, 1490-1501
- Fisher, P.F. and Bridgland, D.R., 1986. Analysis of pebble morphology. In: *Clast Lithological Analysis* (Ed. D.R. Bridgland), 43–72. Quaternary Research Association, Cambridge.
- Flemming, N.C., 1965. Form and function of sedimentary particles. *J. Sed. Petrol.*, 35, 381–390.
- Folk, R.L., 1955. Student operator error in determination of roundness, sphericity and grain size. *J. Sed. Petrol.*, 25, 297– 301.
- Fraser, H.J., 1935. Experimental study of the porosity and permeability of elastic sediments. *Journal of Geology*, 13 (8), 910-1010.
- Griffiths, J.S., 1967. *Scientific Method in Analysis of Sediments*. McGraw-Hill, New York, 508 pp.
- Grogan, R., 1945. Shape variation of some Lake Superior beach pebbles: *Journal of Sedimentary Petrology* 15, 3-10.
- Hennes, R.G., 1952. The strength of gravel in direct shear. *Symposium on Direct Shear Testing of Soils, ASTM, SPT 131*, 52-62.
- Hight, D. W. and Leroueil, S., 2003. Characterization of Soils for Engineering Purposes. *Proceedings of the Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, 1, 255– 360.
- Holmes, C.D., 1960. Evolution of till-stone shapes, central New York, *Bull.Geol. Soc. Am.* 71, 1645:1660.
- Howard, J.L., 1992. An evaluation of shape indices as palaeoenvironmental indicators using quartzite and metavolcanic clasts in Upper Cretaceous to Palaeogene beach, river and submarine fan conglomerates. *Sedimentology*, 39, 471–486.
- Ismail Ibrahim. K. MH., 2014. Bearing capacity of circular footing resting on granular soil overlying soft clay. *HBRC Journal* 12, 71–77.
- Janke, N.C., 1966. Effect of shape upon the settling velocity of regular convex geometric particles. *J. Sed. Petrol.*, 36, 370– 376.
- Janoo, V.C., 1998. Quantification of Shape, Angularity and Surface Texture of Base Course Materials. *US Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, Special Report 98-1*, 22 pp.
- Karl Terzaghi, 1974. *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons Inc.
- Krumbein, W.C. and Sloss, L.L. 1963. *Stratigraphy and Sedimentation*, Second Edition, W.H. Freeman and Company, San Francisco, p. 660.

- Krumbein, W.C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *J. Sed. Petrol.*, 11, 64–72.
- Kuenen, P.H., 1956. Experimental abrasion of pebbles. 2. Rolling by currents. *J. Geol.*, 64, 336–368.
- Kuo, C.Y., Freeman, R.B., 2000. Imaging Indices for Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Aggregates. *Transportation Research Record* 1721, 57-65.
- Kuo, C.Y., Frost, J.D., Lai, J.S., Wang, L.B., 1996. Three-Dimensional Image Analysis of Aggregate Particles from Orthogonal Projections. *Transportation Research Record* 1526, 98-103.
- Lackner, C., Bergado, D. T., and Semprich, S., 2013. Prestressed reinforced soil by geosynthetics – Concept and experimental investigations. *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 109-123
- Lambe, W. and Whitman, R. V., 1969. *Soil mechanics*. John Wiley and Sons Inc., 553 pp.
- Lee, K.,L., 1970. Comparison of plane strain and triaxial tests on sands. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, 96, 901-923.
- Lee. J., Eun.J., 2009. Estimation of bearing capacity for multiple footings in sand. *Computers and Geotechnics*. 36; 6; 1000-1008.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.03.009>
- Lees, G., 1964a. A new method for determining the angularity of particles. *Sedimentology*, 3, 2–21.
- Lees, G., 1964b. The measurement of particle shape and its influence in engineering materials. *J. British Granite Whinstone Federation*, 4, 1–22.
- Luttig, G., 1956. Eine neue, einfache gero“llmorphometrische methode. *Eiszeit. Gegen.*, 7, 13–20.
- Mackie, W., 1897. On the laws that govern the rounding of particles of sand. *Trans. Edinburgh Geol. Soc.*, 7, 298–311.
- Meloy, T.P., 1977. Fast Fourier transform applied to shape analysis of particle silhouettes to obtain morphological data. *Powder Technology*, 17, 27-35.
- Meyerhof G.G., Hanna A.M. 1978. Ultimate bearing capacity of foundations on layered soil under inclined load. *Can Geotech J* 15:4
- Meyerhof, G. G., 1963. “Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16–26.
- Meyerhof, G.G., 1951. *The ultimate bearing capacity of foundations*, Geotechnique. (Book)
- Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p 577.
- Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M., Toki, S., 1997. Physical characteristics of sands with different primary properties. *Soils and Foundation*, 37 (3), 53-64.
- 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.
- Mora, C.F. , Kwan, A.K.H., Chan, H.C., 1998. Particle Size Distribution Analysis Of Coarse Aggregate Using Digital Image Processing. *Cement and Concrete Research*,, 28 (6), 921–932.

- Naderi, E., Hataf, N., (2014). Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes* 24: 3: 191-200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.010>.
- Önalp, A., 2002. *Geoteknik Bilgisi 1, Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekanığı*. Birsen Yayınevi, 1. Baskı, İstanbul.
- Pentland, A., 1927. A method of measuring the angularity of sands. *Roy. Soc. Canada Proc. Trans. (Ser. 3)*, 21, xciii.
- Pettijohn, F.J., 1949. *Sedimentary Rocks*. Harper and Brothers, New York, 526 pp.
- Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *J. Sed. Petrol.*, 23, 117–119.
- Powers, M.C., 1982. Comparison charts for estimating roundness and sphericity. AGI Data Sheets, American Geological Institute, Alexandria, Va.
- Pryor, W.A., 1971. Grain shape. In: *Procedures in Sedimentary Petrology* (Ed. R.E. Carver), pp. 131–150. Wiley, New York.
- Pye, W., Pye, M., 1943. Sphericity determination of pebbles and sand grains. *J. Sed. Petrol.*, 13, 28–34.
- Quiroga, P.N., Fowler, D.W., 2004. The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete. Research Report ICAR 104-1F, The University of Texas at Austin.
- Rashid, A.S.A., Black, J.A., Hong Kueh, A.B., and Md Noor, N., 2015. Behavior of weak soils reinforced with soil cement columns formed by the deep mixing method: Rigid and flexible footings. *Measurement*. 68, 62–279
- Riley, N.A., 1941. Projection sphericity. *J. Sed. Petrol.*, 11, 94–97.
- Rittenhouse, G., 1943. A visual method of estimating two dimensional sphericity. *J. Sed. Petrol.*, 13, 79–81.
- Russell, R.D., Taylor, R.E., 1937. Roundness and shape of Mississippi River sands. *J. Geol.*, 45, 225–267.
- Schwarcz, H. P., Shane, K. C., 1969, Measurement of particle shape by Fourier analysis: *Sedimentology*, 13 (3/4), 213–231.
- Shimobe, S., Moroto, N., 1995. A new classification chart for sand liquefaction, *Earthquake Geotechnical Engineering*, K. Ishihara (ed.), Balkema, pp. 315-320.
- Sneed, E.D., Folk, R.L., 1958. Pebbles in the Lower Colorado River, Texas: a study in particle morphogenesis. *J. Geol.*, 66, 114–150.
- Swan, B., 1974. Measures of particle roundness: a note. *J. Sedim. Petrol.* 572-577.
- Tadao, E., 2016. Effects of grading and particle characteristics on small strain properties of granular materials. *Soils and Foundations*, 56, 745-750.
- Takada, N., 1993. Mikasa's Direct Shear Apparatus, Test Procedures and Results. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 16 (3), 314-322.
- Teller, J.T., 1976. Equantcy versus sphericity. *Sedimentology*, 23, 427–428.
- Terzaghi, K., 1925. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Deuticke, Vienna.
- Thomas, M.C., Wiltshire, R.J., Williams, A.T., 1995. The use of Fourier descriptors in the classification of particle shape. *Sedimentology*, 42, 635-645.
- Tickell, F.G., 1931. *The Examination of Fragmental Rocks*. Stanford University Press, Stanford, 129 pp.

- Toyosawa.Y., Itoh. K, Kikkawa.N, J.Yang.J., Liu.F., 2012. Influence of model footing diameter and embedded depth on particle size effect in centrifugal bearing capacity tests. *Soils and Foundations*. 3;53(2):349–356
- Uzuner B.A., Temel zemin mekaniği, Derya Kitabevi Trabzon, 2007
- Vesic, A. S., 1973. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the soil mechanics and foundations division, American Society of civil engineers*, 99, (1), 45-73.
- Vesic, A.S., 1975. Bearing capacity of shallow foundations.
- Wadell, H., 1932. Volume, shape, and roundness of rock particles. *J. Geol.*, 40, 443–451.
- Wadell, H., 1933. Sphericity and roundness of rock particles. *J. Geol.*, 41, 310–331.
- Wadell, H., 1935. Volume, shape, and roundness of quartz particles. *J. Geol.*, 43, 250–280.
- Wentworth, C.K., 1919. A laboratory and field study of cobble abrasion. *J. Geol.*, 27, 507–521.
- Wentworth, C.K., 1922a. The shapes of beach pebbles. *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 131-C, 75–83.
- Wentworth, C.K., 1922b. A method of measuring and plotting the shapes of pebbles. In: *The Shapes of Pebbles*. *US Geol. Surv. Bull.*, 730-C, 91–102.
- Wentworth, C.K., 1922c. A field study of the shapes of river pebbles. In: *The Shapes of Pebbles*. *Bull. US Geol. Surv.*, 730-C, 103–114.
- Wenzel, R.N., 1949. Surface Roughness and Contact Angle. *Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 53, 1466-1467.
- Whalley, W.B., 1972. The description and measurement of sedimentary particles and the concept of form. *J. Sed. Petrol.*, 42, 961–965.
- White, D.J., Take, W.A., Bolton, M.D., 2001. Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis. *International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. 997–1002.
- Wu, P.K., Matsushima, K., Tatsuoka, F., 2008. Effects of Specimen Size and Some Other Factors on the Strength and Deformation of Granular Soil in Direct Shear Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 31 (1), 1-20.
- Yasin, S. J. M., Umetsu, K., Tatsuoka, F., Arthur, J. R. F., Dunstan, T., 1999. Plane strain strength and deformation of sands affected by batch variations in two different types of apparatus. *Geotech. Test. J.*, 22 (1), 80–100.
- Yoo. C., 2001. Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope. *Geotextiles and Geomembranes* 19 279–298. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00009-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00009-7)
- Youd, T.L., 1973. Factors controlling maximum and minimum densities of sands. *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils*, ASTM STP 523. American Society for Testing and Materials, 98-112.
- Yu, Z.Q., Chow, P.S., Tan, R.B.H., 2007. Quantification of particle morphology by boundary Fourier transform and generic Fourier transform. *Chemical Engineering Science*, 62(14), 3777-3786.
- Zingg, T., 1935. Beitrag zur schotteranalyse. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 15, 39–140.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İran'ın Tebriz şehrinde doğdu. Babasının işlerinden dolayı İran'ın farklı şehirlerinde ilkokul, ortaokul ve liseyi bitirdi. 2000 yılında girdiği Tebriz İslamic Azad Üniversitesi, İnşaat mühendisliği Bölümünden 2005 yılında mezun oldu. 2009 yılında Zanjaan İslamic Azad Üniversitesi Geoteknik Anabilim dalından yüksek lisansını tamamladı. 2011-2012 Öğretim yılında Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora başlandı.

