



**GRANÜLER ZEMİNLERİN YIĞILMA
VE KAYMA MUKAVEMETİ AÇILARININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Muraddin DURSUNOV

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Prof. Dr. Suat AKBULUT**

2016

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GRANÜLER ZEMİNLERİN YIĞILMA VE KAYMA
MUKAVEMETİ AÇILARININ DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

Muraddin DURSUNOV

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2016**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

GRANÜLER ZEMİNLERİN YIĞILMA VE KAYMA MUKAVEMETİ
AÇILARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Suat AKBULUT danışmanlığında, Muraddin DURSUNOV tarafından hazırlanan bu çalışma 27/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (...../.....) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Suat AKBULUT

İmza :

Üye : Doç. Dr. S. Banu İKİZLER

İmza :

Üye : Doç. Dr. Seracettin ARASAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 14.....07...../2016 tarih ve 28.../...17..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRANÜLER ZEMİNLERİN YIĞILMA VE KAYMA MUKAVEMETİ AÇILARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Muraddin DURSUNOV

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

Danışman: Prof. Dr. Suat AKBULUT

Granüler zemin ve malzemeler, ince taneli zeminler ile karşılaştırıldığında rölatif olarak yüksek dayanımlı olmaları, suyu hızlı drene edebilmeleri ve oturma miktarlarının az olmasından dolayı dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Bu malzemelerin en önemli kullanım alanları, mekanik olarak sıkıştırılmış toprak duvarlar ve güçlendirilmiş zemin şevleridir. Granüler zeminlerin yığılma açısı, kumların yığın halinde göçmeden durabildiği açı değeri olduğu için bilinmesi önemlidir. Bu açı, yığını teşkil eden koni kenarının yatay düzlemle yaptığı açının ölçüm değeridir.

Bu çalışma kapsamında, farklı boyutlardaki granüler zeminler üç farklı yuvarlaklık seviyesinde hazırlanarak deneylerde kullanılmıştır. Zeminlerin yuvarlaklık seviyeleri köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak olacak şekilde Los Angeles aleti kullanılarak hazırlanmıştır. Bu numunelerin granülometri eğrileri çizilerek indeks özellikleri belirlenmiştir. Köşeli, yuvarlak ve yarı yuvarlak haline getirilen zeminlerin yığılma açıları ASTM C1444 ve Santamarina and Cho (2001) yöntemleriyle belirlenmiştir. Ayrıca farklı rölatif sıklıklarda kesme kutusu deneyleri yapılarak kayma mukavemeti açıları da belirlenmiştir. İlâveten granüler kum zemin numunelere, çeşitli yüzdelerde, propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar katılarak, katkıların yığılma açılarına ve kayma mukavemeti açılarına olan etkisi araştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda hem kayma mukavemeti açılarının (ϕ), hem de yığılma açılarının (θ), kumların tane çapları 0,30 mm'den 4,75 mm'ye gidildikçe arttığı köşeli kumdan yuvarlak kuma gidildikçe de bu değerlerin azaldığı görülmüştür. ASTM C 1444 yöntemine göre belirlenen yığılma açısı değerleri, Santamarina and Cho yöntemine göre belirlenen yığılma açısı değerlerinden daha yüksek olarak bulunmuştur.

Katkılı kumlarda genel olarak kumların tane boyutları arttıkça yığılma ve kayma mukavemeti açılarında artış görülmüştür. İlâveten kayma mukavemeti açısı değerlerinin, katkılı kumlarda katkısız kumlara göre daha düşük değerler aldığı belirlenmiştir.

2016, 87 sayfa

Anahtar Kelimeler: kayma mukavemeti açısı, granüler zemin, yığılma açısı, yuvarlaklık.

ABSTRACT

MS Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INTERNAL FRICTION ANGLE AND ANGLE OF REPOSE OF GRANULAR SOILS

Muraddin DURSUNOV

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

Supervisor: Prof. Dr. Suat AKBULUT

Because of high resistant, faster drainage of water and less settlement of granular soils and materials in comparing with fine particle soils, they are used as filling materials. The most important usages of these materials are mechanical compacted soil walls and fortified soil slopes. Angle of repose of granular soils is important for knowing the angle of sand at bulky condition that stay stable without collapsing. This angle is the amount of angle of cone stack edge with the horizontal plane.

In the context of this study, granular soils have been used by preparing in different dimensions at three different roundness groups. Roundness group of soil have been prepared by using Los Angeles machine at three angular, rounded and well-rounded groups. Index properties of these samples have been founded by drawing granulometry of soil. Angle of repose of angular, rounded and well-rounded soils has been found by ASTM C 1444 and Santamarina and Cho (2001) methods. Also, by doing direct shear strength tests friction angles have been founded at different relative densities. Additionally, effect of adding propylene grains, rubber powder and polypropylene particles to soil samples on angle of repose and shear strength has been investigated.

At the end of studies, it was found that friction angles (ϕ) and angle of repose increased by increasing the dimension of soil from 0.30 mm to 4.75 mm and decreasing of these two parameters by changing angular soil to well-rounded soils. It found that angle of repose earned by ASTM C 1444 method is more than the angle of reposed earned by Santamarina and Cho method.

On sand with additives, generally by increasing particle dimensions there was an increase on both angle of repose and friction angle, and amount of friction angles was less than soils without additives.

2016, 87 pages

Keywords: Internal friction angle, granular soils, angle of repose, roundness.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince yardımını ve fikirlerini esirgemeyen tez danıőmanım deęerli hocam Sayın Prof. Dr. Suat AKBULUT'a teőekkűrlerimi sunarım.

Ayrıca bu alıőmamda emeği geen değerli hocalarım Sayın Yrd. Do. Dr. Samet ÇELİK'e, Sayın Do. Dr. Seracettin ARASAN'a ve Sayın Yrd. Dr. Zeynep Neőe KURT ALBAYRAK'a teőekkűrlerimi sunarım.

Çalıőmam sűresince emeęi geçen Atatűrk Ūniversitesi İnőaat Műhendislięi Geoteknik laboratuvarındaki Doktora Őęrencileri Babak KARIMI GHALEHJOUGH'ye ve Payam MAJEDİ'ye teőekkűrlerimi sunarım.

Gűsterdikleri sabır ve verdikleri her tűrlű destek için deęerli **AİLEME** ve arkadaőlarıma teőekkűr ederim.

Muraddin DURSUNOV

Haziran, 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Özetleri.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. Taneli Zeminler ve Özellikleri	8
2.2. Yığılma Açısı	10
2.3. Tanelerin Şekilsel Özellikleri.....	13
2.4. Zeminlerin Kayma Mukavemeti	14
2.4.1. Granüler zeminlerin kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi.....	15
2.5. Yuvarlaklık.....	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Materyal.....	24
3.1.1. Kalker	24
3.1.2. Propilen taneler.....	26
3.1.3. Lastik tozu	27
3.1.4. Polipropilen parçacıklar	28
3.2. Yöntem	30
3.2.1. Los angeles deney aleti ile malzemelerin şekilsel özelliklerinin değiştirilmesi.....	30
3.2.2. Elek analizi deneyi ve zeminlerin sınıflandırılması	32
3.2.3. Zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesi.....	33
3.2.4. Yığılma açılarının belirlenmesi	34
3.2.5. Kesme kutusu deneyi.....	43
3.2.6. Katkılı numunelerin hazırlanması	44

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	47
4.1. Katkısız Kumların Tane Çapı Dağılım Eğrileri ve Sınıflandırılması.....	47
4.2. Kullanılan Zeminlerin İndeks Özellikleri.....	48
4.3. Katkısız Kumların Yığılma Açılarının Belirlenmesi.....	48
4.3.1. ASTM C 1444 yöntemine göre katkısız kumların yığılma açılarının belirlenmesi.....	48
4.3.1.a. ASTM C 1444'e göre köşeli katkısız kumların yığılma açılarının belirlenmesi.....	49
4.3.1.b. ASTM C 1444'e göre yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi.....	50
4.3.1.c. ASTM C 1444'e göre yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi....	51
4.3.2. Santamarina and Cho yöntemine göre katkısız kumların yığılma açılarının belirlenmesi.....	52
4.3.2.a. Santamarina and Cho yöntemine göre köşeli kumların yığılma açılarının belirlenmesi.....	53
4.3.2.b. Santamarina and Cho yöntemi ile yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi.....	54
4.3.2.c. Santamarina and Cho yöntemi ile yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi.....	55
4.3.3. ASTM C 1444 ve Santamarina and Cho yöntemlerinden elde edilen yığılma açılarının karşılaştırılması.....	56
4.4. Katkılı Kumların Yığılma Açılarının Belirlenmesi.....	57
4.4.1. Propilen taneler katkıli kum numuneler üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri.....	57
4.4.2. Lastik tozu katkıli kum numuneler üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri..	60
4.4.3. Polipropilen parçacıklar katkıli kum numuneler üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri	62
4.5. Katkısız Kumların Kesme Kutusu Deneylerinin Yapılması	63
4.5.1. Kesme kutusu deneyleri ile katkısız kumların (0,30 mm ile 4,75 mm arası) kayma mukavemeti açılarının (ϕ) belirlenmesi.....	64
4.6. Katkılı Kumların Kesme Kutusu Deneylerinin Yapılması.....	70

4.6.1. Propilen taneler katkılı kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneyleri.....	70
4.6.2. Lastik tozu katkılı kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneyleri.....	70
4.6.3. Propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar %2 oranda katkılı, 0,30-1,18 mm, 1,40-2,36 mm ve 3,35-4,75 mm arasında olan yarı yuvarlak kum numuneler üzerinde rölatif sıkılık yüzde 70’te yapılan kesme kutusu deneyleri.....	71
5. SONUÇLAR.....	73
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	78
EK 1.....	78
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

e_{max}	Maksimum Boşluk Oranı
e_{min}	Minimum Boşluk Oranı
γ_k	Kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmax}	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı
γ_{kmin}	Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı
γ_n	Doğal birim hacim ağırlığı
γ_s	Tane birim hacim ağırlığı
D_{10}	Efektif Çap
D_{30}	Zeminin Yüzde Otuzunun Geçtiği Çap
D_{60}	Zeminin Yüzde Altmışının Geçtiği Çap
D_r	Rölatif sıkılık
G_s	Tane özgül ağırlığı
ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Derneği
c	Kohezyon
C_c	Derecelenme Katsayısı
C_u	Uniformluluk Katsayısı
e	Boşluk Oranı
θ	Malzemenin Yığılma Açısı
σ	Uygulanan normal gerilme
τ_f	Zeminin kayma dayanımı
ϕ	Malzemenin Kayma Mukavemeti Açısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İri taneli zeminlerin tane biçimleri	9
Şekil 2.2. Geoteknik ve yol mühendisliğinde şev (yığılma) açısı ve heyelan oluşumu..	11
Şekil 2.3. Kumların oluşumu ve yığılma açısının gösterimi.....	12
Şekil 2.4. Kumun yığılma açısının gösterimi.....	12
Şekil 2.5. İri taneli zeminlerin şekilleri.....	13
Şekil 2.6. Kesme kutusu deneyinin 3 boyutlu şematik şekli	16
Şekil 2.7. Kesme kutusunun metal halkaları.....	17
Şekil 2.8. Kesme kutusu deneyi.....	17
Şekil 2.9. Kesme kutusu deneyinde gerilmeler.....	18
Şekil 2.10. Kesme kutusu deneyinde c ve ϕ 'nin belirlenmesi.....	19
Şekil 2.11. Aynı kumda sıkı ve gevşek durumlardaki kayma mukavemeti açıları.....	19
Şekil 2.12. Yığın açısı.....	20
Şekil 2.13. Kumlarda kesme deformasyonu - τ ilişkisi	20
Şekil 2.14. Kumlarda kesme deformasyonu–hacim değişimi ilişkisi	21
Şekil 2.15. Yuvarlaklığın şekilsel gösterimi	22
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan kum.....	24
Şekil 3.2. Deneylerde katkı malzemesi olarak kullanılan propilen taneler.....	26
Şekil 3.3. Deneylerde katkı malzemesi olarak kullanılan lastik tozu	27
Şekil 3.4. Propilen'den katalizör vasıtasıyla polipropilen'in elde edilmesi.....	28
Şekil 3.5. Yaklaşık 1-2 mm olarak kesilmiş polipropilen parçacıklar	29
Şekil 3.6. ASTM C131 ve ASTM C535 standartlarına uygun Los Angeles aşındırma test cihazı.....	30
Şekil 3.7. (a) 0 tur, (b) 5000 tur, (c) 10000 tur, (d) 15000 tur, (e) 20000 tur, (f) 25000 tur, (g) 30000 tur, (h) 50000 tur ve (i) 100000 tur	32
Şekil 3.8. Deney düzeneği	35
Şekil 3.9. ASTM C1444'de göre kum üzerinde yığılma açısını belirlemek için yapılan deney	35
Şekil 3.10. Kullanılan huniler	36
Şekil 3.11. Chik and Vallejo (2005) çalışmalarında kullandıkları huni	37

Şekil 3.12. (a) 0,30-1,18 mm tane çapına sahip yuvarlak malzeme (b) Deney düzeneği hazırlanması	38
Şekil 3.13. 0,30-1,18 mm yuvarlak malzeme 1. huni ile deney	39
Şekil 3.14. 2. huni ile 1,40-2,36 arası malzemenin deney düzeneği	39
Şekil 3.15. (a) ve (b) 1,40 – 2,36 mm arası yuvarlak malzemenin yığılma açısının belirlenmesi	40
Şekil 3.16. Santamarina and Cho yöntemi için hazırlanmış deney düzeneği	41
Şekil 3.17. Santamarina and Cho yöntemine göre deney yapılışı	42
Şekil 3.18. Santamarina and Cho Yöntemi'ne göre hazırlanmış olan deney düzeneği ..	42
Şekil 3.19. Santamarina and Cho Yöntemi'ne göre deneyin yapılışı	42
Şekil 3.20. Malzemenin yığılma açısının okunması (1,18 mm ile 1,40 mm arası tane çapına sahip malzeme)	43
Şekil 3.21. Deneylerde kullanılan kesme kutusu aleti	44
Şekil 3.22. (a) polipropilen parçacıklar katkılı kum, (b) propilen taneler katkılı kum, (c) lastik tozu katkılı kumların yığılma açısı deneyi yapılması	44
Şekil 3.23. (a) polipropilen katkılı kum, (b) propilen taneler katkılı kum, (c) lastik tozu katkılı kumların kesme kutusu deneyi yapılması	45
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kumların tane çapı dağılım eğrileri	47
Şekil 4.2. Köşeli kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi	49
Şekil 4.3. Yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi	50
Şekil 4.4. Yuvarlak kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi	51
Şekil 4.5. Köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi	52
Şekil 4.6. Santamarina and Cho yöntemine göre köşeli malzemelerin yığılma açılarının tane çapına bağlı olarak değişimi	53
Şekil 4.7. Santamarina and Cho yöntemine göre yarı yuvarlak malzemelerin yığılma açılarının tane çapına bağlı olarak değişimi	55
Şekil 4.8. Santamarina and Cho yöntemine göre yuvarlak malzemelerin yığılma açılarının tane çapına bağlı olarak değişimi	56

Şekil 4.9. ASTM C1444 ve Santamarina and Cho yöntemlerinden elde edilen yığılma açılarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.10. Propilen taneler' e ait granülometri eğrisi	58
Şekil 4.11. %1, %2 ve %5 oranlarda propilen bile ile katkıli yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının değişimi	59
Şekil 4.12. Lastik tozuna ait granülometri eğrisi	60
Şekil 4.13. %1, %2 ve %5 oranlarında lastik tozu katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine etkisinin grafiksel gösterimi	61
Şekil 4.14. Polipropilen'e ait granülometri eğrisi.....	62
Şekil 4.15. %1, %2 ve %5 oranlarında polipropilen parçacıklar katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine etkisinin grafiksel gösterimi	63
Şekil 4.16. Köşeli 0,30-1,18 mm arasında olan kumun deformasyon-kayma direnci grafiği	64
Şekil 4.17. Kayma mukavemeti açısının belirgin olduğu Mohr-Coulomb göçme hipotezi grafiği	65
Şekil 4.18. $D_r = \%30$ 'a göre kayma mukavemeti ve yığılma açılarının kıyaslanması	66
Şekil 4.19. $D_r = \%50$ 'ye göre kayma mukavemeti ve yığılma açılarının kıyaslanması ...	67
Şekil 4.20. $D_r = \%70$ 'e göre kayma mukavemeti ve yığılma açılarının kıyaslanması	68
Şekil 4.21. $D_r = \%30$ 'a göre katkısız kumların kayma mukavemeti açılarının grafikleri	69
Şekil 4.22. $D_r = \%50$ 'ye göre katkısız kumların kayma mukavemeti açılarının grafikleri	69
Şekil 4.23. $D_r = \%70$ 'e göre katkısız kumların kayma mukavemeti açılarının grafikleri	70
Şekil 4.24. Propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar katkıları yarı yuvarlak kumlara %2 oranlarda eklenerek yüzde 70 rölatif sıklıkta ($D_r = \%70$), kayma mukavemeti açılarının grafiksel gösterimi	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yuvarlaklık sayısal değerleri	22
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan kumların yuvarlaklık seviyelerine göre malzeme aralıkları	25
Çizelge 3.2. Propilen'in özellikleri	27
Çizelge 3.3. Polipropilene ait bazı genel fiziksel özellikler.....	29
Çizelge 3.5. Kum ve çakılların bağıl (rölatif) sıklıkları.....	33
Çizelge 3.6. Malzeme boyutlarına göre kullanılacak hunilerin özellikleri.....	36
Çizelge 3.7. Yarı yuvarlak kumlara (0,30-4,75 mm arası) üç farklı katkı katılarak (polipropilen, propilen taneler, lastik tozu), üç farklı oranlarda (%1, %2, %5) yığılma açılarının ASTM C1444 yöntemine göre belirlenmiştir	45
Çizelge 3.8. Katkıların, zemin tane aralığına göre katılan katkı oranları	46
Çizelge 4.1. 0,30-1,18 mm köşeli kuma ait indeks özellikleri.....	48
Çizelge 4.2. Köşeli kumlar üzerinde yapılan yığılma deneyi sonuçları (ASTM C1444)	49
Çizelge 4.3. Yarı yuvarlak kumlar üzerinde yapılan yığılma deneyi sonuçları.....	50
Çizelge 4.4. Yuvarlak kumlar üzerinde yapılan yığılma deneyi sonuçları	51
Çizelge 4.5. Santamarina and Cho yöntemi ile köşeli malzemelerin yığılma açılarının sonuçları.....	53
Çizelge 4.6. Santamarina and Cho yöntemi ile yarı yuvarlak malzemelerin yığılma açılarının sonuçları	54
Çizelge 4.7. Santamarina and Cho yöntemi ile yuvarlak malzemelerin yığılma açıları	55
Çizelge 4.8. Propilen taneler %1, %2 ve %5 oranlarda katkılı kumların yığılma açıları sonuçları.....	59
Çizelge 4.9. %1, %2 ve %5 oranlarında lastik tozu katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine olan etkisi.....	61
Çizelge 4.10. %1, %2 ve %5 oranlarında polipropilen katkılı yarı yuvarlak kumların yığılma açıları sonuçları.....	62

Çizelge 4.11. Kumların (köşeli, yarı yuvarlak, yuvarlak) kayma mukavemeti açıları (ϕ).....	66
Çizelge 4.12. Propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar katkıları yarı yuvarlak kumlara %2 oranında eklenerek yüzde 70 rölatif sıklıkta ($D_r=\%70$), kayma mukavemeti açılarının sonuçları.....	71



1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının temelleri vasıtası ile zemine iletildiği yüklerin emniyetle taşınabilmesi için zeminin yeterli mukavemete sahip olması gerekmektedir. Ayrıca iletilen bu yükler altında zeminde meydana gelebilecek oturmaların da müsaade edilebilir sınırlar içerisinde kalması gerekir. Bu koşulların tam anlamıyla değerlendirilebilmesi için her mühendislik yapısının zemin özelliklerinin o yapıya özel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda her yapı temelinin oturacağı zemin için ayrı, yeterli ve doğru zemin etütleri yapılmalıdır.

Granüler zemin ve malzemeler, ince taneli zeminler ile karşılaştırıldığında rölatif olarak yüksek dayanımlı olmaları, suyu hızlı drene edebilmeleri ve oturma miktarlarının küçük olmasından dolayı yapısal dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Bu malzemelerin en önemli kullanım alanları, mekanik olarak sıkıştırılmış toprak duvarlar ve güçlendirilmiş zemin şevleridir. Bu tür uygulamalarda malzemenin kayma mukavemeti açısı (ϕ) en önemli özelliktir. Kumlar bu tür uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar (Arasan 2011).

Granüler zeminlerin yığılma açısı, yığın halinde olan malzemenin kaymadan durabildiği açı değeri olarak tanımlanmaktadır. Yuvarlaktan köşeliye kadar değişik yuvarlaklık özellikleri gösteren zeminlerin mühendislik özellikleri değişiklikler göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, 0,30 mm-4,75 mm aralığındaki granüler kum zeminlerin yığılma ve kayma mukavemeti açıları araştırılmıştır. Tanelerin yuvarlaklığının bu açılara etkisini inceleyebilmek için deneyler üç farklı yuvarlaklık seviyesinde (köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak) yapılmıştır. Ayrıca üç farklı katkı (propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar) katılarak katkılı kum numuneler elde edilmiş ve bu numuneler üzerinde ASTM C1444'e (kuru yöntem) göre yığılma açıları ve kayma mukavemeti açıları bulunmuştur.

1.1. Kaynak Özetleri

Literatürde, granüler zeminlerin yığılma ve kayma mukavemeti açıları ile birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı granüler zemin tanelerinin şekilsel özellikleri ile ilgili olup, literatür özeti aşağıda sunulmuştur.

Ahlich (1996) çalışmasında bitümlü sıcak karışım (BSK) ile agregaların asfalt kaplamaların performansı üzerindeki özelliklerinin etkisini araştırmıştır. Çalışmada, sıcak asfalt karışımının toplam hacminin yaklaşık yüzde 85'i agrega olduğu için agregaların özelliklerinin asfaltın özelliklerine büyük etkisi olduğundan bahsetmiştir. Ağır taşıtların tekerlek izinden dolayı asfaltta oluşan ezilmeyi (çökme) önlemek için böyle bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmada, agrega parçacıklarının şekil ve doku özelliklerinin köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak olmasının BSK performansına ve sürtünme kuvvetine önemli bir etkisi olduğu söylenmiştir. Ayrıca kaba ve köşeli şekilsel özelliğe sahip zeminlerden üretilen asfaltların, yuvarlak zeminlerden üretilen asfalta göre daha dayanıklı olduğu belirtilmiştir.

Zhou *et al.* (2002) çalışmalarında zemin tanelerinin özelliklerini ve o özelliklerin yığılma açısına olan etkisini incelemişlerdir. Deneylerinde zemin tanesi olarak çapları 0,55 mm, 1 mm, 2 mm, 5 mm ve 10 mm olan cam taneler kullanılmıştır. Tanelerin yoğunluğu 2500 kg/m^3 'tür. Yaptıkları deneyler sonucunda yığılma açısının tanelerin büyüklüğü, kayma ve taneler arası sürtünmelerinden etkilendiğini göstermişlerdir. Ayrıca yığılma açısına etki etmeyen faktörlerin ise: yoğunluk, *poisson* oranı ve *young* modülü olduğunu belirlemişlerdir. Buna ek olarak kayma ve yuvarlanma sürtünmesi arttıkça ve tane boyutu büyüdükçe yığılma açısının da arttığı ifade edilmiştir.

Chik and Vallejo (2005) tarafından yapılan çalışmalarında granüler malzemelerin yığılma açılarını ASTM C1444 standardına göre belirlemişlerdir. Çalışmada huniden dökülen malzemenin, döküldüğü taban camdan ise çok yayıldığı dolayısıyla yığılma açısının düşük olduğu görülmüş, malzeme pürüzlü taş tabana dökülürse yayılmanın az bundan dolayı da yığılma açısının yüksek olduğu belirtilmiştir. Çalışmada tane boyutu

ortalama 1,16 mm olan kaba taneli zemin ve ortalama boyutu 0,1 mm olan ince taneli zemin kullanılmıştır. Huni altına koyulan plakanın pürüzlülüğünün yığılma açısına olan etkisini incelemiştir. Pürüzlü plakada kaba taneli malzemenin üstte kalıp dağılmakta olduğu, ince taneli malzemenin ise üste çıkmadan yayılmaya başladığı gözlenmiştir. Fakat pürüzsüz plakada her iki zeminde aynı şekilde üste çıkmadan yayıldığı yapılan çalışmada belirtilmiştir.

Liu *et al.* (2005) çalışmalarında 3 mm ve 5 mm çaplara sahip cam tanelerin yığılma açılarını, üç farklı çapa sahip (200 mm, 300 mm, 500 mm) davullar kullanılarak incelemiştir. Davulun içine malzeme yerleştirilerek, davul yavaşça döndürülmüş ve iki farklı yığılma açısı değeri ölçülmüştür. Birincisi yığılma açısı, malzeme çökmeden önce ölçülmüştür. Daha sonra davulun yavaşça dönmesiyle malzeme heyelan gibi çökmeye başlamış ve bu şekilde ikinci yığılma açısı değeri ölçülmüştür. Çöktükten sonraki malzemenin açısı daha ilk yığılma açısı değerinden daha düşük olduğu belirtilmiştir. Davulun dönme hızı arttıkça malzemenin heyelan yapmasına benzer şekilde çökmesinin de döndürme hızıyla orantılı olarak arttığı ifade edilmiştir. Davulun dönme hızının iyice artmasıyla malzemede çöküş sürekli olmaya başlamış ve bundan dolayı da yığılma açısı değeri sabitlenmiştir. Sonuç olarak bu açılardan yola çıkılarak yığılma açılarını bulmak için bazı eşitlikler öne sürülmüştür.

Ghazavi *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmada yığılma açısı ile kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu çalışmada özel bir alet kullanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kumların yığılma açıları belirlenmiş ardından kesme kutusu deneyleri ile kayma mukavemeti açıları bulunmuştur. Sonuç olarak, deneyler kum gevşek halde iken yapıldığında yığılma açısı ve sürtünme açısının hemen hemen aynı olduğu öne sürülmüştür.

Liu and Zhou (2008) çalışmalarında, farklı tane boyutlarına sahip granüler zeminlerin yığılma açıları hem deneysel olarak hemde sayısal yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Sayısal yöntem olarak, Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM)

kullanılmıştır. Yapılan deneyler simüle edilmiştir. Simüle sonucunda, parçacıkların yığılma açılarının, tane büyüklüğü ve sürtünme katsayısı ile arttığı ileri sürülmüştür.

Arasan (2011) doktora tez çalışmasında granüler zeminlerin geoteknik özellikleri (tane boyu dağılımı, maksimum ve minimum boşluk oranları, rölatif sıklık, kayma mukavemeti açısı v.b.), bilgisayar ve görüntüleme teknolojileri kullanılarak görüntü analizi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, bazalt ve kum zeminler ile demir tanelerin (aşındırıcı ve rulman taneleri) görüntüleri analiz edilerek şekilsel özellikleri (yuvarlaklık, küresellik, köşelilik, konvekslik, fraktal boyut v.b.) hesaplanmış ve tane şeklinin zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, tane şeklinin granüler zemin özelliklerine önemli etkisinin olduğu ve tanelerin yuvarlaklığının artması veya fraktal boyutunun azalmasıyla maksimum ve minimum boşluk oranları ve kayma mukavemeti açısının azaldığı belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal analizler neticesinde, zeminlerin boşluk oranlarına en etken parametrelerin sırasıyla şekilsel özellikler, tane boyutu ve dağılım özelliklerinin (üniformaluluk veya derecelenme katsayısı) olduğu söylenebilir. Kayma mukavemeti açısı için ise bu sıranın, rölatif sıklık, şekilsel özellikler, dağılım özellikleri ve tane boyutu olduğu söylenebilir. Ayrıca, bir örnek uygulama ile zeminlerin birçok geoteknik özelliğinin (endeks özellikleri, tane boyu dağılımı, maksimum ve minimum boşluk oranları ve kayma mukavemeti açısının) deney yapmadan yeterli bir doğrulukta tahmin edilebildiği gösterilmiştir.

Arasan and Yener (2011)' de yaptıkları çalışmada granüler zemin davranışında önemli olan bazı şekilsel özellikler ile yığılma açısı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Şekilsel özelliklerden yuvarlaklık, küresellik, köşelilik, konvekslik ve fraktal boyut görüntü analizi ile belirlenmiştir. Yığılma açısının devrilen kutu yöntemi ile belirlenen bu çalışmada tane şekilsel özellikleri ile yığılma açısı arasında belirleme katsayısının yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Liu (2011) tarafından yapılan tez çalışmasında granüler homojen zeminlerin yığılma açıları ve sonsuz şev stabilite analizi üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada granüler zeminlerin yığılma açısı, farklı çap, boy ve pürüzsüzlük seviyesindeki silindirler kullanılarak incelenmiştir. Bu silindirler, homojen kum ve çakıl örnekleri ve ikisinin karışımını içermektedir. Sonuç olarak silindirler iki farklı hızda kaldırıldığı zaman, granüler zeminlerin konik bir yığın oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca laboratuvar deneylerinden, aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

- Granüler malzemelerin yığılma açıları, tanelerin üzerinde durduğu plakanın pürüzlülüğüne bağlıdır. Deneylerde plakanın pürüzlülüğü arttıkça yığılma açısında arttığı belirlenmiştir.
- Silindirlerin kaldırılma hızları, düşük hızlı (2-3 cm/sn) ve yüksek hızlı (7-8 cm/sn) değerler arasında değişmektedir. Plakanın pürüzlülüğünden bağımsız olarak, silindir yüksek hızda kaldırıldığı zaman yığılma açısının daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.
- Silindirin içerdiği malzeme yüzdesi (doluluk oranı) arttıkça yığılma açısının azaldığı belirlenmiştir.

Rouse (2014) tarafından yapılan çalışmada yığılma açısının belirlenmesi için altı farklı yöntem kullanmış ve bu yöntemler birbirileri ile kıyaslanmıştır. Deneyler sonucu en yüksek yığılma açısı değerini veren yöntemin ASTM C1444 standardına göre yapılan deneylerin olduğu belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemler, ASTM C1444, Scoop Deposition, Cornforth Methods, Cone Lifting, Santamarina ve Cho yöntemleridir. Yığılma açısının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan Scoop Deposition yönteminde keçe ile malzeme tabaka tabaka cam silindirine içine doldurulur ve cam silindir kaldırıldıktan sonra oluşan koni şeklindeki malzemenin yığılma açısı ölçülür. Bir diğer yöntem olan Cornforth yöntemi, Scoop Deposition yöntemine benzerdir. Farklı yöntemlerle yaklaşık aynı değerler bulunmuştur. Cone Lifting yönteminde huni ters çevrilerek malzeme dar kısmından dökülür sonra huni kaldırılarak altta oluşan koni şeklindeki malzemenin yığılma açısı bulunur. Santamarina and Cho yönteminde cam silindir içine 1 litre su koyulur ve zemin numunesi su içerisine koyulduktan sonra 60 derece çevrilir daha sonra eski orijinal (dikey) haline

getirilir. Cam silindir içinde oluşan zeminin yığılma açısı ölçülür. Eğer Santamarina and Cho yönteminde malzeme eski haline geri gelerek bir açı belirmez ise Cho Yöntemi uygulanır. Cho Yönteminde Santamarina yöntemi ile aynı düzenekte silindirin içine su koyulmadan aynı deney tekrarlanır ve yığılma açısı bulunur.

Chen *et al.* (2015) çalışmalarında simülasyon ile granüler zeminlerin dünya, ay ve marsın yer çekimine göre yığılma açılarını araştırmışlardır. Bu çalışmada granüler malzemelerin temel özelliklerinden biri olan yığılma açısının, malzemenin üzerinde hiçbir etki yokken oluşan maksimum şev açısı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca şev açısının üst kısmında, malzemenin akmaya başladığı, şev açısının alt kısmında ise malzeme hareketinin durduğu ve stabil hale geldiği söylenmiştir. Doğada yığılma açısı genelde pürüzsüz küresel taneler için 25° , pürüzlü köşeli taneler için ise 45° arasında değişkenlik göstermektedir. Çalışmada, gezegenlerin yerçekimi güçlerinin farklı olmasından dolayı, malzemelerin yığılma açılarının farklılıklar gösterebileceğinden bahsedilmiştir.

Derakhshani *et al.* (2015) çalışmalarında Ayrık Elemanlar Metodu (DEM) ile taneli malzemelerin mikroskobik özelliklerini kalibre etmişlerdir. Yuvarlanma ve kayma sürtünme katsayıları granüler malzemenin mikroskobik özellikleri olarak, yığılma açısı gibi makroskopik özellikleri üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Yığılma açısı malzemelerin mikroskopik özelliklerinin farklı kombinasyonları ile ispat edilebilir. Bu nedenle, yığılma açısı, tek başına DEM kalibrasyonu için güvenilir bir kriter olarak kabul edilemez. Dolayısıyla, ikinci makroskopik özellik olarak mikroskobik özelliklerinin kalibrasyonu için yığılma açısı ile birlikte kabul edilir. Bu çalışmada kuvars kum testi, kumun makroskopik özelliklerini ölçmek için kullanılmıştır. Daha sonra DEM tarafından kum saati çeşitli aralıkta yuvarlanma ve kayma sürtünmesi katsayıları için simüle edilmiştir. Yığılma açısı ve malzemenin boşaltma zamanı ve DEM sonuçları arasında yapılan bir karşılaştırma kum parçacıklarının yuvarlanma ve kayma sürtünme katsayıları sırasıyla 0,3 ve 0,52 olduğunu göstermiştir. Çalışmada, kuvars kumlarının tane boyutlarının artmasıyla yığılma açılarının azaldığı ileri sürülmüştür. İlâveten, kuvars tanelerin boyutu arttıkça sürtünme katsayıları ve

yuvarlanma katsayıları da arttığından yığılma açılarının düştüğü görülmüştür. Fakat bu olay kumlarda ters etki yapmaktadır. Kumda tane boyutunun artmasıyla yığılma açıları da artış göstermiştir.

Raei *et al.* (2015) çalışmalarında bünyesinde farklı numunelerin karışık bir şekilde bulunduğu zemin numunesi üzerinde ve farklı boyutlarda kum numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır. Çalışmalarında 20 cm x 350 cm'lik bir kanal içinde tane boyutunun etkisi ve birim hacim ağırlıklarına göre başlangıç hareketlerini incelemişlerdir. Deneyde kullanılan zeminin birim hacim ağırlığı 1.76 gr/cm³, kumun ise 2.66 gr/cm³'tür. Kullanılan kum kohezyonsuzdur (c=0). Sonuç olarak, tane boyutları arttıkça yığılma açılarının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca kumun yığılma açılarının, zeminin yığılma açılarına göre daha düşük olduğundan da bahsedilmiştir.

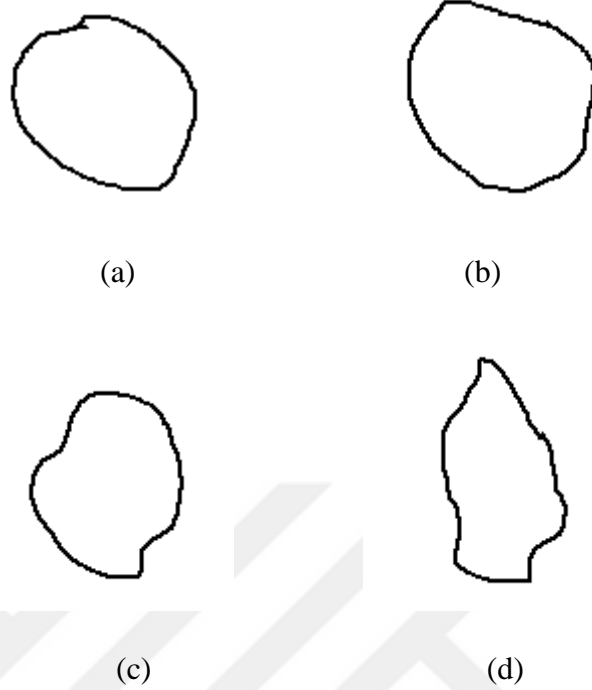
İlaveten, granüler zeminlerin yığılma ve kayma mukavemeti açıları ile ilgili olarak yapılmış olan farklı çalışmalar da vardır (Yang *et al.* 2009; Zhou and Zhang 2009; Pipatpongsa 2013). Literatürde farklı yöntemler kullanılarak malzemelerin yığılma açıları tespit edilmiştir. Yığılma açısının geometrik etkisi Matsuo *et al.* (2014) tarafından çalışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Taneli Zeminler ve Özellikleri

Taneli zeminler diğere bir değişle granüler zeminler olan kum ve çakıl zeminler ile ilgili çalışmalar zemin mekaniğinin başlangıcına kadar dayanır. Coulomb (1776) istinat duvarları üzerinde yaptığı çalışmalarda kaba taneli zeminlerin mukavemet özelliklerini incelemiştir. Geoteknik mühendisliğinin önemli isimlerinden olan Terzaghi (1925) ise taneli zeminleri çok yönlü olarak araştırmıştır. İlerleyen yıllarda birçok araştırmacı bu tür zeminlerin özellikle mukavemet özellikleri konusunda çalışmalar yapmışlardır.

Tabii zeminleri oluşturan taneler kayaların mekanik ve kimyasal ayrışma sonucu küçük parçalara ayrılması ile oluşmaktadır. Taneleri oluşturan kayaların birbirinden farklı minerolojik yapılara sahip olmaları ve ayrışmaya yol açan faktörlerin çok çeşitli olması nedeni ile, tabii zeminler içinde farklı boyutlarda ve biçimlerde taneler yer almaktadır. Kayalar içindeki daha duraylı mineraller ayrışma sonucu iri taneleri meydana getirirken, daha az duraylı mineraller kimyasal ayrışma sonucu bazı ikincil minerallere dönüşmekte ve kırılğan ve plakalı bir yapıya sahip olan bu mineraller çok küçük parçalara ayrılarak zeminlerdeki ince taneleri oluşturmaktadırlar. Dolayısıyla, iri taneli zeminler (kumlar ve çakıllar) ile ince taneli zeminlerin (özellikle killerin) biçimlerinin birbirinden çok farklı oldukları gözlenmektedir. Şekil 2.1’de iri taneli tabii zeminlerde rastlanılan bazı tipik tane biçimleri gösterilmiştir. Bazı taneler aşınma sonucu yuvarlatılmış ve yaklaşık küresel bir biçime kavuşurken (a) bazıları ise köşeli bir biçimde (d) olabilmektedir. Şekil 2.1’de (b) ve (c) de ise yarı yuvarlak ve yarı köşeli olarak tanımlanabilecek tane biçimleri gösterilmiştir (Özaydın 2008).



Şekil 2.1. İri taneli zeminlerin tane biçimleri (Özaydın 2008)

Tanelerin şekilleri, iri taneli zeminlerin mühendislik özellikleri üzerinde en az tane çapı dağılımı kadar etkili olmaktadır. Sedimenter petrologlarca geliştirilen kurallar dâhilinde zemin tanelerinin şekillerini sınıflandırmak mümkündür ancak bu sınıflandırmalar geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılmamaktadır. Zeminlerin görsel olarak sınıflandırmasında sadece niteliksel olarak şeklin belirlenmesi yeterlidir.

Kütlesel taneler ile farklı şekillere (düz, uzun, sivri uçlu ya da pulsu) sahip taneler arasında da bir ayrım yapılabilir. ASTM (2010) D 2488 kütlesel olmayan taneler hakkında bazı bilgiler vermektedir. Mika pulcukları ince tabaka şeklindeki tanelere örnek gösterilebilir, aynı şekilde Ottawa kumunun kütlesel bir şekli vardır. Bu zeminler silindirik içine koyularak bir piston yardımı ile sıkıştırıldıklarında çok farklı davranışlar sergilemektedir. Kütlesel taneli kum en gevşek durumda bile çok zor sıkışırken, mika pulcukları düşük basınçlar altında bile başlangıç hacimlerinin yarısı kadar sıkışabilmektedir. Kumların kayma dayanımlarının belirlenmesinde tane şekli, sürtünme özelliklerinin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir (Holtz and Kovacs 2002).

2.2. Yığılma Açısı

Yığın halinde olan malzemenin kaymadan durabildiği açı değeri yığılma açısı olarak tanımlanmaktadır. Bu açı, yığını teşkil eden koni kenarının yatay düzlemle yaptığı açının ölçüm değeridir (Holtz *et al.* 2015).

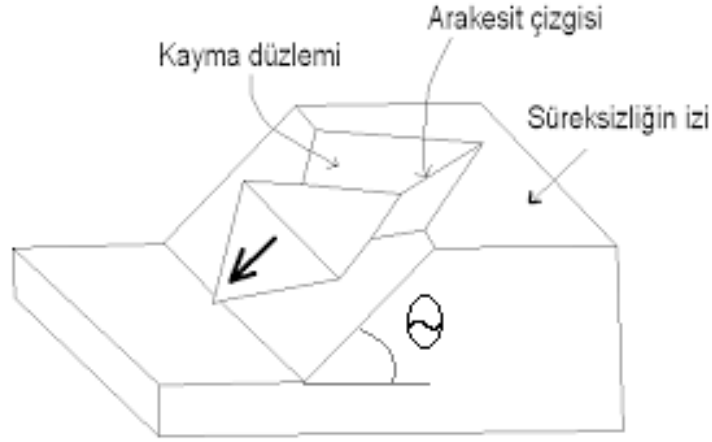
Yığılma açısına bir diğer benzer kavramda şev açısıdır. Bu kavram genellikle geoteknik uygulamalarındaki yol mühendisliğinde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Şev açısı, zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açıdır (Şekil 2.2). Doğal şevlere yamaç denilirken insan eliyle yapılan şevlere yarma veya dolgu şevi denir. Doğal şevin kayma veya göçme hareketine heyelan ve insan eliyle yapılan şevlerin kayma ve/veya göçme hareketine direnç göstermesine de şevin stabilitesi (veya duraylılığı) denir.

Ulaşım yapılarındaki şev göçmeleri başlıca;

- Jeolojik faktörler (şevin topoğrafyası ve geometrisi, tabakaların eğimi, kalınlığı, sürekliliği, zemin oluşumu, vb.)
- Zemin faktörleri (zeminin mekanik özellikleri, gerilmelerin durumu, yeraltı su seviyesi, drenaj tedbirleri, vb.)

gibi sebeplere bağlıdır. Şev stabilitesinin bozulması yani şevdeki zemin kitlesinin dışarı ve aşağı doğru kayması veya göçmesi konkav bir eğri üzerinde yavaşça veya aniden hiçbir belirti vermeden veya kısmen vererek olabilir.

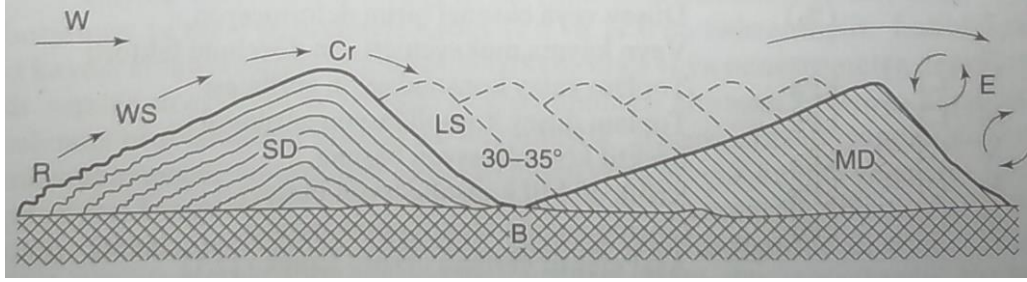
Gün geçtikçe ulaşım yapılarının standartları artarak yüksek dolguların ve yarmaların yapılmasını gerektirmekte ve bununla birlikte şevlerde stabilite problemleri meydana gelmektedir. Ulaşımın güvenliği ve sürekli hizmet verebilir durumda kalması için şevlerin stabilite problemleri proje aşamasında çok iyi etüd edilerek dizayn edilmelidir. (Tunç 2002). Bu nedenlerden dolayı zeminin yığılma açıları ve davranışları inşaat mühendisliğinde önemlidir.



Şekil 2.2. Geoteknik ve yol mühendisliğinde şev (yığılma) açısı ve heyelan oluşumu

Kum Yığınlarının Doğal Açısı: Eğer zemin yüzeyinden yukarıda bir noktadan taneli zemin dökürsek, oluşan yığılma çökeli bir konik yığına benzer. Yığının üzerinde daha fazla taneli malzeme dökülürse, kısa bir süre içinde eğim dikleşiyor gibi görünse de, sonrasında zemin taneleri yığılma açısında yamaç aşağıya kayarlar (Şekil 2.2). Yatay düzlemlerle yapılan bu şev açısı, bir minimum değerinde sabit kalır. Bu açı gevşek sıklıktaki kum için en dik duraylı şevi oluşturduğundan, yığılma açısı taneli zeminin en gevşek halindeki kayma mukavemeti açısını temsil eder.

Kumlar, yığılma açıları ile doğadan bir örnektir. Kumlar bir jeolojik süreç olarak rüzgardan dolayı oluşan yeryüzü şekilleridir. Şekil 2.3'te hem sabit kumların (SD) hem de hareket eden kumların (MD) oluşum şekilleri gösterilmiştir. Rüzgarı arkadan alan şevde (LS) yığılma açısı $30-35^\circ$ arasında değişir. Rüzgarı arkadan şev $30-35^\circ$ den daha dik olursa, şev stabilitesini kaybeder ve kum taneleri yığılma açısına ulaşınca kadar yamaç aşağıya doğru yuvarlanır. Duraysız bir durum Şekil 2.3'te görülen yamaçlardan sağdakinde gösterilmiştir, eninde sonunda yığılma açısında daha düz bir şev oluşacaktır (Holtz and Kovacs 2002).



Şekil 2.3. Kumların oluşumu ve yığılma açısının gösterimi (van Bandat 1962'den) (Holtz and Kovacs 2002)

Rüzgarlara kumun çökertilmesi ile kalıcı veya sabit kumların (SD) ve göç eden aktif kumların (MD) ideal yapıları Şekil 2.3'te görüldüğü gibidir. Burada, oklar hava akımının yönünü gösterir (w), E ise anafordur. WS, kum şevinin rüzgarın estiği yöndeki yüzey, LS, rüzgar altı yönü veya rüzgarı arkadan alan şevdir. R, kum dalgacığı izleri ve Cr kumun tepesidir. Kesikli çizgiler aktif kumun önceki halini (MD) gösterir. B temel kayadır (Holtz and Kovacs 2002). Şekil 2.4'te ise laboratuvar ortamında dökülmüş bir kumun konik şekli görülmektedir. Burada koni kenarının yatay düzlem ile yaptığı açı yığılma açısıdır.

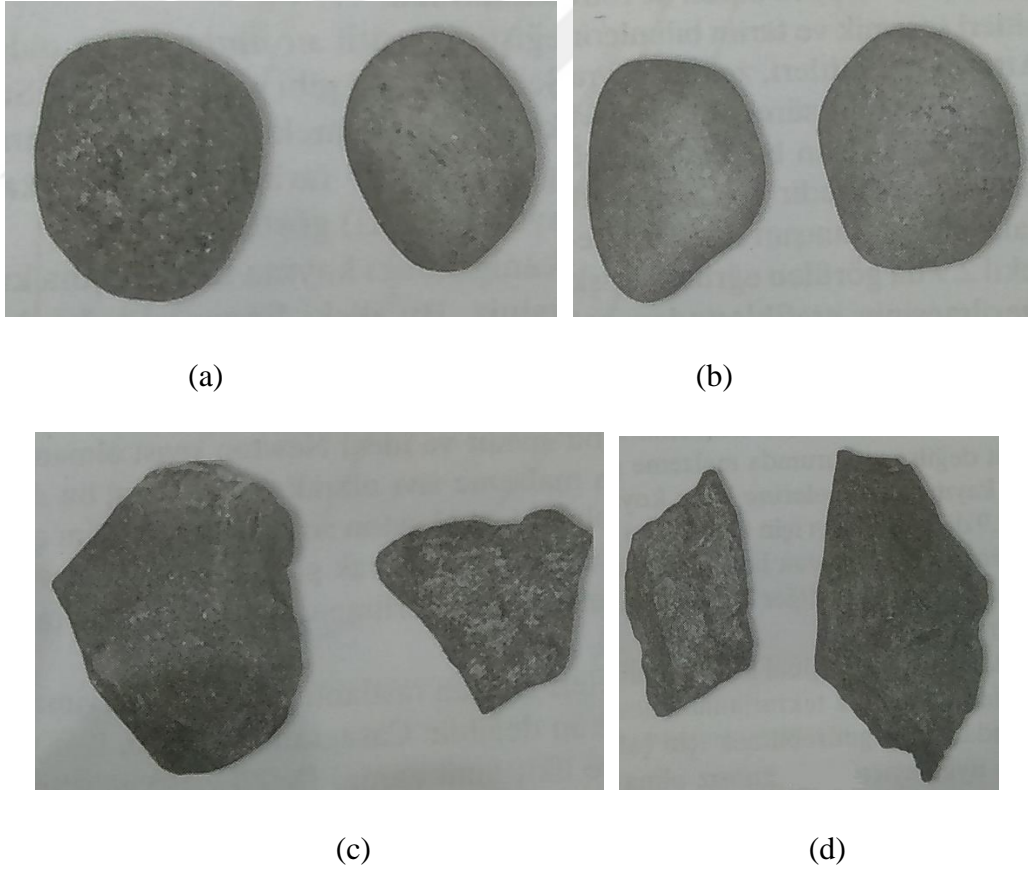


Şekil 2.4. Kumun yığılma açısının gösterimi

2.3. Tanelerin Şekilsel Özellikleri

Zeminlerdeki granüler kum tanelerin şekilsel özellikleri ile ilgili öncü çalışma Mackie (1897) tarafından yapılarak yuvarlaklığın (küreselliğin) gözlemsel sınıflandırılması yapılmıştır. Bu tarz çalışmalar günümüze kadar artarak devam etmiştir.

Arasan 2011’de bahsedildiği gibi, küçük ölçeklerde, yüzey pürüzsüzlüğü, köşe ve kenarların yuvarlaklığı gibi lokal pürüzlülük özelliklerini gösteren doku önemlidir. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi, yuvarlaklık ve köşelilik tane şeklini ifade etmede kullanılır. Yuvarlaklık dokusu yuvarlak, yarı yuvarlak, yarı köşeli ve köşeli olmak üzere dört seviyede ifade edilir (Mitchell and Soga 2005).



Şekil 2.5. İri taneli zeminlerin şekilleri

*(a) yuvarlak, (b) yarı yuvarlak, (c) yarı köşeli, (d) köşeli (Holtz *et al.* 2015)

Arasan (2011) yapmış olduğu doktora çalışmasında, görüntü analizi ile granüler zeminlerin bazı geoteknik özelliklerini belirlemiştir. Bu çalışmada kumların (kalker) şekilsel özellikleri olan yuvarlaklık, küresellik, form ve yüzey pürüzlülüğünü dikkate almıştır. Sonuç olarak tane şeklinin granüler zemin özelliklerine önemli etkisinin olduğu ve tanelerin yuvarlaklığının artması veya fraktal boyutunun azalmasıyla maksimum ve minimum boşluk oranları ve kayma mukavemeti açısının azaldığı belirlenmiştir.

2.4. Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Diğer bütün malzemelerde olduğu gibi, zeminler üzerine uygulanan yüklerin yol açtığı gerilmeler belirli sınırları aştığı zaman zeminde göçme meydana gelmektedir. Bu olay zeminin kayma mukavemeti dayanabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanır. Değişik malzemelerin göçme biçimlerinin birbirinden farklı olduğu bilinmektedir. Zeminlerin kayma mukavemetinin matematiksel bir ifade ile gösterimi Coulomb (1776) ile başlamıştır. Ayrıca zeminlerin kayma mukavemeti ile ilgili Mohr-Coulomb, Tresca-Coulomb ve Von Misses gibi birçok hipotez vardır.

Zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için kesme kutusu aleti kullanılarak kayma mukavemeti açısı da olarak bilinen ϕ değeri bulunur. Kesme kutusu deneyinde, zemin numunesi dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içine yerleştirilmektedir. Uygulanan bir kesme kuvveti altında, kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket edebilmekte ve böylece numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmaktadır. Numune üzerine normal gerilme uygulamak ve böylece kesmeden önce zeminin konsolide olması ve kesme sırasında normal gerilmelerin kontrol altında tutulması mümkün olmaktadır. Bu deneyde, zemin önceden belirlenmiş (numunenin ortasından geçen) yatay bir düzlem boyunca kırılmaya (göçmeye) zorlanmaktadır. Belirli bir normal gerilme altında, uygulanan kesme kuvveti ile meydana gelen yatay yer değiştirmeler ölçülmektedir. Uygulamada, kesme kutusu deneyi daha çok kumların kayma mukavemetini saptamak için kullanılmaktadır. Kum zeminler için elde edilen

kayma mukavemeti açısı (kayma mukavemeti açısı) ϕ , drenajlı yükleme durumları için olup, arazi koşulları ile uyumlu olduğu kabul edilmektedir (Özaydın 2011).

Zeminlerin kayma mukavemeti (τ) aşağıda verilmiş olan (2.1) Eşitliği ile belirlenir.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

Burada c : kohezyon, ϕ : kayma mukavemeti açısıdır. c ve ϕ kayma mukavemeti parametreleri olup, kohezyon zemin tanelerini birbirine bağlayan (yapıştırıcı) elektriksel ve bağlayıcı kuvvetlerdir. Kumlar kohezyonsuz zeminlerdir. Kayma mukavemeti açısı (kayma mukavemeti açısı) ise taneler arası sürtünme ve taneler arası kilitlemenin toplamını yansıtmaktadır. Taneler arasındaki sürtünme, tanelerin birbiri üzerinde kayma ve yuvarlanmasından oluşur. Tanelerin şekli ve pürüzlülüğü kayma mukavemeti açısının sürtünme kısmını etkilemektedir (Özaydın 2008).

2.4.1. Granüler zeminlerin kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi

Granüler zeminlerde kohezyon (c) parametresi sıfır değerini aldığı için kayma mukavemeti bağıntısı;

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

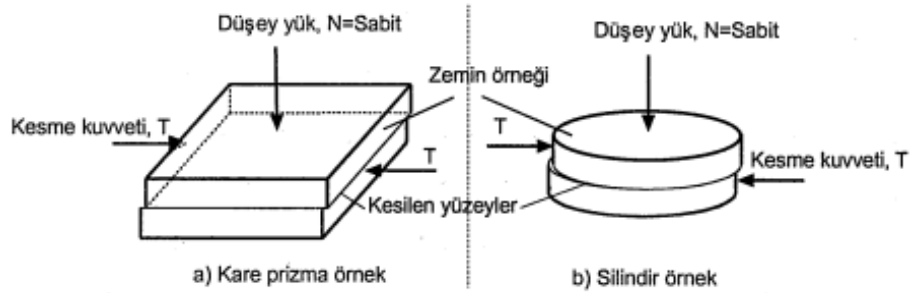
şeklini almaktadır. Ayrıca, arazide statik yüklemeler altında, kumlarda drenajlı koşulların geçerli olacağını kabul etmek gerçekçi bir yaklaşım olmaktadır. Bu durumda, yükleme sırasında boşluk suyu rahatlıkla zeminden dışarı çıkabilmekte ve boşluk suyu basınçlarında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir. Dolayısıyla, kumların arazi yüklemeleri altında davranışı incelenirken, drenajlı (veya efektif) kayma mukavemeti açısının bulunması yeterli olacaktır ($\phi_d = \phi'$). Kayma mukavemeti açısının değeri ise laboratuvarında kesme kutusu veya üç eksenli basınç deneyleri kullanılarak, veya arazi deneyleri sonuçlarından korelasyon yolu ile elde edilmektedir (Özaydın 2008).

Kumlarda kayma mukavemeti açısının (ϕ) değerini etkileyen faktörler, aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Kumun sıkılık derecesi: Yoğunluk arttıkça (porozite veya boşluk oranı azaldıkça) ϕ 'nin değeri artmaktadır.
2. Tane çapı dağılımı: İyi derecelenmiş zeminler, üniform kumlara göre daha yüksek ϕ değerine sahip olmaktadır.
3. Tane biçimi: Köşeli tanelerden oluşan iri taneli zeminlerin kayma mukavemeti açısı yuvarlak tanelerden biraz daha yüksektir.
4. Tanelerin mineral yapısı: Taneler arası sürtünme özelliğini etkilemekle beraber, çoğu tabii kumlar için oldukça dar bir aralık içinde değiştiği kabul edilebilir.
5. Su etkisi: Zeminin kuru veya su altında olması ϕ değerini çok az etkilemektedir. ($\phi_{\text{kuru}} \cong \phi_{\text{ıslak}}$) (Özaydın 2008).

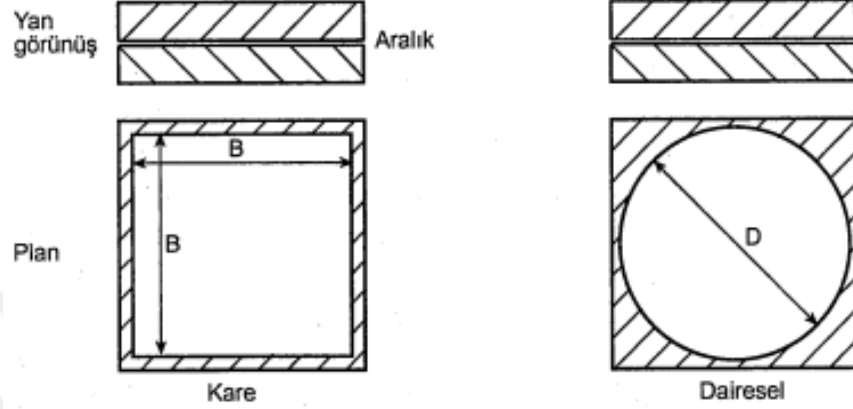
Kayma direnci parametreleri, c ve ϕ , çeşitli laboratuvar ve arazi deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu değerler, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT), Presiyometre Deneyi (PMT) vb. arazi deneylerinin sonuçlarından bazı ampirik bağıntı, grafik ve tablolardan da elde edilebilmektedir (Uzuner 2007).

Kesme kutusu deneyi (doğrudan kesme deneyi): Bu deney sabit yük altındaki kare prizma veya silindirik örneklerin ortadan kesilmesine dayanır. Kesme kutusu deneyinin 3 boyutlu şematik şekli Şekil 2.6'da görülmektedir.

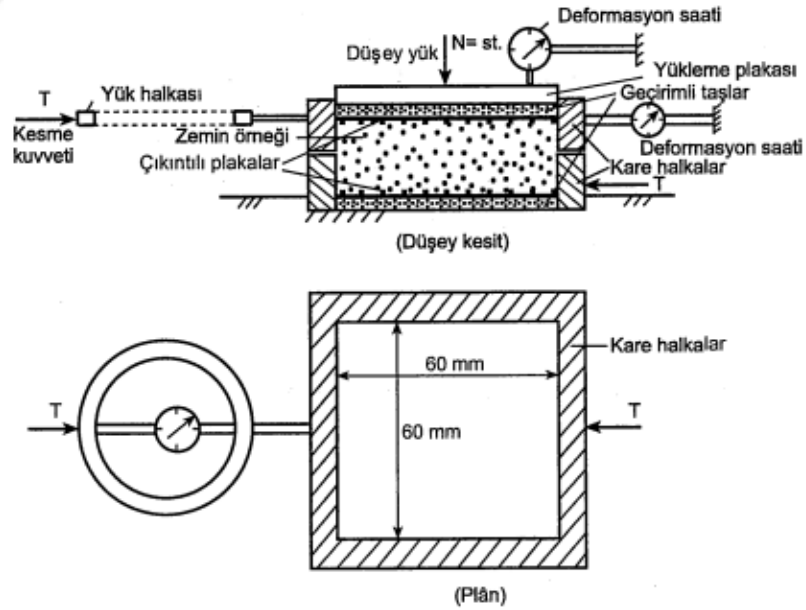


Şekil 2.6. Kesme kutusu deneyinin 3 boyutlu şematik şekli

Deney aleti birbiri üzerine oturan 60 mm x 60 mm - 300 mm x 300 mm vb. iç boyutlu iki kare metal veya dairesel halkadan oluşmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Kesme kutusunun metal halkaları (Uzuner 2007)



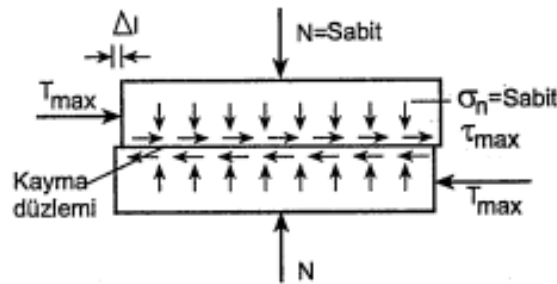
Şekil 2.8. Kesme kutusu deneyi (Uzuner 2007)

Bu deney kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler için uygun olmakla birlikte, daha ziyade kumlar için uygundur. Deneyde kum istenilen sıklıkta kutu içine yerleştirilir. Kohezyonlu zeminlerden, ucu keskin, kare enkesitli örnek alıcı ile alınan kare prizma

biçimindeki örselenmemiş örnek, kutuya yerleştirilir. Zemin örneğinin alt ve üst yüzlerini iyi kavramak üzere, çıkıntıları kesme hareketine dik olan iki metal plaka kullanılır. Drenajlı deneylerde, deney sırasında, zemin örneğinden suyun çıkabilmesi için, çıkıntılı plakanın alt ve üstüne geçirimsiz taş plakalar yerleştirilir (Şekil 2.8). Çıkıntılı plakalar, drenajlı deneylerde delikli olurlar. Zemin örneği üzerine 90, 180, 360, 720 N luk gibi sabit bir düşey yük uygulanır. Düşey yük sabit iken, yatay olarak sabit bir kesme deformasyonu uygulanır. Bu elle veya bir elektrik motoru ile uygulanabilir. Gittikçe artan kesme kuvvetine karşı, zemin örneği önce direnir, sonra iki halkayı ayıran düzlem boyunca kesilir (T_{max}). Uygulanan kesme kuvveti, bir yük halkası, bir yük hücresi (Yük hücresi elektronik olarak çalışır.) vb. ile ölçülür. Deney sırasında kesme deformasyonunu (Δl) ölçmek için bir mikrometre kullanılır. Zemin örneğinin deney sırasındaki hacim değişmesini (sıkışma veya kabarma) izlemek üzere bir deformasyon saati, en üstteki yükleme plakası üzerine oturtulur. Deney başlangıcından itibaren, hem yük halkası ve hem de düşey deformasyon saatinin okumaları, belli zaman aralıkları ile okunarak, kaydedilir. Zemin örneği kesildikten bir süre sonra, deneye son verilir (Şekil 2.9). Kırılma anındaki, normal ve kesme gerilmeleri, 60mm x 60mm iç boyuta sahip kare metal halkalar ile gerçekleştirilen deneyde, aşağıdaki gibi hesaplanır (Uzuner 2007).

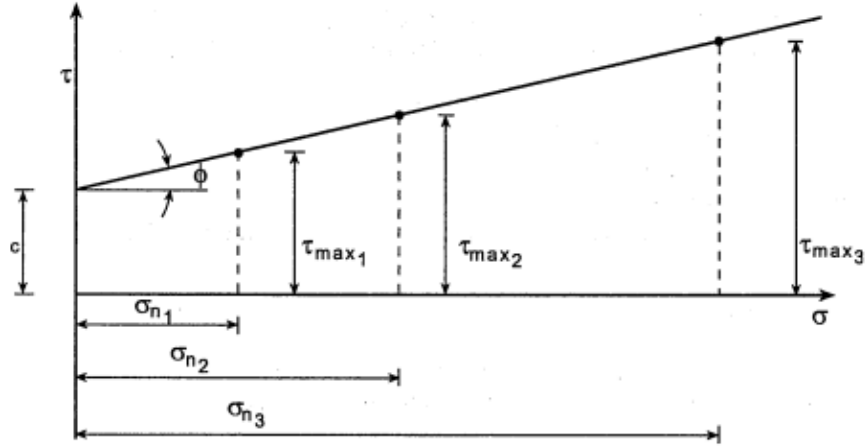
$$\sigma_n = N/A = \frac{N}{60 \times 60} = st, \tau_{max} = \frac{T_{max}}{A} = \frac{T_{max}}{60 \times 60} \quad (2.3)$$

Metal halkanın alanı (A) daha duyarlı olarak, $60 \times (60 - \Delta l)$ olarak da alınabilir. Δl (mm), Kesme anındaki yatay hareket miktarıdır.



Şekil 2.9. Kesme kutusu deneyinde gerilmeler (Uzuner 2007)

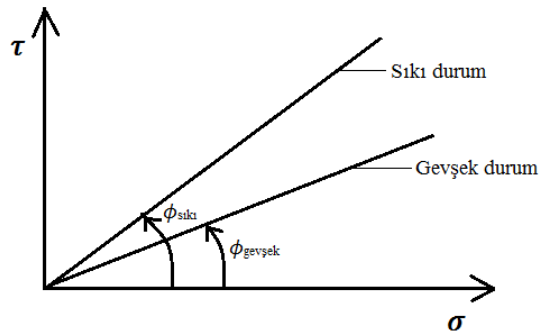
Deney, deęişik dűşey sabit yűkler altında, birkaç kez tekrarlanır ve deney sonuçları σ - τ eksen takımında iřaretlenerek, bir doęru geęirilir (řekil 2.10). Buradan, kayma mukavemeti parametreleri, c ve ϕ belirlenir.



şekil 2.10. Kesme kutusu deneyinde c ve ϕ 'nin belirlenmesi (Uzuner 2007)

şekil 2.10'da τ_{max} kırılma (kayma) anında, zeminin kayma direnci (dayanımı) olup, kırılma yüzeyindeki kayma gerilmesine eşittir. σ_n numunenin rűlatif sıklığa bağlı olarak kayma gerilmesini ifade etmektedir.

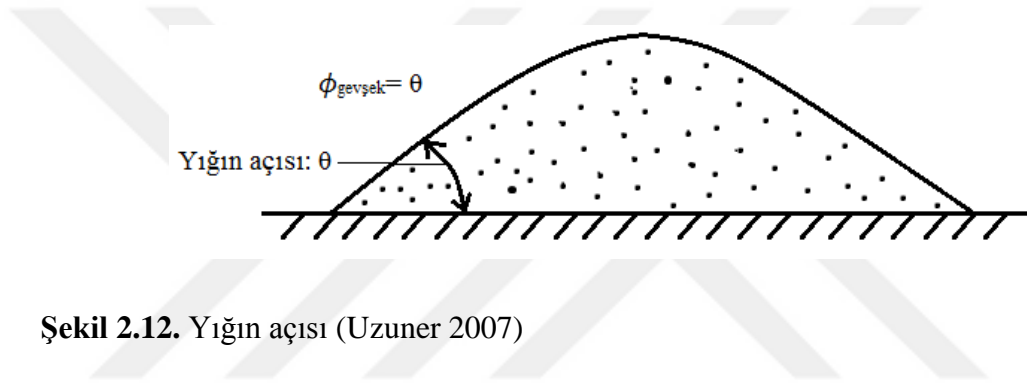
Kumlar űzerinde yapılan kesme kutusu deneylerine gűre, kayma mukavemeti aęısı, aynı kum için, rűlatif sıklık arttıka artar, rűlatif sıklık azaldıkça azalır (řekil 2.11).



şekil 2.11. Aynı kumda sıkı ve gevşek durumlardaki kayma mukavemeti açıları (Uzuner 2007)

Kumlarda, kayma mukavemeti açısı ayrıca, zeminin iyi veya kötü derecelenmiş olmasına, tanelerin şekline (köşeli, yuvarlak) bağlıdır. İyi derecelenmiş kumda kayma mukavemeti açısı, kötü derecelenmişe göre daha büyük, köşeli taneli kumlarda yuvarlak taneliye göre daha büyüktür.

Yatay bir düzlemde, serbestçe dökülerek oluşturulmuş bir kuru kum yığınının eğik yüzeyinin yatayla yaptığı açı olan şev açısı, o kumun gevşek durumdaki kayma mukavemeti açısına yani yığın açısına eşittir (Şekil 2.12).



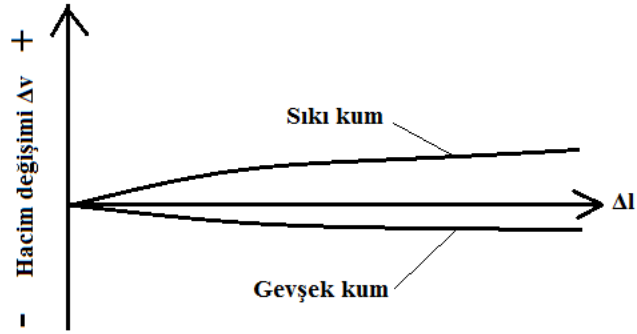
Şekil 2.12. Yığın açısı (Uzuner 2007)

Kumlarda, kesme gerilmelerinin yatay kesme deformasyonu ile deney sırasında tipik değişimi, Şekil 2.13'te görülmektedir.



Şekil 2.13. Kumlarda kesme deformasyonu - τ ilişkisi (Uzuner 2007)

Deney sırasında, sıkı kumlarda hacim artışı (kabarma), gevşek kumlarda hacim azalması (sıkışma) görülür (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Kumlarda kesme deformasyonu–hacim değişimi ilişkisi (Uzuner 2007)

2.5. Yuvarlaklık

Yuvarlaklık, küresellik gibi tanelerin çökme ve taşınabilirliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Yuvarlaklık bir tanenin ölçümün yapıldığı düzlemde köşelerine sığdırılabilecek dairelerin yarıçapının aritmetik ortalaması olup her bir köşenin yuvarlaklığı Weddel sabiti olarak adlandırılır. Weddel sabiti tanenin köşelerine sığabilecek dairenin yarıçapının tüm taneye sığabilecek olan dairenin yarıçapına olan oranıdır. Ayrıca granüler kumların yuvarlaklığı, tanelerin orta ölçekte bir morfolojik özelliğidir. Tane köşe ve kenarların ortalama eğrilik yarıçapının en büyük iç kürenin yarıçapına oranı olarak ifade edilir (Mitchell and Soga 2005). Powers (1953)'e göre sayısal yuvarlaklık değerlerine karşılık gelen görsel ifadeler Çizelge 2.1 ve Şekil 2.15'te verilmiştir. Buradaki sayısal yuvarlaklık değerleri Wentworth (1919)'nun geliştirdikleri Eşitlik 2.4 ile hesaplanmıştır. Bu formül kullanılarak hesaplanan değer 1'e yaklaştıkça tane köşeliden yuvarlağa doğru değişir. Formülün temelinde dairenin alan ve çevresinin karesinin bir birine oranının sabit olması prensibi vardır.

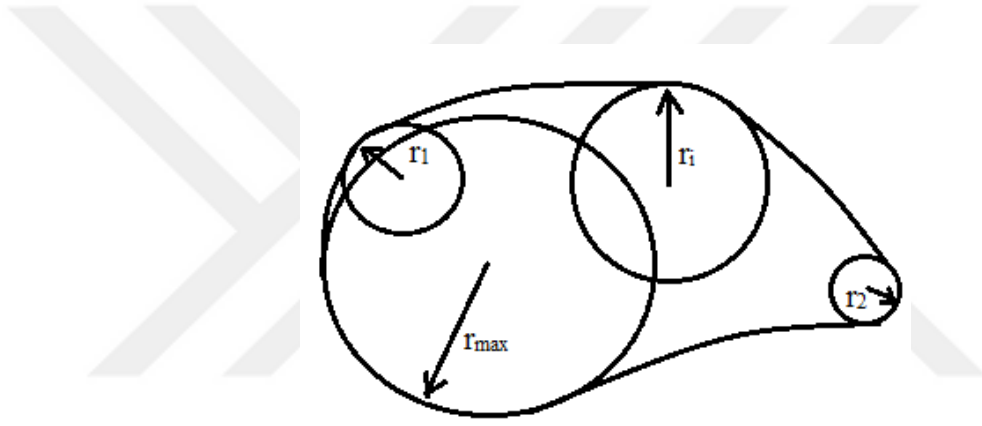
$$R = \frac{r_1}{r_2} \quad (2.4)$$

r_1 = Yüzey özelliklerinin eğrilik yarıçapı

r_2 = En büyük iç dairenin yarıçapı (Mitchell and Soga 2005)

Çizelge 2.1. Yuvarlaklık sayısal değerleri (Powers 1953)

Sınıflandırma	Yuvarlaklık
Çok köşeli	0,12-0,17
Yarı köşeli	0,17-0,25
Köşeli	0,25-0,35
Yarı yuvarlak	0,35-0,49
Yuvarlak	0,49-0,70
Çok yuvarlak	0,70-1,00

**Şekil 2.15.** Yuvarlaklığın şekilsel gösterimi (Powers 1953)

Eşitlik 2.5'te yuvarlaklık hesaplanmasında kullanılan formül görülmektedir.

$$R = \frac{r_1}{r_a} \quad (\text{Mitchell and Soga 2005}) \quad (2.5)$$

r_1 = En konveks kısmın eğrilik yarıçapı, r_a = Ortalama yarıçap

Köşelilik: Bir tanenin köşeliliğinin (A) keskinliğinin bir ölçüsüdür ve iki boyutta ölçülmektedir. Ayrıca tanelerin orta ölçekte bir morfolojik özelliği ve yuvarlaklığın tersidir (Mora *et al.* 1999).

$$A = \frac{r_a}{r_m} \quad (2.6)$$

r_a = Köşe ve kenarların ortalama yarıçapı, r_m = En büyük iç dairenin yarıçapı



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kalker

Bu çalışmada kalker (kum) kullanılmıştır. Kum, Erzurum ili, Ilıca ilçesi agrega ocağından alınmıştır. Bu kumun bazı mühendislik özellikleri, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneylerle belirlenmiştir. Yapılan özgül ağırlık deneyi ASTM D 854'e uygun olarak yapılmış ve 2,70 olarak bulunmuştur. Yapısında en az % 90 CaCO₃ (kalsiyum karbonat) bulunduran kayalara kalker (kum) denir. Ayrıca mineralojik bileşiminde asgari %90 kalsit minerali bulunan kayalara da kalker (kum) adı verilmektedir. Şekil 3.1'de deneylerde kullanılan kum görülmektedir. Kumun sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5-2,7 arasındadır. Kumlar inşaat malzemesi olarak çok kullanılır. Fazla sert olmamaları, kolayca işlenebilmeleri, hemen hemen her yerde bulunmaları nedeniyle her türlü yapıda, masif veya kesme taş halinde yararlanılmaktadır. Yoğun ve güzel renkli olanlar cilalanır, bina iç ve dış kaplamasında kullanılır. Kumlar bazı yerlerde, marn ile karıştırılarak çimento endüstrisinde kullanılır (Anonim 2014).



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan kum

Kum binalarda kaplama olarak kullanılırken, bilhassa temele yakın rutubetli kısımlarda, su emerek dağılabilecekleri, parçalanıp dökülebilecekleri dikkate alınmalıdır. Buna karşıt kurak bölge ve yöreler için kum çok sağlam bir yapı malzemesidir (Ünsal 2015). Şekilsel özelliklerine göre köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak hale getirilmiş olan kum, Çizelge 3.1’de gösterilen tane çap aralıklarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan kumların yuvarlaklık seviyelerine göre malzeme aralıkları

Kumun Şekilsel Özelliği	Kumun çap aralıkları (mm)
Köşeli	0,30 – 1,18
	1,18 – 1,40
	1,40 – 2,36
	2,36 – 2,80
	2,80 – 3,35
	3,35 – 4,75
Yarı Yuvarlak	0,30 – 1,18
	1,18 – 1,40
	1,40 – 2,36
	2,36 – 2,80
	2,80 – 3,35
	3,35 – 4,75
Yuvarlak	0,30 – 1,18
	1,18 – 1,40
	1,40 – 2,36
	2,36 – 2,80
	2,80 – 3,35
	3,35 – 4,75

Kum kırılıp yollarda blokaj ve mıcır olarak kullanılır. Kum özel ocaklarda yakılmasıyla kireç elde edilir. Kumun su emmesi, aşınması ve basınca karşı direnci dokularına göre değişir, sıkı ve kompakt olanlarının basınç direnci 2000 kg/cm² civarındadır. Türkiye’de

inşaatla en çok kullanılan kumun porozitesi, %0-15 arasında değişir. Bu daha ziyade içlerinde bulunan boşluklara ve kum tanelerine bağlıdır (Ünsal 2015).

3.1.2. Propilen taneler

Propilen (PP), polimerizasyon ile üretilen yarı sert, şeffaf, kolay şekillendirilen, pahalı olmayan bir polimerdir. Monomer olan propilen, petrolden elde edilir. Farklı özelliklerde ataktik, izotaktik ve sindiyotaktik PP hazırlanabilmektedir. İzotaktik PP nin camsı geçiş sıcaklığı -10°C , erime sıcaklığı 160°C dolayındadır. Erime noktası düşük olduğu için $90-110^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığı gibi düşük sıcaklıklarda kullanılabilir. Yükleme yapılmadığında 140°C dolayındaki sıcaklıklara dayanabilir. Kristal oranı %60-70 arasında değişir, $0,90-0,92\text{ g/cm}^3$ arasındaki yoğunluk değeri ile en hafifi termoplastiktir. PP nin kimyasal direnci iyidir. Görünür bölge ışınlarına dayanıklı olmakla birlikte, UV-ışınları PP den yapılan malzemelerin yüzeylerini bozar. Polimerin oksidasyonu sıcaklıkla yükselir, oksidasyonu önlemek amacıyla içlerine katılan karbon siyahı ise polimerin ısıl yaşlanmasını hızlandırır. Klor, nitrik asit ve diğer kuvvetli oksitleyiciler tarafından etkilenir. Yakılabilir fakat yavaş yanar, zehirsizdir. Uygun şekilde modifiye edildiğinde iyi bir ısı dayanımına sahiptir (Anonim 2016). Deneylerde kullanılan propilen Şekil 3.2’de görülmektedir. Propilenin özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Kullanılan propilenin çapı 3.35 mm – 4.75 mm arası olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Deneylerde katkı malzemesi olarak kullanılan propilen taneler

Çizelge 3.2. Propilen'in özellikleri (Anonim 2016)

Özgül Ağırlığı	0,90
Gerilme Kuvveti	30-40 MPa
Elastik Modülü	1400-1600 Mpa
Darbe Dayanımı	5-10 kJ/m ²
Deformasyon Sıcaklığı	110 °C
Vicat Yumuşama Sıcaklığı	155 °C
Tane Çapı	3,35 mm – 4,75 mm

3.1.3. Lastik tozu

Deneylerde kullanılan lastik tozu (Şekil 3.3), rejenere kauçuk ve lastik tozu imalatı yapan bir firmadan (Kahya Kauçuk) temin edilmiştir. Lastik tozunun hafif oluşu ve darbe enerjisini sönmüleme kapasitesi nedeniyle lastikler, sismik kuvvetlerin azaltılmasında ve deprem titreşimlerinin absorpsiyonunda kullanılabilir. Bu çalışmada lastik tozunun, zeminin taşıma gücünde önemli faktör olan kesme mukavemetine (ϕ) ve yığılma açısına (θ) etkisi araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan lastik tozunun yoğunluğu $11,5-11,98 \text{ kN/m}^3$ 'tür (Akbulut *et al.* 2007). Lastiğin tane çapı 0,063 mm - 0,075 mm olarak belirlenmiştir.

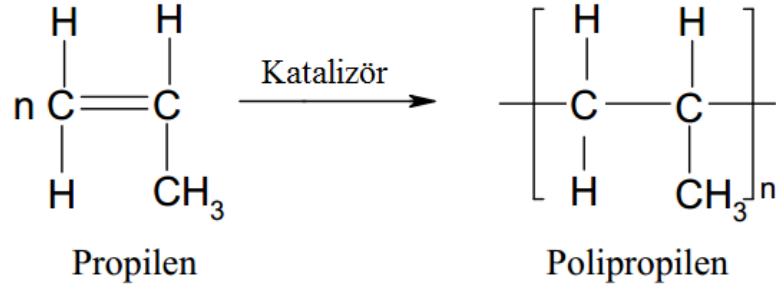


Şekil 3.3. Deneylerde katkı malzemesi olarak kullanılan lastik tozu

Lastik (kauçuk) tozunun kompozit malzeme üretiminde kullanılması durumunda, şekli bozuk ve pürüzlü yüzeyler küresel şekilli ve düzgün yüzeyli partiküllerle karşılaştırıldığında partikül-matris adezyonunun arttığı görülmüştür. Herhangi bir işlem görmemiş lastik tozunun (kauçuk tozu) kauçuğa dolgu olarak katılması durumunda, mekanik özelliklerdeki ortalama kaybın ağırlıkça her yüzde birlik ilavede %1 olduğu ifade edilmiştir. Yapılan çalışmalarda 0.6 mm'nin altındaki atık kauçuklar atık lastik tozu dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda mekanik özellikleri iyileştirdiği belirlenmiştir (Karabörk ve Akdemir 2013).

3.1.4. Polipropilen parçacıklar

Polipropilen, ziegler–natta katalizörleri olarak bilinen $TiCl_3$, DEAC (dietilalüminyumklorür) ya da bazı metalosen katalizörlerinin varlığında propilen monomerinin polimerleşmesinden elde edilir ve genel polimerleşme tepkimesi Şekil 3.4'deki gibidir.



Şekil 3.4. Propilen'den katalizör vasıtasıyla polipropilen'in elde edilmesi

Dünyada 150'den fazla polipropilen türü üretilmektedir. Bunlar özellikle fiziksel özellikleri açısından az da olsa birbirinden farklı özellikler gösterirler. Ancak polipropilene ait bazı genel fiziksel özellikler Çizelge 3.3'de verilmiştir (Anonim 2009).

Çizelge 3.3. Polipropilene ait bazı genel fiziksel özellikler

Erime sıcaklığı	160-170°C
Erime ısısı	21 cal/g
Yoğunluk	0,90-0,929 g/cm ³
Özgül ısı	0,46 cal/g°C
Bozunma sıcaklığı	380-410°C
Nem tutma	%0,1

Polipropilenler kimyasal direnci iyi olan malzemelerdir. Asitlerin, bazların ve tuzların sulu çözeltilerinden etkilenmez, alkol ve deterjanlara karşı da dayanıklıdır. Yüksek sıcaklıklarda yağlarda, aromatik hidrokarbonlarda, halojenli hidrokarbonlarda şişme yapar. Isı, ışık ve yükseltgenlerden polietilene göre daha fazla etkilenir. Bu yüzden polipropilen üretim aşamasında antioksidanlar ve ultraviyole ışık absorblayıcılarla stabilize edilir (Anonim 2009).

**Şekil 3.5.** Yaklaşık 1-2 mm olarak kesilmiş polipropilen parçacıklar

Eskiden doğal mikro donatı saman ve hayvan kılları kullanımının günümüz teknolojisine uyumlaştırılmış hali polipropilen parçacıklardır. Polipropilen beton, sıva,

harç ve püskürtme beton uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda artan bir hızla polipropilen zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılmakta ve konuya ilişkin bilimsel çalışmalar her geçen gün artmaktadır (Anonim 2009).

3.2. Yöntem

Çalışma kapsamında zeminler üzerinde, elek analizi deneyleri yapılmış olup, zeminlerin maksimum ve minimum boşluk oranları bulunmuştur. Daha sonra zemin numuneleri üzerinde yapılan kesme kutusu deneyleri ile zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. Son olarak zemin numunelerinin yığılma açıları hesaplanmıştır.

3.2.1. Los angeles deney aleti ile malzemelerin şekilsel özelliklerinin değiştirilmesi

Malzemelerin (kumların) şekilsel özelliklerinin değiştirilmesi amacıyla kullanılan Los Angeles deney aleti, 71,1 cm çapında ve 50,8 cm uzunluğunda çelik sacdan yapılmış yatay ekseni dakikada 30- 35 devir yapmak suretiyle dönebilen, bir silindirden ibarettir. Silindir içinde fonttan yapılmış muhtelif adet küresel taneler 47,7 mm çapında ve 390,45 gr ağırlığındadır (Anonim 2015). Şekil 3.6'da Los Angeles deney aleti görülmektedir.



Şekil 3.6. ASTM C131 ve ASTM C535 standartlarına uygun Los Angeles aşındırma test cihazı

Los Angeles deney aletiyle, kumların şekilsel özelliklerini değiştirmek için ASTM C131 ve ASTM C535 standartlarına uygun şekilde cihaz çalıştırılarak köşeliden yuvarlağa doğru malzemeler elde edilir. Şekil 3.7’de tam köşeliden yuvarlağa doğru, ‘0’ tur tam köşeli, 100000 tur olduğunda kum yuvarlak olur. Bu malzemeleri elde etmek için Los Angeles aletinin döndürme sayıları Çizelge 3.4’de verilmiştir (Arasan 2011).

Çizelge 3.4. Los Angeles deney aletinin tur (devir) sayısına bağlı olarak, malzemenin şekilsel özelliğinin değişimi (Arasan et al. 2011)

Tur Sayısı	Şekilsel Özellik	Yuvarlaklık Sınıfı	Fraktal Boyut
0	Köşeli	0,693-0,744	1,121-1,289
50 000	Yarı Yuvarlak	0,786-0,803	1,092-1,232
100 000	Yuvarlak	0,834-0,854	1,076-1,159

Arasan (2011) doktora tez çalışmasında kumların yuvarlaklık ve köşeliliklerinden bahsederek Los Angeles aleti ile Çizelge 3.4’deki gibi çevrimler yapıldığında, köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak taneler elde edildiğini sayısal yöntemlerle açıklamıştır. Şekil 3.7’de Los Angeles deney aleti ile gerçekleştirilen çevrimler sonucunda malzemelerin şekilsel özelliklerinde meydana gelen değişimler görülmektedir.



Şekil 3.7. (a) 0 tur, (b) 5000 tur, (c) 10000 tur, (d) 15000 tur, (e) 20000 tur, (f) 25000 tur, (g) 30000 tur, (h) 50000 tur ve (i) 100000 tur

3.2.2. Elek analizi deneyi ve zeminlerin sınıflandırılması

Kum üzerinde yapılan elek analizi ASTM D 422'e göre yapılmış olup sarsma cihazı ve farklı elek çaplarında elekler kullanılmıştır. Elek analizi deneyi sonucunda elde edilen granülometri eğrisinden faydalanılarak zemin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma sistemine (USCS) göre sınıflandırılmıştır.

3.2.3. Zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesi

Maksimum ve minimum boşluk oranları: Zeminlerde boşluk oranı, boşluk hacminin tane hacmine oranıdır.

$$e = \frac{\text{Boşluk hacmi}}{\text{Tane hacmi}} = \frac{V_b}{V_s} \quad (3.1)$$

Maksimum ve minimum boşluk oranlarının tespiti için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları ASTM D 4254 ve D 4253'te verilen yöntemlerdir. Yapılan çalışmada maksimum boşluk oranının belirlenmesi için ASTM D4254 Method B ve minimum boşluk oranı için ise ASTM D 4253 Method A kullanılmıştır.

Rölatif sıklık: Kumlu ve çakıllı zeminlerin bağıl sıklığına bağlı olarak önerilen sınıflama Çizelge 3.5' te verilmekte olup, bağıl sıklık (Rölatif sıklık) Eşitlik 3.2 ile belirlenir (Yılmaz vd 2014).

$$D_r = \frac{(e_{max} - e)}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de e_{max} ve e_{min} verilen zeminin laboratuvar koşullarında belirlenen en gevşek ve en sıkı durumlardaki boşluk oranlarıdır. e ise doğal boşluk oranı değeridir (Yılmaz vd 2014).

Çizelge 3.5. Kum ve çakılların bağıl (rölatif) sıklıkları (Yılmaz vd 2014)

Bağıl (Rölatif) Sıklık, D_r (%)	Tanımlama
< 20	Çok gevşek
20 – 33	Gevşek
33 – 66	Orta derecede gevşek
66 – 90	Sıkı
90 - 100	Çok sıkı

Özgül Ağırlık:

$$G_S = \frac{\gamma_S}{\gamma_w}, \gamma_S = G_S \gamma_w, \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 \quad (3.3)$$

Olarak hesaplanır. Burada

γ_S : zemin tanelerinin birim hacim ağırlığı

γ_w : suyun birim hacim ağırlığıdır

3.2.4. Yığılma açılarının belirlenmesi

Çalışma kapsamında malzemelerin yığılma açılarını belirlemek için deneyler iki farklı yöntem ile yapılmıştır. Bunlar:

1. ASTM C1444 Yöntemi (Kuru Ortamda Deney)
2. Santamarina and Cho Yöntemidir (Islak Ortamda Deney)

a) ASTM C1444'e göre yığılma açılarının belirlenmesi

ASTM C1444 yöntemi malzemelerin kuru şarttaki yığılma açılarını bulmak için kullanılır. Bu metod, malzemenin serbest akma yeteneğini belirler. Granüler malzemelerin akışkanlık özelliği, o malzemenin doğru kullanılabilmesi için önemli özelliklerdendir.

Deney için gerekli araçlar:

- Ağız açıklığı 0,64 cm ile 0,97 cm arasında ve yaklaşık 113,5 gr ile 227,2 gr malzeme doldurma kapasiteli huni.
- Huniyi tutan alet
- Huni kapağı

- En az 30,5 cm x 30,5 cm boyutlarında düz, sert ahşap veya metal plaka
- Kuşe kâğıdı
- Trigonometrik fonksiyonlu hesap makinesi
- Kumpas (30,5 cm'den 0,025 cm'ye kadar hesap yapabilen)
- 3,81 cm'lik kütük

ASTM C1444'de göre kum üzerinde yığılma açısının belirlemek amacıyla hazırlanmış olan deney düzeneği Şekil 3.8'de, yapılan deney ise Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.8. Deney düzeneği



Şekil 3.9. ASTM C1444'de göre kum üzerinde yığılma açısını belirlemek için yapılan deney

Şekil 3.10'da çalışmada kullanılacak huniler görülmektedir. Çizelge 3.6'da ise, malzeme boyutlarına göre kullanılacak hunilerin çıkış çapları ve malzemelerin döküleceği yükseklikler verilmiştir. Çizelge 3.6'da belirtilen 1.huni ASTM standardına uygun bir hunidir. Bu huni ASTM standardında 1,16 mm çap elek altında kalan malzemelerin yığılma açılarının bulunabilmesi için kullanılmış olan hunidir. Şekil 3.11'de Chik and Vallejo (2005) çalışmalarında kullandıkları ve ASTM standardına uygun bir huni görülmektedir. Burada, hununun çıkış çapı 0,9 cm'dir.

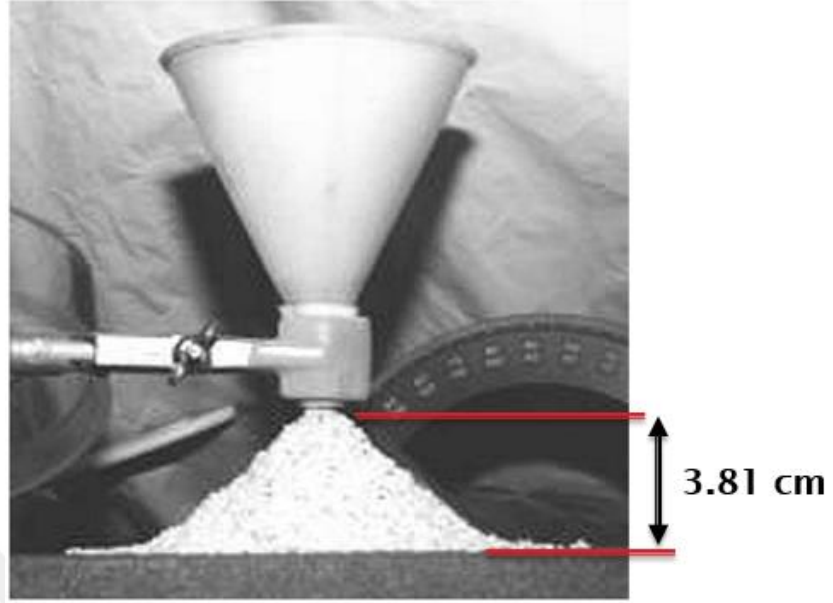
Şekil 3.8'de ise kurulan deney düzeneği sunulmaktadır.



Şekil 3.10. Kullanılan huniler

Çizelge 3.6. Malzeme boyutlarına göre kullanılacak hunilerin özellikleri

Huni	Huni Ağızı (malzeme çıkış çap), (cm), (d)	Dökülecek Yükseklik (H) (cm),	Kullanılacak Malzeme Boyutları (mm)
1. Huni	0,9	3,81	0,30 ile 1,18 1,18 ile 1,40
2. Huni	1,55	6,56	1,40 ile 2,36 2,36 ile 2,80 2,80 ile 3,35 3,35 ile 4,75



Şekil 3.11. Chik and Vallejo (2005) çalışmalarında kullandıkları huni

Deneyin yapılışı:

ASTM C1444'e göre deney yapılırken önce istenen boyutta malzeme alınır tartılır (Şekil 3.12) Bu standarda göre bir huni vasıtasıyla 3,81 cm yükseklikten malzeme dökülür. Huninin iç kısımdaki malzeme çıkış çapı 0,9 cm dir. Huni çıkış çapı 0,64 cm – 0,97 cm arası seçilebilir ve huninin içine 113,5 gr – 227,2 gr aralığında malzeme, huninin büyüklüğüne göre yerleştirilebilir. Eğer malzemenin tümü sığmaz ise huninin alt kısmını açtıktan sonra malzeme dökülmeye başladığı andan itibaren malzemenin geri kalan kısmının yaklaşık aynı hızda huniye yukarıdan dökülmesi gerekir. Deneye tabi tutulacak olan zemin numunesi 454 gr olmalıdır. Örnek homojen olmalı ve malzeme yığınını temsil etmelidir. Örnek malzeme karıştırılmak için büyük bir kaba yerleştirilir. Daha sonra huniyi tabandan istenilen yükseklikte ayarlamak için istenilen yükseklikte cetvel huninin altına yerleştirilir, huni ağzı bloğa değene kadar aşağı indirildikten sonra huni sabitlenir ve cetvel kaldırılır. Malzeme tartılır, huni ağzı kapatılır, tam dolana kadar malzeme boşaltılır. Daha sonra huninin ağzı açılır, boşalan malzeme hızına yaklaşık denk gelecek şekilde üstte malzeme dökme devam edilir. Plaka üzerinde oluşan koni, huni ağzına girene kadar boşaltılır. Sonra malzeme boşaltma bırakıldıktan

sonra kumpas ile koninin 4 ayrı yerden ölçülür. Test edilen numuneyi tekrar kaba koyup homonejize etmek için karıştırılır ve yukarıdaki adımlar 2 kez daha tekrarlanır. Bu testlerin sonuçları D_1, D_2 ve D_3 olarak kaydedilir. Bu çaplar aralarında 0,254 cm'ye kadar fark izin verilebilir. Eğer fark bu sayıdan yüksek ise deney tekrar yapılır. En son bu çapların ortalamasını D_A olarak yazıldıktan sonra 3.4 eşitliğine koyulur ve yığılma açısı hesaplanmış olur.

$$\text{Yığılma açısı (angle of repose)} = \tan^{-1}[2H/(D_A - d)] \quad (3.4)$$

Şekil 3.12'de 0,30-1,18 mm tane çapına sahip yuvarlak malzeme ile deney düzeneği görülmektedir. Bu düzenekte Chik and Vallejo (2005) çalışmalarında öne sürdükleri kâğıt plaka ile düzenek hazırlanmıştır.



(a)

(b)

Şekil 3.12. (a) 0,30-1,18 mm tane çapına sahip yuvarlak malzeme (b) Deney düzeneği hazırlanması

Şekil 3.13'te numune huni üzerinden dökülmeden önce istenilen şekilde ayarlanmış olan huni görülmektedir. Huni üzerine su terazisi ile iki ayrı yanını düzleştirildikten sonra malzeme huniye dökülmüştür.

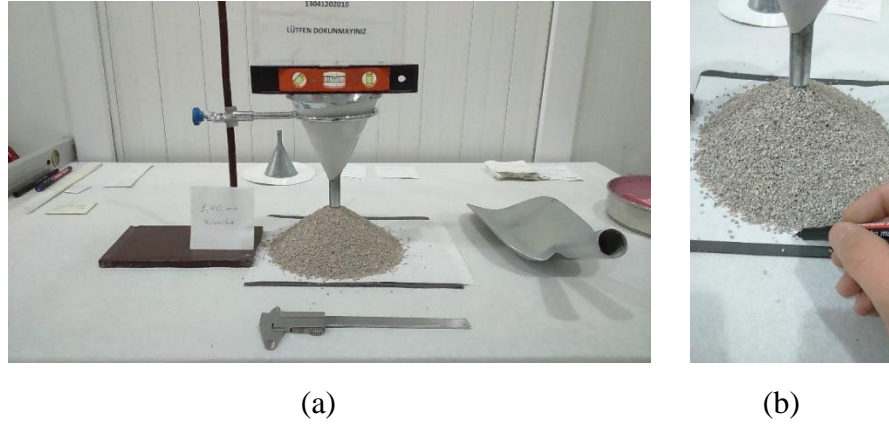


Şekil 3.13. 0,30-1,18 mm yuvarlak malzeme 1. huni ile deney

Şekil 3.14'de 2. huni ile 1,40-2,36 tane çapı aralığındaki malzemenin deney düzeneği görülmektedir. Şekil 3.15 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi, huninin çıkış ağzı kapatılarak huni doldurulmuş, tekrar ağzı açıldıktan sonra huni ağzından dökülen numune hızına yaklaşık hızda üstten kum dökülmüştür. Kumun dökülmesine altta oluşan kum koni şekli huni ağzına girene kadar devam edilmiştir. Altta oluşan kum konisinin 4 ayrı çapının değeri okunmuştur.



Şekil 3.14. 2. huni ile 1,40-2,36 arası malzemenin deney düzeneği



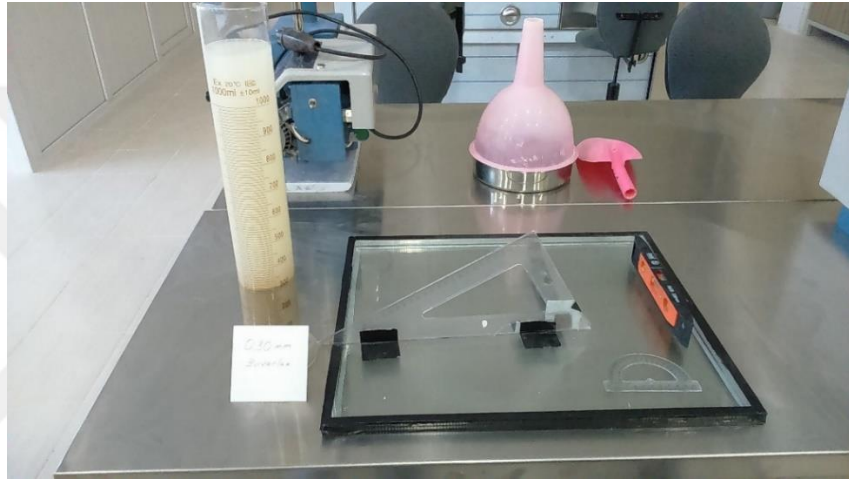
Şekil 3.15. (a) ve (b) 1,40 – 2,36 mm arası yuvarlak malzemenin yığılma açısının belirlenmesi

b) Santamarina and Cho yöntemi'ne göre yığılma açılarının belirlenmesi

Santamarina and Cho yöntemi ıslak ortamda malzemelerin yığılma açılarını bulmayı amaçlayan bir yöntemdir (Santamarina and Cho 2001). Bu yöntemeye uygun olarak hazırlanmış deney düzeneği Şekil 3.16'da görülmektedir.

Deney için gerekli araçlar

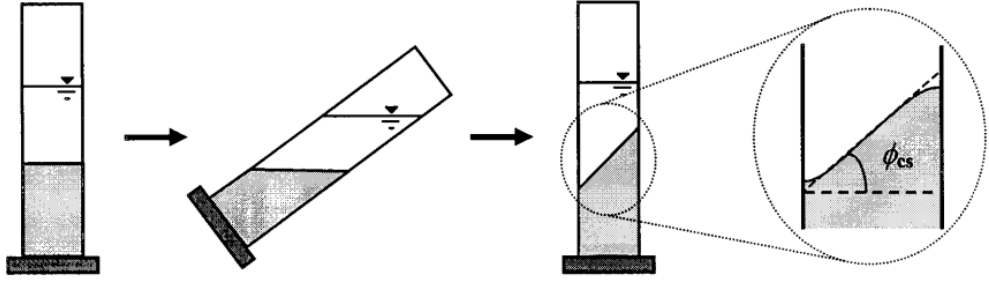
- Cam silindir
- 1 litre su
- Aı ler
- 60 derecelik cetvel



Şekil 3.16. Santamarina and Cho yöntemi için hazırlanmış deney düzeneği

Deneyin yapılışı:

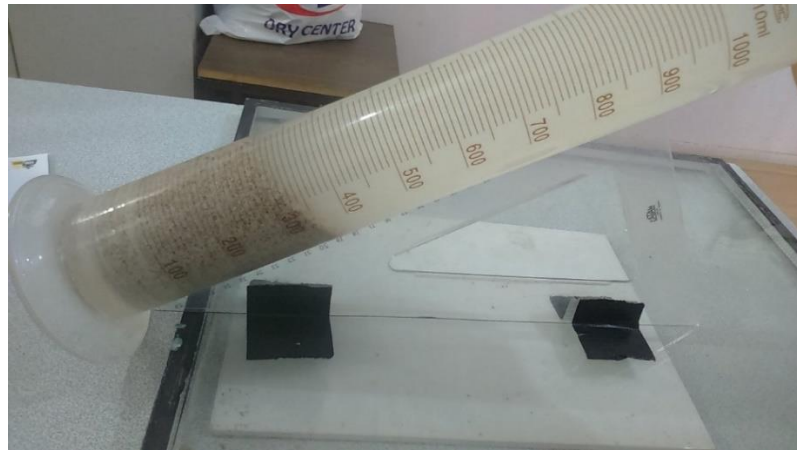
Santamarina and Cho yöntemine göre deneyin yapılışı Şekil 3.17’de görölmektedir. Bu yöntemde cam silindir içine 1 litre su koyulur ve zemin numunesi koyulduktan sonra 60 derece çevrilir daha sonra eski orijinal (dikey) haline getirilir. Cam silindir içinde oluşan zeminin yığılma açısı ölçölür. Şekil 3.18’de Santamarina and Cho Yöntemi’ne göre hazırlanmış olan deney düzeneği görölmektedir. Şekil 3.19’da deneyin yapılışı, Şekil 3.20’de ise 1,18 mm ile 1,40 mm arası tane çapına sahip olan malzemenin yığılma açısının ölçölümü gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Santamarina and Cho yöntemine göre deney yapılışı (Santamarina and Cho 2001)



Şekil 3.18. Santamarina and Cho Yöntemi'ne göre hazırlanmış olan deney düzeneği



Şekil 3.19. Santamarina and Cho Yöntemi'ne göre deneyin yapılışı



Şekil 3.20. Malzemenin yığılma açısının okunması (1,18 mm ile 1,40 mm arası tane çapına sahip malzeme)

3.2.5. Kesme kutusu deneyi

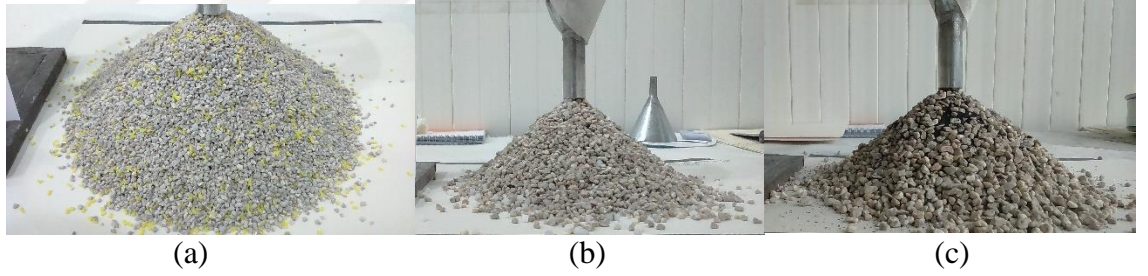
Kesme kutusu deneyinin amacı sıklıkları farklı olan kohezyonlu veya kohezyonsuz zemin numunesine kesme etkisi uygulayarak zemin numunesinin kayma direnci parametrelerini (kayma mukavemeti açısını (ϕ)) bulmaktır. Bu deney, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için uygun olmakla birlikte, daha ziyade kumlar için uygundur. Bundan dolayı bu çalışmada kumların kayma mukavemeti açılarının belirlenmesi için ASTM D 3080-04 yöntemine göre kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kesme hızı olarak ASSHTO T 236'da önerilen 0,25 mm/dakika kullanılmıştır. Her bir numune için üç farklı normal gerilmede (σ) deneyler yapılmıştır. Normal gerilme seviyeleri 0.5 kg/cm², 1.00 kg/cm² ve 2.00 kg/cm² olarak seçilmiştir. Deneyler %30, %50 ve %70 (gevşek, orta sıkı ve sıkı durumları) olmak üzere üç farklı rölatif sıklıkta yapılmıştır. Deneylerde göçmenin belirgin olduğu durumlarda maksimum kayma gerilmesi olarak pik değer alınmıştır (ASTM D 3080). ASTM D 3080 standardında zemin davranışına bağlı olarak farklı yüzdelerinde alınabileceği belirtilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme kutusu deney aleti Şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3.21. Deneylerde kullanılan kesme kutusu aleti

3.2.6. Katkılı numunelerin hazırlanması

Katkılı kumların yığılma açılarının belirlenmesi: yarı yuvarlak kumlara (0,30-4,75 mm arası) üç farklı katkı katılarak (polipropilen, propilen taneler, lastik tozu), üç farklı oranlarda (%1, %2, %5) yığılma açılarının ASTM C1444 yöntemine göre belirlenmiştir.



Şekil 3.22. (a) polipropilen parçacıklar katkılı kum, (b) propilen taneler katkılı kum, (c) lastik tozu katkılı kumların yığılma açısı deneyi yapılması

Zeminlere katkılar (polipropilen parçacıklar, propilen taneler, lastik tozu) belirli oranlarda eklenmiştir (%1, %2, %5), daha sonra yarı yuvarlak 0,30-4,75 mm arasında kalan tüm kumlar için ASTM C1444'e göre deney yapılmıştır (Şekil 3.22). Çizelge 3.7' de katkıların zemin aralıklarına göre hangi oranlarda katıldığı görülmektedir.

Çizelge 3.7. Yarı yuvarlak kumlara (0,30-4,75 mm arası) üç farklı katkı katılarak (polipropilen, propilen taneler, lastik tozu), üç farklı oranlarda (%1, %2, %5) yığılma açılarının ASTM C1444 yöntemine göre belirlenmiştir

Zemin Aralığı (mm)	Zemin Tane Aralıklarına Göre Katılan Polipropilen Parçacıklar'ın Oranları	Zemin Tane Aralıklarına Göre Katılan Propilen Taneler' in Oranları	Zemin Tane Aralıklarına Göre Katılan Lastik Tozunun Oranları
0,30-1,18	%1	%1	%1
	%2	%2	%2
	%5	%5	%5
1,18-1,40	%1	%1	%1
	%2	%2	%2
	%5	%5	%5
1,40-2,36	%1	%1	%1
	%2	%2	%2
	%5	%5	%5
2,36-2,80	%1	%1	%1
	%2	%2	%2
	%5	%5	%5
2,80-3,35	%1	%1	%1
	%2	%2	%2
	%5	%5	%5
3,35-4,75	%1	%1	%1
	%2	%2	%2
	%5	%5	%5

Katkılı kumların kayma mukavemeti açılarının belirlenmesi: Yarı yuvarlak kumlara %2 oranında farklı katkı karıştırılarak kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Rölatif sıklık yüzde 70'te ($D_r = \%70$) deney yapılmıştır. Bunun da nedeni zemin iyileştirmesi en sıkı halde yapılır, katkılarında zemin iyileştirmesinde olumlu sonuç verip vermeyeceğini araştırmak için en sıkı hale tekabül eden rölatif sıklık yüzde 70 seçilmiştir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 3.23. (a) polipropilen katkılı kum, (b) propilen taneler katkılı kum, (c) lastik tozu katkılı kumların kesme kutusu deneyi yapılması

Polipropilen parçacıklar kuma katılmadan önce yaklaşık 1 ile 2 mm arasında makasla doğranarak granülometri eğrisi çizilmiştir. Daha sonra kesme kutusunda deney yapılmıştır.

Çizelge 3.8. Katkıların, zemin tane aralığına göre katılan katkı oranları

Zemin Aralığı (mm)	Zemin Tane Aralıklarına Göre Katılan Polipropilen Parçacıklar' ın Oranları	Zemin Tane Aralıklarına Göre Katılan Propilen Taneler' in Oranları	Zemin Tane Aralıklarına Göre Katılan Lastik Tozunun Oranları
0,30-1,18	%2	%2	%2
1,40-2,36	%2	%2	%2
3,35-4,75	%2	%2	%2

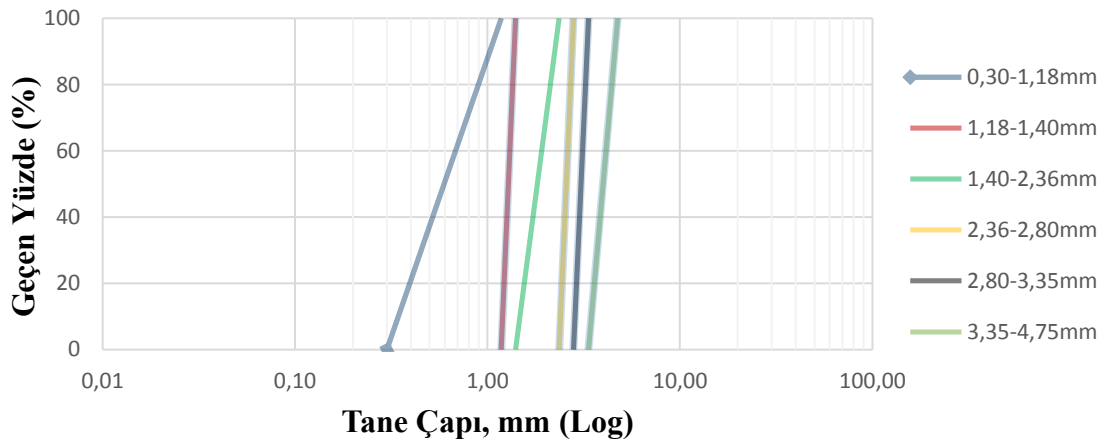
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında, tane çapları 0,30 mm ile 4,75 mm arasında kalan kumlar deneylere tabi tutulmuştur. Öncelikle kullanılacak kum sınıflandırılmış ve indeks deneyleri yapılmıştır. Her bir tane çapı aralığı için, yığılma açıları kuru ortamda (ASTM C1444) ve ıslak ortamda (Santamarina and Cho yöntemi) belirlenmiştir. Ardından, her bir tane çapı aralığındaki zemin üzerinde kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilerek, numunelerin kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir.

Daha sonra yarı yuvarlak zeminlere üç farklı katkı (Propilen taneler, Lastik tozu ve Polipropilen) katılarak katkılı kum numuneler elde edilmiş ve bu numuneler üzerinde ASTM C1444'e (kuru yöntem) göre yığılma açısı deneyleri ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

4.1. Katkisız Kumların Tane Çapı Dağılım Eğrileri ve Sınıflandırılması

Çalışmada kullanılan numuneler köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak olmak üzere üç farklı şekilsel özelliğe sahip olup bu numuneler üzerinde elek analizi deneyi gerçekleştirilerek, numunelerin tane çapı dağılım eğrileri çizilmiştir. Deneylerde kullanılan zeminlere ait tane çapı dağılım eğrileri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kumların tane çapı dağılım eğrileri

Yapılan indeks deneyler sonucunda deneylerde kullanılan tüm zeminlerin USCS'ye göre zemin sınıfı SP (kötü derecelenmiş kum) olarak belirlenmiştir.

4.2. Kullanılan Zeminlerin İndeks Özellikleri

Kumların yığılma ve kayma mukavemeti açılarının belirlenmesinden önce bunların indeks deneyleri yapılarak indeks özellikleri belirlenmiştir (Örneğin Çizelge 4.1'de 0,30-1,18 mm köşeli kumun indeks özellikleri görülmektedir). Geri kalan tüm kumlara ait indeks özellikler **EK 1**'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. 0,30-1,18 mm köşeli kuma ait indeks özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmax})	16,9	kN/m ³
Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_{kmin})	13,7	kN/m ³
Maksimum Boşluk Oranı (e_{max})	0,97	-
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	0,59	-
% 30 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($\gamma_{dr=%30}$)	14,5	kN/m ³
% 50 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($\gamma_{dr=%50}$)	15,1	kN/m ³
% 70 Rölatif Sıklıkta Birim Hacim Ağırlığı ($\gamma_{dr=%70}$)	15,7	kN/m ³
% 30 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr=%30}$)	0,86	-
% 50 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr=%50}$)	0,78	-
% 70 Rölatif Sıklıkta Boşluk Oranı ($e_{dr=%70}$)	0,71	-
Zeminin Yüzde Onunun Geçtiği Çap (D_{10})	0,388	mm
Zeminin Yüzde Otuzunun Geçtiği Çap (D_{30})	0,564	mm
Zeminin Yüzde Altmışının Geçtiği Çap (D_{60})	0,828	mm
Uniformluluk Katsayısı (C_u)	2,13	-
Derecelenme Katsayısı (C_c)	0,990	-

4.3. Katkısız Kumların Yığılma Açılarının Belirlenmesi

4.3.1. ASTM C 1444 yöntemine göre katkısız kumların yığılma açılarının belirlenmesi

Katkısız kum zeminlerin yığılma açıları ASTM C1444'e (kuru yöntem) göre belirlenmiştir. Deneyler, köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak şekil özelliklerine sahip

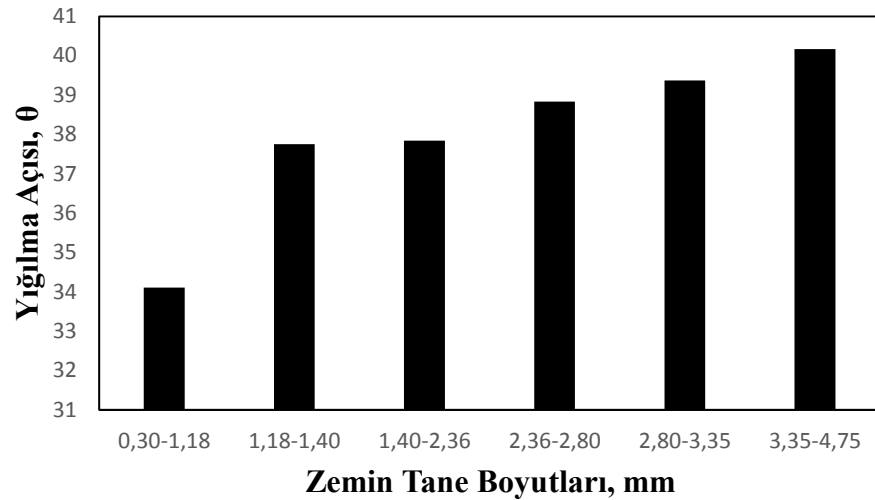
numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler her numune için en az 3 defa tekrarlanmıştır.

4.3.1.a. ASTM C 1444'e göre köşeli katkısız kumların yığılma açılarının belirlenmesi

Köşeli katkısız kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deney sonuçları Çizelge 4.2'de görülmektedir. Tane boyutlarına göre yığılma açılarının değişimi ise Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.2'ye göre, köşeli kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri sonucunda, tane çapının artmasıyla yığılma açılarının arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.2. Köşeli kumlar üzerinde yapılan yığılma deneyi sonuçları (ASTM C1444)

Malzeme Boyutu (mm)	Ortalama Yığılma Açısı (θ)
0,30-1,18	34,11
1,18-1,40	37,75
1,40-2,36	37,84
2,36-2,80	38,83
2,80-3,35	39,37
3,35-4,75	40,17



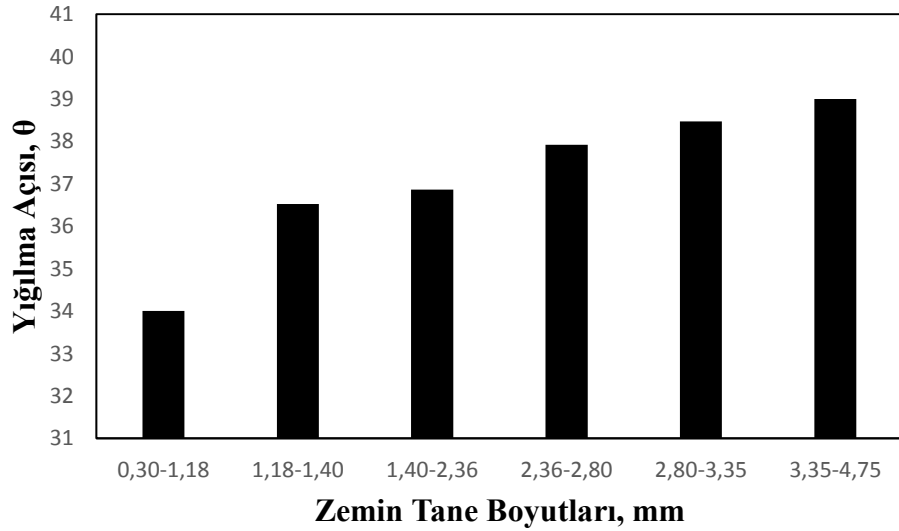
Şekil 4.2. Köşeli kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi

4.3.1.b. ASTM C 1444'e göre yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi

Yarı yuvarlak katkısız kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deney sonuçları Çizelge 4.3'te görülmektedir. Tane boyutlarına göre yığılma açılarının değişimi ise Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.3'e göre, yarı yuvarlak kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri sonucunda, tane çapının artmasıyla yığılma açılarının arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.3. Yarı yuvarlak kumlar üzerinde yapılan yığılma deneyi sonuçları

Malzeme Boyutu (mm)	Ortalama Yığılma Açısı (θ)
0,30-1,18	34,00
1,18-1,40	36,52
1,40-2,36	36,86
2,36-2,80	37,92
2,80-3,35	38,47
3,35-4,75	39,00



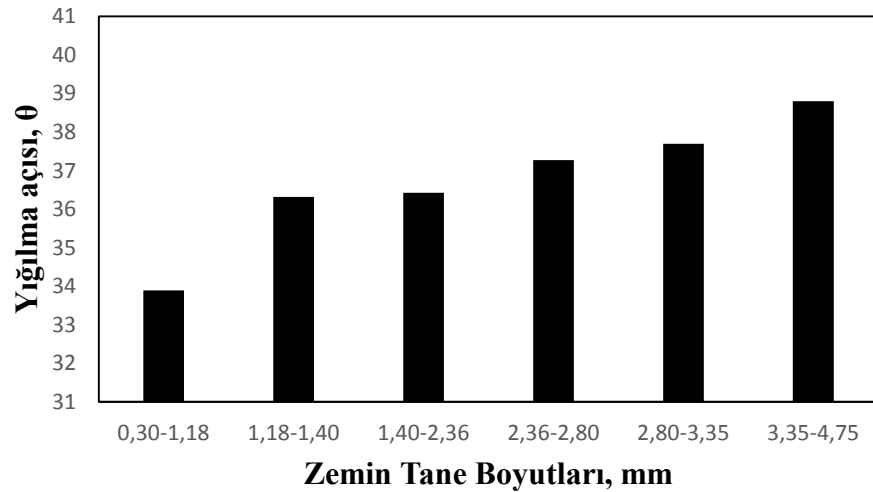
Şekil 4.3. Yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi

4.3.1.c. ASTM C 1444'e göre yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi

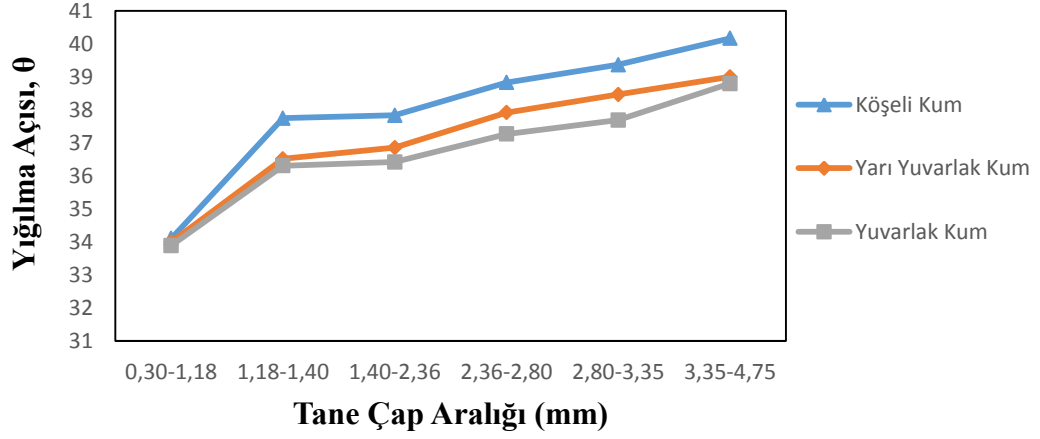
Yuvarlak katkısız kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deney sonuçları Çizelge 4.4'te görülmektedir. Tane boyutlarına göre yığılma açılarının değişimi ise Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'de göre, yuvarlak kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri sonucunda, tane çapının artmasıyla yığılma açılarının arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. Yuvarlak kumlar üzerinde yapılan yığılma deneyi sonuçları

Malzeme Boyutu (mm)	Ortalama Yığılma Açısı (θ) (derece)
0,30-1,18	33,89
1,18-1,40	36,31
1,40-2,36	36,42
2,36-2,80	37,27
2,80-3,35	37,69
3,35-4,75	38,80



Şekil 4.4. Yuvarlak kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi



Şekil 4.5. Köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak kumların yığılma açılarının (ASTM C 1444) tane çapına bağlı olarak değişimi

ASTM C 1444 yöntemine göre üç farklı şekilsel özelliğe sahip (köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak) kumların yığılma açılarının 33,89 derece ile 40,17 derece arasında olduğu belirlenmiştir. Kumların yığılma açılarının Chen *et al.* (2015)'te yapmış oldukları çalışmada buldukları değerlerle uyumlu olduğu (25,8°-44,8°) görülmektedir. İlaveten, köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak tanelere sahip kumların tane boyutları arttıkça, yığılma açılarının da arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, Liu and Zhou (2008)'de yapmış oldukları çalışmada, malzemenin boyutu arttıkça yığılma açılarının da arttığını belirtmişlerdir.

4.3.2. Santamarina and Cho yöntemine göre katkısız kumların yığılma açılarının belirlenmesi

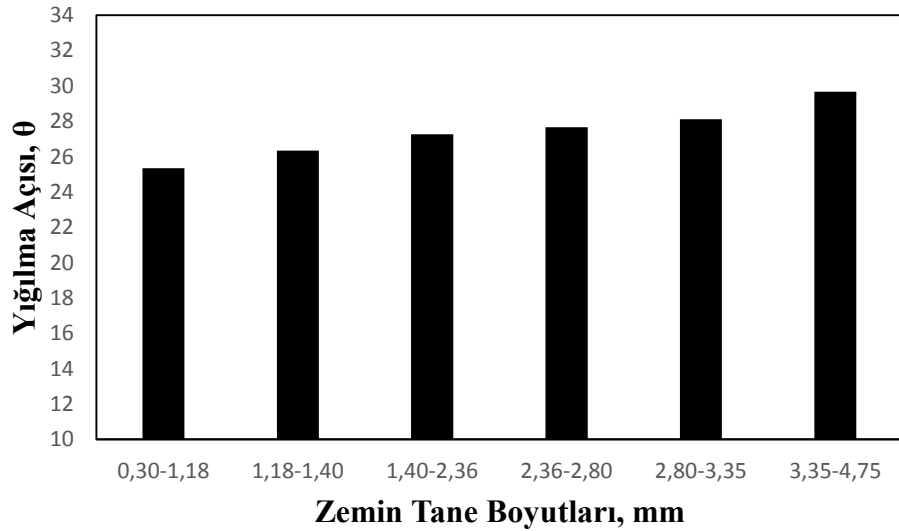
Katkısız kum zeminlerin yığılma açıları Santamarina and Cho Yöntemi'ne (ıslak yöntem) göre belirlenmiştir. Deneyler, köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak şekil özelliklerine sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.3.2.a. Santamarina and Cho yöntemine göre köşeli kumların yığılma açılarının belirlenmesi

Köşeli katkısız kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deney sonuçları Çizelge 4.5'te görülmektedir. Tane boyutlarına göre yığılma açılarının değişimi ise Şekil 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Santamarina and Cho yöntemi ile köşeli malzemelerin yığılma açılarının sonuçları

Malzeme Boyutu (mm)	Ortalama Yığılma Açısı (θ)
0,30-1,18	25,33
1,18-1,40	26,33
1,40-2,36	27,25
2,36-2,80	27,66
2,80-3,35	28,10
3,35-4,75	29,66



Şekil 4.6. Santamarina and Cho yöntemine göre köşeli malzemelerin yığılma açılarının tane çapına bağlı olarak değişimi

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.6' da görüldüğü gibi, köşeli malzemelerin tane boyutları arttıkça yığılma açıları da artmıştır.

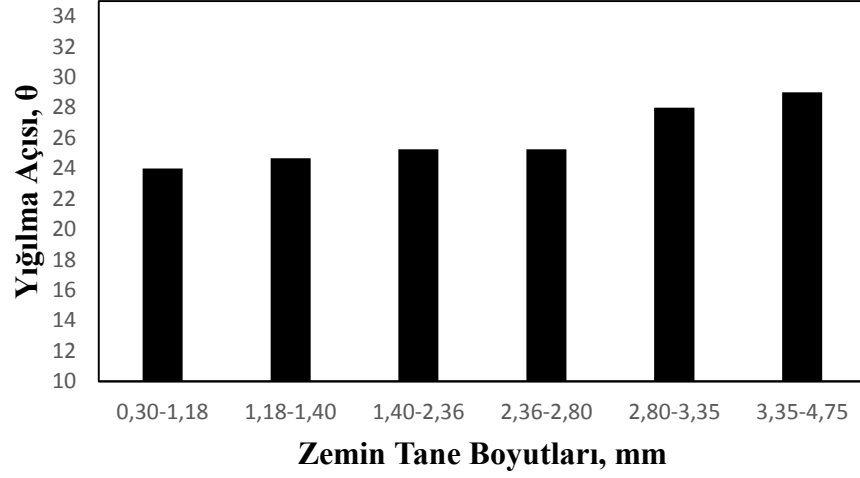
4.3.2.b. Santamarina and Cho yöntemi ile yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi

Yarı yuvarlak katkısız kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deney sonuçları Çizelge 4.6'da görülmektedir. Tane boyutlarına göre yığılma açılarının değişimi ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Santamarina and Cho yöntemi ile yarı yuvarlak malzemelerin yığılma açılarının sonuçları

Malzeme Boyutu (mm)	Ortalama Yığılma Açısı (θ) (derece)
0,30-1,18	24,00
1,18-1,40	24,66
1,40-2,36	25,25
2,36-2,80	25,27
2,80-3,35	28,00
3,35-4,75	29,00

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.7'de incelendiğinde, yarı yuvarlak malzemelerin tane boyutlarındaki artışla, yığılma açısı değerlerinde de artış meydana geldiği görülmektedir.



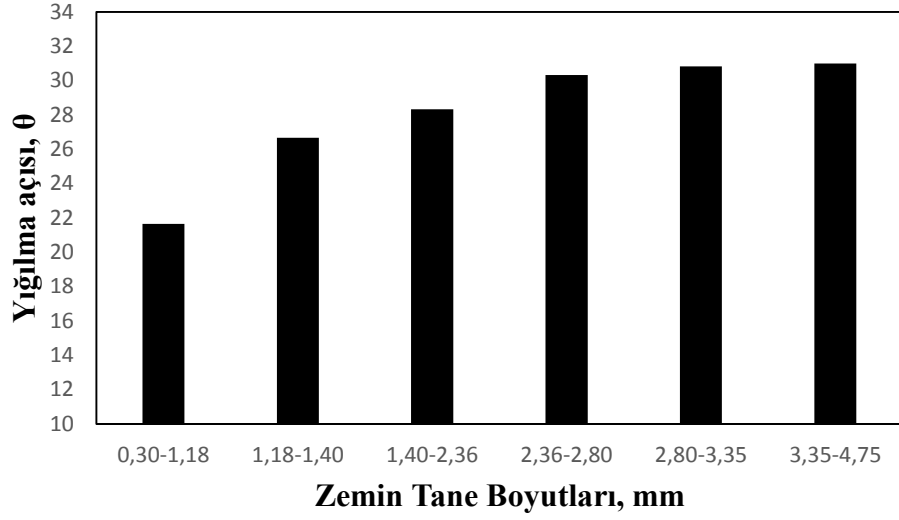
Şekil 4.7. Santamarina and Cho yöntemine göre yarı yuvarlak malzemelerin yığılma açılarının tane çapına bağlı olarak değişimi

4.3.2.c. Santamarina and Cho yöntemi ile yuvarlak kumların yığılma açılarının belirlenmesi

Yuvarlak katkısız kumlar üzerinde yapılan yığılma açısı deney sonuçları Çizelge 4.7’de görülmektedir. Tane boyutlarına göre yığılma açılarının değişimi ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Santamarina and Cho yöntemi ile yuvarlak malzemelerin yığılma açıları

Malzeme Boyutu (mm)	Ortalama Yığılma Açısı (θ) (derece)
0,30-1,18	21,66
1,18-1,40	26,66
1,40-2,36	28,33
2,36-2,80	30,33
2,80-3,35	30,83
3,35-4,75	31,00



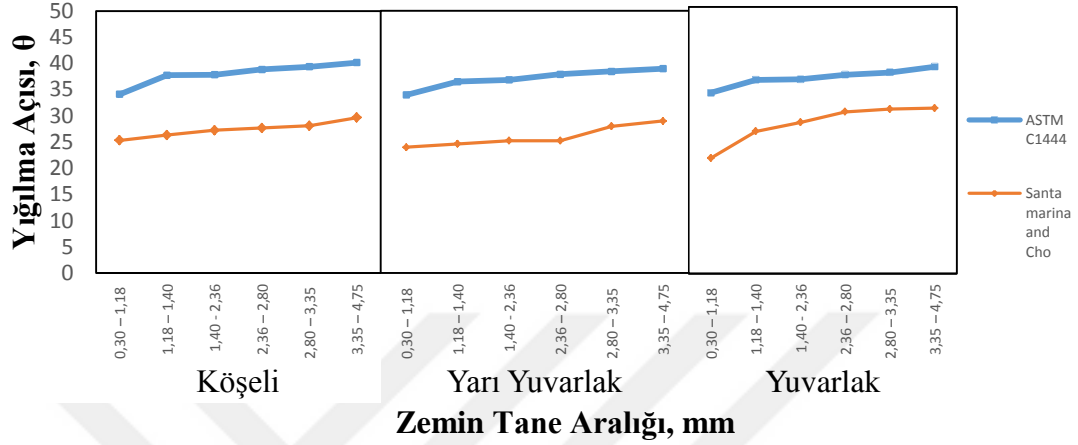
Şekil 4.8. Santamarina and Cho yöntemine göre yuvarlak malzemelerin yığılma açılarının tane çapına bağlı olarak değişimi

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, yuvarlak malzemelerin tane boyutları arttıkça yığılma açıları da artmıştır. Santamarina and Cho Yöntemi’ne göre üç farklı şekilsel özelliğe sahip (köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak) kumların yığılma açılarının 21,66 derece ile 31,00 derece arasında olduğu belirlenmiştir. İlaveten, köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak tanelere sahip kumların tane boyutları arttıkça, yığılma açılarının da arttığı görülmüştür.

4.3.3. ASTM C 1444 ve Santamarina and Cho yöntemlerinden elde edilen yığılma açılarının karşılaştırılması

ASTM C 1444 yöntemine göre kuru ortamda bulunan yığılma açısı değerlerinin Santamarina and Cho Yöntemi’ne göre ıslak ortamda belirlenen yığılma açısı değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin ıslak ortamda bulunan su etkisiyle kum tanelerin aderansının azalması sonucu tanelerin birbiri üzerinde kayması olduğu düşünülmektedir. Taneler birbiri üzerinde su sayesinde pürüzsüz ortam gibi kayarlar ve daha fazla alana yayılırlar, Bu nedenle oluşan koninin düzlemlerle yaptığı açı daha düşük olur. Fakat ASTM C 1444 yönteminde kuru şartlar

altında deney yapıldığından yukarıda bahsedilen aderans burada mevcuttur, dolayısıyla Santamarina and Cho yöntemine göre yığılma açısı değerleri daha yüksektir.



Şekil 4.9. ASTM C1444 ve Santamarina and Cho yöntemlerinden elde edilen yığılma açılarının karşılaştırılması

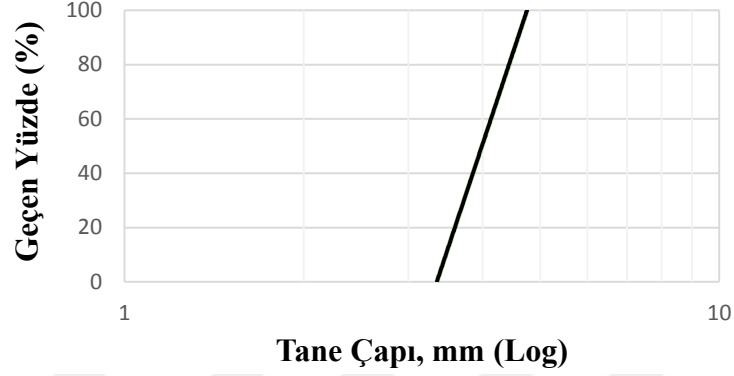
Şekil 4.9'da görülen grafik ASTM C 1444 üzerinde 0,30 ile 4,75 mm arası kum ve bunlarında üç farklı şekilsel özelliğe (köşeli, yarı yuvarlak, yuvarlak) sahip olan numuneler üzerinde yapılan yığılma açıları ile Santamarina and Cho (ıslak ortam) yöntemine göre yapılan deney sonuçlarının kıyaslanma grafiğidir. Buradan ASTM C1444- Santamarina and Cho arasındaki ilişkisi görülmektedir. ASTM ile kuru şartlarda kumların yığılma açıları belirlenirken Santamarina and Cho yönteminde yığılma açıları ıslak ortamda belirlenmektedir.

4.4. Katkılı Kumların Yığılma Açılarının Belirlenmesi

4.4.1. Propilen taneler katkı kum numuneler üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri

Plastikten oluşan tanelerin birim hacim ağırlığı piknometre deneyi ile 9 kN/m^3 olarak bulunmuştur. Bu taneler yarı yuvarlak kumlara katılarak yığılma açısına etkileri

belirlenmiştir. Şekil 4.10’da deneylerde kullanılan propilen tanelere ait granülometri eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.10. Propilen taneler’ e ait granülometri eğrisi

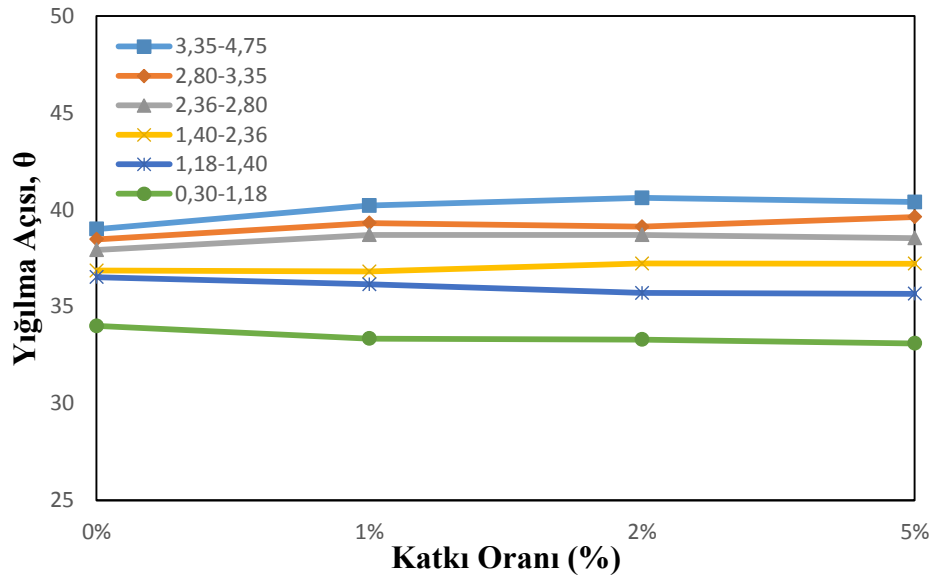
Propilen tanelerin çap aralığı 3,35-4,75 mm arası olarak belirlenmiştir.

Propilen taneler sadece yarı yuvarlak 0,30-4,75 mm arasında kalan tüm kumlara %1, %2 ve %5 oranlarında katılmış ve homojen olacak şekilde karıştırılarak elde edilen katkılı numunelerin yığılma açıları bulunmuştur.

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.11’de sadece yarı yuvarlak 0,30-4,75 mm arasında kalan tüm kumlara %1, %2 ve %5 oranlarda propilen taneler katılarak yığılma açılarının sonuçlarını ve grafiksel gösterimi görünmektedir.

Çizelge 4.8. Propilen taneler %1, %2 ve %5 oranlarda katkıli kumların yığılma açıları sonuçları

Malzeme Aralığı (mm)	Katkısız Kumların Yığılma Açıları	Propilen Taneler Katkılı Kumların Yığılma Açıları		
	%0	%1	%2	%5
0,30-1,18	34,00	33,35	33,78	33,10
1,18-1,40	36,52	36,15	35,63	35,66
1,40-2,36	36,86	36,81	37,22	36,21
2,36-2,80	37,92	38,70	38,70	38,53
2,80-3,35	38,47	39,31	39,12	39,62
3,35-4,75	39,00	40,21	40,61	40,39



Şekil 4.11. %1, %2 ve %5 oranlarda propilen bile ile katkıli yarı yuvarlak kumların yığılma açılarının değişimi

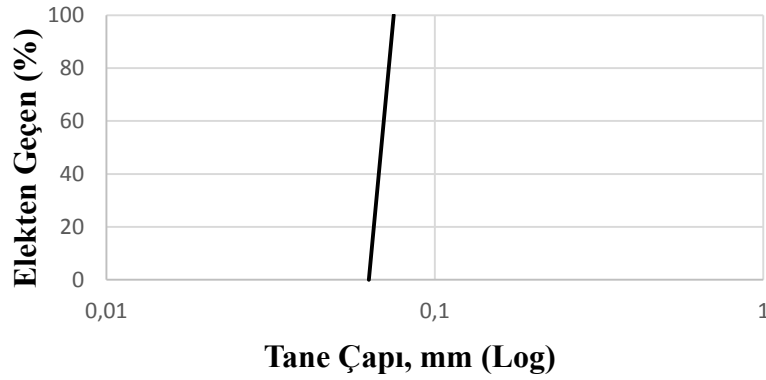
Yarı yuvarlak kumlara belirli oranlarda eklenen propilen tanelerin yığılma açısı deneylerinden elde edilen değerlerin grafiksel ifadesi Şekil 4.11’de görülmektedir. 0,30 mm - 2,36 mm tane çapı aralığındaki %1 propilen taneler katkıli kumun yığılma açısı değeri katkısız kumun yığılma açısı değerine göre azalırken, 2,36 mm – 4,75 mm tane

çapı aralığındaki %1 propilen taneler katkılı kumun yığılma açısı değerlerinin arttığı görülmüştür. Propilen taneler, kum zemine %1 oranında katıldığında düşük tane çaplarında yığılma açısının katkısız kuma göre azaldığı, büyük çaplarda ise yığılma açısının arttığı söylenebilir.

4.4.2. Lastik tozu katkılı kum numuneler üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri

Lastik tozu sadece yuvarlak kumlara 0,30-4,75 mm arasında olan tüm kumlara %1, %2 ve %5 oranlarda lastik tozu eklenerek yığılma açıları bulunmuştur.

Lastik tozu üzerinde elek analizleri yapılmış ve çalışmada kullanılan lastik tozunun tane çapı aralığının 0,063-0,075 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Lastik tozunun granülometri eğrisi Şekil 4.12’de görülmektedir.



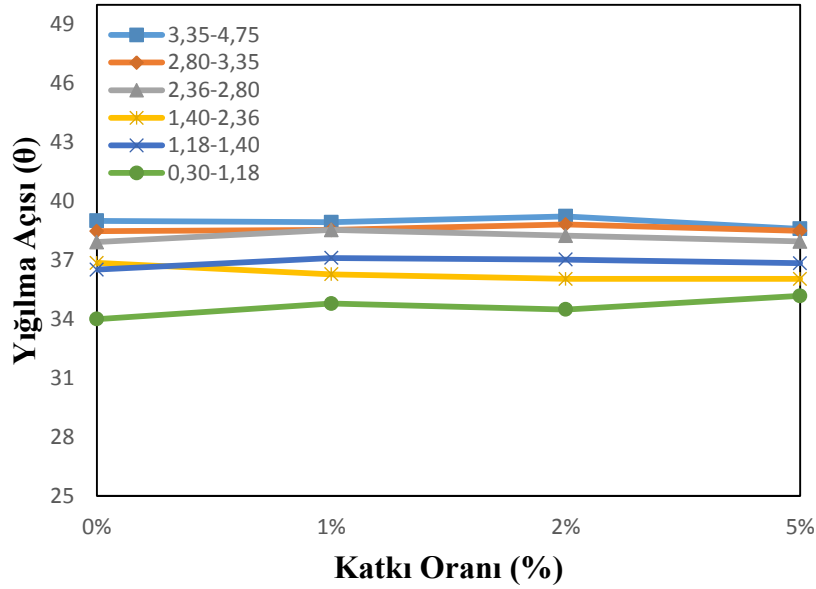
Şekil 4.12. Lastik tozuna ait granülometri eğrisi

Lastik katkılı kum numunelerin yığılma açıları ASTM C 1444’e göre belirlenmiştir.

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.13’te yarı yuvarlak kum için ASTM C 1444 standardına göre 0,30-4,75 mm arasında kalan tüm kumlara %1, %2 ve %5 oranlarda lastik tozu katılarak elde edilmiş katkılı kumların yığılma açıları ve grafiksel gösterimi görülmektedir.

Çizelge 4.9. %1, %2 ve %5 oranlarında lastik tozu katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine olan etkisi

Malzeme Aralığı (mm)	Katkısız Kumların Yığılma Açıları	Lastik Tozu Katkılı Kumların Yığılma Açıları		
	%0	%1	%2	%5
0,30-1,18	34,00	34,79	34,49	35,18
1,18-1,40	36,52	37,11	37,03	36,84
1,40-2,36	36,86	36,28	36,04	36,04
2,36-2,80	37,92	38,54	38,24	37,95
2,80-3,35	38,47	38,54	38,81	38,49
3,35-4,75	39,00	38,93	39,23	38,59

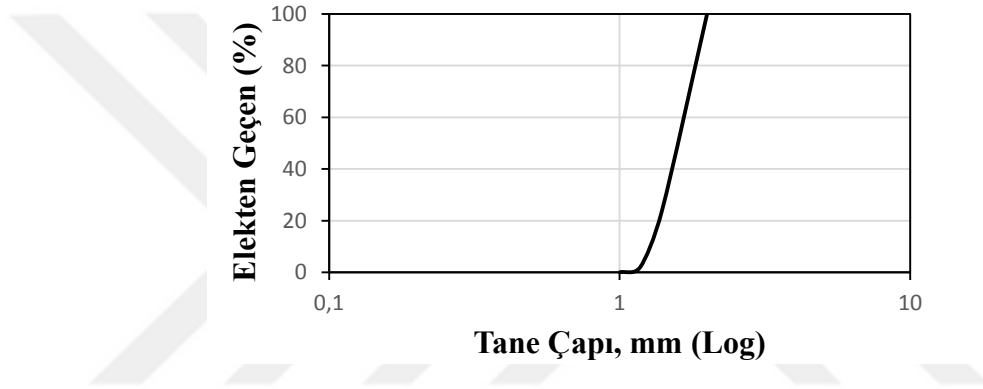


Şekil 4.13. %1, %2 ve %5 oranlarında lastik tozu katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine etkisinin grafiksel gösterimi

Belirli oranlarında lastik tozu katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine etkisinin grafiksel gösterimi Şekil 4,13'te görülmektedir. Burada, genellikle katkısız kumun yığılma açısının değerleri %1 katkıli kumun yığılma açısı değerlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir.

4.4.3. Polipropilen parçacıklar katkı kum numuneler üzerinde yapılan yığılma açısı deneyleri

Polipropilen yaklaşık 1 mm olarak makasla kesilmiştir, daha sonra bunların elek analizi yapılarak granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 4.14). Kumlara %1, %2 ve %5 oranlarında katılmıştır ve homojen olacak şekilde karıştırılarak yığılma açıları bulunmuştur.

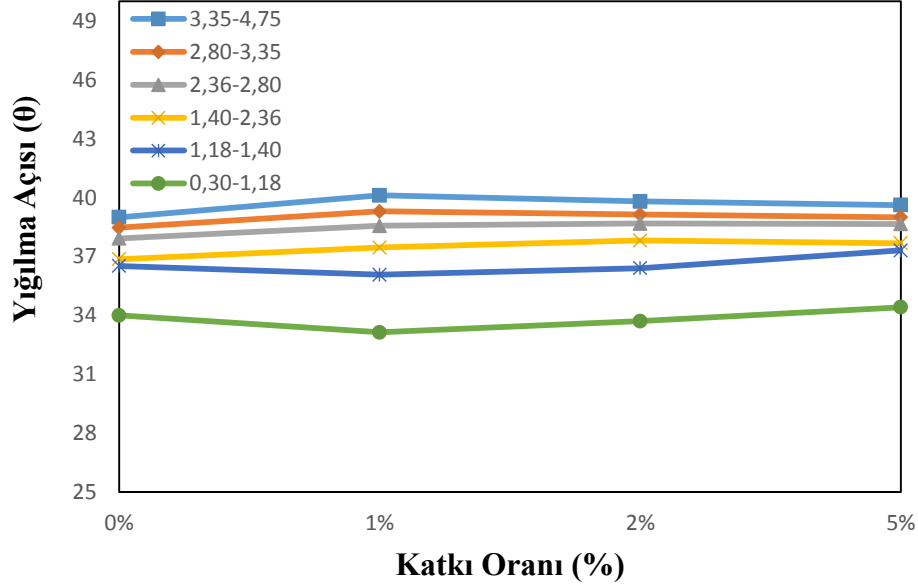


Şekil 4.14. Polipropilen'e ait granülometri eğrisi

Çizelge 4.10. %1, %2 ve %5 oranlarında polipropilen katkı yarı yuvarlak kumların yığılma açıları sonuçları

Malzeme Aralığı (mm)	Katkısız Kumların Yığılma Açıları	Polipropilen Katkılı Kumların Yığılma Açıları		
	%0	%1	%2	%5
0,30-1,18	34,00	33,14	33,71	34,42
1,18-1,40	36,52	36,07	36,41	37,31
1,40-2,36	36,86	37,46	37,82	37,68
2,36-2,80	37,92	38,80	38,68	38,66
2,80-3,35	38,47	39,30	39,14	39,00
3,35-4,75	39,00	40,12	39,81	39,62

Şekil 4.15'te %1, %2 ve %5 oranlarında polipropilen parçacıklar katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine etkisinin grafiksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.15. %1, %2 ve %5 oranlarında polipropilen parçacıklar katkısının yarı yuvarlak kumların yığılma açıları üzerine etkisinin grafiksel gösterimi

Şekil 4.15 incelendiğinde, %1 polipropilen parçacıklar katkılı kumların, düşük tane çap aralığında yığılma açılarının katkısız kuma göre daha düşük olduğu, tane boyunun artmasıyla yığılma açısının da artış gösterdiği görülmüştür. %2 ve %5 polipropilen parçacıklar katkılı kumlarda ise düşük tane çap aralığındaki kumların yığılma açısında artış meydana gelirken daha büyük tane çap aralığında bulunan %2 ve %5 polipropilen parçacıklar katkılı kumların yığılma açılarının azaldığı görülmüştür.

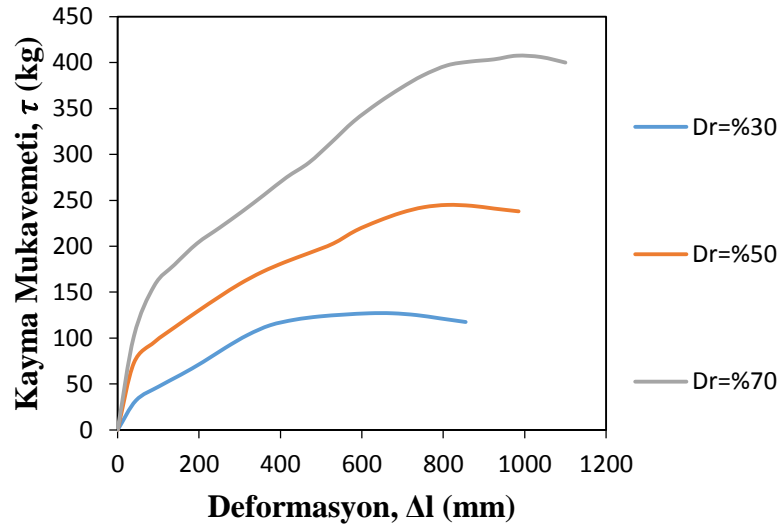
4.5. Katkısız Kumların Kesme Kutusu Deneylerinin Yapılması

Katkısız Kumlar üzerinde ASTM D 3080'e göre kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kum numunelerin kesme kutusuna yerleştirilebilmeleri için bazı indeks özellikleri ve zemin sınıfları belirlenmiştir. Deneyler, her bir tane çapı aralığındaki, köşeli, yarı

yuvarlak ve yuvarlak kum numuneler üzerinde, %30, %50 ve %70 olmak üzere üç farklı rölatif sıklıkta gerçekleştirilmiştir.

4.5.1. Kesme kutusu deneyleri ile katkısız kumların (0,30 mm ile 4,75 mm arası) kayma mukavemeti açılarının (ϕ) belirlenmesi

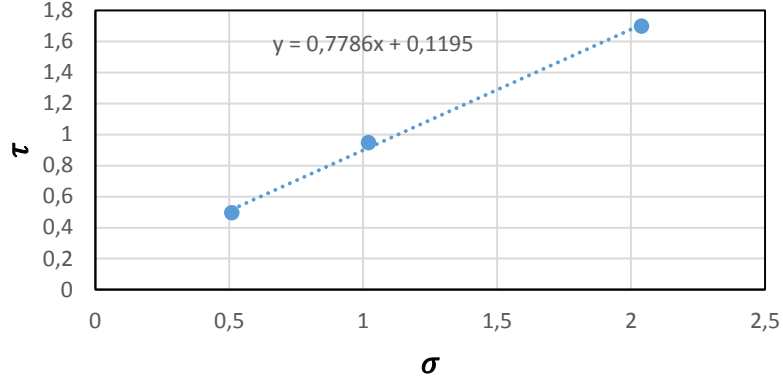
Katkısız kumlar üzerinde yapılan kesme kutusu deneyi sonucu çizilmiş olan 0,30-1,18 mm köşeli kumun deformasyon-kayma direnci grafiği Şekil 4.16'da görülmektedir. Şekil 4.17'de ise aynı malzemenin Mohr-Coulomb göçme hipotezi grafiği üç farklı rölatif sıklık değeri için verilmiştir. Kumlar üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerine göre, kayma mukavemeti açısı, aynı kum için, rölatif sıklık arttıkça artar, azaldıkça azalır.



Şekil 4.16. Köşeli 0,30-1,18 mm arasında olan kumun deformasyon-kayma direnci grafiği

Kumlarda, kayma mukavemeti açısı zeminin iyi veya kötü derecelenmiş olmasına, tanelerin şekline (köşeli, yarı yuvarlak, yuvarlak) bağlıdır. İyi derecelenmiş kumda kayma mukavemeti açısı, kötü derecelenmiş göre daha büyük, köşeli taneli kumlarda yuvarlak taneliye göre daha büyüktür. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'den da (Mohr-Coulomb

göçme hipotezi grafiği) anlaşılacağı gibi rölatif sıkılık arttıkça kayma mukavemeti açısı da artmaktadır.

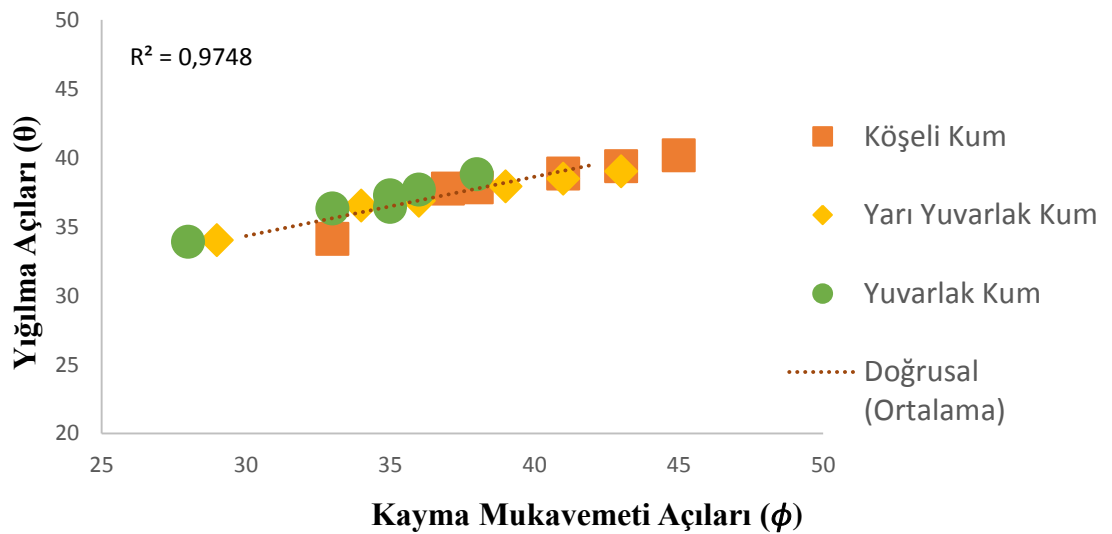


Şekil 4.17. Kayma mukavemeti açısının belirgin olduğu Mohr-Coulomb göçme hipotezi grafiği

Çizelge 4.11’de köşeli, yarı yuvarlak, yuvarlak kumlar üzerinde gerçekleştirilmiş olan kesme kutusu deney sonuçları görülmektedir. Şekil 4.18’de ise $D_r=30\%$ ’a göre belirlenen kayma mukavemeti açılarının ve ASTM C1444 yöntemine göre belirlenen yığılma açılarının grafiği görülmektedir kıyaslanması görülmektedir.

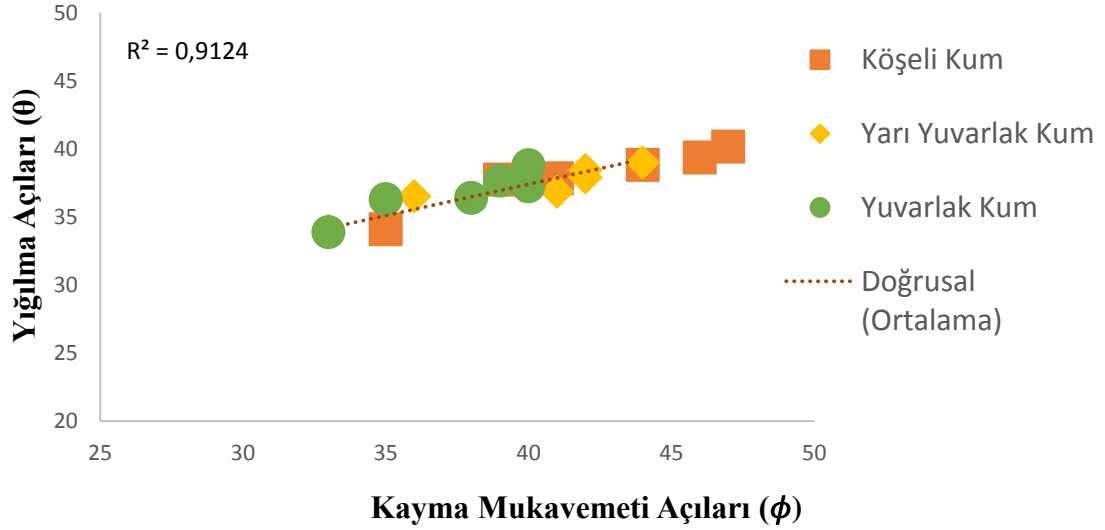
Çizelge 4.11. Kumların (köşeli, yarı yuvarlak, yuvarlak) kayma mukavemeti açıları (ϕ)

Malzeme Aralığı (mm)	Kayma Mukavemeti Açısı için Rölatif Sıklık (D_r)	Yığılma Açısı için Rölatif Sıklık (D_r)	Köşeli Kumun Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ) (derece)	Yarı Yuvarlak Kumun Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ) (derece)	Yuvarlak Kumun Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ) (derece)
0,30 – 1,18	30 %	18 %	33	29	28
	50 %		35	33	33
	70 %		39	36	35
1,18 – 1,40	30 %	18 %	37	34	33
	50 %		39	36	35
	70 %		42	38	38
1,40 - 2,36	30 %	18 %	38	36	35
	50 %		41	41	38
	70 %		42	42	40
2,36 – 2,80	30 %	18 %	41	39	35
	50 %		44	42	40
	70 %		45	43	43
2,80 – 3,35	30 %	18 %	43	41	36
	50 %		46	42	39
	70 %		47	43	43
3,35 – 4,75	30 %	18 %	45	43	38
	50 %		47	44	40
	70 %		49	45	41



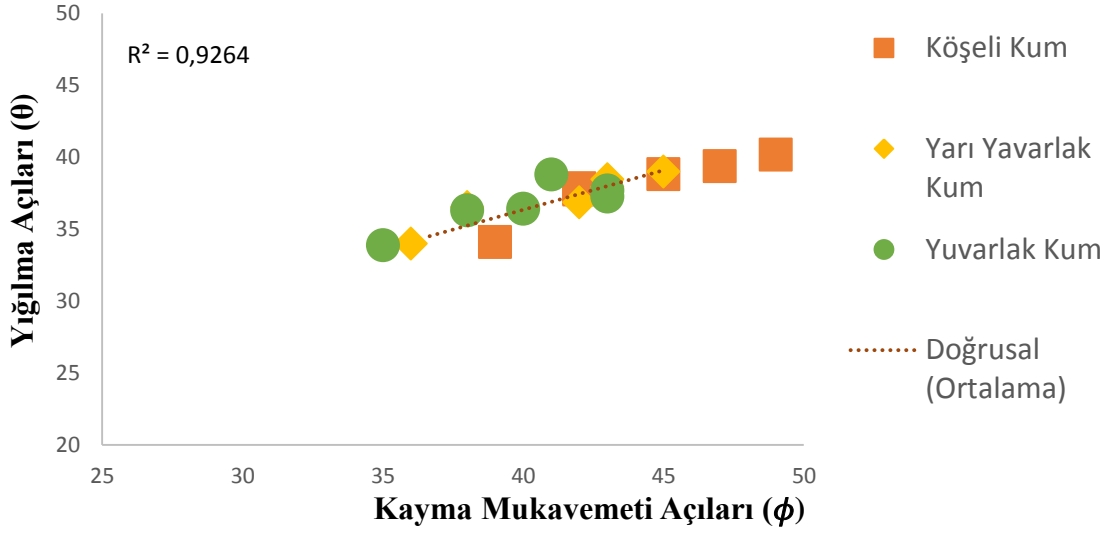
Şekil 4.18. $D_r=30\%$ 'a göre kayma mukavemeti ve yığılma açılarının kıyaslanması

Şekil 4.19'da $D_r=50$ 'ye göre belirlenen kayma mukavemeti açılarının ve ASTM C1444 yöntemine göre belirlenen yığılma açılarının kıyaslanması görülmektedir. Burada doğrusal düz çizgi tüm değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.



Şekil 4.19. $D_r=50$ 'ye göre kayma mukavemeti ve yığılma açılarının kıyaslanması

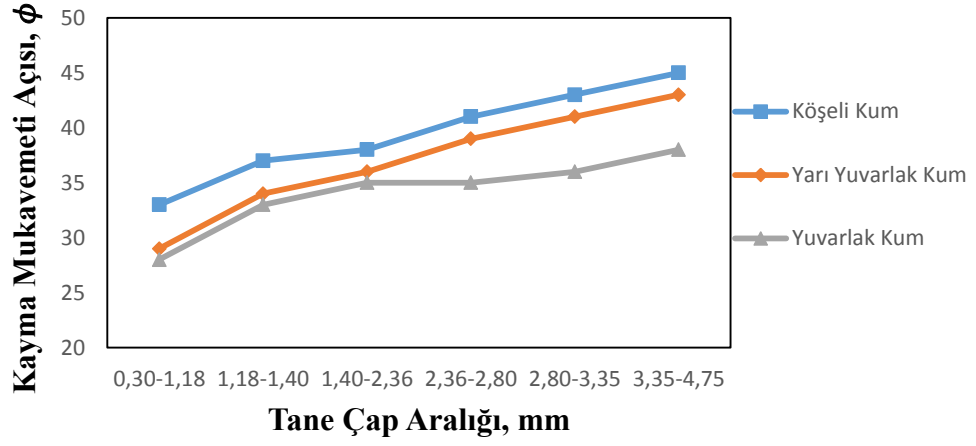
Şekil 4.20'de $D_r=70$ 'e göre belirlenen kayma mukavemeti açılarının ve ASTM C1444 yöntemine göre belirlenen yığılma açılarının kıyaslanması görülmektedir. Burada doğrusal düz çizgi tüm değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.



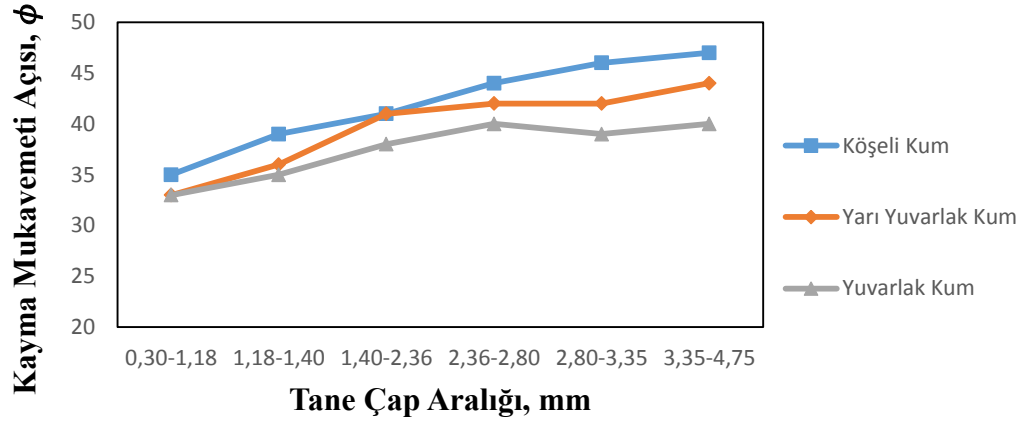
Şekil 4.20. $D_r=70\%$ 'e göre kayma mukavemeti ve yığılma açılarının kıyaslanması

Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20'a göre kumların yığılma açılarının değerleri ve kayma mukavemeti açılarının değerleri numunenin tane boyutları arttıkça arttığı görülmekle beraber, yığılma ve kayma mukavemeti açısı arasında ilişkinin olduğunu göstermektedir.

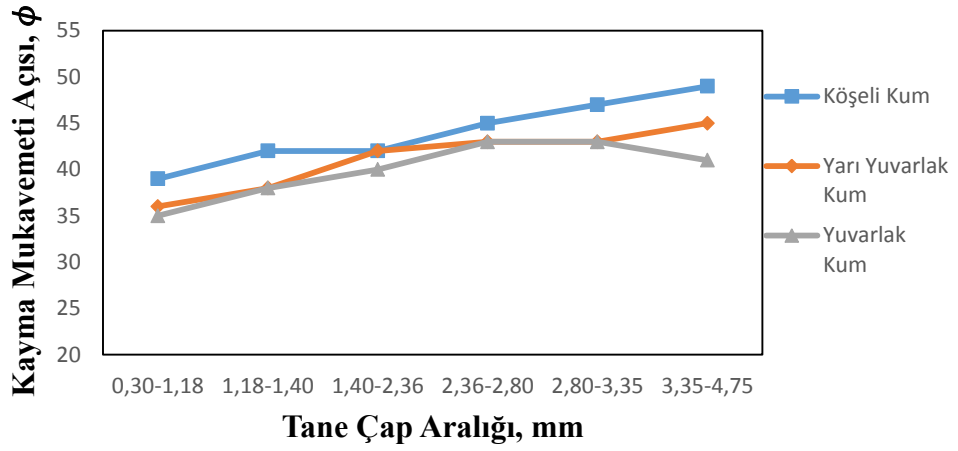
Katkısız kumların rölatif sıkılıklarına göre grafikleri Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te görülmektedir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı gibi kumların tane boyunun artmasıyla kayma mukavemeti açısının da artışı görülmektedir.



Şekil 4.21. $D_r = \%30$ 'a göre katkısız kumların kayma mukavemeti açılarının grafikleri



Şekil 4.22. $D_r = \%50$ 'ye göre katkısız kumların kayma mukavemeti açılarının grafikleri



Şekil 4.23. $D_r=70\%$ 'e göre katkısız kumların kayma mukavemeti açılarının grafikleri

4.6. Katkılı Kumların Kesme Kutusu Deneylerinin Yapılması

4.6.1. Propilen taneler katkılı kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneyleri

Propilen taneler sadece yarı yuvarlak 0,30-1,18 mm, 1,40-2,36 mm ve 3,35-4,75 mm arasında kalan kumlara %2 oranda katıldı ve homojen olacak şekilde karıştırılarak rölatif sıklık yüzde 70'te ($D_r=70\%$) kayma mukavemeti açıları bulunmuştur.

4.6.2. Lastik tozu katkılı kum numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneyleri

Lastik tozu sadece yarı yuvarlak 0,30-1,18 mm, 1,40-2,36 mm ve 3,35-4,75 mm arasında kalan kumlara %2 oranda katıldı ve homojen olacak şekilde karıştırılarak rölatif sıklık yüzde 70'te ($D_r=70\%$) kayma mukavemeti açıları bulunmuştur.

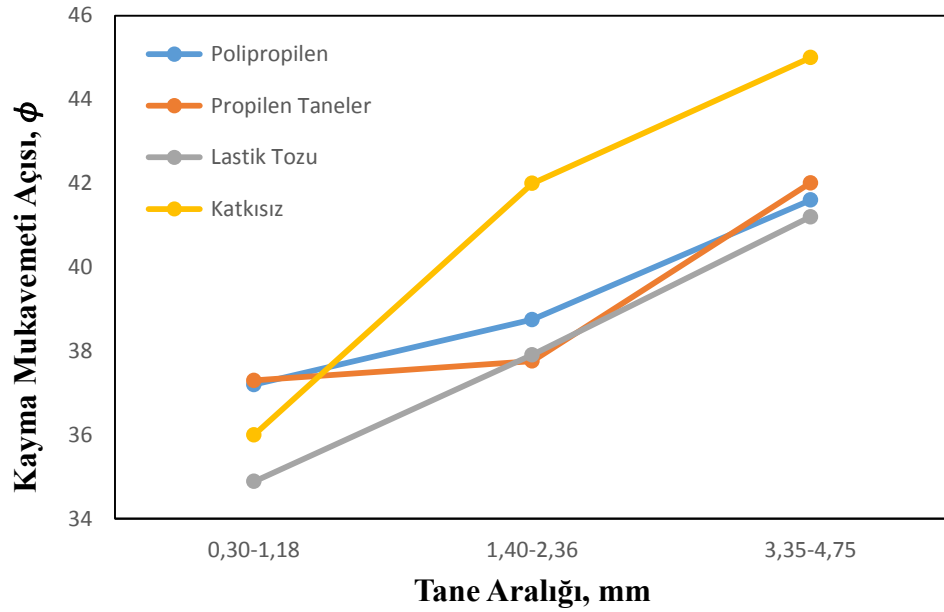
4.6.3. Propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar %2 oranda katkı, 0,30-1,18 mm, 1,40-2,36 mm ve 3,35-4,75 mm arasında olan yarı yuvarlak kum numuneler üzerinde rölatif sıklık yüzde 70'te yapılan kesme kutusu deneyleri

Kesme kutusu deneyi yapılmadan önce %2 oranda yarı yuvarlak kumlara propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar katkıları eklenerek homojen şekilde karıştırılmıştır ve rölatif sıklık yüzde 70'te (en sıkı hal $D_r=\%70$) deneye tabii tutulmuştur (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12. Propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar katkıları yarı yuvarlak kumlara %2 oranlarda eklenerek yüzde 70 rölatif sıklıkta ($D_r=\%70$), kayma mukavemeti açılarının sonuçları

Malzeme Aralığı (mm)	Katkısız Kumların ϕ 'leri	Polipropilen Parçacıklar Katkı Kumların ϕ 'leri	Propilen Taneler Katkı Kumların ϕ 'leri	Lastik Tozu Katkı Kumların ϕ 'leri
	%0	%2	%2	%2
0,30-1,18	36	37,20	37,30	34,89
1,40-2,36	42	38,75	37,76	37,91
3,35-4,75	45	41,60	42,01	41,20

Çizelge 4.12'de verilen değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 4.24'te verilmiştir. Burada sarı renk ile gösterilen çizgi katkısız kumlara ait kayma mukavemeti açısını temsil ederken mavi renk polipropileni, turuncu renk propilen taneleri ve gri renk lastik tozu katkıli kumların kayma mukavemeti açısını (ϕ) temsil etmektedir.



Şekil 4.24. Propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar katkıları yarı yuvarlak kumlara %2 oranlarda eklenerek yüzde 70 rölatif sıklıkta ($D_r=\%70$), kayma mukavemeti açılarının grafiksel gösterimi

Şekil 4.24'te genel olarak kumların tane boyutları arttıkça kayma mukavemeti değerlerinde de artış görünmekte. Katkılı kumların kayma mukavemeti açıları katkısız kumun değerlerine göre daha düşük. Lastik tozunun hafif oluşu ve darbe enerjisini sönmleme kapasitesi nedeniyle lastikler, sismik kuvvetlerin azaltılmasında ve deprem titreşimlerinin absorpsiyonunda kullanılabilir. Fakat lastik tozu katkılı kumlarda mukavemet açısını düşürmektedir. Propilen tanelerin yüzeyi pürüzsüz olduğundan propilen katkılı kumlarda kayma mukavemeti açısını azaltmaktadır. Nedeni ise yuvarlanma kayması ve yüzey sürtünmesini taneler arası azalttığı için kayma mukavemeti açısını da etkilemektedir. Polipropilen parçacıklar da propilen tanelere benzer etki göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, granüler zeminlerin geleneksel deneyler ile belirlenen bazı geoteknik özellikleri (tane boyu dağılımı, maksimum boşluk oranı (e_{maks}), minimum boşluk oranı (e_{min}), rölatif sıklıkları (D_r) vb.) belirlenmiştir. Daha sonra granüler zeminlerin kayma mukavemeti ve yığılma açıları bulunmuştur. Yığılma açılarını bulmada iki farklı yöntem kullanılmıştır. Biri ASTM C 1444 kuru ortamda deney yöntemi, diğeri ise Santamarina and Cho ıslak ortamda deney yöntemidir. Zeminde granüler malzeme özellikleri, yer altı su seviyesine göre değişim gösterdiği için hem kuru ortamda hem de tamamen ıslak ortamda deney yapılarak bu malzemelerin yığılma açıları (θ) belirlenmiştir. Ayrıca bu malzemelerin kesme kutusu deneyi ile kayma mukavemeti açıları da bulunarak yığılma açıları ile kayma mukavemeti açıları arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, granüler zeminlerin şekilsel özelliklerinin (köşeli, yarı yuvarlak, yuvarlak) kayma mukavemeti açılarına ve yığılma açılarına olan etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Los Angeles aşındırma aleti ile granüler zeminlerin yuvarlaklaştırma çalışması sonucunda, kum zemini istenilen üç farklı yuvarlaklık seviyesinde hazırlanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda kumlarda tane boyutu arttıkça yığılma açılarının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelerde (köşeli, yarı yuvarlak ve yuvarlak) köşeliden yuvarlağa doğru gidildikçe yığılma açılarının da düştüğü görülmüştür. Köşeli kumun yığılma açısı (θ) > yarı yuvarlak kumun yığılma açısı (θ) > yuvarlak kumun yığılma açısı (θ), sırasını takip etmektedir.

ASTM C 1444 yönteminde kumların yığılma açıları kuru ortamda, Santamarina and Cho yönteminde ise kumların yığılma açıları ıslak ortamda belirlenmektedir. Çalışma sonucunda, kuru ortamda bulunan yığılma açılarının ıslak ortamda bulunan yığılma açılarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ıslak ortamdaki suyun, kum tanelerin arasındaki aderansı azaltması ve tanelerin birbiri üzerinde kaymalarını kolaylaştırması olduğu düşünülmektedir. Taneler birbiri üzerinde su sayesinde pürüzsüz ortam gibi kaymakta ve daha fazla alana yayılmaktadırlar, bu nedenle yığılma açısı

deneyinde oluşan koninin düzlemlerle yaptığı açı daha düşük olur. Fakat ASTM C 1444 yönteminde kuru şartlar altında deney yapıldığından aderans burada mevcuttur. Dolayısıyla ASTM C 1444 yöntemine göre belirlenen yığılma açısı değerleri, Santamarina and Cho yöntemine göre belirlenen yığılma açısı değerlerinden daha yüksek olarak bulunmuştur.

Kesme kutusu deneyleri sonucunda kumlarda kayma mukavemeti açıları (ϕ), 0,30 mm'den 4,75 mm'ye gidildikçe artmakta olduğu ve köşeli kumlardan yuvarlak kumlara doğru gidildikçe kayma mukavemeti açılarının (ϕ) düştüğü gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda hem kayma mukavemeti açılarının (ϕ), hem de yığılma açılarının (θ), kumların tane çapları 0,30 mm'den 4,75 mm'ye gidildikçe arttığı köşeli kumdan yuvarlak kuma gidildikçe de bu değerlerin azaldığı görülmüştür.

İlaveten kumlara belirli oranlarda, propilen taneler, lastik tozu ve polipropilen parçacıklar ilave edilerek katkılı numuneler elde edilmiş ve bu numunelerin yığılma açıları ve kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. 0,30 mm - 2,36 mm tane çapı aralığındaki %1 propilen taneler katkılı kumun yığılma açısı değeri katkısız kumun yığılma açısı değerine göre azalırken, 2,36 mm – 4,75 mm tane çapı aralığındaki %1 propilen taneler katkılı kumun yığılma açısı değerlerinin arttığı görülmüştür. Propilen taneler, kum zemine %1 oranında katıldığında düşük tane çaplarında yığılma açısının katkısız kuma göre azaldığı, büyük çaplarda ise yığılma açısının arttığı söylenebilir.

Katkısız kumların yığılma açısının değerlerinin, %1 lastik tozu katkılı kumların yığılma açısı değerlerine göre daha düşük olduğu görülmüştür.

%1 polipropilen parçacıklar katkılı kumların, düşük tane çap aralığında yığılma açılarının katkısız kuma göre daha düşük olduğu, tane boyunun artmasıyla yığılma açısının da artış gösterdiği görülmüştür. %2 ve %5 polipropilen parçacıklar katkılı kumlarda ise düşük tane çap aralığındaki kumların yığılma açısında artış meydana gelirken daha büyük tane çap aralığında bulunan %2 ve %5 polipropilen parçacıklar katkılı kumların yığılma açılarının azaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Ahlich, R. C., 1996. Influence of Aggregate Properties on Performance of Heavy-Duty Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Record,7-14.
- Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., 2007. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. Applied Clay Science, 38, 23-32.
- Anonim, 2009. Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Kimya Teknolojisi Propilen Türevleri ve Prosesleri, Ankara.
- Anonim, 2014. https://tr.wikipedia.org/wiki/Kireç_taş (10.12.2014).
- Anonim, 2015. <http://www.rantek.com.tr/?/los-angeles-asindirma-test-cihaz> (05.10.2015).
- Anonim, 2016. <http://asyasarplastik.com/polipropilen-moblen.asp> (10.01.2016).
- Arasan, S. and Yener, E., 2011. The Relationship between the Angle of Repose and Shape Properties of Granular Materials Using Image Analysis. 2nd International Symposium on Computing in Science & Engineering, Izmir.
- Arasan, S., 2011. Görüntü Analizi İle Granüler Zeminlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Arasan, S., Akbulut, S. and Hasiloglu, A.S., 2011. The Relationship between the Fractal Dimension and Shape Properties of Particles. KSCE Journal of Civil Engineering, 15 (7), 1219-1225.
- ASTM C131, 2006. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM C1444-00, 2014. Standart Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM C535, 2012. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 422, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4253, 2000. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4254, 2000. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D 854, 2000. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D2488, 2010. Standard Practice for Description and Identification of Soils. ASTM West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080, 2004. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM West Conshohocken, PA.

- Chen, H., Liu, Y.L., Zhao, X.Q., Xiao, Y.G. and Liu, Y., 2015. Numerical investigation on angle of repose and force network from granular pile in variable gravitational environments. *Powder Technology*, 283 (1), 607-617.
- Chik, Z. and Vallejo, E. L., 2005. Characterization of the angle of repose of binary granular materials. *Can Geotech Journal*, 42 (1), 683-691.
- 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.
- Derakhshani, S. M., Schott, D. L. and Lodewijsk, G., 2015. Micro-macro Properties Of Quartz Sand Experimental Investigation and DEM Simulation. *Powder Technology*, 269 (1), 127-138.
- Feng-Guang, Y., Xing-Nian, L., Ke-Jun, Y. and Shu-You, C., 2009. Study on the angle of repose of nonuniform sediment. *Journal of Hydrodynamics*, 25 (5), 685-691.
- Ghazavi, M. Hosseini, M. and Mollanouri, M., 2008. A Comparison between Angle of Repose and Frictional Angle of Sand. *Goa IACMAG*. India.
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., T.C., Çeviri Editörü: Kamil Kayabalı, 2002. *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*. Kongre Kütüphane Yayınlanmış Eserlerin Kataloğlanması., 427 s, Ankara.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. and Sheahan, T. C., Çeviri Editörü: Ayfer Erken, 2015. *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*. Nobel Akademik Yayıncılık, 857 s, Ankara.
- Karabörk, F., Akdemir, A., 2013. Atık taşıt lastiklerinin parçalanması ve lastik tozunun karakterizasyonu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29 (1), 29-40.
- Liu, J. and Zhou, J., 2008. Numerical Study on Sandpile Formation of Granular Materials with Different Grain Size Distributions. *Catena*, 17 (1), 198-202.
- Liu, X. Y., Specht, E. and Mellmann, J., 2005. Experimental Study Of The Lower And Upper Angles Of Repose Of Granular Materials In Rotating Drums. *Powder Technology*, 154 (1), 125-131.
- Liu, Z., 2011., Measuring the angle of repose of granular systems using hollow cylinders. MS Thesis, Submitted to the Graduate Faculty of the Swanson School of Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, University of Pittsburgh.
- Mackie, W., 1897. On the laws that govern the rounding of particles of sand. *Trans. Edinburgh Geol. Soc.*, 7, 298-311.
- Matsuo, M. Y., Nishiura, D. and Sakaguchi, H., 2014., Geometric affect of angle of repose revisited. *Granular Matter*, 16 (1), 441-447.
- Mitchell, J.K. and Soga, K., 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p 577.
- Mora, C.F., Kwan, A.K.H. and Chan, H.C., 1999. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 29, 1404.
- Özaydın, K., 2008, 2011. *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi, 16, 42-51, 223-225, İstanbul.
- Pipatpongsa, T., 2013. Statically admissible stress solutions in gravitating loose earth of wedge and valley with plane slopes inclined at angle of repose. *Granular Matter*, 15 (5), 645-659.
- Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *J. Sed. Petrol.*, 23, 118.

- Raei, B., Asadi, H., Moussavi, A., and Ghadiri, H., 2015., A study of initial motion of soil aggregates in comparison with sand particles of various sizes. *Catena J.*, 127 (1), 279-286.
- Rouse, P. C., 2014. Comparison of Methods for the Measurement of the Angle of Repose of Granular Materials. *Geotechnical Testing Journal*, 37 (1), 1-5.
- Santamarina, J. C. and Cho, G. C., 2001. Determination of Critical State Parameters in Sandy Soils-Simple Procedure, *Geotechnical Testing Journal*, 24 (2), 185-192.
- Terzaghi, K., 1925. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Deuticke, Vienna.
- Tunç. A., 2002. *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. Atlas Yayın Dağıtım, 477, İstanbul.
- Uzuner. B. A., 2007. Temel Zemin Mekaniği. *Derya Kitabevi*, 52-56, 83-90, 204-209, Trabzon.
- Ünsal. N., 2015. İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji. Nobel Yayınevi, 92-93. Ankara.
- Wentworth, C.K., 1919. A laboratory and field study of cobble abrasion. *J. Geol.*, 27, 508.
- Yılmaz. I., Yıldırım. M., Keskin. I., 2014. Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler. Seçkin Yayıncılık, 13, 17, Ankara.
- Zhou, Y. C., Xu, B. H. , Yu, A. B. and Zulli, P. 2002. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres. *Powder Technology*, 125 (1), 45-54.
- Zhou, Y. and Zhang, G., 2009. Effect of granular size on the angle of repose in the chute. *Physics, Mechanics and Astronomy*, 52 (4), pp 563-565.

ÖZGEÇMİŞ

27.09.1988 yılında Özbekistan'ın Taşkent şehrinde doğdu. Aslen Ahıska Türküdür. İlköğrenimini Kazakistan Devlet okulunda orta ve lise öğrenimini Rusya Federasyonu Devlet Okulunda tamamladı. Daha sonra 2006-2007'de Türkiye Cumhuriyeti Ankara Üniversitesi Kayseri TÖMER Şubesinde hazırlığını tamamlayarak 2007'de Erzurum Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. Ocak 2014'te Lisans Eğitimini tamamlayarak aynı üniversitede aynı yıl İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalında Lisansüstü eğitimine başladı.