

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜNİFORM SİLİS KUMLARIN RÖLATİF SIKILIĞA BAĞLI İÇSEL SÜRTÜNME VE
DİLATASYON AÇILARININ DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAŞAR KORKMAZ

TEMMUZ 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜNİFORM SİLİS KUMLARIN RÖLATİF SIKILIĞA BAĞLI İÇSEL SÜRTÜNME VE
DİLATASYON AÇILARININ DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yaşar KORKMAZ

DANIŞMAN: Dr. Öğ. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR

ZONGULDAK
Temmuz 2019

KABUL:

Yaşar KORKMAZ tarafından hazırlanan “Üniform Silis Kumların Rölatif Sıklığına Bağlı İçsel Sürtünme ve Dilatasyon Açılarının Değişiminin Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 31/07/2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Sedat SERT

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜN BÜL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./..../2019

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Yaşar KORKMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÜNİFORM SİLİS KUMLARIN RÖLATİF SIKILIĞA BAĞLI İÇSEL SÜRTÜNME VE DİLATASYON AÇILARININ DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Yaşar KORKMAZ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğ. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR

Temmuz 2019, 75 sayfa

Bu araştırmanın amacı, direk kesme deneyi sonuçlarıyla rölatif sıklık (D_r), dane boyutları ve üniform kum numunelerinin kayma dayanımları arasındaki ilişkileri belirlemektir. Bu deneysel çalışmalar için Çelikleş Sinai Kumu A.Ş. 'den dört farklı kum numunesi (AFS15-20, 40-45, 60-65 ve 100-140) temin edilmiştir. Tüm kum numuneleri üniform gradasyona sahip silis kumudur. Üniformluk katsayılarının (C_u) değerleri 1.7 ile 2.8 arasında değişmektedir. Numuneler rölatif sıklık deneyine tabi tutulmuştur. (ASTM D4253-D4254). Tüm kumların minimum ve maksimum boşluk oranları sırasıyla $e_{min} = 0.603-0.77$ ve $e_{max} = 0.478-0.592$ olarak değişmiştir. Kuru kum numuneleri direk kesme kutusu ünitesinde farklı rölatif sıklıklarda ($D_r = \%40,60,80, 100$) havadan yağmurlama tekniği ile oluşturulmuştur. Rölatif sıklık değerleri kabul edilebilirlik sınırı $\pm\% 0,5$ ile sınırlandırılarak bu şartı sağlamayan numuneler kullanılmamıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra 48 adet kum numunesi farklı normal gerilmelerde direk kesme deneyine tabi tutulmuştur. (98.1, 196.2, 392.4 kN / m²). Deneysel çalışmalar yapıldıktan sonra rölatif sıklık, indeks özellikleri ve içsel sürtünme açıları ile dilatasyon açıları arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda,

ÖZET (devam ediyor)

kumların içsel sürtünmeaçıları 32 ile 44° arasında değiştiği görölmüştür. Kum numunelerinin rölatif sıkılık değerlerinin artması, literatürdeki sonuçlara da uyum göstererek içsel sürtünme açılarının artmasına neden olmuştur. Ayrıca, kum numunelerinin partikül büyüklüğü dağılım parametrelerinin de iç sürtünme açlarına olumlu yönde etki ettiği deneysel olarak kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rölatif Sıkılık, Direkt Kesme Kutusu, İçsel Sürtünme Açısı, Dilatasyon Açısı.

Bilim Kodu: 624.01.00.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON INTERNAL FRICTION AND DILATATION ANGLES OF UNIFORM SILICA SANDS BASED ON RELATIVE DENSITY

Yaşar KORKMAZ

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Thesis Advisor: Asst. Prof. Dr. Ömer Faruk ÇAPAR

July 2019, 75 pages

The focus of this research is to determine relationships between relative density (D_r), particle sizes and shear strengths of uniform sand materials via direct shear test results. For this experimental studies four different sand materials (AFS15-20, 40-45, 60-65, and 100-140) were obtained from Çeliktaş Sinai Kumu AŞ. All sand materials are very uniform silica sand. The values of their uniform coefficients (C_u) changes between 1.7 and 2.8. They were subjected to relative density tests (ASTM D4253-D4254). The minimum and maximum void ratios of all sands were varied as $e_{min}=0.603-0.77$ and $e_{max}=0.478-0.592$, respectively. Dry sand samples were reconstituted in direct shear box unit at different relative densities ($D_r=40,60,80,100$ %) by air-pluviation technique. The variation values of their relative densities had to be $\pm 0.5\%$ to be accepted. Otherwise, the samples were rejected. As soon as the preparation of the samples were done, 48 soil samples were subjected to direct shear tests at different normal stress (98.1, 196.2, 392.4 kN/m²). After the experimental works were conducted, relationship among relative density, index properties, and internal friction angles.

ABSTRACT (continued)

were investigated. As a result of this studies, internal friction angles of sands vary between 32 and 44°. Increasing values of relative densities of sand samples led to the increase of their internal friction angles which are well-matched with the results in the literatures. In addition, It was experimentally proved that the particle size distribution parameters of sand samples also affect positively on internal friction angles

Keywords: Relative Density, Direct Shear Test, Internal Friction Angle, Dilatancy Angle.

Science Code: 624.01.00.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu tezin hazırlanması sürecinde bana her zaman yol gösteren, değerli katkılarını, zamanını ve birikimini benden esirgemeyen Sayın Hocam, Dr. Öğ. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR' a, deneysel çalışmalarımıza verdiği katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Hamit AYDIN'a, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı personeline ve öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olarak maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| KABUL | ii |
| ÖZET..... | iii |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR | vii |
| İÇİNDEKİLER..... | xi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xiii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xvii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xix |
| | |
| BÖLÜM 1 GİRİŞ | 1 |
| | |
| 1.1 TEZİN AMACI | 2 |
| | |
| BÖLÜM 2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR | 5 |
| | |
| 2.1 MOHR - COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ | 5 |
| 2.2 ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ | 7 |
| 2.3 KAYMA MUKAVEMETİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ..... | 9 |
| 2.4 KUMLU ZEMİNLERDE DİREK KESME DENEYİ | 10 |
| 2.5 DİREK KESME DENEYİ VERİLERİNİN YORUMU | 12 |
| 2.5.1 İçsel Sürtünme Açısının Direk Kesme Deneyinden Elde Edilişi..... | 15 |
| 2.6 KUMLU ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİNE ETKİYEN FAKTÖRLER ... | 18 |
| 2.6.1 Boşluk Oranı veya Rölatif Sıklığın Mukavemete Etkisi | 19 |
| 2.6.2 Parçacık Morfolojisinin Kumlu Zeminlerin Mukavemetine Üzerine Etkisi..... | 21 |
| 2.7 DİLATASYONUN (ψ)İÇSEL SÜRTÜNME AÇISINA ETKİSİ | 24 |

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| BÖLÜM 3 MALZEME VE METOT..... | 31 |
| 3.1 GİRİŞ..... | 31 |
| 3.2 ARAŞTIRMADA KULLANILAN MALZEME | 31 |
| 3.2.1 Silis Kumlarının AFS Sistemine Göre Sınıflandırılması | 35 |
| 3.3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 36 |
| 3.3.1 Kum Örneklerinin İndeks Özelliklerinin Belirlenmesi | 36 |
| 3.3.2 Rölatif Sıklık Deneyleri | 37 |
| 3.3.3 Kesme Kutusu Deneyleri | 40 |
| BÖLÜM 4 DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR | 43 |
| 4.1 DİREK KESME KUTUSU DENEY SONUÇLARI..... | 43 |
| 4.1.1 AFS 15-20 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları | 43 |
| 4.1.2 AFS 40-45 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları | 46 |
| 4.1.3 AFS 60-65 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları | 49 |
| 4.1.4 AFS 100-140 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları | 52 |
| 4.2 DİLATASYON AÇILARININ BULUNMASI | 55 |
| BÖLÜM 5 SONUÇLAR..... | 63 |
| KAYNAKLAR..... | 71 |
| ÖZGEÇMİŞ | 75 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>No</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1 Mohr kırılma kriteri. | 6 |
| Şekil 2.2 Mohr kırılma kriterinin mühendislik çalışmalarına uyarlanması..... | 6 |
| Şekil 2.3 Zeminlerde kırılma modellenmesi | 7 |
| Şekil 2.4 Mohr-Coulomb kırılma bölgesi | 7 |
| Şekil 2.5 Mohr-Coulomb kırılma zarfı ile asal gerilmeler ile ilişkilendirilmesi | 8 |
| Şekil 2.6 Kesme kutusu deneyi düzeneği..... | 10 |
| Şekil 2.7 Direk kesme deney kutusunun çizimsel gösterimi..... | 11 |
| Şekil 2.8 Direk kesme deneyi (a) Deneyde ölçülen parametreler (b) Tipik deney çıktıları (c) Yapılan deneylerin sonuçları yardımı ile kırılma zarfının elde edilmesi | 12 |
| Şekil 2.9 Direk kesme deneyi kayma düzlemine etkileyen kayma gerilmesi Mohr dairesinin tanjant noktasından hesaplanır..... | 13 |
| Şekil 2.10 Direk kesme deneyinde zemin numunesine etkileyen deney başı ve sonundaki gerilemeler | 14 |
| Şekil 2.11 Direk kesme deneyinden içsel sürtünme açısının elde edilmesi. | 16 |
| Şekil 2.12 Direk kesme deneyinden içsel sürtünme açısının bulunuşu a) Yatay düzlem teorik kayma kırılma düzlemi olarak kabul edilirse b) Yatay düzlemde kırılma düzlemi olarak ön görülürse | 17 |
| Şekil 2.13 İçsel sürtünme açısı ile kuru birim hacim ağırlık ve boşluk oranı ile ilişkisi | 20 |
| Şekil 2.14 Boşluk oranı ve içsel sürtünme arasındaki ilişki..... | 21 |
| Şekil 2.15 İnce ve orta-kaba kumların R katsayısı ile ϕ' arasındaki ilişki | 23 |
| Şekil 2.16 Kumların gerilme-defomasyon davranışları. | 25 |
| Şekil 2.17 Testere dişi dilatasyon modeli..... | 26 |
| Şekil 2.18 Dilatasyon açısının elde edilmesi..... | 27 |
| Şekil 2.19 Dilatasyon açısının elde edilmesi..... | 27 |
| Şekil 2.20 ϕ'_{cv} açısının elde edilmesi | 28 |
| | |
| Şekil 3.1 AFS 15-20 silis kumu örnek detayları. | 32 |
| Şekil 3.2 AFS 40-45 silis kumu örnek detayları. | 33 |
| Şekil 3.3 AFS 60-65 silis kumu örnek detayları. | 34 |
| Şekil 3.4 AFS 100-140 silis kumu örnek detayları. | 35 |
| Şekil 3.5 Silis kumu örneklerine ait gradasyon eğrileri. | 37 |
| Şekil 3.6 Rölatif sıklık deney kalıp detayları | 38 |
| Şekil 3.7 Rölatif sıklık deneyine ait sarma tablası. | 39 |
| Şekil 3.8 Kesme kutusu deney seti içindeki zemin numunesinin olası mohr daire ve asal gerilmeleri..... | 40 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| <u>No</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 3.9 Kesme kutusu deney düzeneği içinde kum numunelerinin oluşturulması | 41 |
| Şekil 4.1 AFS 15-20 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 44 |
| Şekil 4.2 AFS 15-20 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 44 |
| Şekil 4.3 AFS 15-20 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki | 45 |
| Şekil 4.4 AFS 15-20 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi - yatay deplasman arasındaki ilişki | 45 |
| Şekil 4.5 AFS 15-20 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 45 |
| Şekil 4.6 AFS 15-20 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 45 |
| Şekil 4.7 AFS 15-20 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 46 |
| Şekil 4.8 AFS 15-20 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 46 |
| Şekil 4.9 AFS 40-45 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 47 |
| Şekil 4.10 AFS 40-45 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 47 |
| Şekil 4.11 AFS 40-45 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 48 |
| Şekil 4.12 AFS 40-45 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. . | 48 |
| Şekil 4.13 AFS 40-45 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki | 48 |
| Şekil 4.14 AFS 40-45 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.. | 48 |
| Şekil 4.15 AFS 40-45 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 49 |
| Şekil 4.16 AFS 40-45 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 49 |
| Şekil 4.17 AFS 60-65 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 50 |
| Şekil 4.18 AFS 60-65 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 50 |
| Şekil 4.19 AFS 60-65 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 50 |
| Şekil 4.20 AFS 60-65 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. . | 50 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| <u>No</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 4.21 AFS 60-65 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 51 |
| Şekil 4.22 AFS 60-65 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. . | 51 |
| Şekil 4.23 AFS 60-65 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 52 |
| Şekil 4.24 AFS 60-65 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 52 |
| Şekil 4.25 AFS 100-140 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 53 |
| Şekil 4.26 AFS 100-140 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 53 |
| Şekil 4.27 AFS 100-140 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 53 |
| Şekil 4.28 AFS 100-140 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 53 |
| Şekil 4.29 AFS 100-140 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 54 |
| Şekil 4.30 AFS 100-140 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 54 |
| Şekil 4.31 AFS 100-140 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki. | 55 |
| Şekil 4.32 AFS 100-140 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki. | 55 |
| Şekil 4.33 AFS 15-20 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 56 |
| Şekil 4.34 AFS 15-20 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 56 |
| Şekil 4.35 AFS 15-20 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 57 |
| Şekil 4.36 AFS 15-20 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 57 |
| Şekil 4.37 AFS 40-45 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 58 |
| Şekil 4.38 AFS 40-45 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 58 |
| Şekil 4.39 AFS 40-45 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 58 |
| Şekil 4.40 AFS 40-45 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 58 |
| Şekil 4.41 AFS 60-65 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 59 |
| Şekil 4.42 AFS 60-65 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 59 |
| Şekil 4.43 AFS 60-65 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 60 |
| Şekil 4.44 AFS 60-65 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 60 |
| Şekil 4.45 AFS 100-140 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 61 |
| Şekil 4.46 AFS 100-140 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 61 |
| Şekil 4.47 AFS 100-140 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 61 |
| Şekil 4.48 AFS 100-140 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi. | 61 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| <u>No</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 5.1 AFS 15-20 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki..... | 64 |
| Şekil 5.2 AFS 40-45 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki..... | 65 |
| Şekil 5.3 AFS 60-65 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki..... | 66 |
| Şekil 5.4 AFS 100-140 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki..... | 67 |
| Şekil 5.5 Silis kumlarının içsel sürtünme açıları - dilatasyon açıları arasındaki ilişki..... | 68 |
| Şekil 5.6 Silis kumlarının dilatasyon açıları – içsel sürtünme açıları arasındaki ilişki..... | 68 |
| Şekil 5.7 Silis kumlarının deneysel dilatasyon açıları (ψ_{Deney}) ve ψ_{Bolton} açıları..... | 69 |



ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>No</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Çizelge 2.1 İçsel sürtünme açısına etkiyen faktörler..... | 19 |
| Çizelge 2.2 Kum ve silt zeminler için efektif kayma mukavemeti açısı değerleri..... | 19 |
| Çizelge 2.3 Rölatif sıkılığa bağlı kaba daneli zeminlerin sıkılık tanımlaması..... | 20 |
| Çizelge 3.1 AFS sınıflandırma sisteminde kullanılan elek detayları. | 36 |
| Çizelge 3.2 Kum örneklerinin elek analiz sonuçları. | 36 |
| Çizelge 3.3 Rölatif sıkılık deney sonuçları. | 38 |
| Çizelge 4.1 AFS 15-20 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları. | 56 |
| Çizelge 4.2 AFS 40-45 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları. | 57 |
| Çizelge 4.3 AFS 60-65 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları. | 59 |
| Çizelge 4.4 AFS 100-140 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları. | 60 |



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|----------------------|--|
| A | : Alan |
| c | : Zeminin Kohezyonu |
| Dr | : Rölatif Sıklık |
| ϵ | : Birim Deformasyon Oranı |
| e | : Boşluk Oranı |
| e_{max} | : Maksimum Boşluk Oranı |
| e_{min} | : Minimum Boşluk Oranı |
| h | : Ampirik Üs (0,4-0,5) |
| K_o | : Yanal Toprak Basınç Katsayısı |
| P | : Kuvvet |
| S | : Kayma Direnci |
| τ | : Kayma Gerilmesi |
| τ_{max} | : Maksimum Kayma Gerilmesi |
| τ_{xy} | : X Ve Y Yönündeki Kayma Gerilmesi |
| τ_{ff} | : Kırılma Düzlemi Üzerindeki Kayma Gerilmesi |
| u | : Boşluk Suyu Basıncı |
| V_T | : Toplam Hacim |
| V_V | : Boşluk Hacmi |
| V_S | : Kesme Kutusunun Hacmi |
| σ_{avg} | : Ortalama Gerilme |
| σ' | : Efektif Gerilme |
| σ_1, σ_3 | : Asal Gerilmeler |
| σ_{3cr} | : Kritik Çevre Basıncı |
| σ_{ff} | : Kırılma Düzlemi Üzerindeki Normal Gerilme |
| σ_{ho} | : Arazideki Yatay Efektif Gerilme |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

| | |
|---------------|--|
| σ_{vo} | : Arazideki Düşey Efektif Gerilme |
| ϕ | : İçsel Sürtünme Açısı |
| ϕ' | : Kayma Direnci Efektif Açısı |
| ϕ_{cv} | : Sabit hacim durumunda içsel sürtünme açısı |
| ψ | : Dilatasyon açısı |
| Θ | : Dönme Açısı |
| ρ_s | : Birim Hacim Ağırlığı |

KISALTMALAR

| | |
|-------------|--|
| AFS | : Amerikan Döküm Derneği |
| ASTM | : Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu |
| SP | : İnce ve temiz kum |
| USCS | : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi |

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin bilinmesi gereken mekanik özelliklerinin başında gelen en önemli parametrelerden biri kayma mukavemeti parametreleridir. Bu parametreler, zemini oluşturan danelerinin arasında oluşan içsel sürtünmeden dolayı kesme gerilmelerine gösterdiği direnç olarak tanımlanabilmektedir. Zemin tabakalarının kayma dayanımlarını elde edilmesi özellikle, duraylılık analizlerinde, taşıma gücü hesaplarında ve zeminlerin gerilme-gerinim davranışlarının modellenmesi için gereklidir (Atkinson and Brandy 1982, Wood 1991, Atkinson 1993).

Kayma mukavemeti zeminlerde arazide ve laboratuarda birçok deneysel yöntemlerle bulunabilir. Arazi deneyleri geoteknik mühendisliğinde en çok kullanılan yöntemlerdir. Arazi deneyleri zemin tabakalarını yerinde ölçme ile arazi koşullarını dikkate alarak çözümler sunmakta ve daha hızlı sonuç vermektedir. Bununla beraber, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT), Presiyometre Deneyi (MPT) gibi arazi deney yöntemleri arazide yapılması düşünülen yapıların meydana getireceği gerilme artımlarını tam olarak modelleyememektedir. Dolaylı yaklaşımlarla bu deneylerden elde edilen mukavemet parametreleri ile zeminin kayma mukavemeti parametreleri elde edilmektedir.

Laboratuar koşullarında yapılan zemin kayma mukavemeti deneyleri yapıdan gelen gerilme şartlarına daha uygundur. Zemin katmanlarına yapıdan veya dış kuvvetlerinden gelen gerilme artımları ve yönelimleri laboratuar koşullarında daha rahat modellenerek zemin örneklerine ait kayma mukavemeti parametrelerini bulmak mümkündür. Ancak laboratuar koşullarında yapılan deneylerde de kullanılan zemin örnekleri arazi şartlarındaki geniş alandaki zemin tabakalarını temsil etmek sıkıntısı vardır. Bundan dolayı hem arazi hem de laboratuar deneyleri birlikte yapılmasında zorunluluk vardır.

Bilindiği üzere Geoteknik mühendisliğinde zeminleri ince daneli (kohezyonlu) ve kaba daneli (kohezyonsuz) olarak iki ana grupta sınıflanmaktadır. İnce daneli zeminlerin hem arazide hemde laboratuvar şartlarında mukavemet deneylerini yapmak oldukça kolaydır. Çünkü basit ve ucuz yöntemlerle, kohezif yapıya sahip bu tip zeminleri araziden örselemeden laboratuvara taşımak mümkündür. Kaba daneli zeminleri laboratuvara örselemeden taşımak oldukça zor ve pahalı işlemler gerekir. Bundan dolayı arazide elde edilen kaba daneli zemin tabakalarına ait yoğunluklar, su içeriği ve gradasyon parametreleri dikkate alınarak zemin numuneleri laboratuvarında tekrar oluşturulması en çok kullanılan yöntemdir.

Zemin kayma direncinin belirlenmesinde laboratuvarında birçok farklı deney yapılmaktadır. Deney ekipmanı seçilirken zemin numunesinin tipi, arazideki gerilme ve çevresel durumu, incelenecek parametrenin statik veya dinamik olup olmaması ve projenin maliyeti gibi etkenler dikkate alınmaktadır. Serbest basınç ve Vane deneyleri, kohezyonlu ve suya doymuş zeminler için, direkt kesme ve üç eksenli kesme deneyleri kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için uygun deneylerdir. Farklı araştırma amaçları için ise burulmalı kesme deneyi ve karayolu projelerinde rezilyans modülü ve CBR deneyleri de yapılmaktadır (Aytekin 2004).

Direk kesme deney seti zeminlerin kayma mukavemet parametrelerini bulmak için geliştirilmiş en eski ve en basit deney sistemidir. İlk denemeler 1776 da Coulumb tarafından oluşturulan 1846 yılında da Fransız Mühendis Alexandre Collin, şu anda kullanılan sisteme benzer yükleme kolu ve 4.0x4.0 cm kesitlere sahip ve 35 cm uzunluğunda bir kesme kutusu geliştirmiştir. Bugün kullandığımız sisteme en yakın ilk geliştirilen ekipman Casagrande tarafından 1932'de geliştirilmiştir (Head 1994). Bu deney sistemi ucuz bir deney sistemi olmasından dolayı piyasa da oldukça sık kullanılmaktadır. Zemin numunesi üzerine yapılan yüklemelerle zemin numunesinde meydana gelecek olan deformasyonların incelenerek zemin numunesine ait kayma direnci parametrelerinin (zeminin kohezyonu ve içsel sürtünme açısı) elde edilmesi için kesme kutusu deneyi yapılması amaçlanır.

1.1 TEZİN AMACI

Bu çalışmada farklı gradasyona sahip silisli kum numuneleri üzerinde elek analizi, rölatif sıkılık ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden kumlara ait gradasyon eğrileri, maksimum boşluk oranları (e_{max}), minimum boşluk oranları (e_{min}) değerleri ile kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir.

Kumlu zeminlerin kayma mukavemeti içsel sürtünme açısı ile tespit edilirler. Özellikle temiz kum olarak adlandırılan üniform kumlar arasında herhangi bir kohezif kuvvet bulunmadığından dolayı, dayanımlarını partiküller arasındaki sürtünme ve kitlenme gücü ile alırlar. Dayanımlarının hesaplanmasında arazi ve laboratuvar deneyler kullanılmaktadır. Özellikle araziden örselenmemiş kum numuneleri almak çok zor olduğu için laboratuvar koşullarında kumlu zeminler arazide sahip oldukları su içeriği ve yoğunluğa uygun şekilde laboratuvarda tekrar oluşturulurlar. Dayanım parametrelerinin hesaplanmasında bundan dolayı rölatif sıklık parametresi önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında kesirli sayılar için nokta (.) kullanılmıştır.





BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Zeminlere ait taşıma gücü ve stabilite problemlerin çözümleri, temelde kendilerine ait kayma dayanımlarına bağlıdır. Dayanım parametrelerini tespit etmek içinde gerilme-birim boy değiştirme ve zamana bağlı gerilme altındaki zemin davranışlarını inceleyerek bulmaya çalışılır. Bu parametrelerin bulunması için, birçok ampirik ve fenomenolojik yaklaşımlara dayanır. Özellikle Mohr-Coulomb modeli en yaygın kullanılanıdır (Mitchell and Soga 2005).

2.1 MOHR - COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

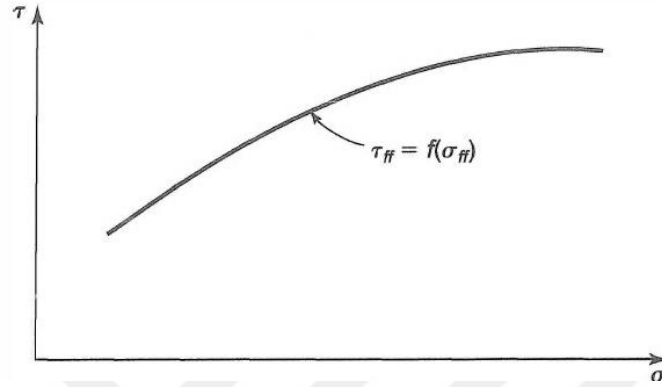
Coulomb tarafından 1776 yılında sunulan ve 1900 yılında Mohr tarafından geliştirilen malzemelerin kırılma teorisi Zemin mekaniği problemlerine zeminlerin kayma dayanımlarını modellemede kullanılmaktadır. Teori, bir malzemede bir düzlem boyunca kırılma kritik bir normal ve kayma gerilmesi arasındaki fonksiyonel ilişki ile verilmektedir.

$$\tau_{ff} = f(\sigma_{ff}) \quad (2.1)$$

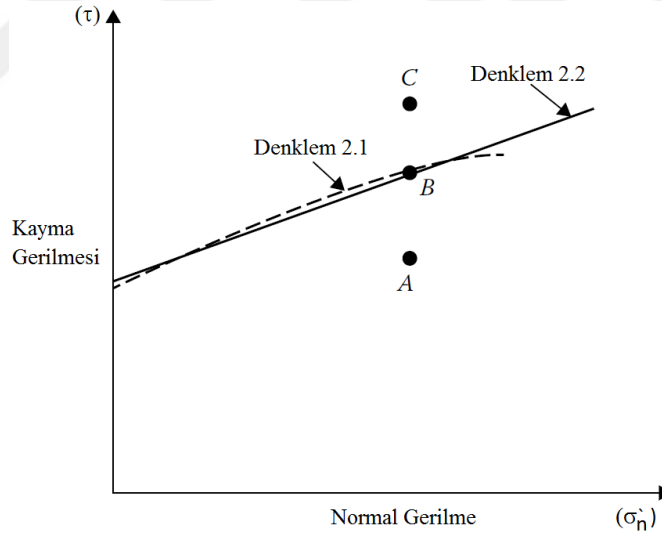
τ_{ff} ve σ_{ff} sırası ile kırılma düzlemi üzerindeki kayma ve normal gerilmelerdir. Aralarındaki fonksiyona kırılma zarfı olarak da tanımlanmaktadır. Şekil 2.1’de Denklem 2.1 tanımlanan kırılma zarfı görülmektedir. Tam doğrusal olmayan bu fonksiyon Geoteknik mühendisliğinde tasarım yaparken kullanılan değerler Şekil 2.2’de verilen ve kırılma zarfının üzerine denk gelen B noktasındaki gerilme, göçmeye sebep verecek nihai gerilme durumu olarak göz önüne alınarak belirlenmektedir. Göçme olarak tanımlanan bu durum, beklenenin üzerinde oturumların meydana gelmesi ve üst yapıya veya çevredeki yapılara zarar verilmesidir. Teorik olarak göçme de kayma mukavemeti parametreleri ile ilişkili olduğundan kayma dayanımı, geoteknik alanının en önemli başlıklarından biri olduğu söylenebilir. Mohr-Coulomb kırılma zarfı mühendislik hesaplamalarında denklem 2’de görüldüğü üzere doğrusal olarak kabulü yapılarak çizilmektedir.

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

Burada τ_f , kırılma anındaki kayma gerilmesini, σ , normal gerilme, c , kohezyon ve ϕ içsel sürtünme açısıdır.



Şekil 2.1 Mohr kırılma kriteri.



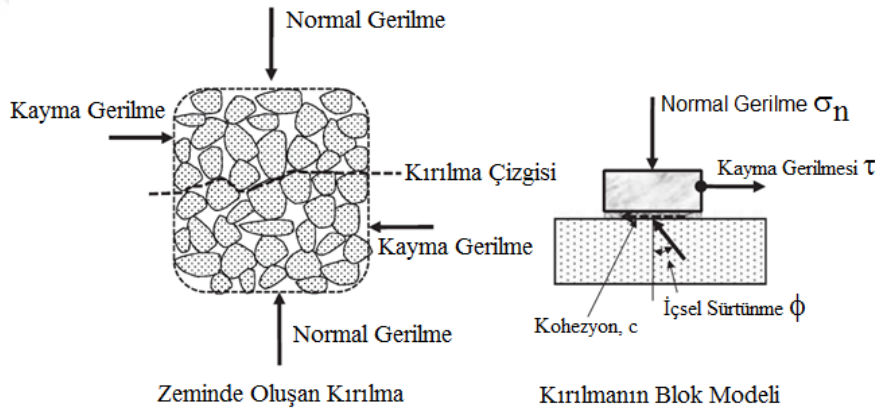
Şekil 2.2 Mohr kırılma kriterinin mühendislik çalışmalarına uyarlanması.

Kayma mukavemetinin belirlenmesinde göçmeye neden olan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önünde bulunduran birçok hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezlerin içerisinde en bilinen ve uygulamada en çok kullanılan hipotez Mohr - Coulomb hipotezidir. Zeminin kayma direnci parametreleri aynı zemine ait drenaj ve konsolidasyon koşullarına bağlı olarak değişik değerler almaktadır. Mohr - Coulomb hipotezine göre zemini kayma mukavemeti,

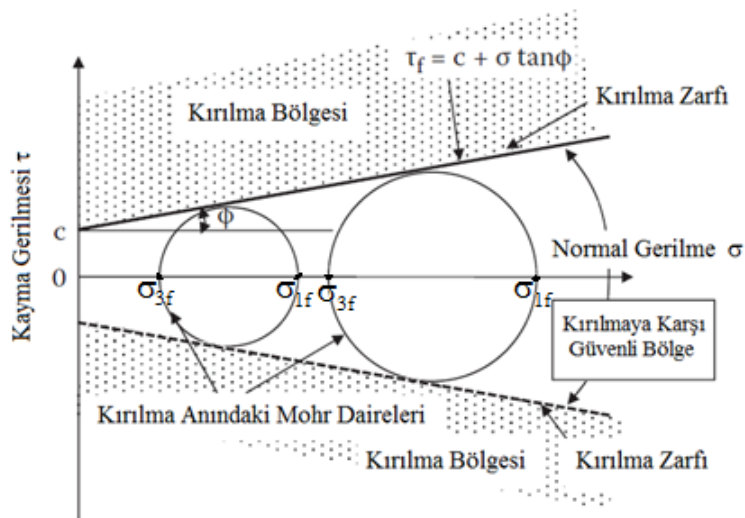
kırılma anında kayma yüzeyine etkiyen normal gerilmeye bağlı olarak da değişmektedir (Taylor 1948, Das 2019).

2.2 ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ

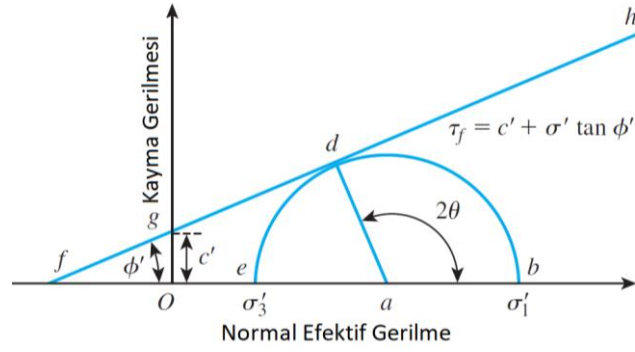
Zeminlerin kayma mukavemeti, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi sert bir yüzeye sahip katı bir plaka üzerinde bir blok ile modellenmiş ve zeminin mukavemeti, partiküller arasındaki içsel sürtünme açısı (ϕ) ve aralarındaki kohezyon (c) direnci ile ifade edilmiştir. Şekil 2.4 ve denklem 2.2’ göre, zeminlerin kayma mukavemeti sabit bir değer değildir. Kırılma durumunda kayma düzlemi üzerine etkiyen toplam veya efektif normal (σ , σ') gerilmeye bağlıdır.



Şekil 2.3 Zeminlerde kırılma modellenmesi (Ishibashi and Hazarika 2010)



Şekil 2.4 Mohr-Coulomb kırılma bölgesi (Ishibashi and Hazarika 2010).



Şekil 2.5 Mohr-Coulomb kırılma zarfı ile asal gerilmeler ile ilişkilendirilmesi (Das 2010).

Şekil 2.5’de kırılma zarfının teğet olduğu Mohr dairesinin merkezinden geçen \overline{ad} doğrusu kayma düzlemini göstermektedir. Bununla beraber dairenin yatay eksenini kestiği noktalardaki gerilmeler (σ'_1, σ'_3) kayma gerilmelerinin sıfır olduğu düzlem üzerinde oluşan normal gerilmeleri göstermektedirler ve bu gerilmelere asal gerilmeler olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.5’de ki trigonometrik ve geometrik bağıntıların yardımı ile asal gerilmeler malzemenin içsel sürtünme açısı ve kohezyon arasında denklem 2.3 ve 2.4 gösterilen ilişkiler elde edilebilir.

Büyük asal gerilme:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.3)$$

Küçük asal gerilme:

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.4)$$

Burada σ'_1, σ'_3 , sırası ile büyük ve küçük efektif asal gerilmeler, c' , efektif gerilme durumundaki kohezyon ve ϕ' efektif gerilmeler altındaki içsel sürtünme açısıdır. Ayrıca kaba daneli zeminlerde kohezyon bulunmadığı ($c'=0$) durumlarda

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{1 + \sin(\phi')}{1 - \sin(\phi')} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.5)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.6)$$

Büyük ve küçük asal gerilmeler farkı deviatör gerilme olarak bilinir. Efektif gerilme cinsinden hesaplanan deviatör gerilme, toplam gerilme türünden hesaplanan deviatör gerilmeye eşittir.

2.3 KAYMA MUKAVEMETİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışının ve kayma mukavemetinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için deney koşulları ile doğal koşulların olabildiğince benzer olması gerekmektedir. Kayma mukavemeti zeminin arazide yüklenmeden önce yerindeki başlangıç durumunu yansıtan konsolidasyon basıncı, boşluk oranı, su muhtevası, suya doygunluk derecesi gibi faktörlerden, arazi yükleme türü ve hızından ve drenaj koşullarından etkilenmektedir. Uygulamada birbirinden farklı koşullar ile karşılaştırılması nedeniyle zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Örselenmemiş numune almanın zor olduğu kumlu zeminlerde ve yumuşak killerde arazi deney sonuçlarından yararlanılmaktadır

Zeminlere ait kayma mukavemeti parametreleri kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) arazi ve laboratuvar deneyleri yardımı ile bulunmaktadır (Head 1994, Aytekin 2004, Holtz 2010, Erol ve Çekinmez 2014). En çok kullanılan deneyleri sıralayacak olursak:

Arazi Deneyleri

1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)
2. Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)
3. Menard Presiyometre Deneyi (MPT)
4. Dilatometre Deneyi (DMT)

Laboratuvar Deneyleri

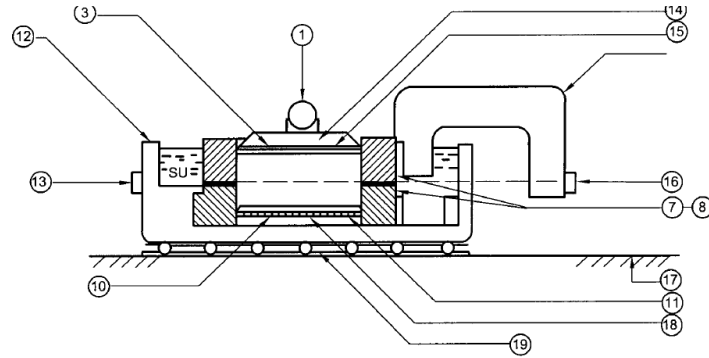
1. Direk Kesme Deneyi
2. Basit Kesme Deneyi
3. Serbest Basınç Deneyi
4. Üç Eksenli Basınç Deneyi'dir.

Bu tez çalışmasında üniform dağılımlı silis kumlar üzerinde direk kesme deneyleri yapılmıştır. Bundan dolayı bu deney hakkında detaylı olarak bilgi verilecektir.

2.4 KUMLU ZEMİNLERDE DİREK KESME DENEYİ

Direk kesme deneyi ile özellikle kuru kum veya çakıllı zeminlerin kayma dayanım parametresi olan içsel sürtünme açıları (su olmadığı için $\phi=\phi'$) belirlenir. Direk kesme kutusu deneyinde, malzeme örnekleri kare veya dairesel ve iki parçadan oluşan metal rijit bir kalıp içerisine yerleştirilmektedir. Daha sonra sabit bir hızda yatay deformasyon uygulayarak metal kalıbının aşağı kısmı mesnetlenerek sabit tutulurken üst kısmı yatay bir şekilde yönelimine izin verilmekte ve böylece numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmaktadır. Sabit bir normal gerilme altında uygulanan kesme kuvveti ile meydana gelen yatay ve düşey deformasyonlar ölçülmektedir.

Bu deney kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmış ilk ve en eski yöntemlerden biridir. Zemin numunesi dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutunun içine yerleştirilmektedir (Şekil 2.6 ve 2.7). Numune belirli bir normal gerilme altında konsolidasyonu tamamladıktan sonra uygulanan kesme kuvveti ile gereken hızda kesilir. Uygulanan kesme kuvveti altında, kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket etmektedir ve zemin kaymaya zorlanmaktadır. Deney sırasında yatay hareket, düşey deformasyon ve kesme kuvveti ölçülmektedir.

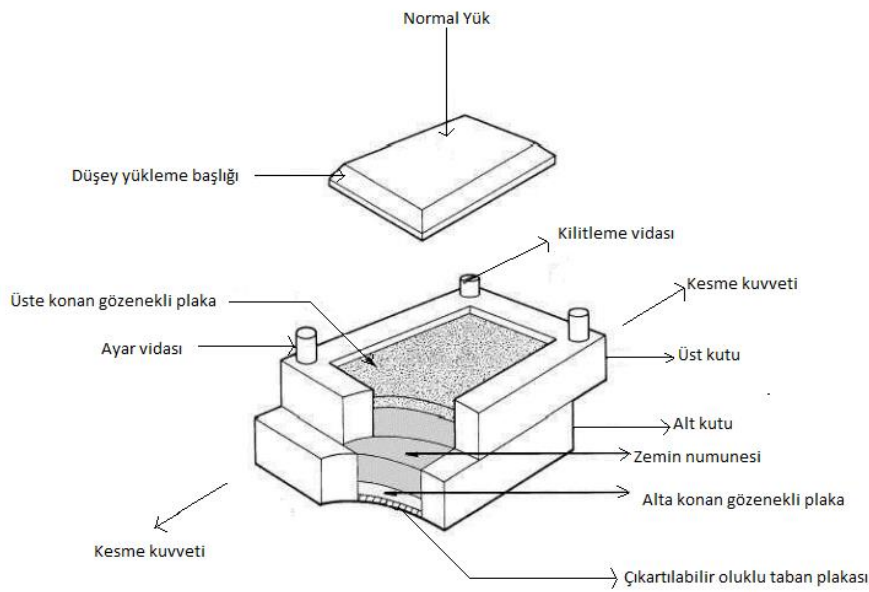


Açıklamalar

| | | | |
|----|----------------------------|----|---|
| 1 | Normal yük | 11 | Çıkarılabilir oluklu taban plâkası |
| 2 | Düşey yükleme başlığı | 12 | Su havuzu |
| 3 | Üste konan gözenekli plâka | 13 | Yükleme sistemi (sabit hız) |
| 4 | Ayar vidası | 14 | Yükleme başlığı |
| 5 | Kesme kuvveti | 15 | Delikli ara plâka |
| 6 | Kilitleme vidası | 16 | Kuvvet halkası reaksiyon plâkası |
| 7 | Üst kutu | 17 | Makine yatağı |
| 8 | Alt kutu | 18 | Taban plâkası |
| 9 | Zemin numunesi | 19 | Doğrusal düşük sürtünlü hareket mekanizması |
| 10 | Alta konan gözenekli plâka | | |

Şekil 2.6 Kesme kutusu deneyi düzeni.(TS-1900-2).

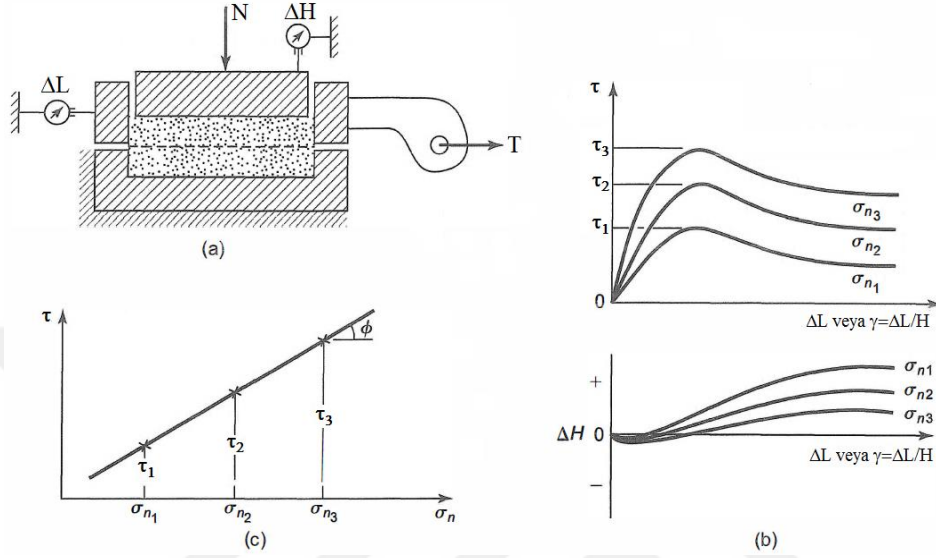
Kesme kutusu kare veya dairesel kesitli olabilirler. Tipik olarak 60 mmx60mm yüzey alanına ve yaklaşık 2.8 cm yüksekliğe sahiptir. Normal gerilme aralığı 0 ile 1000 kPa arasındadır. Deney setleri gerilme veya gerinim kontrollü yapılmaktadır. Deney kuru yapıldığında üç eksenli basınç deneyine benzemektedir. Şekil 2.7’de tipik bir direk kesme kutusu görülmektedir. Kumlu zeminlerde gözenekli (poroz taş) plakaların kullanılması zorunlu olmamasına rağmen ıslak yada suya doymuş zemin numuneleri kullanıldığında poroz taşları kullanmak zorunludur (Lambe and Whitman 1964).



Şekil 2.7 Direk kesme deney kutusunun çizimsel gösterimi (TS-1900-2).

Kumlu zeminlerde Direk kesme deneyi yapmak için örselenmemiş nüme almak çok zor olduğu için arazideki kumlu zeminin yoğunluğu ve rölatif sıklığına uygun en az üç adet numune hazırlanır. Örnekler kesme deney setindeki numune hücrelerinde oluşturulur. Hazırlanan bu numuneler üzerine sabit bir normal gerilme uygulanır. Uygulanan bu normal gerilmeler ($\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$) deney boyunca sabit tutulmasına rağmen her bir deney için farklı normal gerilmeler seçilir böylelikle denklem 2.2’de görülen kırılma zarfı çizilir. Şekil 2.8’de tipik kumlu bir zeminin ($c=0$) tipik kayma gerilmesi-deformasyon ne karşılık deformasyon eğrilerinde gösterilmiştir. Şekil 2.8b’de sıkı bir kum zeminin gerilme ve deformasyon grafikleri görülmektedir. Deney sırasında kayma gerilmesi zorlanmış yatay deformasyon ile önce doğrusal daha sonra da eğimi düşen bir eğrisel hareket ile maksimum değerine ulaşmakta (Elasto-plastik davranış) göstermektedir. Maksimum veya Pik değerine ulaşan

kayma gerilmesi daha sonra azalarak yataya yakın bir eğimle sabit bir değerde devam etmektedir. Düşey deformasyon (ΔH) deney başında negatif yani hacimsel sıkışmayı gösterse de daha sonra pozitif bölgeye geçerek hacim artışı göstermektedir (Holtz et al. 2010). Bu deneydeki zemin davranışları daha detaylı olarak ileriki bölümlerde anlatılacaktır.



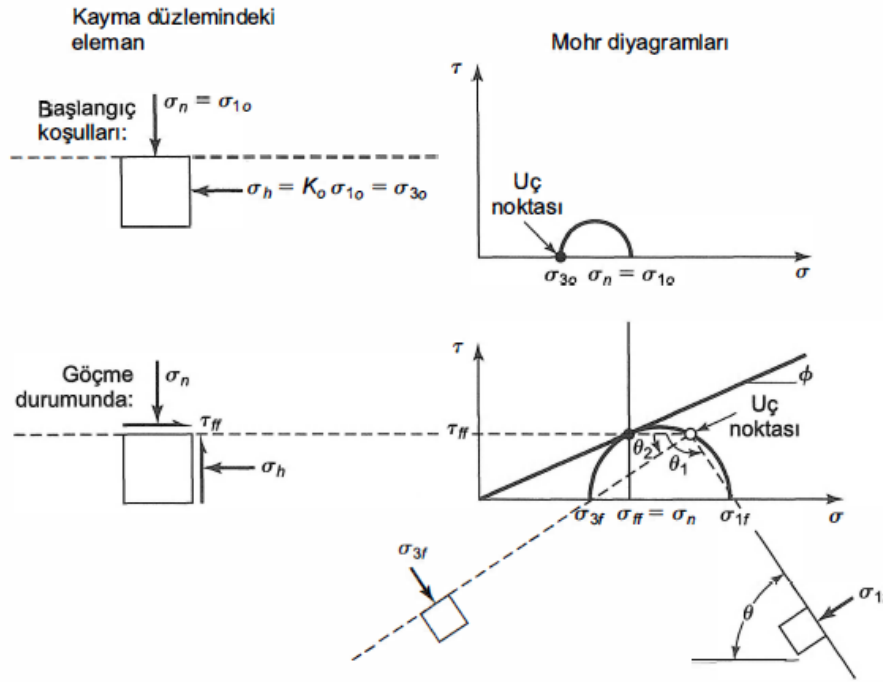
Şekil 2.8 Direk kesme deneyi (a) Deneyde ölçülen parametreler (b) Tipik deney çıktıları (c) Yapılan deneylerin sonuçları yardımı ile kırılma zarfının elde edilmesi (Holtz et al. 2010).

Direk kesme deneyinde bütün zeminlerde kullanılabilir. Bundan dolayı zemin numunesini kesme hızı ince daneli (Killi veya siltli) zeminlerde oldukça önemli olsa da kaba daneli zeminlerde drenaj ve konsolidasyon çok hızlı geliştiği için hız çok da önemli değildir. ASTM 3080 ve TS 1900-2 standartların da kesme hızının 0.0025 ile 1.0 mm/dakika aralığında olması önerilmektedir. Bu çalışmada 60 mm x 60 mm (L x L) kesit alanına sahip bir kesme kutusu hücresi kullanılmaktadır. Yaklaşık %10'luk yatay birim deformasyon ($\Delta L/L$) değerini 10 dakika da sağlayacak şekilde 0.6 mm/dakika hızında deney tamamlanmaktadır.

2.5 DİREK KESME DENEYİ VERİLERİNİN YORUMU

Daha önce belirtildiği gibi bu deney de her biri farklı bir düşey normal gerilme altında aynı zemine ait bir dizi örnekleri test edilir ve kayma mukavemetini gösteren maksimum kayma gerilmesi değerleri $\tau_f = T_{max} / \text{Alan}$ ($L \times L$), her biri için normal gerilme de $\sigma'_f = N / \text{Alan}$ şeklinde bulunur. Elde edilen verilerin yardımı ile Mohr-Coulomb kayma dayanımı parametreleri c' ve ϕ' elde edilir.

Direkt kesme deneyinin çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır. Granüler zeminler için bu deney ucuz, hızlı ve basittir. Deney kutusunun içindeki zemin örneğine ait kırılma düzlemi önceden belirlidir ve bundan dolayı kırılma düzlemi üzerindeki gerilmeler direkt ölçülebilmektedir. Diğer bir deyişle deney sonunda mohr-coulomb kırılma zarfı çizildikten sonra asal gerilmelerin yönelim açıları hesaplanabilmektedir (Şekil 2.9).

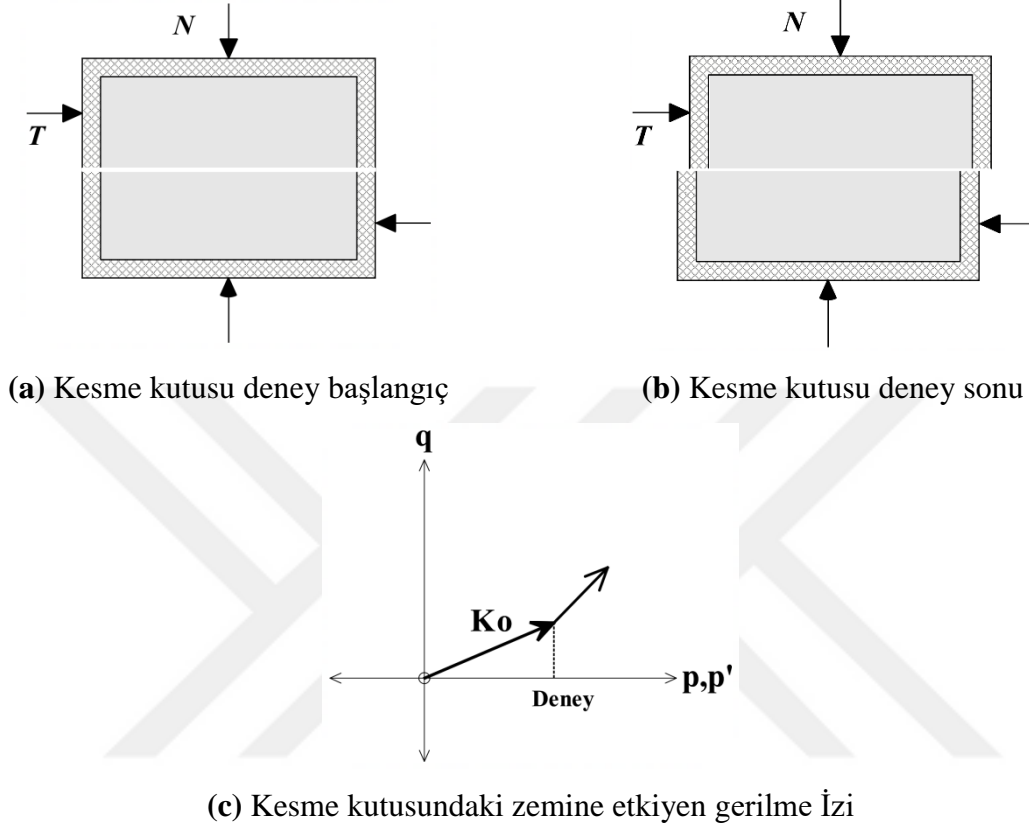


Şekil 2.9 Direk kesme deneyi kayma düzlemine etkileyen kayma gerilmesi Mohr dairesinin tanjant noktasından hesaplanır (Holtz et al. 2010).

Deneyin en sakıncalı yanı, kesilmeye zorlanan zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmayabileceğidir. Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının ölçülememesi, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır.

Direk kesme deneyinde, deney başında (K_0 durumu) Şekil 2.8a ve Şekil 2.9'da görüldüğü gibi zemin numunesinin üzerine etkileyen düşey normal gerilme ($\sigma_{10} = \sigma_n$) büyük asal gerilmeye, yatayda da küçük asal gerilme (σ_{30})'e eşittir. Fakat deney sırasında asal gerilmelerin düzlemleri değişmekte, düşey verilen normal gerilmenin etkidiği düzlem üzerinde kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 2.8 ve 2.9'da da görüldüğü üzere deney başlangıcında K_0 durumu düşey yük verilerek sağlanmaktadır. Daha sonra yatayda verilen kayma gerilme

sayesinde gerilme izleri q ve p' artırılmaktadır. Gerilme izi kesin olarak bu teste çizmek mümkün değildir. Sadece kesme yüzeyine etkiye normal ve kayma gerilmesi bilinmekte fakat diğer gerilme durumları bilinmemektedir.



Şekil 2.10 Direk kesme deneyinde zemin numunesine etkiyen deney başı ve sonundaki gerilemeler (Lamb and Whitman 1969).

Buradaki q , p ve p' gerilme izleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \text{ ve } p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (2.7)$$

$$q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (2.8)$$

Burada σ_1 , toplam büyük, σ_3 toplam küçük ve sırası ile σ'_1, σ'_3 , efektif büyük ve küçük asal gerilmeleri göstermektedir. Bu çalışmada kuru kumlar üzerine çalışmalar yapıldığı için boşluk suyu basıncının etkisi sıfırdır. Bundan dolayı efektif gerilme toplam gerilmeye eşittir.

Gerilme izindeki K_0 , sedimantasyon gibi doğal normal konsolide zeminlerin oluşum proseslerinde artmaktadır. K_0 değişim oranı (β) olarak kabul edilirse K_0 yüklemesi aşağıdaki gibi yazılabilir. Bu denklemi K_0 ile ilişkilendirilirse

$$\frac{q}{p} = \tan \beta \quad (2.9)$$

$$K_0 = \frac{1 - \tan \beta}{1 + \tan \beta} \quad (2.10)$$

İlk defa granular zemin bir yüke maruz bırakıldığında sürtünme kuvvetlerinin etkidiği noktalardaki düşey gerilmeler ($\sigma_v > \sigma_h$) yatay normal gerilemelerden küçüktür ($K_0 < 1$). Ko partüküller arasındaki noktalarındaki kontak noktalarında mobilize olan sürünme miktarına bağlıdır. Deneysel çalışmalarda Jaky 1944 aşağıdaki denklem 2.11'i önermiştir.

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (2.11)$$

Denklem 2.10 ile 2.11 birleştirildiğinde

$$\tan \beta = \frac{\sin \phi}{2 - \sin \phi} \quad (2.12)$$

veya

$$\sin \phi = \frac{2 \tan \beta}{1 + \tan \beta} \quad (2.13)$$

şeklinde bulunur.

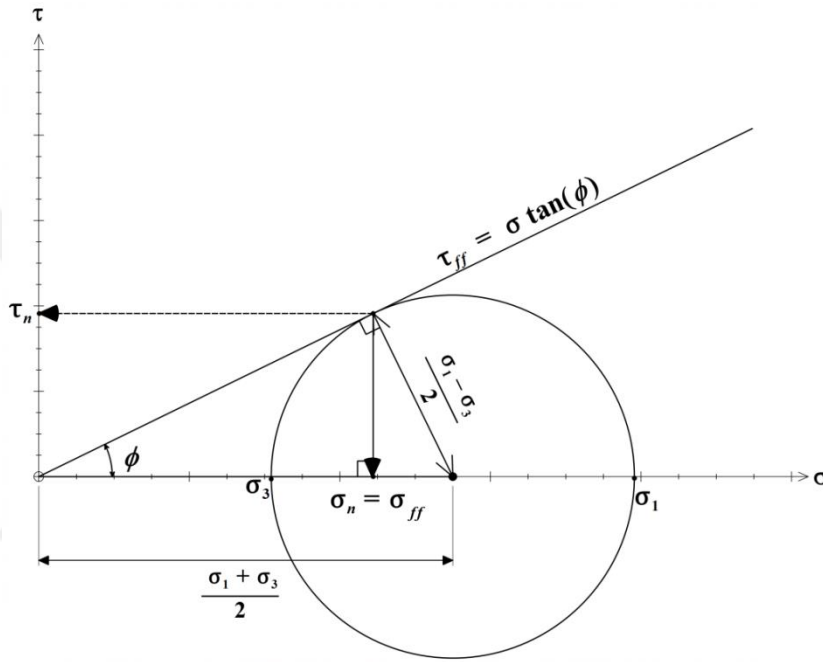
2.5.1 İçsel Sürtünme Açısının Direk Kesme Deneyinden Elde Edilişi

Bu deneyde bilindiği üzere sadece bir düzlem üzerindeki kayma ve normal gerilmelerin değerleri bilinmektedir. Bundan dolayı test sonuçlarından verilen gerilmeler duruma göre Mohr dairesini çizmek mümkün değildir. Ancak, ölçülen $\tau/\sigma = \tan \phi$ olarak kabul edilirse Şekil

2.11 şeklinde gibi çizilebilir. Aslına bakılırsa, kesme kutusundaki yatay düzlem ile teorik kırılma düzleminin (denklem 2.14) aynı olduğu kabulü yapılmaktadır.

$$\tau_n = \tau_{ff} \text{ ve } \sigma_n = \sigma_{ff} \quad (2.14)$$

Burada τ_n ve σ_n deneyden elde edilen kayma dayanımı ve deneyde kullanılan normal gerilmedir.



Şekil 2.11 Direk kesme deneyinden içsel sürtünme açısının elde edilmesi.

Şekil 2.11'deki mohr dairesini çizebilmek için tek veri seti direk kesme deneyinden elde edilen τ_{ff} ve σ_{ff} 'dir. Şekil 2.11'de ki geometrik ve trigonometrik ilişkileri dikkate alarak Mohr dairesi için gerekli asal gerilmeler (σ_1, σ_3) aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir.

$$\tau_{ff}^2 = \sigma_{ff} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sigma_{ff} \right) \quad (2.15)$$

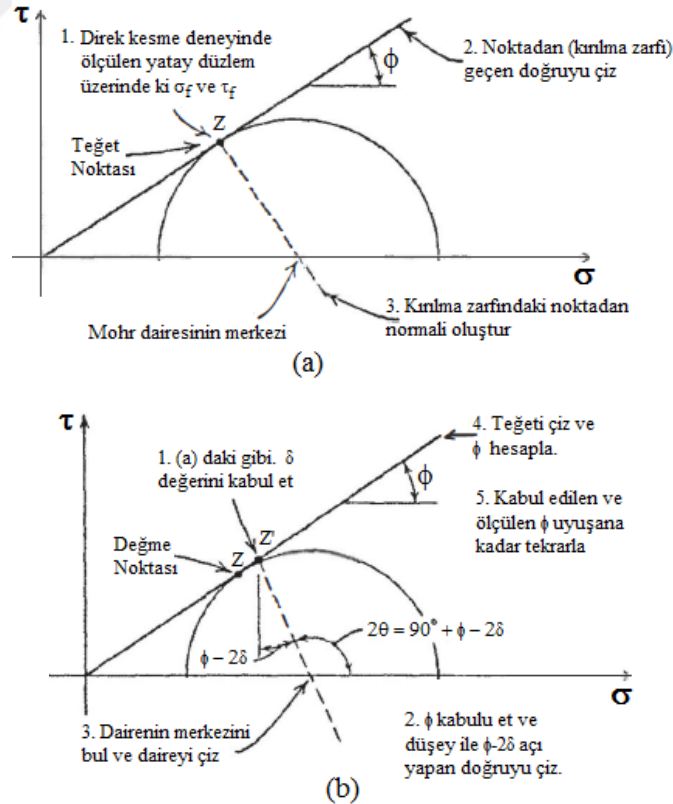
$$\sigma_1 = 2 \sigma_{ff} \left(\frac{\tau_{ff}^2}{\sigma_{ff}^2} + 1 \right) - \sigma_3 \quad (2.16)$$

$$\tau_{ff} = \cos \phi \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.17)$$

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sin \phi \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.18)$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \sigma_{ff} \left(\frac{\tau_{ff}^2}{\sigma_{ff}^2} + 1 \right)}{1 + \tan^2 \left(45 - \phi/2 \right)} \quad (2.19)$$

Bu kabuller sıkça sorgulanmaktadır (Şekil 2.12). Bir çok yönden, Maksimum kayma gerinimlerin (γ_{max}) olduğu düzlem yatay düzlem olduğu görülmektedir. Bu düşünce ile, yatay düzlemdeki gerilmeleri temsil eden nokta büyük asal gerilme ile $2\theta = \pm 2(45^\circ + \phi/2 - \delta)$ açı yapan noktaya hemen hemen düşmektedir (Lamb and Whitman 1969). Lamb and Whitman, δ 'yı teorik ile gözlenen kırılma düzlemler arasındaki oryantasyon açısı olarak tanımlamıştır. Hesaplama detayları Şekil 2.12'de görsel olarak sunulmuştur. Yapılan çalışmalarda δ açısının çok büyük olmadığı ve şayet δ 5° 'den küçük ise iki yaklaşımdaki hesaplanan içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri arasındaki fark 1° derece olduğu bildirilmiştir. Bu fark da mühendislik hesaplarında göz ardı edilebilir bir farktır.



Şekil 2.12 Direk kesme deneyinden içsel sürtünme açısının bulunuşu a) Yatay düzlem teorik kayma kırılma düzlemi olarak kabul edilirse b) Yatay düzlemde kırılma düzlemi olarak ön görülürse (Lamb and Whitman 1969).

Şekil 2.12’de kabule dayanan direk kesme deneyinden elde edilen ϕ açısı ile üç eksenli basınç deneyinden Mohr Coulumb kırılma zarfının eğimi ile arasındaki karşılaştırma yapılan bir çok araştırma vardır (Bolton 1986, Jewel 1989, Holsby 1993, Cui and O`Sullivan 2006, Doherty and Fahey 2011, Fern et al. 2015, Jiang et al. 2018, Lings and Dietz 2004). Deneysel hataları dikkate de alarak bu iki deneyden bulunan değerlerin ortalaması alındığında direk kesme deneylerinden bulunan ϕ değerleri yaklaşık 2° üç eksenli basınç deneylerinden bulunan değerlerden daha fazladır (Taylor 1948).

Kesme kutusu deneyi kuru kum gibi kuru kohezyonsuz zeminlerin içsel sürtünme açılarının bulunmasında oldukça yaygın kullanılmasına rağmen zemin örnekleri suya doymun veya ıslak olduğunda pek kullanılmaz. Drenajlı yapılan deneylerde drenajın kontrol edilmesi oldukça güçtür. Bundan dolayı doymun ince taneli zeminlerde bu deney problem çıkarmaktadır. Ayrıca yüksek plastisiteli killerde drenajsız deney durumlarında yaklaşık değerler vermektedir. Diğer bir dezavantajı da örnek sınırlarında gerilme konsantrasyonları oluşmaktadır. Bu da numunenin içinde yüksek miktarda üniform olmayan gerilmelere sebep olmaktadır. Asal gerilme düzlemlerinin deney boyunca değişimi ve numune sınırlarında oluşan bu gerilme konsantrasyonları arazi koşullarındaki yüklenme durumlarını laboratuvarda modellemekte zorluk çıkarmaktadır (Al-khafajıand and Andersland 1992).

2.6 KUMLU ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİNE ETKİYEN FAKTÖRLER

Kumlu zeminlerin kayma mukavemetine bir çok fiziksel ve yığınsal parametreler etkimektedir. Önceki çalışmalarda ϕ 'i etkileyen faktörleri, boşluk oranı (e) veya rölatif sıklık (Dr), Dane boyu dağılımı, dane yüzey pürüzlülüğü, su içeriği, dane boyu, aşırı konsolide ve ön gerilme olarak sıralayabiliriz. Holtz et al. (2010) tarafından Çizelge 2.1 bu faktörlerin etkileri özetlenmiştir. Rölatif sıklık, köşelilik, üniformalık katsayısı, yüzey pürüzlülüğü arttıkça zemin ait ϕ açısını arttırmakta olduğunu, boşluk oranı azaldıkça da açının yükseldiği dolayısı ile zeminin kayma mukavemetinin yükseldiğini belirtmiştir. Su içeriğinin ve dane boyunun nemli bir etki yapmadığını bildirmiştir.

Bu çalışmada çeşitli boyutlarda üniform silis kumları kullanılmıştır. Böylelikle Çizelge 2.1’de özetlenen boşluk oranı, rölatif sıklık, üniformalık katsayısı ve dane boyunun etkisi incelenmiştir.

Çizelge 2.1 İçsel sürtünme açısına etkileyen faktörler (Holtz et al. 2010).

| FAKTÖR | ETKİ |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Boşluk oranı, e | $e \uparrow, \phi \downarrow$ |
| Rölatif Sıklık, D_r | $D_r \uparrow, \phi \uparrow$ |
| Köşelilik, A | $A \uparrow, \phi \uparrow$ |
| Dane boyu dağılımı, C_u | $C_u \uparrow, \phi \uparrow$ |
| Yüzey pürüzlülüğü, R | $R \uparrow, \phi \uparrow$ |
| Su içeriği, w | $w \uparrow, \phi \downarrow$ hafifçe |
| Dane boyu, D | Etkisiz (e sabiti ile)? |
| Aşırı konsolidasyon veya ön gerilme | Az etki |

2.6.1 Boşluk Oranı veya Rölatif Sıklığın Mukavemete Etkisi

Kaba daneli (çakıllı veya kumlu) zeminlerde rölatif sıklığı ve boşluk oranı kayma mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerdir. Çizelge 2.2’de silt ve kum zeminler için elde edilmiş efektif kayma mukavemeti açıları gösterilmiştir. Yuvarlak ve köşeli dane tipine ait kum ve silt zeminler için gevşek, orta ve sıkı durumlardaki ortalama değerler verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi boşluk oranı(e) azaldıkça granüler zeminin kayma mukavemeti artmaktadır.

Çizelge 2.2 Kum ve silt zeminler için efektif kayma mukavemeti açısı değerleri (Das 2010).

| Zemin Tipi | ϕ' |
|-----------------------|---------|
| Kum (Yuvarlak Daneli) | |
| Gevşek | 27-30 |
| Orta | 30-35 |
| Sıkı | 35-38 |
| Kum (Köşeli Daneli) | |
| Gevşek | 30-35 |
| Orta | 35-40 |
| Sıkı | 40-45 |
| Çakıllı Kum | 34-48 |
| Kil | 15-35 |
| Silt | 26-35 |

Granüler zeminlerin kayma mukavemetini tanımlarken sıkı veya gevşek olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlamalar rölatif sıklık (D_r) parametresi ile ifade edilmektedir.

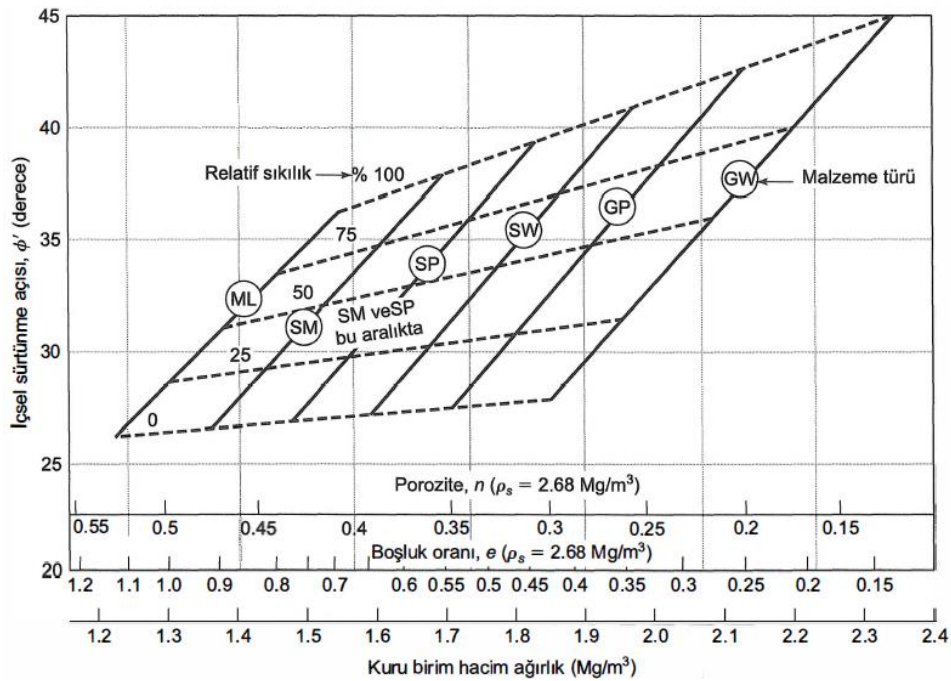
D_r 'nin sayısal olarak hesaplanabilmesi için aşağıdaki ifade den faydalanılmaktadır.

$$D_r = \frac{e_{max} - e_n}{e_{max} + e_{min}} \text{ veya } = \frac{\gamma_{dmax} (\gamma_d - \gamma_{dmin})}{\gamma_d (\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin})} \quad (2.20)$$

Çizelge 2.3 Rölatif sıklığa bağlı kaba daneli zeminlerin sıklık tanımlaması (Budhu 2015).

| D_r (%) | Sıklık Durumu |
|-----------|---------------|
| 0-20 | Çok Gevşek |
| 20-40 | Gevşek |
| 40-70 | Orta Sıkı |
| 70-85 | Sıkı |
| 85-100 | Çok Sıkı |

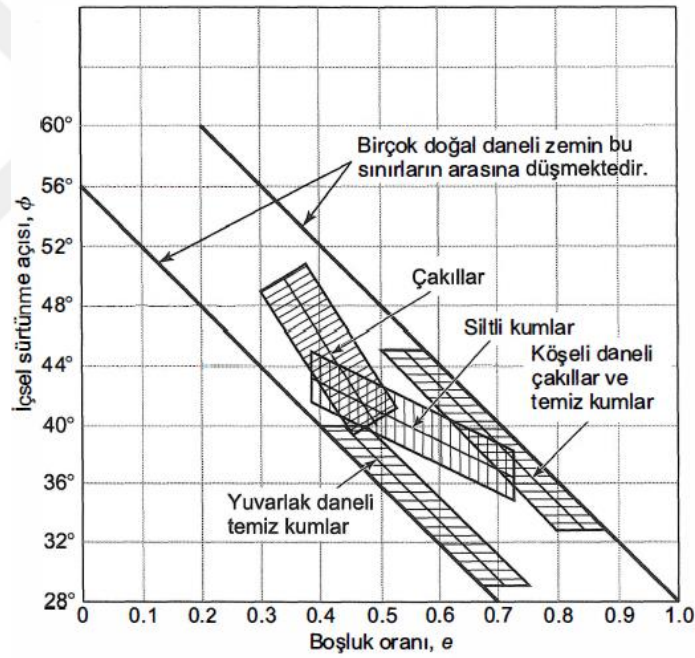
Burada e_{max} zemine ait en büyük boşluk oranı, e_{min} en küçük sahip olabileceği boşluk oranı, e_n zeminin an itibari ile doğal boşluk oranı ve $\gamma_{dmax}, \gamma_{dmin}, \gamma_d$ sırası ile maksimum, minimum ve an itibari ile kuru bicim hacim ağırlıklarıdır. D_r , denklem 2.20'den de anlaşılacağı gibi bir orandır ve sıfır ile bir arasında ve % cinsinden değerler almaktadır. D_r değerlerine bağlı zeminin yığın özellikleri aşağıdaki gibi sınıflanmaktadır.



Şekil 2.13 İçsel sürtünme açısı ile kuru birim hacim ağırlık ve boşluk oranı ile ilişkisi (U.S. Navy 1986, Holtz et al. 2010).

Şekil 2.13’de birleştirilmiş zemin sınıflamasındaki kaba daneli ve kohezyonsuz zeminlerin rölatif sıklığa bağlı içsel sürtünme açılarının değişimi sunulmuştur. D_r arttıkça ϕ değerlerinin arttığı net olarak görülmektedir. Ayrıca şekilde görüldüğü gibi, Üniform kumların (SP) kayma mukavemeti açısı iyi derecelenmiş kumlarınkinden (SW) daha düşüktür ve oldukça dar aralıkta değiştiği kabul edilmektedir.

D_r , denklem 2.20’de görüldüğü gibi zemine ait boşluk oranına sahiptir. Boşluk oranı düştükçe D_r değeri yükselmektedir. Ancak her zeminin gradasyonu, daneler özelliklerinden dolayı maksimum ve minimum boşluk oranları birbirinden farklıdır. Bundan dolayı aynı doğal boşluk oranına sahip iki farklı kumlu zemin farklı rölatif sıklığa sahip olabilirler. Bundan dolayı rölatif sıklık değeri, boşluk oranı yerine kullanılamaz. Şekil 2.13 ve 2.14 aynı boşluk oranına sahip olmasına rağmen farklı içsel sürtünme açılarına sahiptirler.



Şekil 2.14 Boşluk oranı ve içsel sürtünme arasındaki ilişki (Means and Parcher 1963, Holtz et al. 2010).

2.6.2 Parçacık Morfolojisinin Kumlu Zeminlerin Mukavemetine Üzerine Etkisi

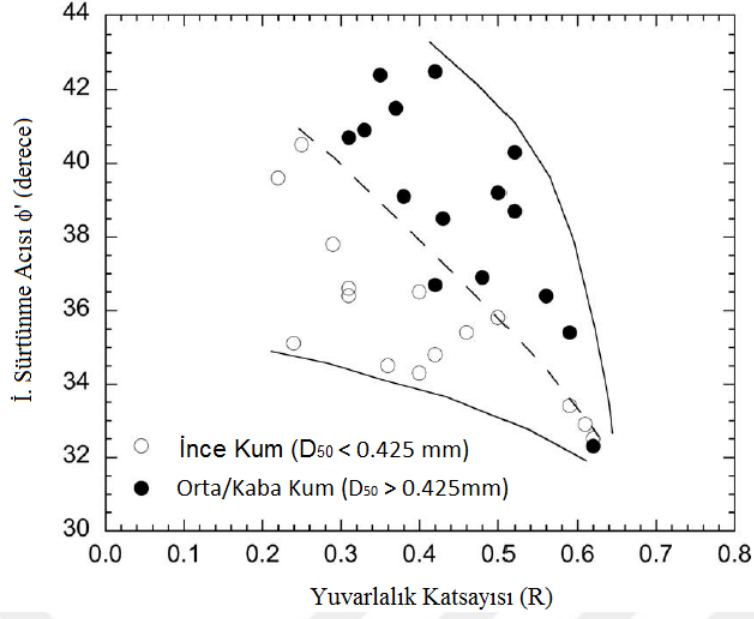
Granül malzemelerin kayma mukavemeti, partikül morfolojisi, derecelendirme, mineraloji, sınır koşulları ve yükleme yolunu içeren birçok faktörden etkilenir. Son yıllarda, bilgisayarlı tomografi gibi üç boyutlu (3B) görüntüleme teknikleri, araştırmacıların parçacıkların 3B görüntülerine dayanan kum parçacık morfolojisini ölçmelerini sağladı. Parçacık

morfolojisinin (yani yüzey dokusu, yuvarlaklık, biçim ve küresellik) etkisinin, örnek yoğunluğunun ve silika kumlarının kayma mukavemet parametreleriyle ilişkileri üzerine bir çok çalışmalar literatürde mevcuttur (Stupkiewicz and Mroz 2001, Cho et al. 2006, Bareither et al. 2008, Arasan 2011, Fu et al. 2014, Aliasand Taha 2014, Alshibliand Cil 2018).

Stupkiewicz and Mroz (2001), Kohezif ve non-kohezif granular malzemeler arasında kırılma ara yüzlerde oluşan monotonik ve devirsel yükler altında kırılma mekanizmalarını ana faktörlerin yüzeyin pürüzlü ve pütürlü yapısı ve pütürlü kısımların uzunlukları etkisini incelemiş ve partiküller arasındaki sürtünme açısının ve kilitlenme derecesinin gevrek kırılmalardan çok etkilendiğini bildirmektedirler.

Cho et al. (2006) çalışmalarında değişik kum ocağı örnekleri kullanışlar ve ocaklara kumların kırılarak oluşturulan değişik çaplardaki kum tanelerinin birbirilerine çok benzediğini yuvarlaklık derecesi (R), 0.2 ile 0.3, küresellik özellikleri (S) ise 0.7 ile 0.8 arasında değerler aldığını belirtmiştir. Doğal kumlarda ise danelerin daha rast gele şekillere sahip oldukları ve R ve S değerleri sırası ile 0.3-0.9, 0.5-0.9 aralıklarında değiştiklerini tespit etmişlerdir. R ve S değerleri düştükçe e_{max} ve e_{min} azaldığını bununla birlikte kritik içsel sürtünme açısının (ϕ_{cv}) ve zeminin sıkışma potansiyelinin arttığını rapor etmişlerdir.

Bareither et al. (2008) Winconsin USA bölgesinde inşaat sahalarında kullanılan yaklaşık 30 adet kompakte edilmiş kum dolgularından örnekler toplamış ve dayanım-deformasyon ile jeoloji orijin ve kumların fiziksel özellikleri ile arasında istatistiki ilişkiler bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda en düşük üçse sürtünme açısı iklimsel sebeplerle aşınmış kum taşları tabakalarından oluşan orta-ince kalınlıkta, yuvarlaklaşmış ve kötü derecelenmiş kumlarda ölçmüşlerdir.



Şekil 2.15 İnce ve orta-kaba kumların R katsayısı ile ϕ' arasındaki ilişki (Bareither et al. 2008).

Arasan (2011) tarafından yapılan çalışmada, zemin partikül şekillerinin mukavemetine etkileyen önemli faktörlerden biri olduğunu özellikle dane yuvarlaklığının artması ve pütürlülüğünün azalması, o zemine ait e_{max} ve e_{min} değerlerinin bununla beraber de ϕ' değerlerini azalttığını bildirmiştir. Arsan doktora çalışmasında görüntü analizleri yardımı ile granüler zemin örneklerinin yuvarlaklık katsayısı (R), pütürlüğü veya fraktal katsayısını (DR), ve küresellik (S) değerlerini hesaplayarak örneklere ait kayma dayanımı gösteren içsel sürtünme açısı arasında istatistiksel ilişkiyi aşağıdaki gibi sunmuştur.

$$\phi = e^{(3.18+0.32D_r-1.36S+0.9D_R+0.0271D_{60}+0.273C_u)} - 11.72 \quad (2.21)$$

Burada, D_r rölatif sıklık, S danenin kısa boyutu, D_R Danelerin ortalama fraktal boyutu, D_{60} Zeminin yüzde altmışının geçtiği çap, C_u ise üniformluk katsayısıdır.

Fu et al. 2014 tarafından geliştirilen özel direk kesme cihazında farklı yükseklikte ve genişlikte kesme kutusu kullanarak farklı gradasyonlara sahip kaba daneli zeminlerin kayma mukavemetleri hesaplanmıştır. Yapılan çalışmaların ışığı altında, boşluklu gradasyon (bazı dane çaplarının eksik olduğu gradasyon) ve dane çaplarının kayma mukavemetine yüksek miktarda etki ettiği bu etkininde yüksek normal (σ_n) gerilemeler altında daha net görüldüğünü bildirmişlerdir.

Alias, Kasa ve Taha (2014)'deki çalışmalarında 60x60x24 mm ve 300x300x200 mm boyutlarında iki tip direk kesme kutusu kullanarak farklı çaplara sahip kum ve çakıllı zeminlerin içsel sürtünme açılarının değişimlerini incelemişlerdir. Küçük kesitli kesme kutusunu 2.26 mm den daha küçük dane boyutlarına sahip zeminler için kullanırken, 20 mm den küçük dane boyutuna sahip zeminler için de büyük kesitli kesme kutusunu kullanmışlardır. Partikül çapları büyüdükçe daha yüksek içsel sürtünme açısı ölçtüklerini belirtmişlerdir. Ayrıca farklı boyutlarda kullanılan kesme kutusu deney setlerinin de maksimum (ϕ_{max}) ve rezidüel (ϕ_{rez}) içsel sürtünme açıları arasında da 3° ile 5° arasında fark oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Alshibli and Cil (2018) değişik çaptaki zemin partikülleri ile küresel cam boncukları karıştırarak kesme deneyleri yapmışlar ve zemin tanelerinin şekil ve boyutlarının dayanım ve gerilme-deformasyon ilişkilerine etkilerini incelemişlerdir. Küresel cam boncuklar ve ABD Elek No. 40 (0,42 mm) ve Elek No. 50 (0,297 mm) arasında tane büyüklüğü olan diğer üç kumun (farklı morfolojili) yanı sıra 15-, 50-, 100- ve 400 -kPa'yı arasında test edilmiştir. Eksenel simetrik üç eksenli basınç altında sınırlayan basınçlar. Parçacık morfolojisinin stres-gerilme tepkisi ve hacim değişim davranışının yanı sıra tepe durum ve kritik durum (CS) sürtünme ve dilatans açıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Literatürden toplanan Toyoura ve Hostun RF kumlarının üç eksenli test sonuçları analizlere dahil edilmiştir. Girdi parametreleri olarak partikül yüzey dokusu, yuvarlaklık, küresellik, bağıl yoğunluk ve başlangıçtaki ortalama stres sağlanarak tepe ve CS sürtünme açılarının yanı sıra dilatans açısını tahmin edebilen basit istatistiksel modeller geliştirilmiştir. Sonuçlar morfoloji parametrelerinin dilatans açısı, CS ve tepe durum sürtünme açılarını büyük ölçüde etkilediğini göstermişlerdir.

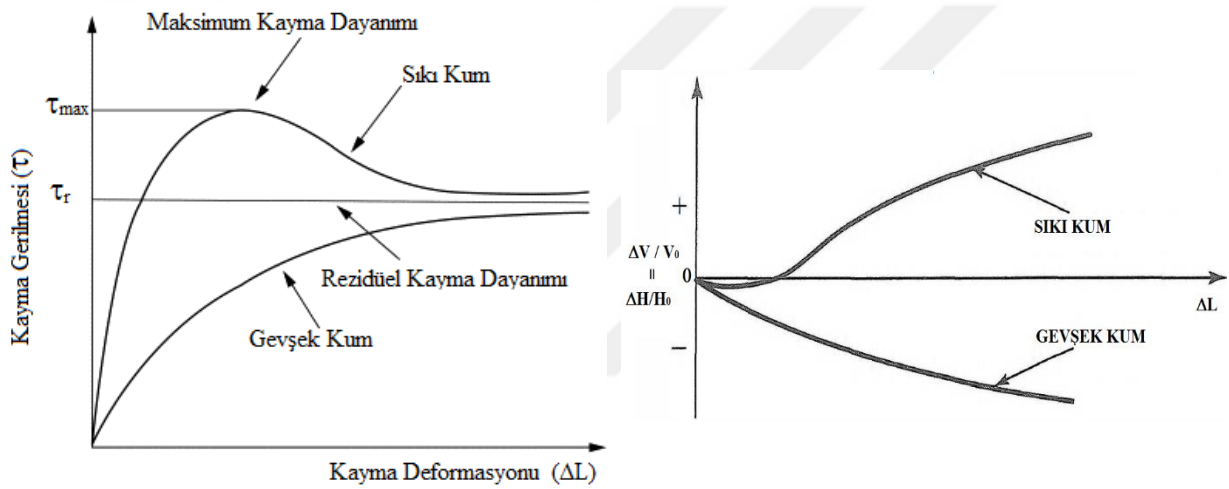
2.7 DİLATASYONUN (ψ)İÇSEL SÜRTÜNME AÇISINA ETKİSİ

Zeminlerin kayma dayanımları incelendiğinde Şekil 2.16 görüldüğü gibi gevşek kum zeminlerin davranışları ile sıkı kumların iki ayrı grup olarak ayırmak gerekmektedir. Şekil 2.16'de iki tip malzeme davranışına ait gerilme-deformasyon davranışları gösterilmiştir.

Burada birinci gevşek grup zeminlerin davranışlarını açıklayacak olursak, kayma gerilmenin artışına bağlı olarak hacimsel (boşluk oranı) gerinimler azalmakta, zeminler daha yoğunlaşmaktadır. İkinci grup malzemeler üzerine uygulanan kayma gerilmesine bağlı olarak

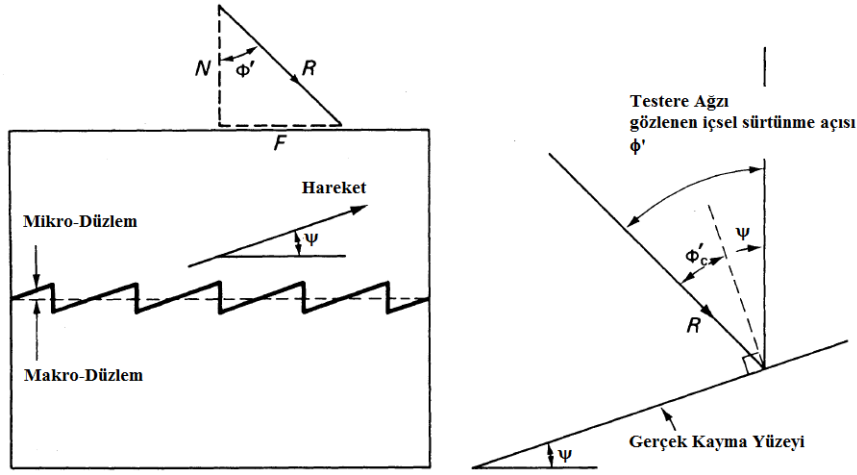
hacimsel artışlar meydana gelmekte ve bu gerilme-deformasyon ilişkileri zeminlerin kayma mukavemeti üzerinde etkili olmaktadır.

Şekil 2.16'de 2. grup sıkı kumlarda ise kayma gerilmesi pikleşme (maksimum) yapmakta ve daha sonra da düşüğe geçerek rezidüel (yada kiritik) bölgede eğim sabitlenmektedir. Birinci grup zeminlerde artan deformasyon seviyesiyle birlikte sıkışma, 2.grup zeminlerde ise hacimsel artışlar oluşmaktadır. Boşluk oranının(e)değişimi de bunlara paralel olarak gelişmektedir. Sıkı kumlarda görülen hacimsel artışa dilate olmuş denir veya dilatasyon olarak da adlandırılır.



Şekil 2.16 Kumların gerilme-defomasyon davranışları.

Dilatasyon, granüler malzemelerde kayma deformasyonlarına maruz kaldıklarında gözlenen hacim değişimidir. Bu etki, ilk olarak 1885/1886'da Osborne Reynolds tarafından bilimsel olarak tanımlanmıştır ve ayrıca Reynolds dilatansı olarak da bilinir. malzeme, kesildiği gibi genişlemektir. Bu, sıkışmış bir durumda olan tanelerin birbirine kenetlendiği ve bu nedenle birbirinin etrafında hareket etme özgürlüğüne sahip olmadığı için oluşur. Şekil 2.17'de tipik sıkı granüler zeminde dilatasyon hareketi görülmektedir. Dilatasyon hareketi yönelimi, gerçek kayma düzleminin yatayla yaptığı açı (ψ) ile ifade edilir. Bu açıya dilatasyon açısı denir.



Şekil 2.17 Testere dişi dilatasyon modeli (Bolton 1979).

Şekil 2.17 dikkate alındığında dilatasyon açısı ile zemin ait içsel sürtünme açısı arasında aşağıdaki ifade yazılabilir.

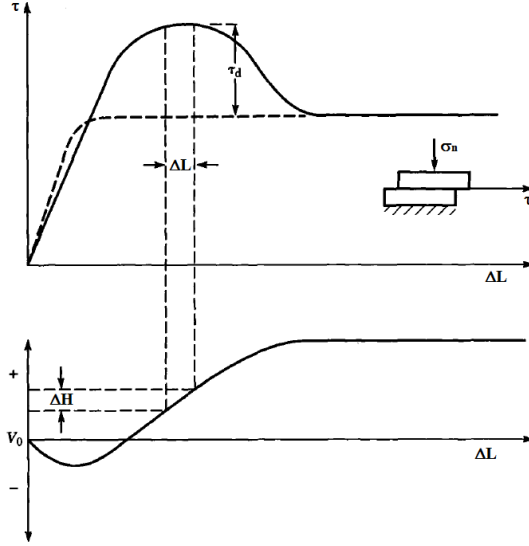
$$\phi' = \phi'_{cv} + \Psi \quad (2.22)$$

Burada ϕ'_{cv} kırık durum sürtünme açısı veya hacim değişimi olmadan deformasyon durumundaki sürünme açısı olarak adlandırılır. Bir sıkı kuru kumlu zeminde yapılan kayma mukavemeti deneyinde eğer maksimum kayma (τ_{max}) gerilmesi kullanılarak içsel sürünme açısı bulunmak isteniyorsa o zaman

$$\phi'_{max} \text{ veya } \phi'_{pik} = \phi'_{cv} + \Psi_{max} \quad (2.23)$$

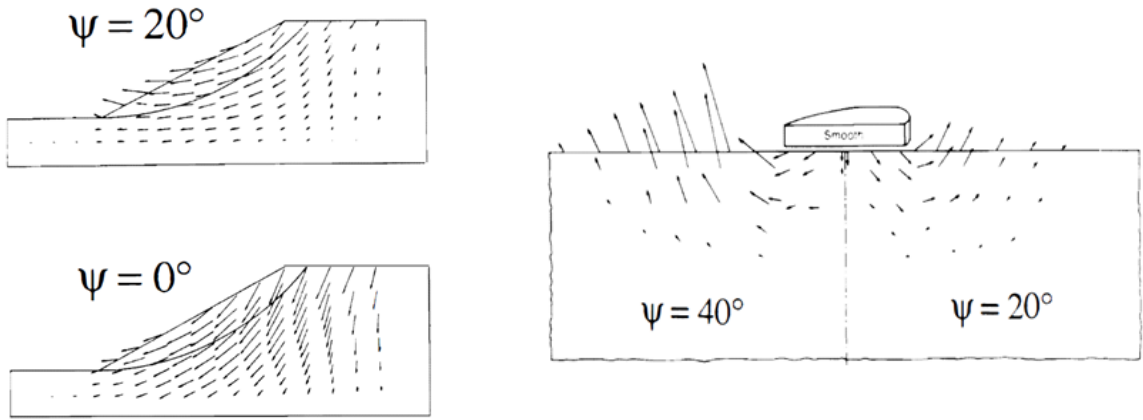
Şeklinde bulunur. Ψ_{max} değerini direk kesme deneyinden elde etmek isteniyorsa o zaman Şekil 2.18'de görüldüğü gibi kayma gerilemelerinin maksimum değerleri ulaştığı bölgede ölçülen hacimsel artışın (düşey deformasyonun) yanıl kesilen plaka düzlemin deformasyonuna oranlanması ile bulunmaktadır. Kesme kutusunda yanıl deformasyonlar kısıtlı olduğu için zemin örneği sadece düşey veya yukarı yönde bir boyutlu deformasyon gösterecektir. Bundan dolayı hacimsel değişim yüksekliğin değişimi ile ifade edilir.

$$\tan(\Psi_{max}) = \frac{\Delta\epsilon_v}{\Delta\gamma} = \frac{\Delta H/H}{\Delta L/H} = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2.24)$$



Şekil 2.18 Dilatasyon açısının elde edilmesi (Al-Khafpjiand and Andersland 1992).

Daha önce bahsedildiği gibi geoteknik mühendisliğinde özellikle, duraylılık analizlerinde, taşıma gücü hesaplarında ve zeminlerin gerilme-gerinim davranışlarının modellenmesinde Mohr-Coulomb modeli oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu modeli kullanarak yapılan sayısal çalışmalarda dilatasyon açısının doğruya yakın girilmesinin önemi büyüktür. Holsby 1991 çalışmasında özellikle yüksek içsel sürtünme açısına ($\phi' > 30^\circ$) sahip zeminlerde dilatasyon açısının deformasyon değerlerine etkisinin yüksek olduğunu, düşük içsel sürtünme açılarında da ($\phi' < 30^\circ$) etkisinin olmadığını bildirmiştir. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi yüksek dilatasyon açılarında deformasyon miktarında gözle görünür artışlar söz konusudur. Sayısal modellemelerde genel yapılan kabul şayet ϕ' açısı 30° den küçükse dilatasyon açısının sıfır, şayet ϕ' açısı 30° 'den büyükse $\psi = \phi' - 30^\circ$ alınmasıdır.



(a) Şev stabilitesi deformasyon hesabı

(b) Dairesel temelde deformasyon hesabı

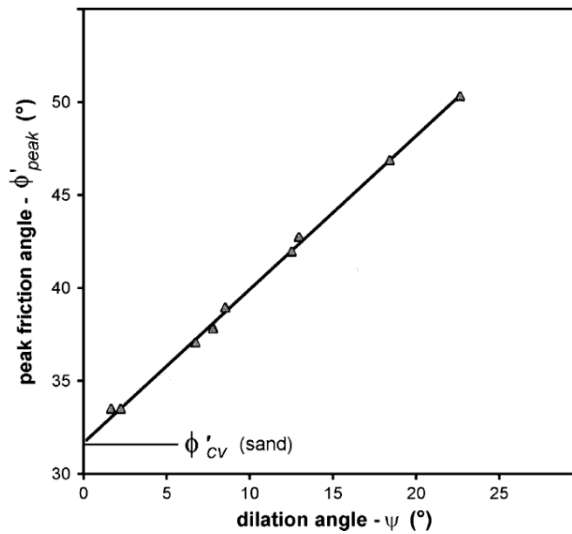
Şekil 2.19 Dilatasyon açısının elde edilmesi (Holsby 1991).

Ancak zemine ait ψ açısını hesaplariken sadece içsel sürtünme açısını dikkate alınarak hesaplamak çok da doğru değildir. Gerilme-deformasyon ilişkileri, kırılma düzlemi ve problemin kaç düzlem gerinim veya düzlem gerilme mi (Plane Strain ve Plane Stress) mi olduğu kullanılan deney tipi dilatasyon açısının doğru şekilde bulunmasında rol oynamaktadırlar. Bundan dolayı bu konuda bir çok çalışma literatürde bulunmaktadır (Rowe 1962, Oda 1975, Bolton 1979, Bolton 1986, Vaidand Sasitharan 1992, Chu 1993, Schanzand Vermeer 1996, LiandDafalias 2000, SimoniandHoulsby 2006, Stoneand Wood 2006, Wood 2007, Chakraborty and Salgado 2010, Mohapatra et al. 2019).

Bolton (1986) 17 adet kum numunesi üzerinde yaptığı deneylerin analiz sonuçlarına göre direk kesme kutusu deneyine uygun düzlem gerinim problemine uygun olarak dilatasyonu ölçmek için aşağıdaki ampirik bağıntıyı önermiştir.

$$\phi' = \phi'_{cv} + 0.8\psi_{max} \quad (2.25)$$

Burada ϕ', ϕ'_{cv} direk kesme kutusu deneyinden elde edilmektedir. ϕ' ($\tan \phi' = \tau_{max}/\sigma_n$) her bir kesme kutu deneyinden elde edilebilirken, ϕ'_{cv} tespit etmek için bir deney yeterli değildir. Bilindiği üzere ϕ'_{cv} kırık durum sürtünme açısı dilatasyon sıfır olduğu andaki içsel sürtünme açısını vermektedir. Bundan dolayı farklı rölatif sıkılıkta direk kesme kutusu deneyi tekrarlanarak Şekil 2.20 hesaplanabilir. Buradaki dilatasyon açısı ψ_{max} olarak denklem 2.24 den bulunmaktadır.



Şekil 2.20 ϕ'_{cv} açısının elde edilişi (Simoneand and Houlsby 2006).

Bu çalışmada deneyde kullanılan silis kumu numuneleri belirlenen rlatıf sıklığa denk gelen boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanarak direk kesme deneyi yapılmış ve farklı rölatif sıklıkta yapılan deney dataları kullanılarak dilatasyon açıları hesaplanmıştır. Deney detayları ve sonuçları bölüm 4 ve 5 de sunulmuştur.





BÖLÜM 3

MALZEME VE METOT

3.1 GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda AFS (Amerikan Döküm Derneği) sistemine göre sınıflandırılmış farklı dane boyutuna sahip silis kumları araştırmada kullanılmıştır. Öncelikle deney zeminlerinin indeks özellikleri belirlenmiş daha sonra maksimum ve minimum boşluk oranı bulunmuş ve daha sonra da farklı rölatif sıklıkta hazırlanan kum örnekleri üzerinde direk kesme deneyleri yapılmıştır. Materyal ve deney detayları aşağıda sunulmuştur.

3.2 ARAŞTIRMADA KULLANILAN MALZEME

Silis kumu ya da bir diğer adıyla kuvars kumu yüksek sertlikte ve dünyanın birçok yerinde ve çokça bulunan madenlerden biridir. Silis kumunun ana elementi diyamanyetik (manyetik olmayan) özelliğe sahip silisyum (Si) elementidir. Silisyum doğada silikat asidi veya tuzları halinde bulunmaktadır. Silisyumoksit doğada kum formunda, kuvarsit veya kuvars şeklinde bulunmaktadır. Silis kumu ülkemizde çoğunlukla Trakya ve şile bölgelerinde bulunur. Madenlerin karakter yapısına ve bölgelere göre bünyelerindeki silis oranları, kimyasal yapıları ve sertlik oranları değişir. Temel olarak filtre kumu, döküm kumu ve cam üretiminde silis kumu kullanılmaktadır. Silis kumu genellikle sarı, gri, bej ve beyaz renklindedir.

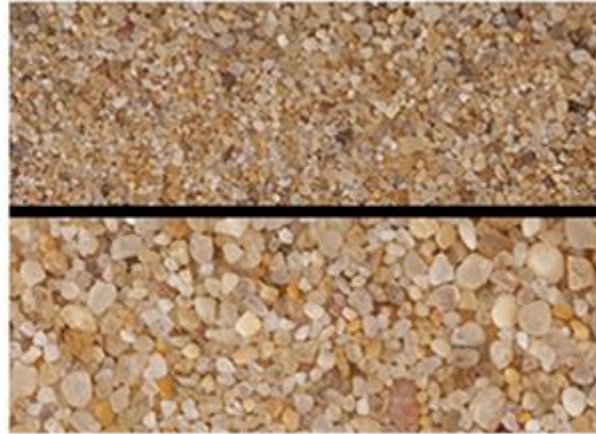
Deneylerde kullanılan silis kumu numuneleri Şile/İstanbul'da bulunan Çelikleş Sinai Kumu San.ve Tic. A.Ş. şirketinden temin edilen Amerikan Döküm Derneği'ne (AFS) göre sınıflandırılmış AFS 15-20 , AFS 40-45, AFS 60-65 ve AFS 100-140 silis kumlarıdır. Elde edilen silis kum örneklerinin mikroskop görüntüleri ve katalog bilgileri Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'de sunulmuştur.



(a)

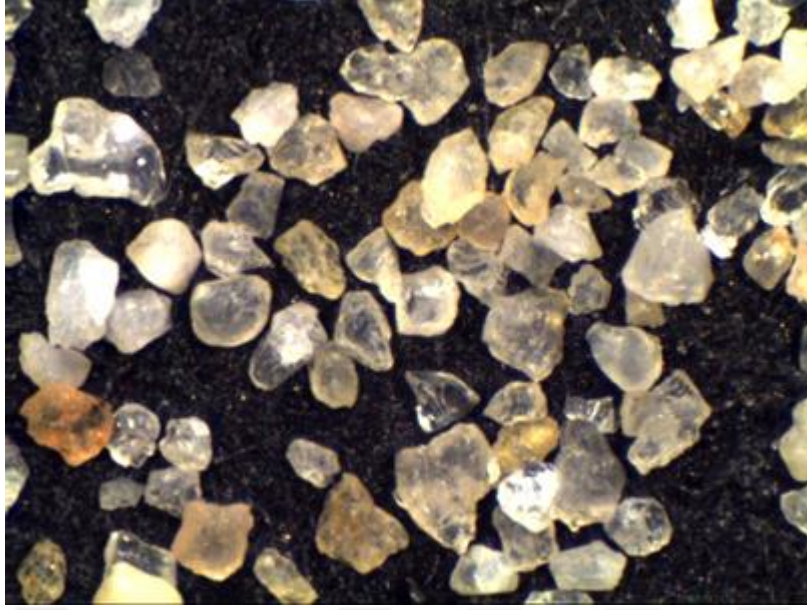
15-20 AFS

| Elek Boyutu (mikron) | Kabul Aralığı % | Analiz Sonucu% |
|-------------------------|--------------------|-------------------|
| + 2000 | 0-6,5 | 1,1 |
| 1600-2000 | 1-8 | 3,5 |
| 1000-1600 | 12-30 | 18,4 |
| 710-1000 | 12-40 | 32,8 |
| 500-710 | 10-40 | 23,9 |
| 355-500 | 5-20 | 10,4 |
| 250-355 | 0-12 | 6,8 |
| 180-250 | 0-5 | 2,7 |
| 0-180 | 0-2 | 0,6 |
| AFS | 15-20 | 19,9 AFS |
| KİL | max:0,25 | 0,24 |



(b)

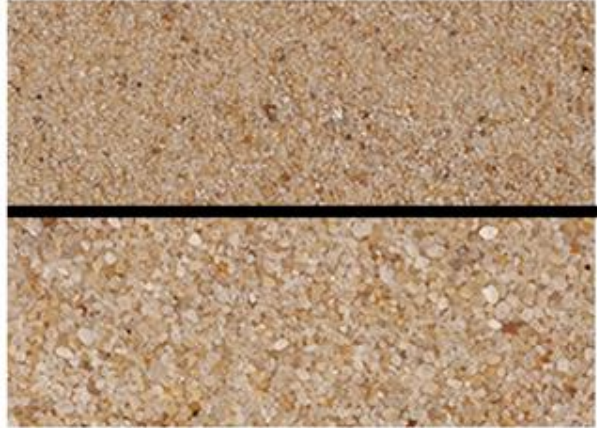
Şekil 3.1 AFS 15-20 silis kumu örnek detayları.



(a)

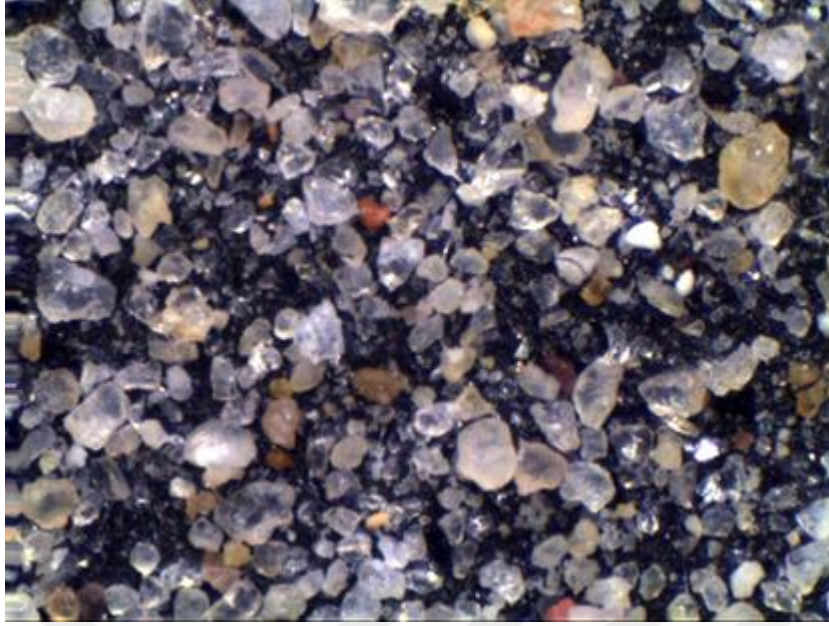
40-45 AFS

| Elek Boyutu (mikron) | Kabul Aralığı % | Analiz Sonucu% |
|----------------------|-----------------|----------------|
| + 1000 | 0-1 | 0,3 |
| 710-1000 | 1-8 | 3,8 |
| 500-710 | 7-25 | 12,5 |
| 355-500 | 10-35 | 25,3 |
| 250-355 | 25-45 | 32,4 |
| 180-250 | 5-30 | 20,6 |
| 125-180 | 0-7 | 3,3 |
| 90-125 | 0-1 | 0,7 |
| 0-90 | 0-0,3 | 0,1 |
| AFS | 40-45 | 43,6 AFS |
| KİL | max:0,25 | 0,19 |



(b)

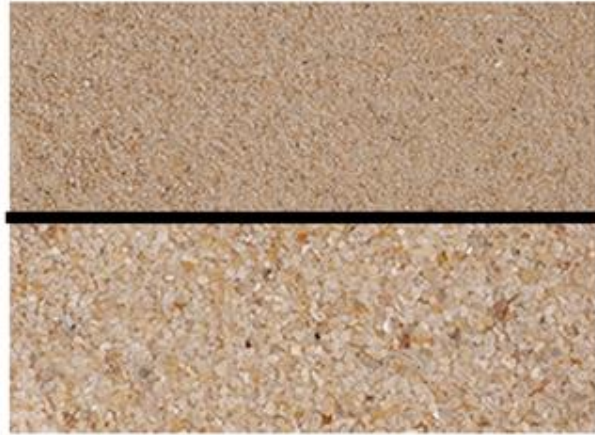
Şekil 3.2 AFS 40-45 silis kumu örnek detayları.



(a)

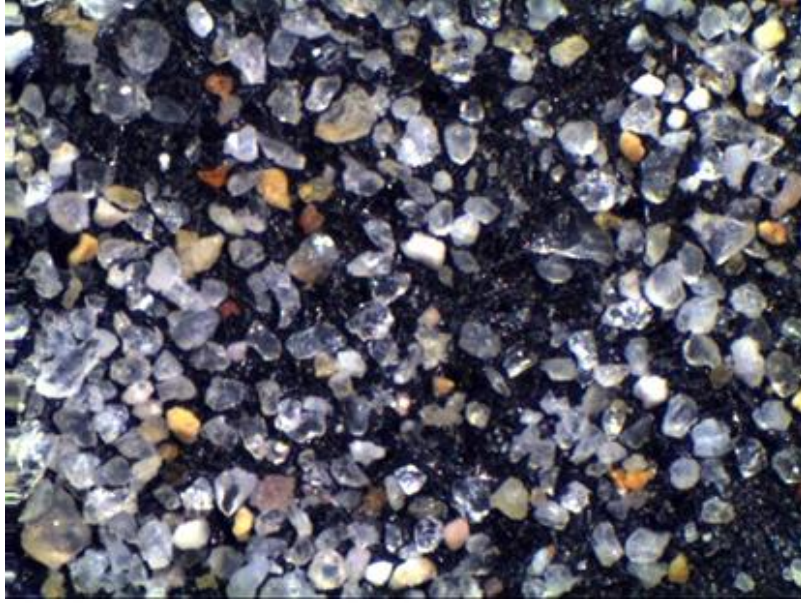
60-65 AFS

| Elek Boyutu (mikron) | Kabul Aralığı % | Analiz Sonucu% |
|-------------------------|--------------------|-------------------|
| + 710 | 0-0,2 | 0,0 |
| 500-710 | 0-1,5 | 0,2 |
| 355-500 | 0-8 | 2,2 |
| 250-355 | 10-30 | 27,5 |
| 180-250 | 40-65 | 46,8 |
| 125-180 | 10-25 | 20,1 |
| 90-125 | 0-6 | 2,5 |
| 63-90 | 0-2 | 0,6 |
| 0-63 | 0-0,3 | 0,1 |
| AFS | 60-65 | 61,7 AFS |
| KİL | max:0,30 | 0,29 |



(b)

Şekil 3.3 AFS 60-65 silis kumu örnek detayları.



(a)

| Elek Boyutu (μm) | Üretim Aralığı % | Analiz Sonucu % |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| + 710 | 0 | 0.0 |
| 500-710 | 0-0,2 | 0.0 |
| 355-500 | 0-0,5 | 0.0 |
| 250-355 | 0-3 | 0.3 |
| 180-250 | 10-30 | 20.3 |
| 125-180 | 20-60 | 41.7 |
| 90-125 | 10-30 | 20.3 |
| 63-90 | 2-10 | 8.5 |
| 0-63 | 5-20 | 9.0 |

109,62 AFS



(b)

Şekil 3.4 AFS 100-140 silis kumu örnek detayları.

3.2.1 Silis Kumlarının AFS Sistemine Göre Sınıflandırılması

Silis kumu tanelerinin irilik ve dağılımlarını belirlemek için kullanılan AFS sisteminde temel olarak elek analizi kullanılmaktadır. Kullanılan eleklerin numaraları ve açıklıkları Çizelge 3.1'da gösterilmiştir. Elek analizi deneyi sonunda her elek üzerinde kalan silis kumları tartılarak da gösterilen örnek elek analizi deney formuna elek numaralarına göre yazılır. AFS incelik numarası, her bir elek üzerinde kalan kum ağırlığının o elek için belirtilen AFS faktörüyle çarpımlarının toplamının elek üzerinde kalan toplam ağırlığa bölünmesiyle elde edilir.

Çizelge 3.1 AFS sınıflandırma sisteminde kullanılan elek detayları.

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Elek No | 6 | 12 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 100 | 140 | 200 | 270 |
| Elek Açıklığı (mm) | 1.7 | 1.2 | 0.84 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.19 | 0.11 | 0.07 | 0.05 |

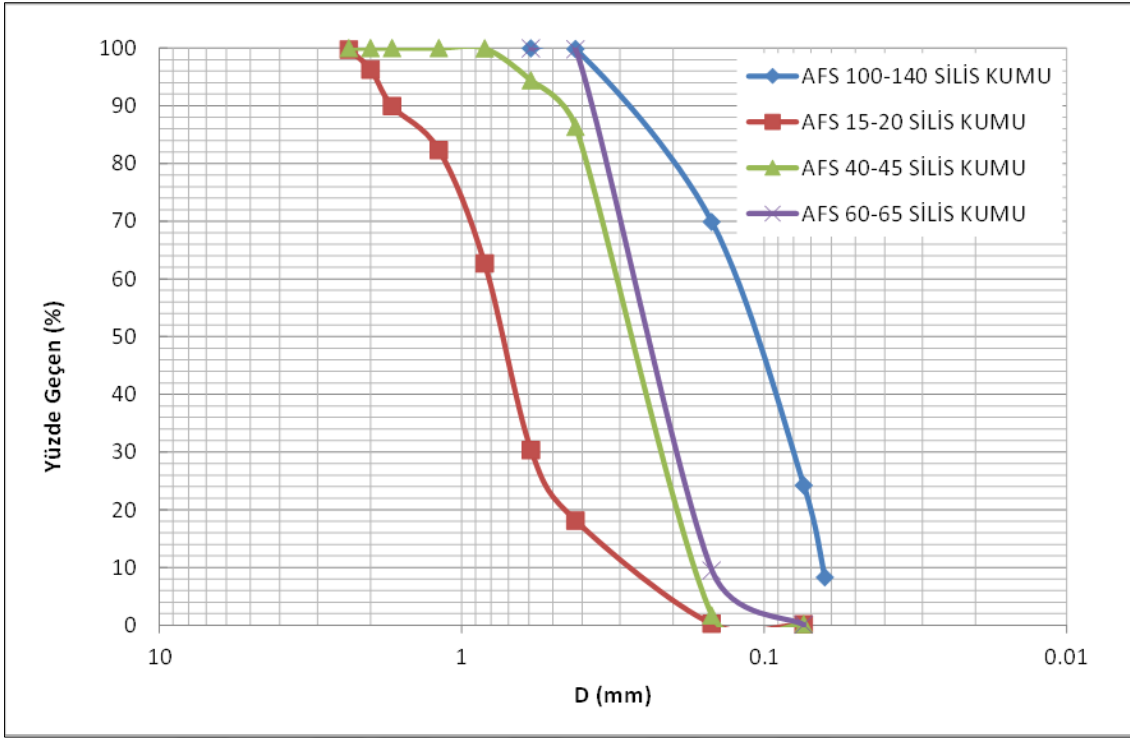
3.3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.3.1 Kum Örneklerinin İndeks Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan silis kumu numunelerinin öncelikle piknometre deneyi yapılarak özgül ağırlıklarının 2.63~2.66 gr/cm³ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bun ilaveten Çeliktaş Sınai Kumu San.ve Tic. A.Ş. şirketinden temin edilen kum örneklerinin katalog bilgileri de dikkate alınarak kuru elek analizleri yapılarak TS 1500 standartlarına göre sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma parametreleri ve dane çapı dağılımı sırası ile Çizelge 3.1 ve Şekil 3.5’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 Kum örneklerinin elek analiz sonuçları.

| | AFS 15-20 | AFS 40-45 | AFS 60-65 | AFS 100-140 |
|-------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|
| D10 | 0.280 | 0.170 | 0.150 | 0.065 |
| D30 | 0.600 | 0.210 | 0.200 | 0.080 |
| D50 | 0.730 | 0.280 | 0.240 | 0.110 |
| D60 | 0.800 | 0.300 | 0.260 | 0.130 |
| Cu | 2.857 | 1.765 | 1.733 | 2.000 |
| Cc | 1.607 | 0.865 | 1.026 | 0.757 |
| USCS | SP | SP | SP | SP |

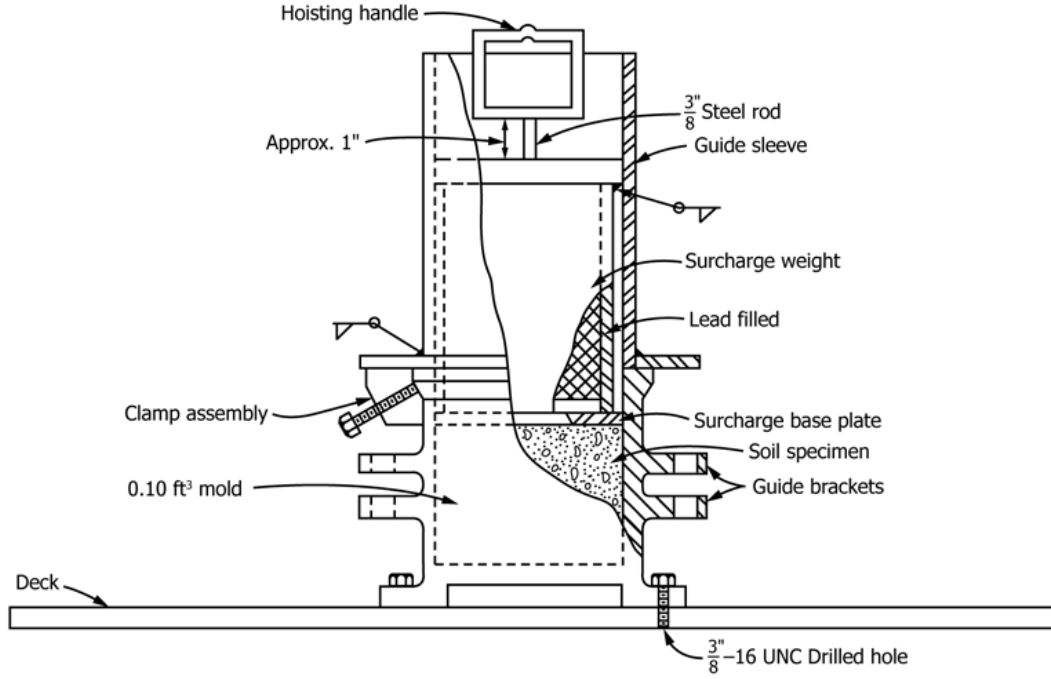


Şekil 3.5 Silis kumu örneklerine ait gradasyon eğrileri.

3.3.2 Rölatif Sıklık Deneyleri

Bu çalışmada kum örneklerinin rölatif sıklığına göre kayma mukavemeti parametrelerine etkisini incelemek için silis kumu numuneleri üzerinde rölatif sıklık deneyleri yapılmıştır. Deneyler TS1900-1 ve 1900-2’de tanımlanmadığından ASTM D4253-16 ve D4254-16 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Rölatif sıklık deneyi gevşek (ASTM D42454-16) ve sıkı durum (ASTM D4253-16) olmak üzere iki farklı durumda gerçekleştirilmiştir. Gevşek ve sıkı durumdaki silis kumu numunelerinin kuru birim hacim ağırlıklarının belirlenmesinde 152.40 mm. çapında 165.10 mm yüksekliğinde silindir şeklinde bir metal kalıp kullanılmıştır. Bu metal kalıp detayları Şekil 3.6 ve 3.7’de verilmiştir. Ayrıca, maksimum sıkı kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) değeri bulunurken ASTM D4253-16’da ki 1A metodu (Etüv kurusu numunelerin eksantik vibrasyon tablası ile sıkıştırma) kullanılmıştır.



Şekil 3.6 Rölâtif sıklık deney kalıp detayları (ASTM D4253-D4254).

Çizelge 3.3 Rölâtif sıklık deney sonuçları.

| Numune | γ_{kmin} (kN/m ³) | γ_{kmax} (kN/m ³) |
|-------------|---|---|
| AFS 15-20 | 15.465±0.100 | 17.660±0.097 |
| AFS 40-45 | 14.632±0.043 | 17.177±0.216 |
| AFS 60-65 | 13.673±0.049 | 16.208±0.084 |
| AFS 100-140 | 13.392±0.091 | 16.926±0.183 |



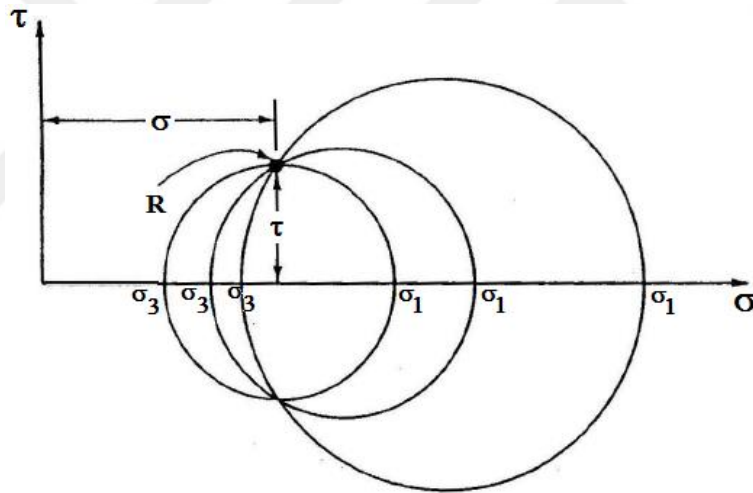
Şekil 3.7 Rölatif sıklık deneyine ait sarma tablası.

Gevşek durumda bulunan silis kumunun kuru birim hacim ağırlığı belirlenirken Şekil 3.7’de görülen huni vasıtası ile kuru kum örnekleri maksimum gevşek hali sağlamak için herhangi bir düşü yüksekliği verilmeden kalıba yavaş ve sarsmadan yerleştirmiştir. Daha sonra yerleşen malzeme ağırlığı bulunarak kalıp hacmine dikkate alınarak numunenin gevşek kuru birim hacim ağırlığı(γ_{kmin}) bulunmuştur.

Sıkı durumda bulunan silis kumunun kuru birim hacim ağırlığı belirlenirken ise silindir kalıba dökülen numunenin yüzeyi düzlendikten sonra üzerine Şekil 3.5 ve 3.6’da detayları verilen önce kılavuz gömlek takıldıktan sonra sürşarj yükü (ölü ağırlığın verdiği basınç 14-kPa) kum dolu kalıbın üstüne yerleştirilmiştir. Titreşim tablasında, 60 khz titreşim frekansında 10 dk. süreyle numune sabit yük altında sıkıştırılmıştır. Titreşim uygulandıktan sonra silindirik kalıbın üzerindeki tabakadan deplasman ölçerler vasıtası ile en az 3 ayrı noktadan ölçüm yapılarak sıkıştırılmış numunenin hacmindeki azalma hesaplanarak silis kumu numunesinin sıkı durumdaki maksimum birim hacim ağırlığı(γ_{kmax}) hesaplanmıştır. Bu çalışma her bir silis kumu numunesi için tüm deneyler 3 kez tekrarlanıp ortalama değerleri kullanılmıştır. Elde edilen silis kumu numunelerine ait minimum ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklar Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

3.3.3 Kesme Kutusu Deneyleri

Bu deney kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmış ilk ve en eski yöntemlerden biridir. Direkt kesme deneyinin çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır. Granüler zeminler için bu deney ucuz, hızlı ve basittir. Deney kutusunun içindeki zemin örneğine ait kırılma düzlemi önceden belirlidir ve bundan dolayı kırılma düzlemi üzerindeki gerilmeler direkt ölçülebilmektedir. Diğer bir deyişle deney sonunda Mohr-Coulomb kırılma zarfı çizildikten sonra asal gerilmelerin yönelim açıları hesaplanabilmektedir. Deneyin en sakıncalı yanı, kesilmeye zorlanan zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmayabileceğidir. Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının ölçülememesi, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması (Şekil 3.8) ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır.



Şekil 3.8 Kesme kutusu deney seti içindeki zemin numunesinin olası mohr daire ve asal gerilmeleri (Atkinson and Bransby 1982).

Zemin numunesi dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutunun içine yerleştirilmektedir. Numune belirli bir normal gerilme altında konsolidasyonunu tamamladıktan sonra uygulanan kesme kuvveti ile gereken hızda kesilir. Uygulanan kesme kuvveti altında, kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket etmektedir ve zemin kaymaya zorlanmaktadır. Deney sırasında yatay hareket, düşey deformasyon ve kesme kuvveti ölçülmektedir.

Bu deneysel çalışmada ASTM D 3080, TS 1900-2 standartlarından faydalanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan silis kumu numuneleri belirlenen rölatif sıklığa denk gelen boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanarak deneye başlanılmıştır. İstenilen boşluk oranına göre hesaplanan sabit hacimdeki numune ağırlığı hassas terazide ölçülerek, numune kesme kutusuna dökülmüştür. Belirlenen rölatif sıklıkta hazırlanan numuneler 60 mm.x 60 mm. ölçülere sahip alt ve üst tabaka olmak üzere iki parçadan oluşan kesme kutusuna belli hızda belli seviyeye ulaşacak şekilde olması için yağmurlama (dry funnel pluviation) yöntemiyle konulmuştur. Kesme kutusu üst plakası ve yükleme başlığı konulduktan sonra kumpasla kesme kutusunun köşe noktalarından ölçüm yapılarak kutu içerisindeki numune yüksekliğinin yaklaşık 28 mm. olması sağlanmıştır. Düzeneğin kesme hızı 0.6 mm/dk olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9 Kesme kutusu deney düzeneği içinde kum numunelerinin oluşturulması

Yükleme başlığı vasıtasıyla numune dolu kesme kutusuna düşey yük uygulanır. Uygulanacak normal gerilmeye göre ağırlıklar askı sistemine asılmıştır. $\sigma_1 = 98.1$ kPa için 4 kg. , $\sigma_2 = 196.2$ kPa için 8 kg. , $\sigma_3 = 392.4$ kPa için 16 kg. ağırlıklar asılmıştır.

Deney belli periyotlarda 10 sn, 20 sn ve 50 sn, aralıklarla yatay ve düşey deformasyonlar okunarak not edilmiştir. İstenilen süre sonuna gelindiğinde kesme kutusunun üst parçasını alt parçasına kenetleyen vidalar gevşetilerek alt ve üst parçaların serbest hale gelmesi sağlanıp kesme kutusu boşaltılmış ve bir sonraki deneye hazır hale getirilmiştir. Deney sırasında düşey deformasyon (Δh), yatay deformasyon (ΔL) ve kesme kuvveti (T) ölçülmüştür.



BÖLÜM 4

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

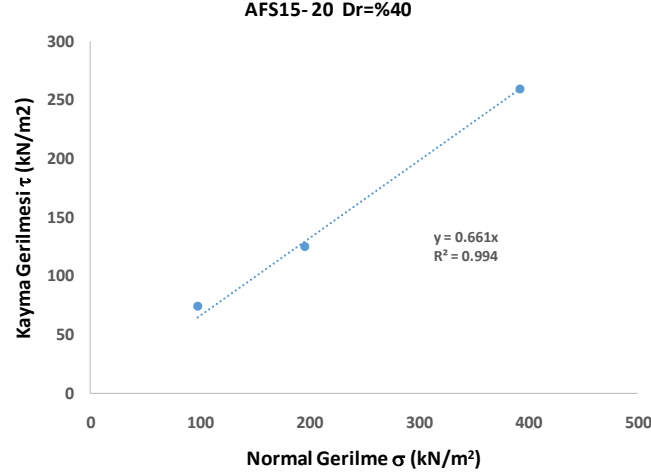
4.1 DİREK KESME KUTUSU DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada 15-20, 40-45, 60 - 65 AFS ve 100 – 140 AFS standartlarına uygun kum numuneleri 98.1, 196.2, ve 392.4 normal gerilmeleri altında direk kesme deneyleri yapılmış ve kırılma zarfı ve buna bağlı olarak elde edilen içsel sürtünme açıları, maksimum kayma gerilme değerlerine göre yapılmıştır. Sonuçları aşağıdaki bölümlerde detaylandırılmıştır.

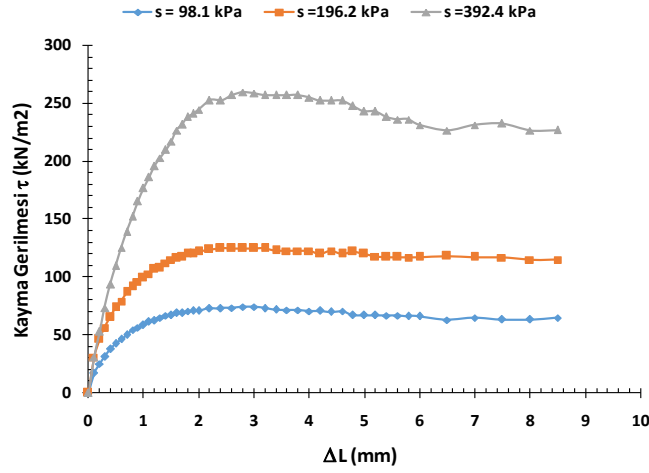
4.1.1 AFS 15-20 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları

AFS 15-20 silis kumundan rölatif sıklıkları Dr sırası ile %40, 60, 80 ve 100 değerlerinde numuneler oluşturularak direk kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney Sonuçları Şekil 4.1-4.8'de verilmektedir.

Şekil 4.1 ve 4.2'de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %40 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 34.36° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü gibi normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %68.4, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %250.2 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2.2, %2.4 ve %2.8 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

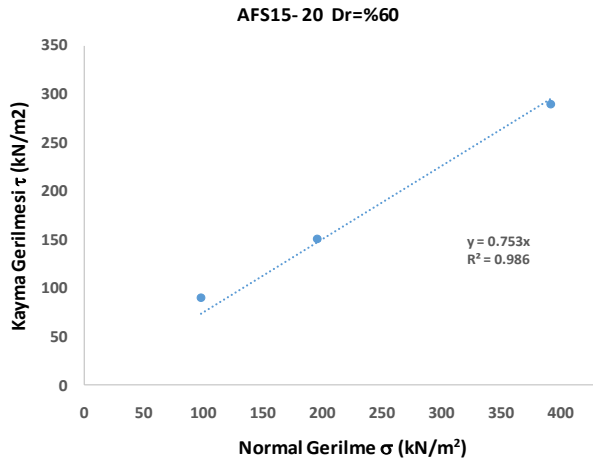


Şekil 4.1 AFS 15-20 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

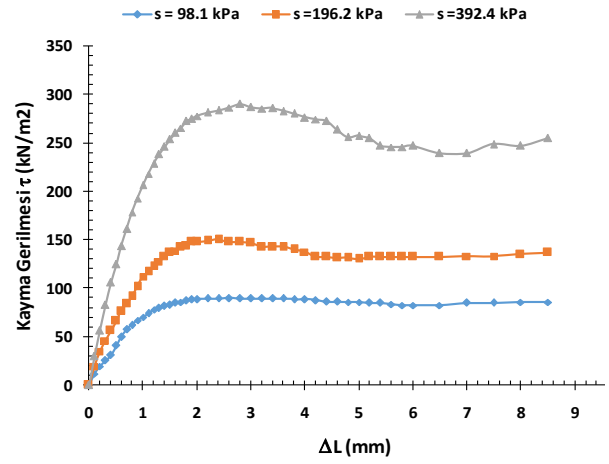


Şekil 4.2 AFS 15-20 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.3 ve 4.4’de görüldüğü üzere rölatif sıkılığı %60 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 36.98° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü gibi normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %67.45, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %223 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2,6, %2.4 ve %2.8 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

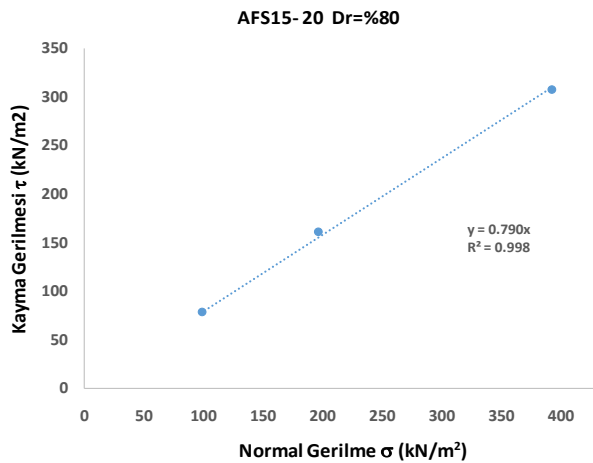


Şekil 4.3 AFS 15-20 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki

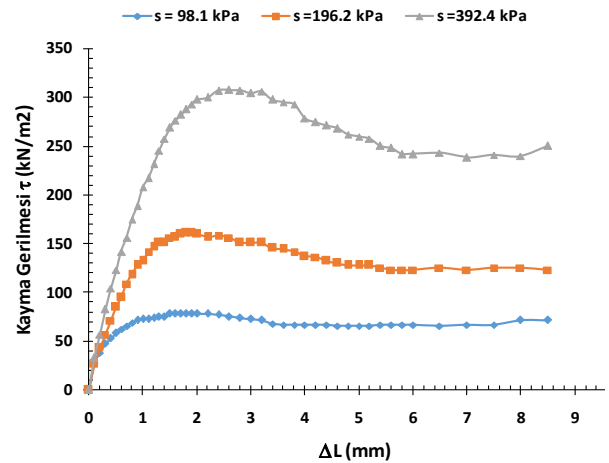


Şekil 4.4 AFS 15-20 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi - yatay deplasman arasındaki ilişki

Şekil 4.5 ve 4.6'da görüldüğü üzere rölatif sıkılığı %80 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 38.33° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü gibi normal gerilme arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %106.43, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %295.24 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2, %1.8 ve %2.6 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

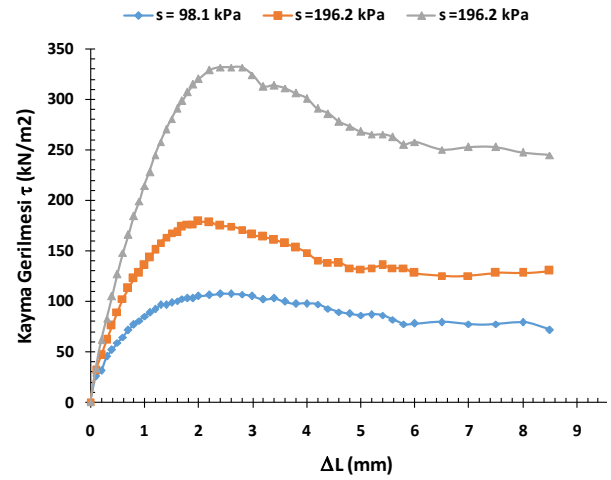
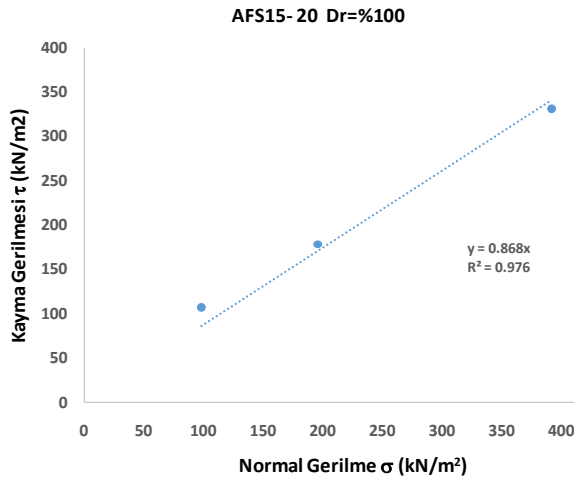


Şekil 4.5 AFS 15-20 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.



Şekil 4.6 AFS 15-20 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.7 ve 4.8’de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %100 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 40.96° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü gibi normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %66.67, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %209.52 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2, %1.8 ve %2.6 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.



Şekil 4.7 AFS 15-20 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

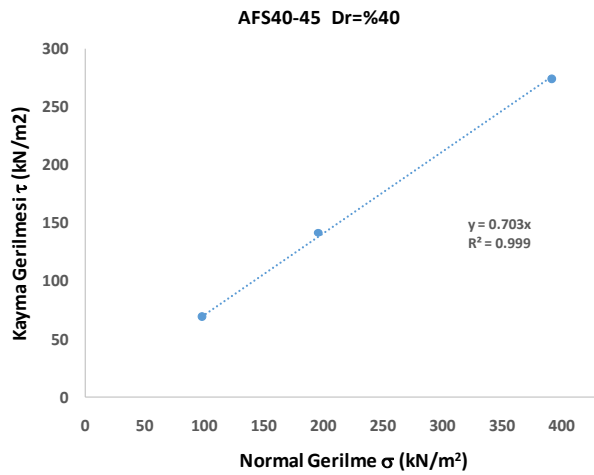
Şekil 4.8 AFS 15-20 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

4.1.2 AFS 40-45 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları

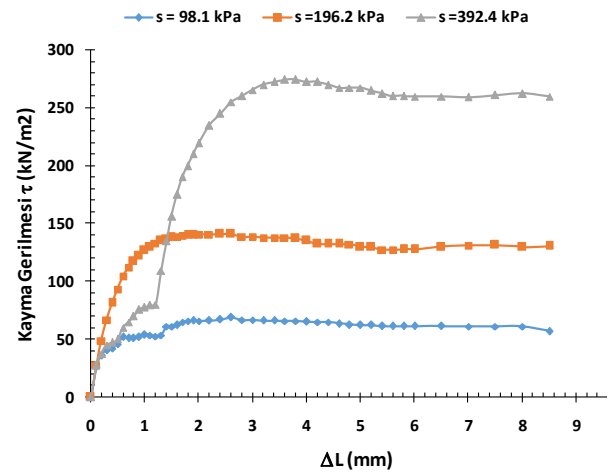
AFS 40-45 silis kumundan rölatif sıklıkları Dr sırası ile %40, 60, 80 ve 100 değerlerinde numuneler oluşturularak direk kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney Sonuçları Şekil 4.9-4.16’da verilmektedir.

Şekil 4.9 ve 4.10’da görüldüğü üzere rölatif sıklığı %40 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 35.13° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası

ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %105.17, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %298.75 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2,6, %2.4 ve %3.6 yatay deformasyonlarda oluşmuştur.

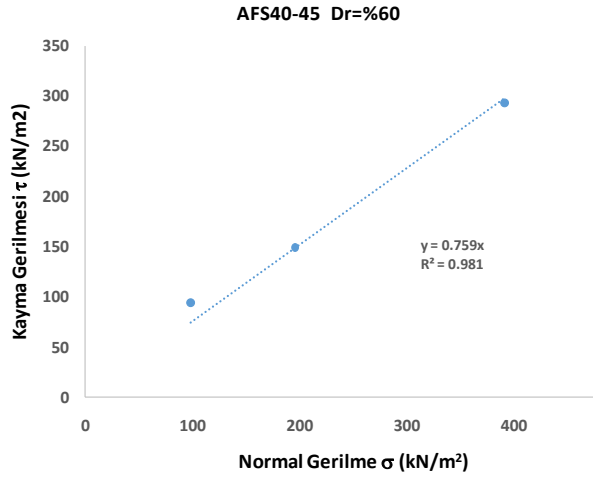


Şekil 4.9 AFS 40-45 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

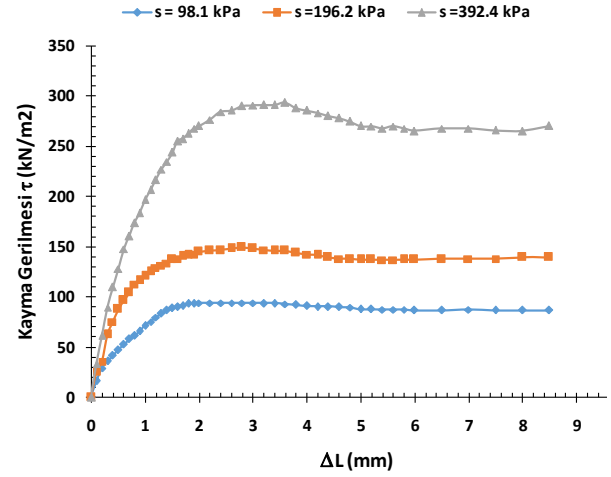


Şekil 4.10 AFS 40-45 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.11 ve 4.12'de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %60 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 37.22° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %58.88, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %212.27 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2, %2.8 ve %3.6 yatay deformasyonlarda oluşmuştur.

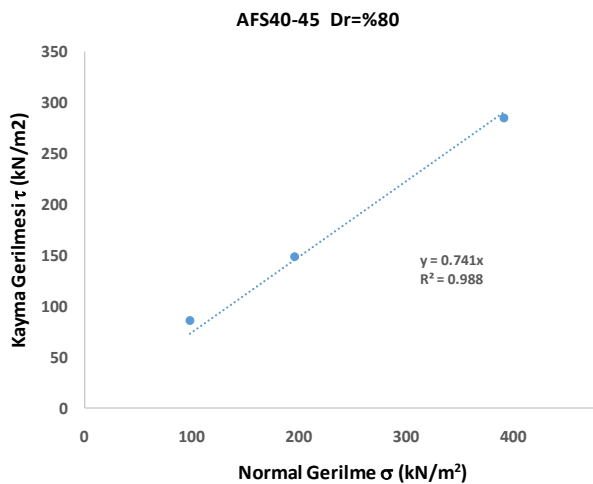


Şekil 4.11 AFS 40-45 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

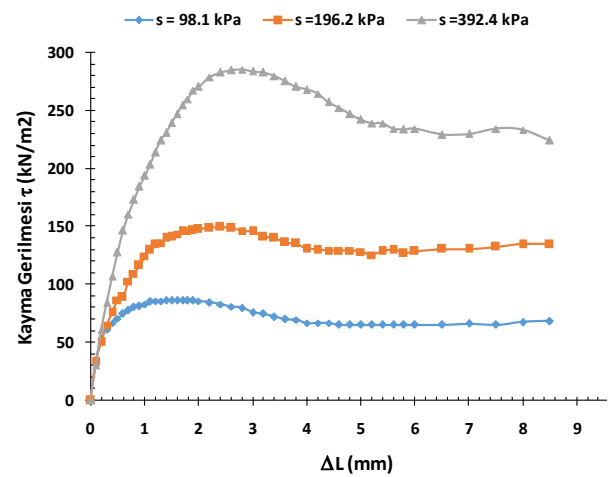


Şekil 4.12 AFS 40-45 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.13 ve 4.14’de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %80 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 36.56° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme artıkcaya kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %73.21, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %230.83 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %1,6, %2.4 ve %2.8 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

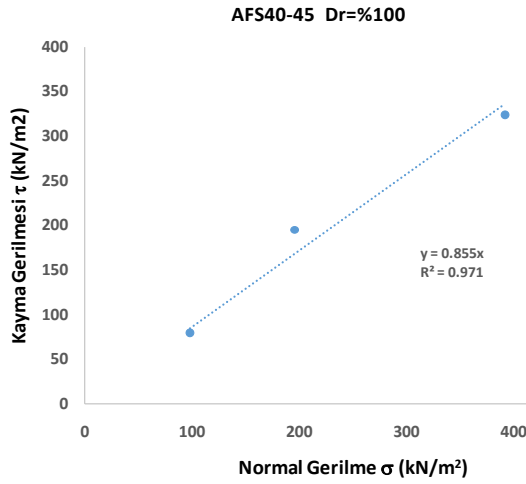


Şekil 4.13 AFS 40-45 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki

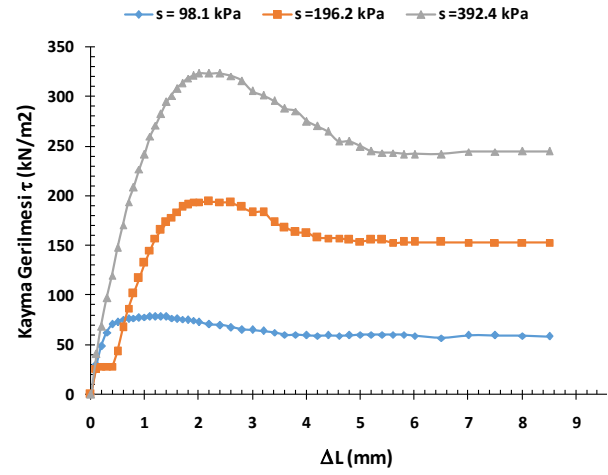


Şekil 4.14 AFS 40-45 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki

Şekil 4.15 ve 4.16'da görüldüğü üzere rölatif sıkılığı %100 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 40.54° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %147.35, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %312.25 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %1,1, %2.2 ve %2.4 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.



Şekil 4.15 AFS 40-45 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

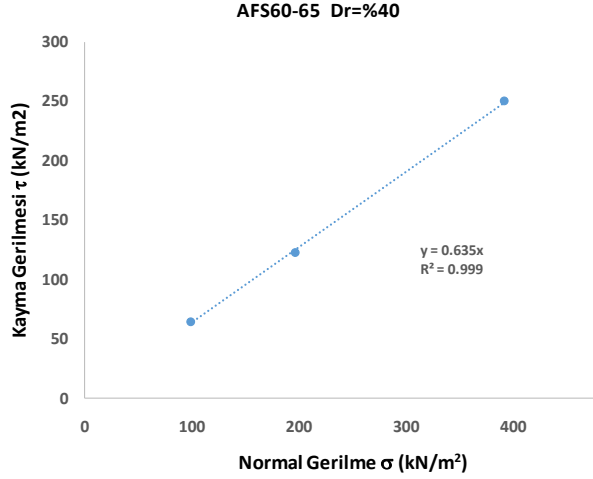


Şekil 4.16 AFS 40-45 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

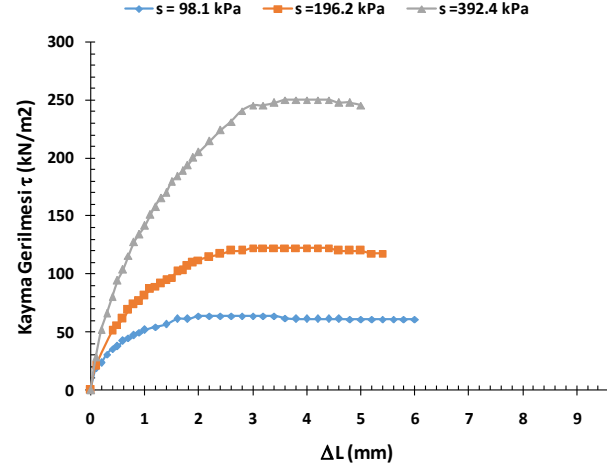
4.1.3 AFS 60-65 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları

AFS 60-65 silis kumundan rölatif sıkılıkları Dr sırası ile %40,60,80 ve 100 değerlerinde numuneler oluşturularak direk kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney Sonuçları Şekil 4.17-4.24'da verilmektedir.

Şekil 4.17 ve 4.18'de görüldüğü üzere rölatif sıkılığı %40 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 36.98° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %91.95, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %292.6 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2, %3 ve %3.6 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

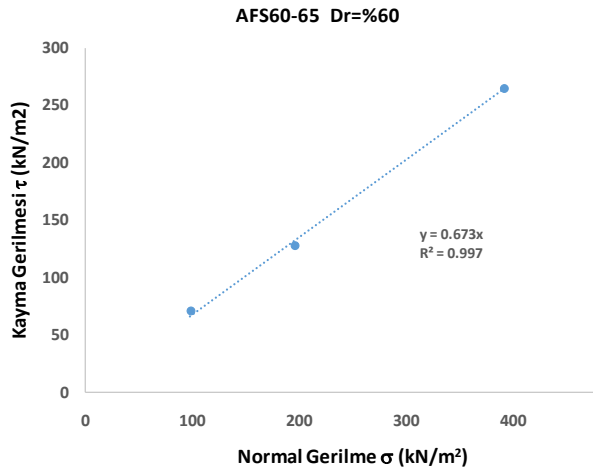


Şekil 4.17 AFS 60-65 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

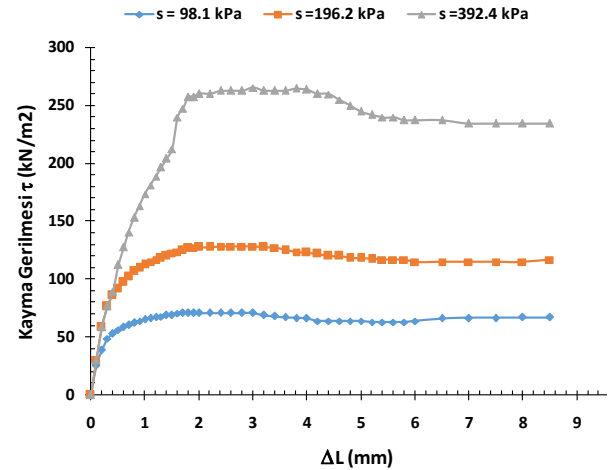


Şekil 4.18 AFS 60-65 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.19 ve 4.20'de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %60 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 33.96° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %80.58, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %274.12 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %1.8, %2.6 ve %3 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

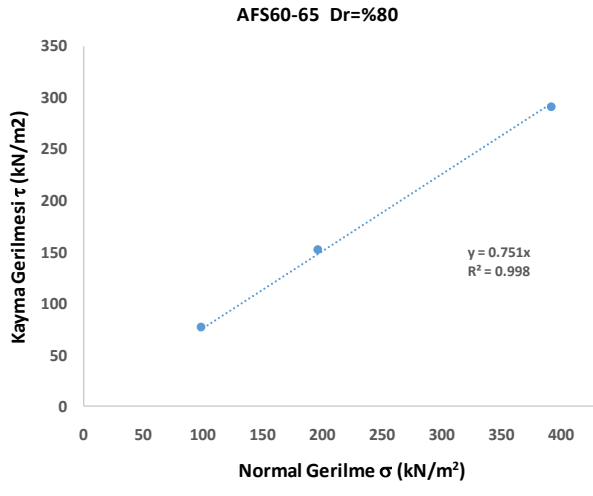


Şekil 4.19 AFS 60-65 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

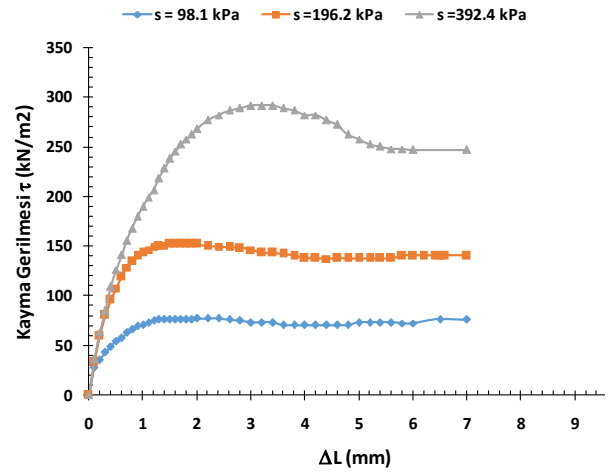


Şekil 4.20 AFS 60-65 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.21 ve 4.22’de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %80 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 36.93° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %97.57, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %275.82 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2, %1.5 ve %3 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

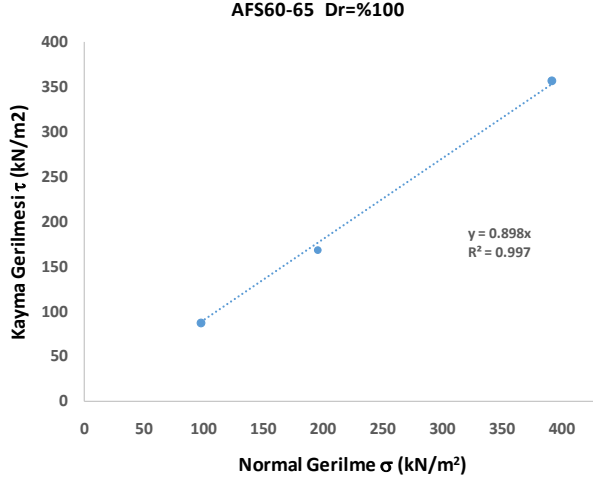


Şekil 4.21 AFS 60-65 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

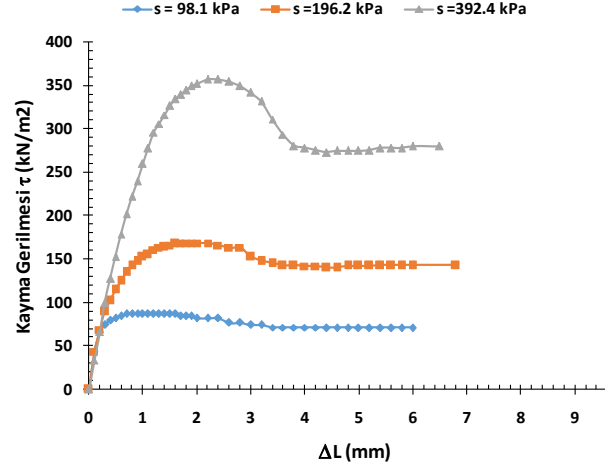


Şekil 4.22 AFS 60-65 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.23 ve 4.24’de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %100 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 41.94° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme artıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %94.12, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %311.77 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2, %1.5 ve %3 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.



Şekil 4.23 AFS 60-65 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

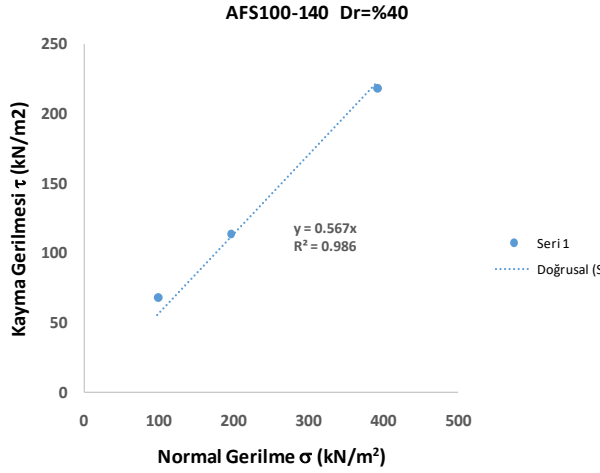


Şekil 4.24 AFS 60-65 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

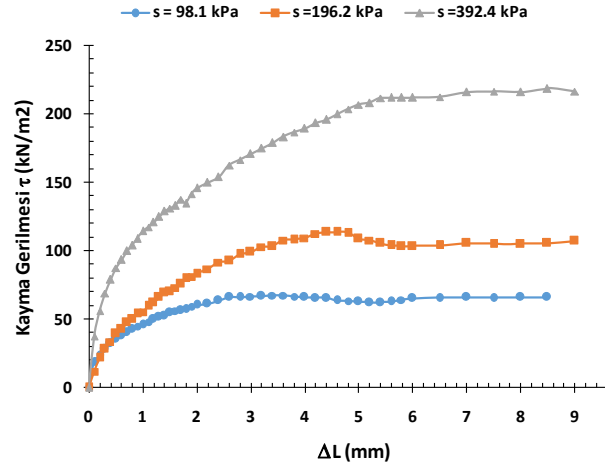
4.1.4 AFS 100-140 Kum Örneklerinin Direk Kesme Deney Sonuçları

AFS 100-140 silis kumundan rölatif sıklıkları Dr sırası ile %40, 60, 80 ve 100 değerlerinde numuneler oluşturularak direk kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney Sonuçları Şekil 4.25-4.32'de verilmektedir.

Şekil 4.25 ve 4.26'da görüldüğü üzere rölatif sıklığı %40 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 36.98° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %68.4, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %223.9 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %3, %4.8 ve %8 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

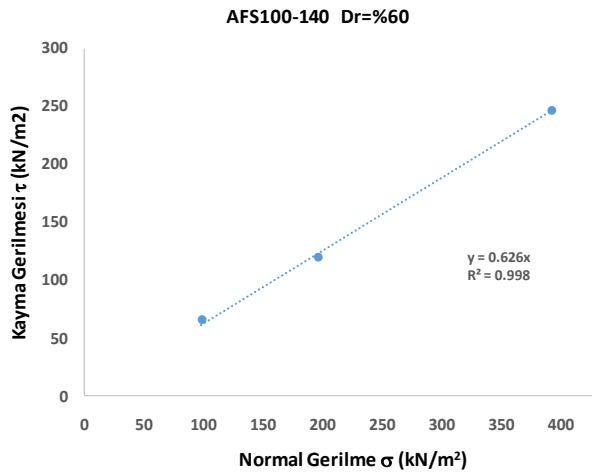


Şekil 4.25 AFS 100-140 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

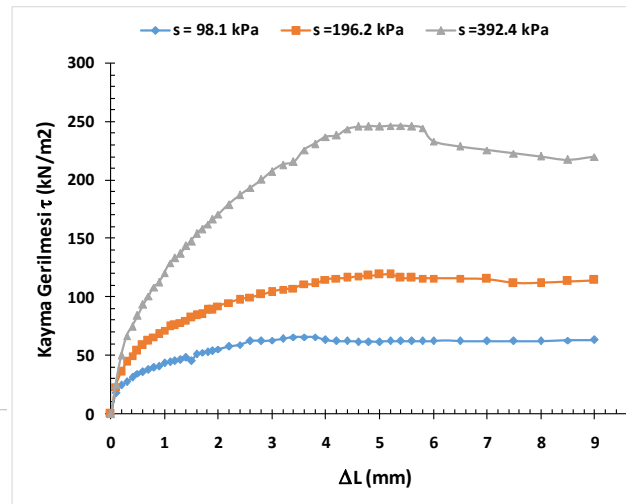


Şekil 4.26 AFS 100-140 Dr=%40 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.27 ve 4.28’de görüldüğü üzere rölatif sıkılığı %60 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 32.08° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %81.76, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %275 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %3.4, %5.2 ve %5.4 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

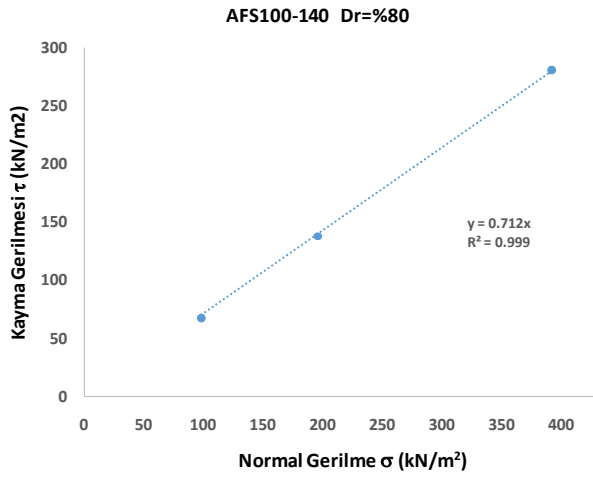


Şekil 4.27 AFS 100-140 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

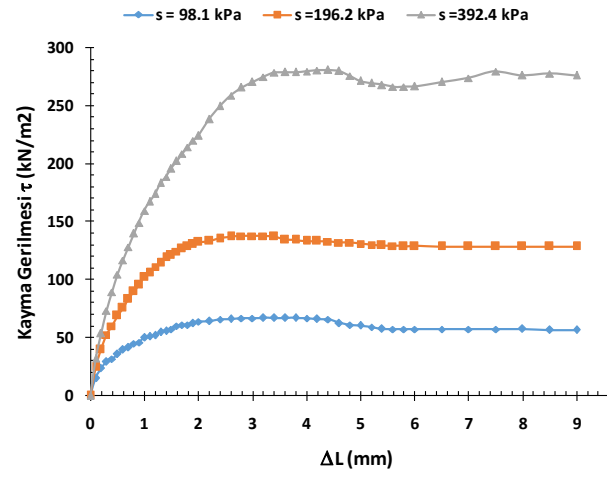


Şekil 4.28 AFS 100-140 Dr=%60 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.29 ve 4.30'da görüldüğü üzere rölatif sıklığı %80 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 35.45° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %104.69, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %317.41 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %3.2, %2.6 ve %4.4 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.

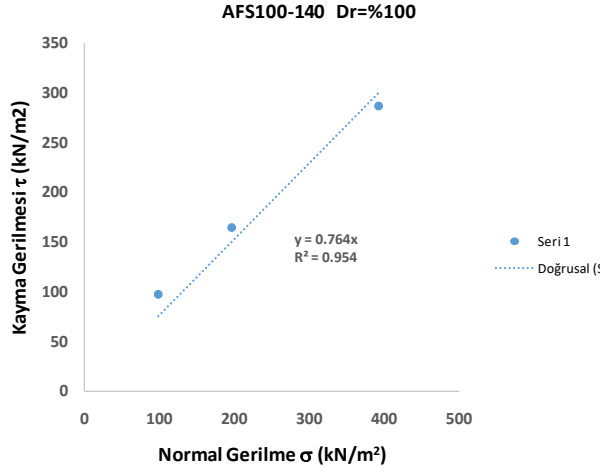


Şekil 4.29 AFS 100-140 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.

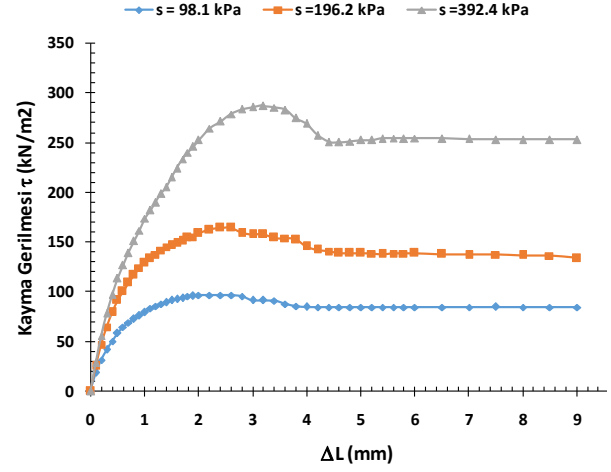


Şekil 4.30 AFS 100-140 Dr=%80 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

Şekil 4.31 ve 4.32'de görüldüğü üzere rölatif sıklığı %100 değerine sahip numunelere ait direk kesme kutusu deney sonuçlarından içsel sürtünme açısı (ϕ') 37.39° olduğu tespit edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere normal gerilme arttıkça kayma dayanımının arttığı gözlenmektedir. Artış oranları 98.1 kPa normal gerilme altındaki maksimum kayma gerilme değeri referans alınarak, maksimum kayma gerilmeleri sırası ile, $\sigma_n = 196.2$ kPa için %70.25, $\sigma_n = 392.4$ kPa da %197 artmıştır. Bu maksimum gerilmeleri sırası ile %2, %2.6 ve %3.2 yatay deformasyonlarda oluşmuşlardır.



Şekil 4.31 AFS 100-140 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-normal gerilme arasındaki ilişki.



Şekil 4.32 AFS 100-140 Dr=%100 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deplasman arasındaki ilişki.

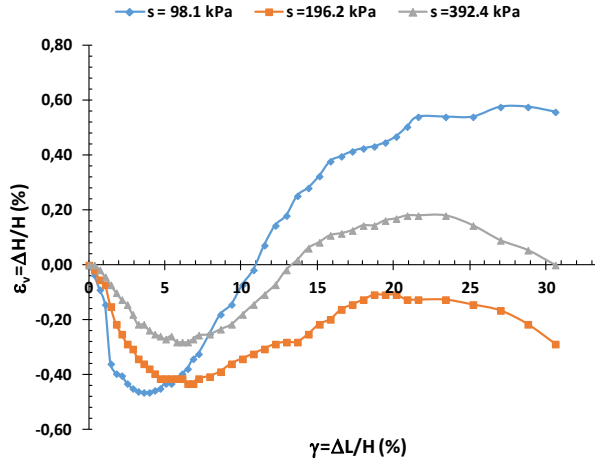
4.2 DİLATASYON AÇILARININ BULUNMASI

Şekil 4.33 - 48' de sırasıya AFS 15-20, 40-45, 60-65 ve 100-140 silis kumu numunelerinin %40, 60, 80 ve 100 rölatif sıklıktaki düşey deformasyon-yatay deformasyon grafikleri gösterilmiş olup, numunenin kırılma aralığını denk gelen bu grafikteki aralığın eğimi bize dilatasyon açısı (ψ) değerini vermektedir.

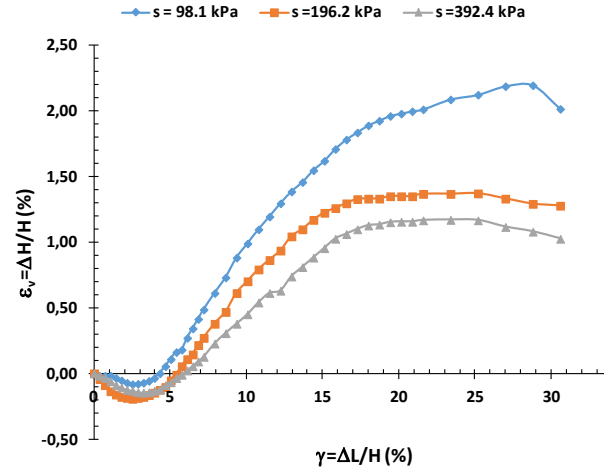
Şekil 4.33, 4.34, 4.35 ve 4.36' daki AFS 15-20 silis kumuna ait dilatasyon eğrilerinden elde edilen dilatasyon açıları, içsel sürtünme açılarıyla birlikte Çizelge 4.1' de gösterilmiştir. Rölatif sıklık artışı ile dilatasyon açılarının arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1 AFS 15-20 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları.

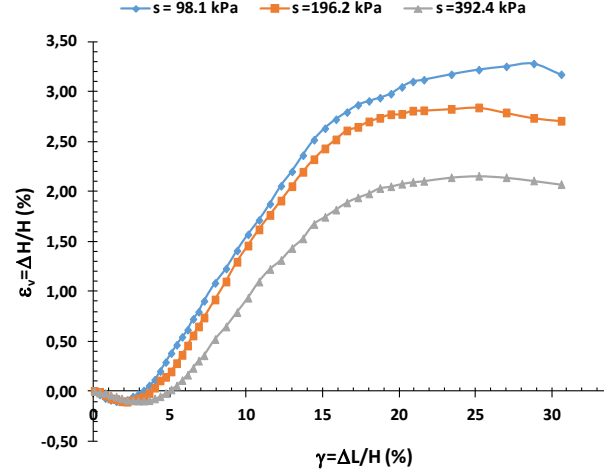
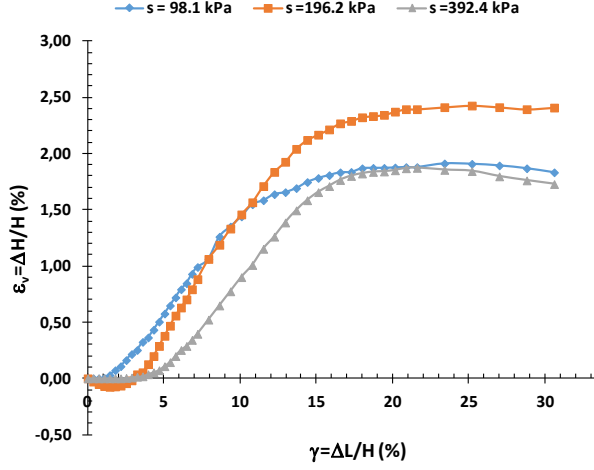
| Dr | KUM | σ_n | τ | t/s | ϕ | ψ |
|-----|----------|------------|---------|-------|--------|--------|
| | | kPa | kPa | | ° | ° |
| 40 | AFS15-20 | 98.100 | 74.167 | 0.756 | 37.090 | 5.569 |
| 40 | AFS15-20 | 196.200 | 124.923 | 0.637 | 32.485 | 1.627 |
| 40 | AFS15-20 | 392.400 | 259.722 | 0.662 | 33.500 | 3.405 |
| 60 | AFS15-20 | 98.100 | 89.833 | 0.916 | 42.481 | 9.537 |
| 60 | AFS15-20 | 196.200 | 150.417 | 0.767 | 37.476 | 8.391 |
| 60 | AFS15-20 | 392.400 | 290.127 | 0.739 | 36.478 | 6.136 |
| 80 | AFS15-20 | 98.100 | 77.778 | 0.793 | 38.409 | 9.235 |
| 80 | AFS15-20 | 196.200 | 160.556 | 0.818 | 39.294 | 13.637 |
| 80 | AFS15-20 | 392.400 | 307.417 | 0.783 | 38.076 | 9.787 |
| 100 | AFS15-20 | 98.100 | 107.080 | 1.092 | 47.506 | 12.544 |
| 100 | AFS15-20 | 196.200 | 178.460 | 0.910 | 42.289 | 13.766 |
| 100 | AFS15-20 | 392.400 | 331.430 | 0.845 | 40.185 | 11.310 |



Şekil 4.33 AFS 15-20 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi.



Şekil 4.34 AFS 15-20 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi.



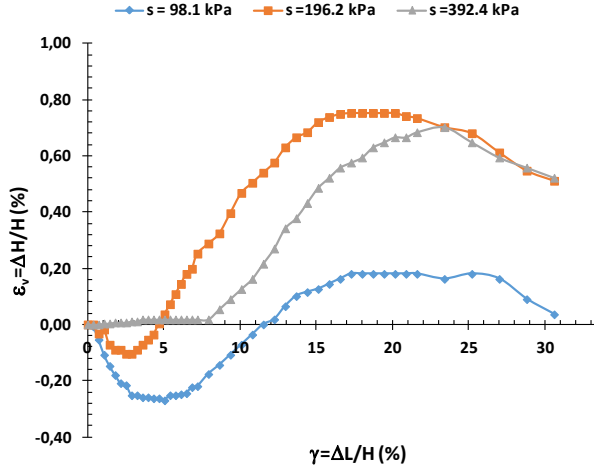
Şekil 4.35 AFS 15-20 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi.

Şekil 4.36 AFS 15-20 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi.

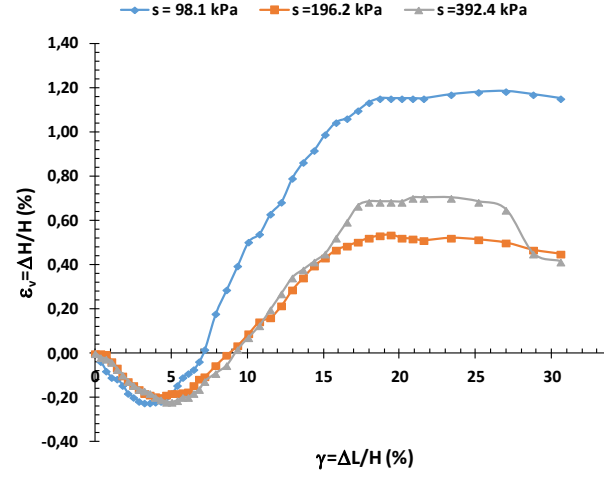
Şekil 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40' daki AFS 40-45 silis kumuna ait dilatasyon eğrilerinden elde edilen dilatasyon açıları, içsel sürtünme açılarıyla birlikte Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Rölatif sıkılık artışı ile dilatasyon açılarının arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2 AFS 40-45 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları.

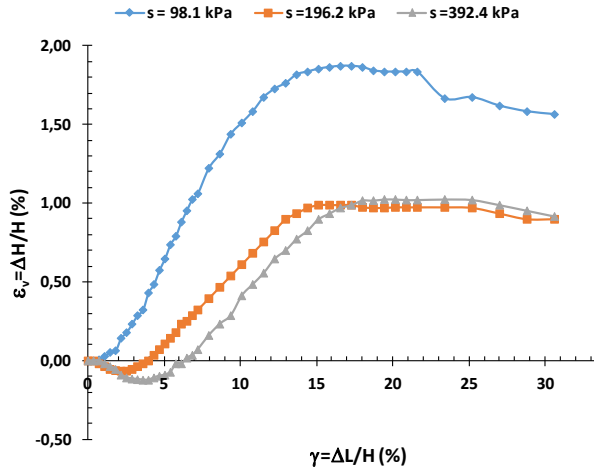
| Dr | KUM | σ_n | τ | t/s | ϕ | ψ |
|-----|----------|------------|---------|-------|--------|--------|
| | | kPa | kPa | | o | o |
| 40 | AFS40-45 | 98.100 | 68.835 | 0.702 | 35.057 | 2.805 |
| 40 | AFS40-45 | 196.200 | 141.239 | 0.720 | 35.749 | 4.289 |
| 40 | AFS40-45 | 392.400 | 274.500 | 0.700 | 34.974 | 4.716 |
| 60 | AFS40-45 | 98.100 | 93.889 | 0.957 | 43.743 | 9.887 |
| 60 | AFS40-45 | 196.200 | 149.167 | 0.760 | 37.245 | 4.033 |
| 60 | AFS40-45 | 392.400 | 293.186 | 0.747 | 36.766 | 5.427 |
| 80 | AFS40-45 | 98.100 | 86.314 | 0.880 | 41.343 | 11.799 |
| 80 | AFS40-45 | 196.200 | 149.500 | 0.762 | 37.307 | 5.711 |
| 80 | AFS40-45 | 392.400 | 285.538 | 0.728 | 36.042 | 6.702 |
| 100 | AFS40-45 | 98.100 | 78.542 | 0.801 | 38.682 | 13.496 |
| 100 | AFS40-45 | 196.200 | 194.268 | 0.990 | 44.716 | 12.817 |
| 100 | AFS40-45 | 392.400 | 323.779 | 0.825 | 39.527 | 11.310 |



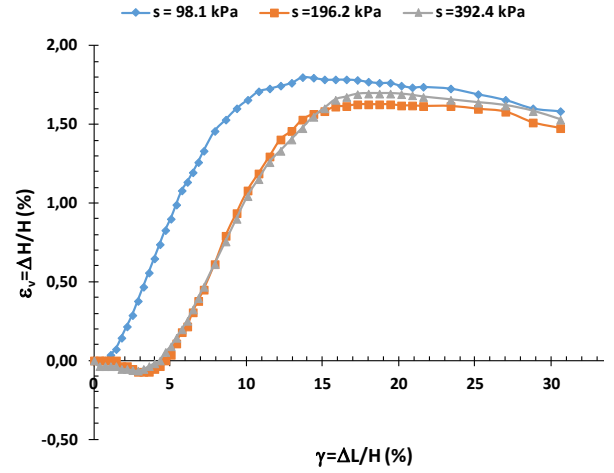
Şekil 4.37 AFS 40-45 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi.



Şekil 4.38 AFS 40-45 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi.



Şekil 4.39 AFS 40-45 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi.

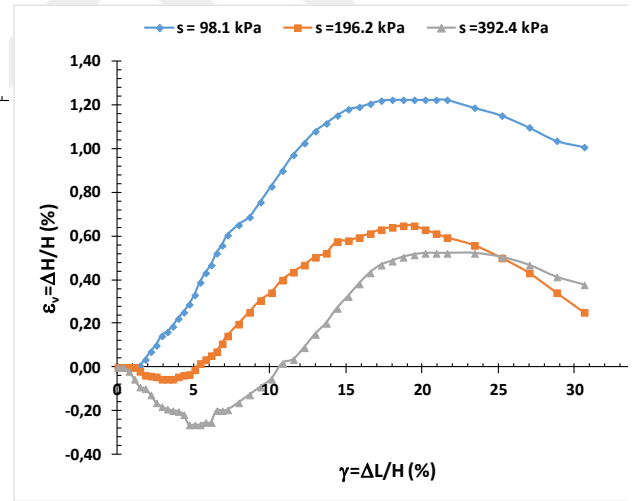
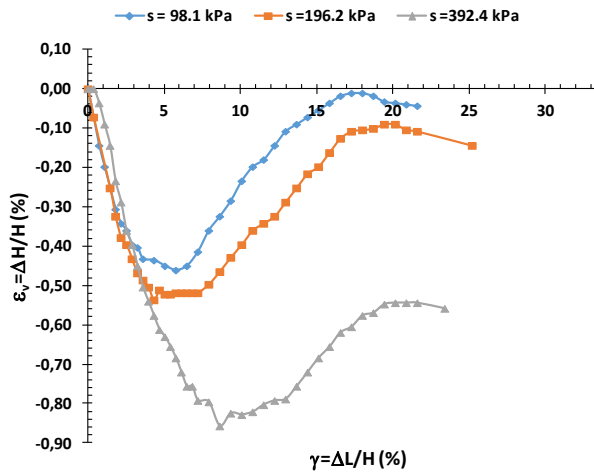


Şekil 4.40 AFS 40-45 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi.

Şekil 4.41, 4.42, 4.43 ve 4.44' deki AFS 60-65 silis kumuna ait dilatasyon eğrilerinden elde edilen dilatasyon açıları, içsel sürtünme açılarıyla birlikte Çizelge 4.3' de gösterilmiştir. Rölatif sıkılık artışı ile dilatasyon açılarının arttığı gözlemlenmiştir.

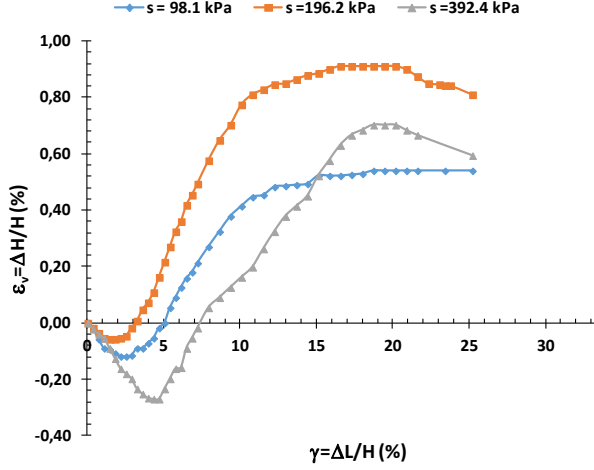
Çizelge 4.3 AFS 60-65 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları.

| Dr | KUM | σ_n | τ | t/s | ϕ | ψ |
|-----|----------|------------|---------|-------|--------|--------|
| | | kPa | kPa | | ° | ° |
| 40 | AFS60-65 | 98.100 | 63.750 | 0.650 | 33.018 | 3.045 |
| 40 | AFS60-65 | 196.200 | 122.373 | 0.624 | 31.953 | 2.331 |
| 40 | AFS60-65 | 392.400 | 250.278 | 0.638 | 32.530 | 2.691 |
| 60 | AFS60-65 | 98.100 | 70.875 | 0.722 | 35.847 | 4.921 |
| 60 | AFS60-65 | 196.200 | 127.982 | 0.652 | 33.117 | 3.805 |
| 60 | AFS60-65 | 392.400 | 265.142 | 0.676 | 34.047 | 4.432 |
| 80 | AFS60-65 | 98.100 | 77.083 | 0.786 | 38.159 | 4.466 |
| 80 | AFS60-65 | 196.200 | 152.292 | 0.776 | 37.819 | 7.069 |
| 80 | AFS60-65 | 392.400 | 291.667 | 0.743 | 36.623 | 5.001 |
| 100 | AFS60-65 | 98.100 | 86.681 | 0.884 | 41.464 | 10.470 |
| 100 | AFS60-65 | 196.200 | 168.263 | 0.858 | 40.617 | 9.809 |
| 100 | AFS60-65 | 392.400 | 356.922 | 0.910 | 42.289 | 12.402 |

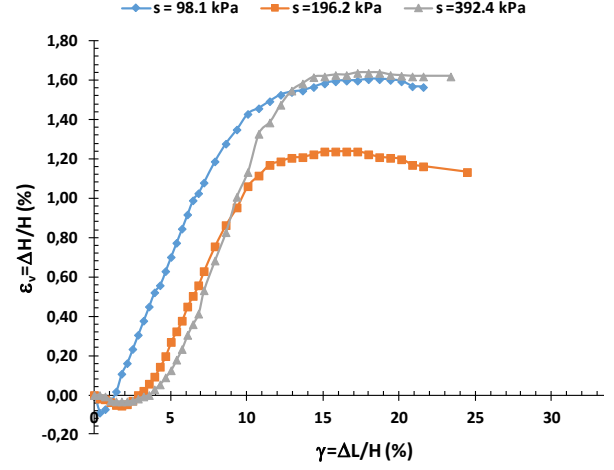


Şekil 4.41 AFS 60-65 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi.

Şekil 4.42 AFS 60-65 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi.



Şekil 4.43 AFS 60-65 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi.

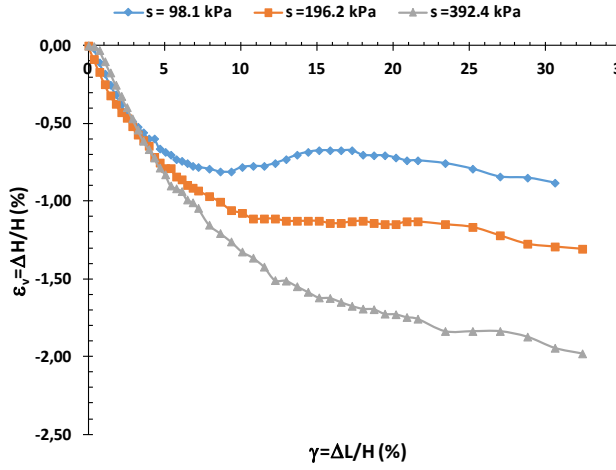


Şekil 4.44 AFS 60-65 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi.

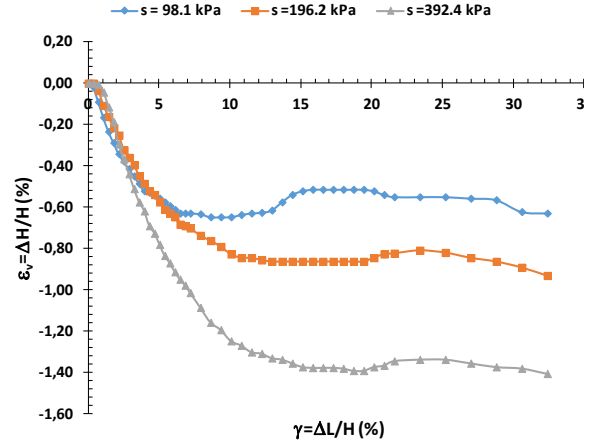
Şekil 4.45, 4.46, 4.47 ve 4.48' deki AFS 100-140 silis kumuna ait dilatasyon eğrilerinden elde edilen dilatasyon açıları, içsel sürtünme açılarıyla birlikte Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Rölatif sıkılık artışı ile dilatasyon açılarının arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4 AFS 100-140 silis kumuna ait direk kesme kutusu deney parametreleri ile içsel sürtünme ve dilatasyon açıları.

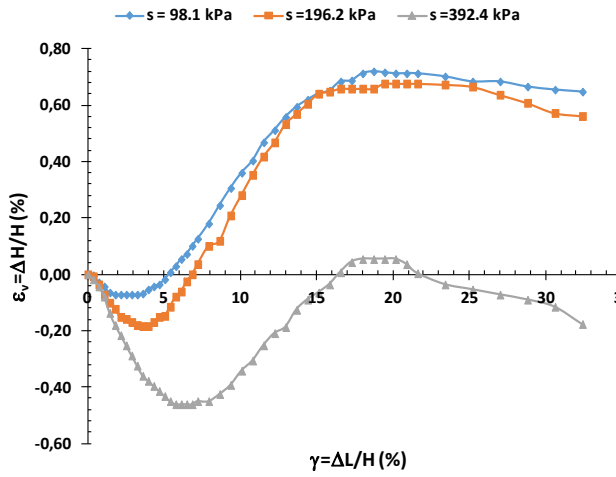
| Dr | KUM | σ_n | τ | t/s | ϕ | ψ |
|-----|------------|------------|---------|-------|--------|--------|
| | | kPa | kPa | | ° | ° |
| 40 | AFS100-140 | 98.100 | 67.528 | 0.688 | 34.542 | 1.489 |
| 40 | AFS100-140 | 196.200 | 113.750 | 0.580 | 30.104 | -0.086 |
| 40 | AFS100-140 | 392.400 | 218.750 | 0.557 | 29.138 | -1.604 |
| 60 | AFS100-140 | 98.100 | 65.778 | 0.671 | 33.843 | 2.376 |
| 60 | AFS100-140 | 196.200 | 119.556 | 0.609 | 31.356 | 0.155 |
| 60 | AFS100-140 | 392.400 | 246.667 | 0.629 | 32.154 | -0.029 |
| 80 | AFS100-140 | 98.100 | 67.305 | 0.686 | 34.454 | 3.748 |
| 80 | AFS100-140 | 196.200 | 137.778 | 0.702 | 35.078 | 5.200 |
| 80 | AFS100-140 | 392.400 | 280.958 | 0.716 | 35.603 | 2.874 |
| 100 | AFS100-140 | 98.100 | 96.667 | 0.985 | 44.578 | 9.090 |
| 100 | AFS100-140 | 196.200 | 164.583 | 0.839 | 39.992 | 9.230 |
| 100 | AFS100-140 | 392.400 | 287.111 | 0.732 | 36.192 | 4.716 |



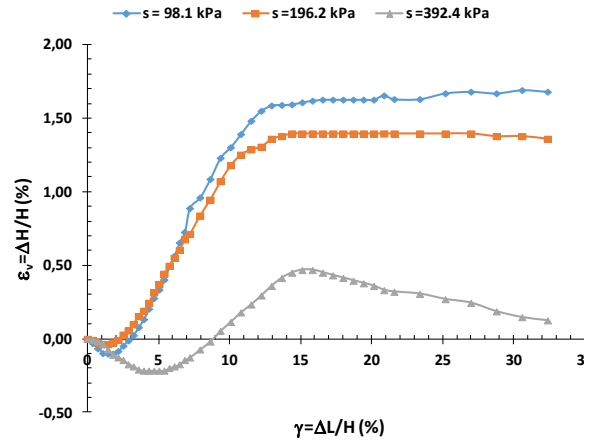
Şekil 4.45 AFS 100-140 Dr=%40 silis kumu dilatasyon eğrisi.



Şekil 4.46 AFS 100-140 Dr=%60 silis kumu dilatasyon eğrisi.



Şekil 4.47 AFS 100-140 Dr=%80 silis kumu dilatasyon eğrisi.



Şekil 4.48 AFS 100-140 Dr=%100 silis kumu dilatasyon eğrisi.

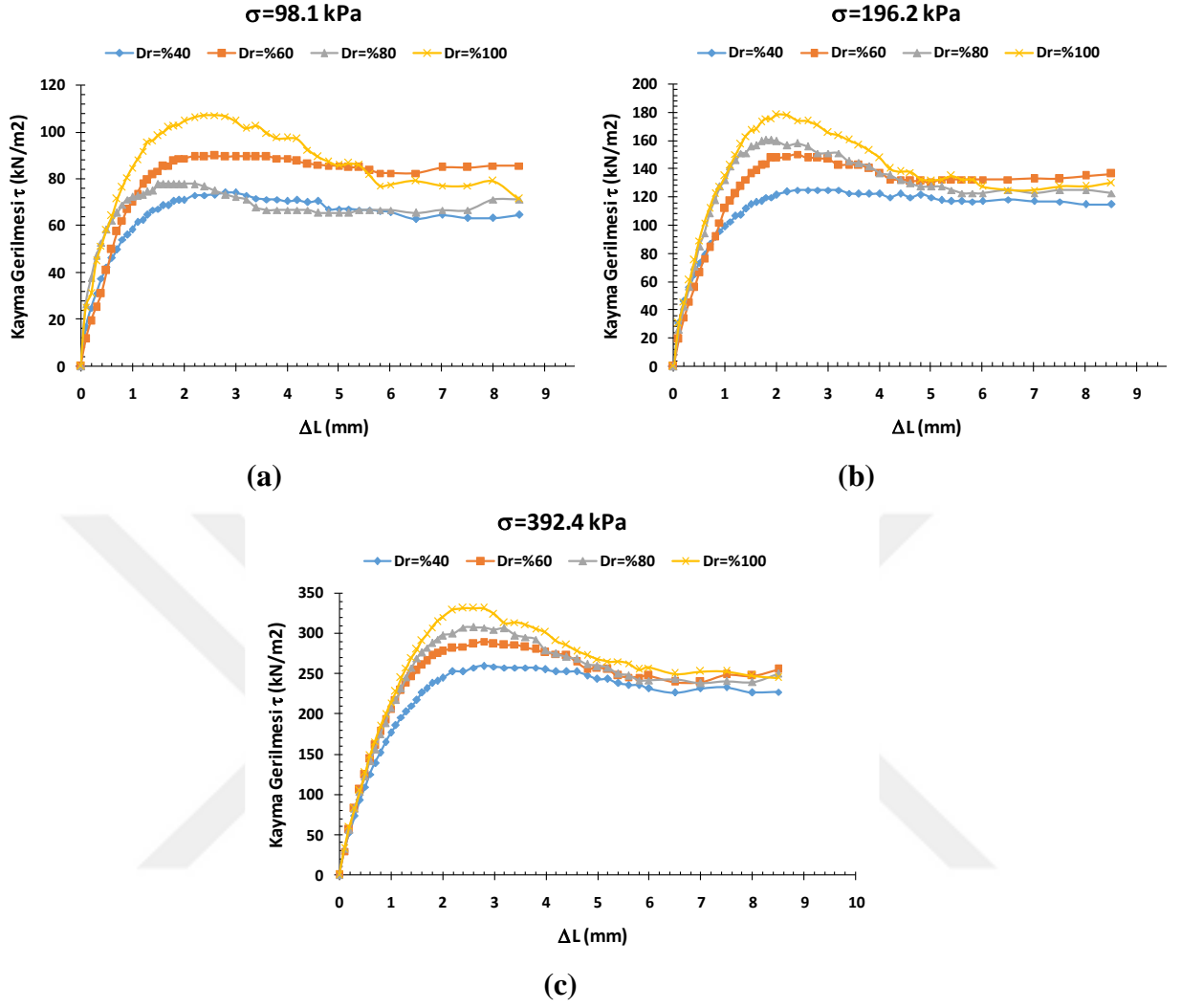


BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Şekil 5.1 (a), (b) ve (c) de AFS 15-20 silis kumuna ait sırasıyla 98.1, 196.2 ve 392.4 kPa normal gerilme altında yapılan direk kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi yatay deplasman grafikleri sunulmuştur.

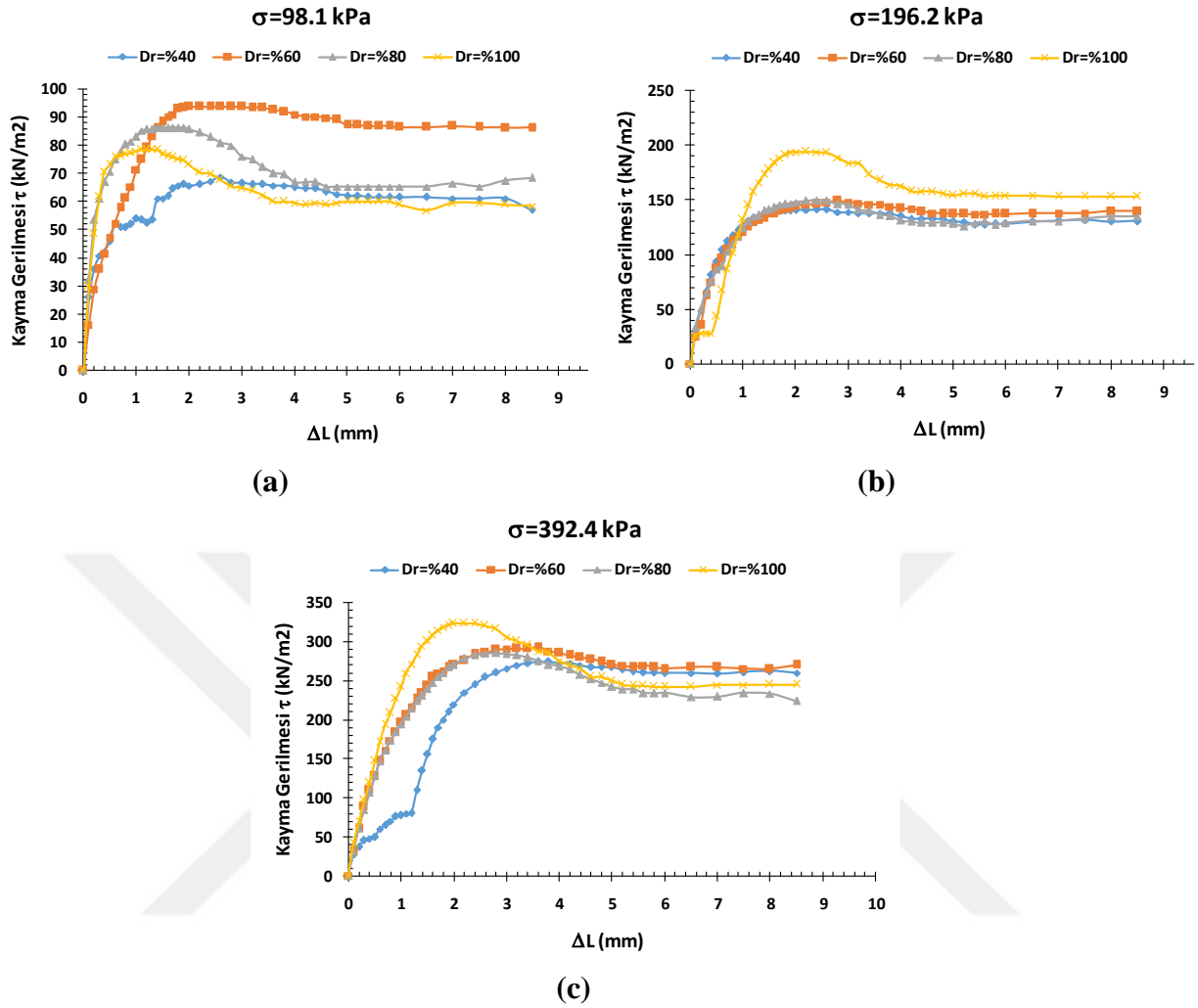
Aynı normal gerilme altında direk kesme kutusu deneyine tabi tutulan numuneler için rölatif sıklık arttıkça kırılma anındaki kayma gerilmesi değerinin arttığı gözlemlenmiştir. %40 rölatif sıklığa sahip orta-gevşek halde kırılma durumundaki kayma gerilmesi, belirli bir değere ulaşp pik oluşturmadan sabit değerlerde devam etmiştir. Rölatif sıklık arttıkça numune sıkı davranışa uygun olarak kayma gerilmesinde pik oluşturup kırılmıştır. Uygulanan normal gerilme arttıkça da numunelerin rölatif sıklıklarına göre aynı davranışı gösterdiği görülmüştür. Normal gerilme arttıkça kırılma anındaki kayma gerilmesi değerleri de artmaktadır.



Şekil 5.1 AFS 15-20 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki.

Şekil 5.2 (a), (b) ve (c) de AFS 40-45 silis kumuna ait sırasıyla 98.1, 196.2 ve 392.4 kPa normal gerilme altında yapılan direk kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi yatay deplasman grafikleri sunulmuştur.

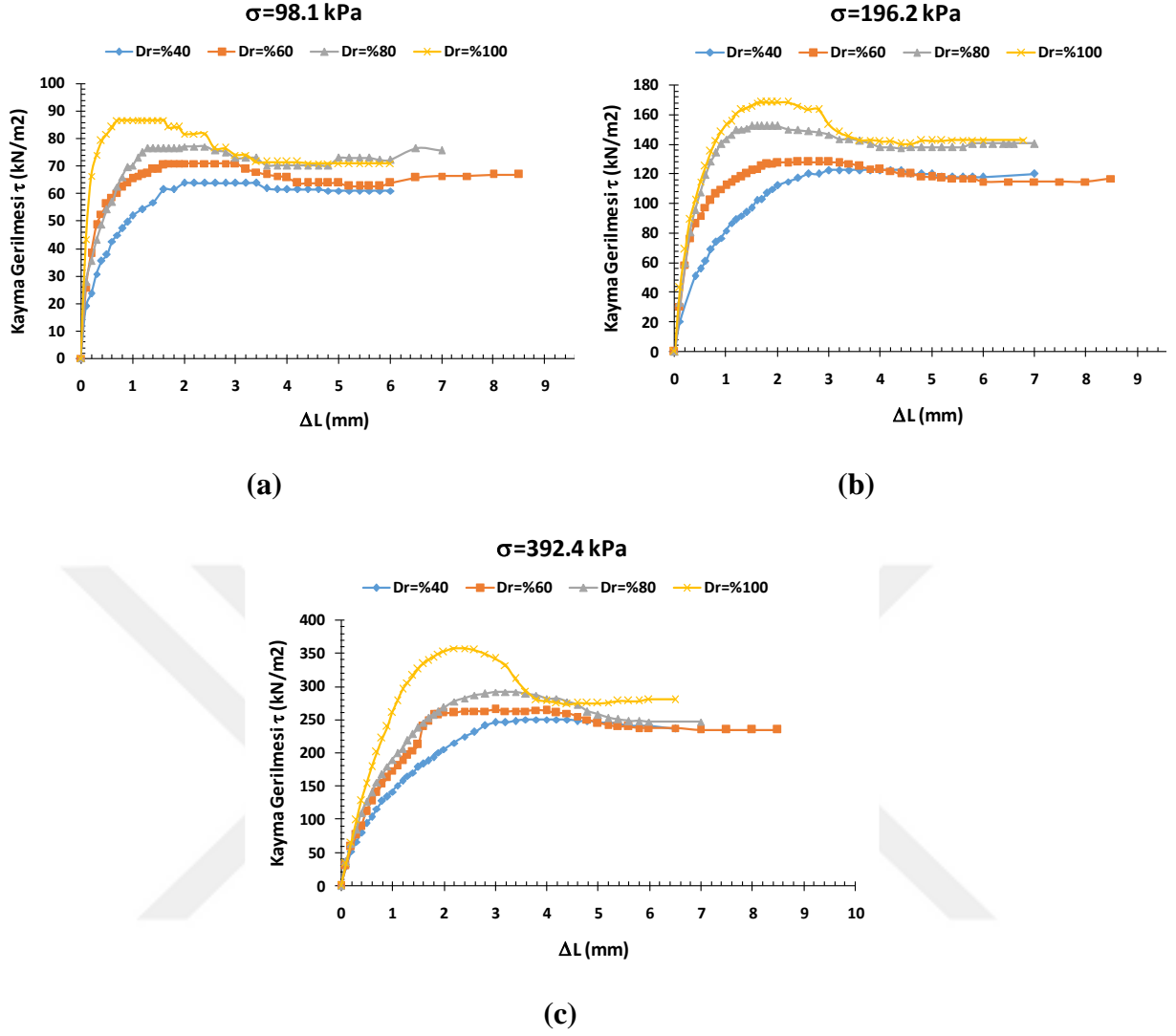
Rölatif sıklık arttıkça numune sıkı davranışa uygun olarak kayma gerilmesinde pik oluşturup kırılmıştır. Uygulanan normal gerilme arttıkça kırılma anındaki kayma gerilmesi değerleri de artmaktadır.



Şekil 5.2 AFS 40-45 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki.

Şekil 5.3 (a), (b) ve (c) de AFS 60-65 silis kumuna ait sırasıyla 98.1, 196.2 ve 392.4 kPa normal gerilme altında yapılan direk kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi yatay deplasman grafikleri sunulmuştur.

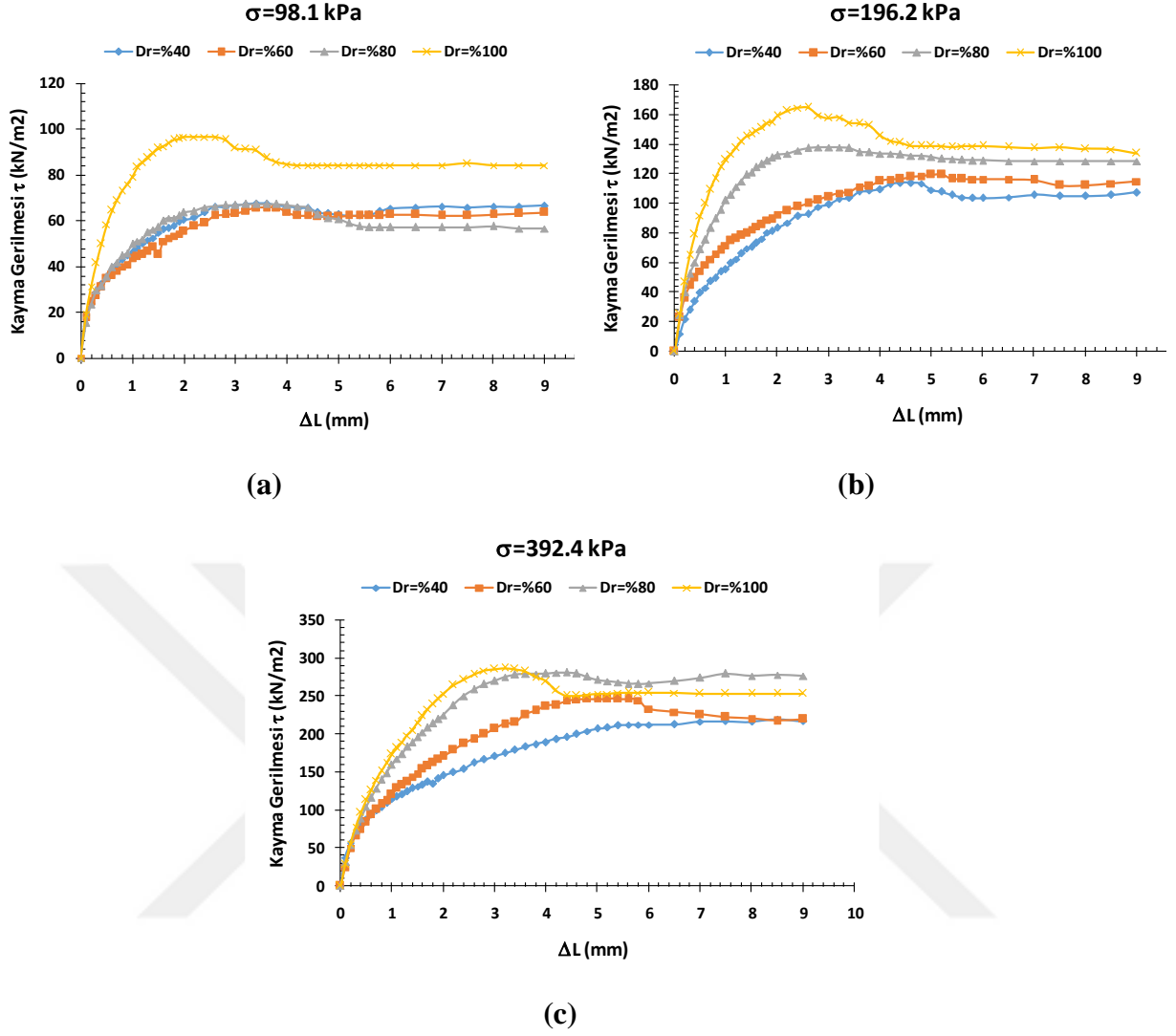
Aynı normal gerilme altında yapılan direk kesme kutusu deneyinde rölatif sıklık arttıkça kırılma anındaki kayma gerilmesi değerinin arttığı gözlemlenmiştir. %40 rölatif sıklığa sahip orta-gevşek halde kırılma durumundaki kayma gerilmesi, belirli bir değere ulaşmış oluşturmada sabit değerlerde devam etmiştir. %60, %80 ve %100 rölatif sıklıkta ise kırılma anındaki kayma gerilmelerinde pik noktaları görülmüştür. Uygulanan normal gerilme arttıkça da numunelerin rölatif sıklıklarına göre aynı davranışı gösterdiği görülmüştür. Normal gerilme arttıkça kırılma anındaki kayma gerilmesi değerleri de artmaktadır.



Şekil 5.3 AFS 60-65 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki.

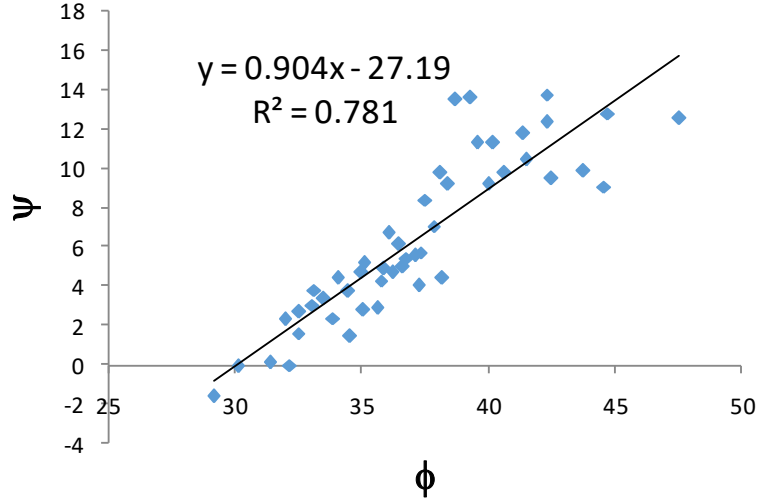
Şekil 5.4 (a), (b) ve (c) de AFS 100-140 silis kumuna ait sırasıyla 98.1, 196.2 ve 392.4 kPa normal gerilme altında yapılan direk kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi yatay deplasman grafikleri sunulmuştur.

Aynı normal gerilme altında yapılan direk kesme kutusu deneyinde rölatif sıklık arttıkça kırılma anındaki kayma gerilmesi değerinin arttığı gözlemlenmiştir. %100 rölatif sıklığa sahip sıkı halde kırılma anındaki kayma gerilmelerinde pik noktaları görülmüştür. %40, %60 ve %80 rölatif sıklıkta ise kırılma anındaki kayma gerilmelerinde belirli bir değere ulaşip pik oluşturmadan sabit değerlerde devam etmiştir. Normal gerilme arttıkça kırılma anındaki kayma gerilmesi değerlerinde de artış gözlemlenmiştir.

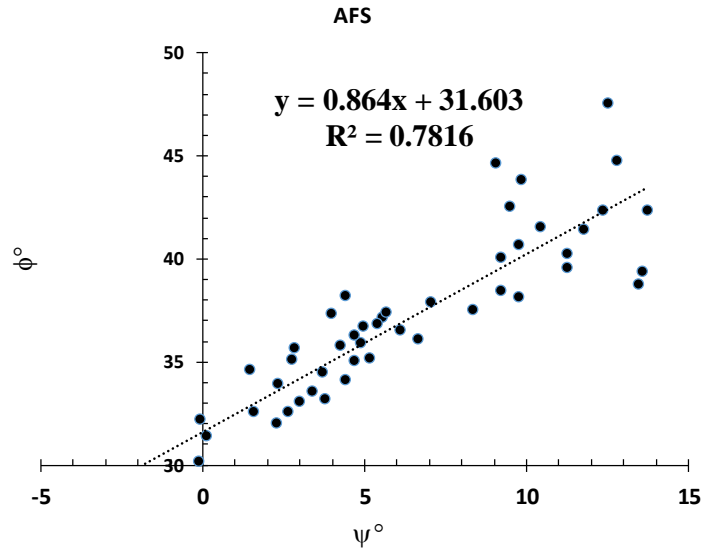


Şekil 5.4 AFS 100-140 silis kumu kayma gerilmesi-yatay deformasyon arasındaki ilişki.

Şekil 5.5'te çalışmada kullanılan AFS15-20, 40-45, 60-65 ve 100-140 silis kumu numunelerine ait %40, 60, 80 ve 100 rölaf sıklıkta ve 98.1, 196.2 ve 392.4 kPa normal gerilme altındaki tüm durumları içeren içsel sürtünme açıları ve buna karşılık gelen dilatasyon açıları gösterilmiştir. Önceki çalışmalarda içsel sürtünme açısı (ϕ')'nın (ψ) dilatasyon açısından 30° daha fazla çıktığını göz önünde bulundurursak çalışmamızdan elde ettiğimiz 27.19° farkın önceki çalışmalara yakın bir değer olduğunu görebiliriz.



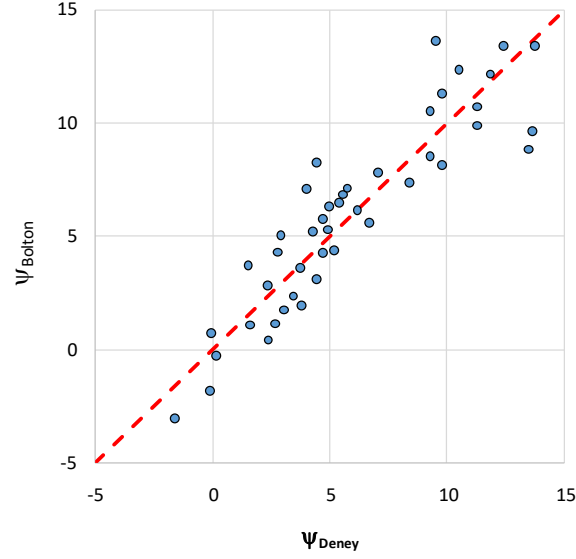
Şekil 5.5 Silis kumlarının içsel sürtünme açıları - dilatasyon açıları arasındaki ilişki.



Şekil 5.6 Silis kumlarının dilatasyon açıları – içsel sürtünme açıları arasındaki ilişki.

Şekil 5.6' da ise deney sırasında hacim değişiminin olmadığı andaki başka bir deyişle dilatasyon açısının 0° olduğu andaki içsel sürtünme açısı ϕ_{cv} değerini bulmak için hazırlanan tüm numunelere ait dilatasyon açısı-içsel sürtünme açısı grafiği gösterilmiştir.

Hacim değişiminin olmadığı andaki içsel sürtünme açısı (ϕ_{cv}) 31.60° olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 Silis kumlarının deneysel dilatasyon açıları (Ψ_{Deney}) ve Ψ_{Bolton} açıları.

Şekil 5.7’ de Bolton ‘un çalışmaları sonucu elde ettiği denklemden hesaplanan dilatasyon açıları ile deneysel verilerimize göre hesapladığımız dilatasyon açıları karşılaştırılmış olup Bolton denklemden elde edilen açılarla deneysel olarak hesaplanan açılar birbirine yakın değerler olduğu gözlemlenmiştir.

Bu deneysel çalışmada 4 ayrı üniform orta ince silis kumu (AFS15-20, 40-45, 60-65, ve 100-140) kullanılmıştır. Rölatif sıklıkları (D_r) % 40, 60, 80 ve 100 olmak üzere hazırlanan numuneler direk kesme kutusu deneyine tabii tutulup elde edilen içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı gibi kayma mukavemeti parametrelerinin rölatif sıklığa bağlı değişimi incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ve literatür sonuçları karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonunda aşağıdaki sonuçlar ve öneriler özetlenmiştir;

- Kullanılan silis kumu numuneler direk kesme kutusu deneyinde istenilen rölatif sıklıkta hazırlamak için (orta gevşek yada sıkı durum) kesme kutusu içine doldurulurken hassasiyet gösterilmiş ve bu durum deney sonuçlarının tutarlılığı açısından önem arz etmiştir.
- Denejde kullanılan silis kumu numunelerinin üniformluk katsayısı C_u 1.7 ile 2.8 arasında değişmektedir. Bütün değerler 6’ dan küçüktür. Bütün kum örnekleri üniform olduğu için C_u nun etkisi beklenildiği gibi görülmemiştir.

- Tüm kumlar ayrı ayrı rölatif sıklık deneyine(ASTM D4253-D4254) tabii tutularak minimum ve maksimum boşluk oranları bulunmuştur. ($e_{min}=0.603-0.77$ ve $e_{max}=0.478-0.592$).
- Elde edilen verilere göre rölatif sıklık artıkça kum örneklerinin içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı artmaktadır. Sonuçlar literatürde verilen değerler arasına kalmaktadırlar.
- Elde edilen dilatasyon açıları ile içsel sürtünme açısı arasındaki açısal fark yaklaşık olarak literatüre uygunluk göstermiştir.
- Literatürde bildirilen yayınların çoğunluğunda daneler arasında boyut farkının çok etkili olmadığı söylenmesine rağmen kayma mukavemeti değerlerinde gözle görülür fark oluşturduğu gözlenmiştir.
- Çalışmanın devamında kum boyutlarını aynı aralıkta tutarak C_u katsayısı değerinin 6'nın üzerine çıkarmak için fiziksel stabilizasyon yapılmalı ve iyi derecelenmiş kum örnekleri üzerinde aynı deneylerin tekrarlanması sonucu boyut farkının etkisi daha net incelenebilecektir.
- Ayrıca kayma mukavemeti parametrelerinin rölatif sıklığa bağlı değişiminin daha iyi irdellemek için direk kesme deneyinin yanı sıra numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyi de yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Alias R, Kasa A and Taha M R** (2014) Particle Size Effect on Shear Strength of Granular Materials in Direct Shear Test. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8 (11): 1144–1147.
- Al-Khafpji A W and Andersland O B** (1992) *Geotechnical Engineering and Soil Testing*. ISBN: 978-0-19-510719-7, Oxford University Press, New York, 385 pp.
- Alshibli K A and Cil M B** (2018) Influence of Particle Morphology on the Friction and Dilatancy of Sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 144(3): 04017118.
- Arasan S** (2011) Görüntü Analizi ile Granüler Zeminlerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 439 s.
- ASTM D 3080** (2011) *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM West Conshohocken, PA. 9 pp.
- ASTM D 4253** (2006) *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*. ASTM WestConshohocken, PA. 15 pp.
- ASTM D 4254** (2006) *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*. ASTM WestConshohocken, PA. 15 pp.
- Atkinson J** (1993) *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations: through critical state soil mechanics*, ISBN: 0-07-707713-3, McGraw-Hill Book Company, Berkshire, 356 pp.
- Atkinson J H and Bransby P L** (1982) *The Mechanics of Soils /An Introduction to Critical State Soil Mechanics*, ISBN: 07-084135-7, McGRAW-HILL Book Company, Berkshire, 380 pp/s.
- Aytekin M** (2004) *Deneysel Zemin Mekaniği*, ISBN: 975-523-028-9, Teknik Yayınevi, Ankara, 623 s.
- Bareither C A, Edil T B, Benson C H and Mickelson D M** (2008) Geological and Physical Factors Affecting the Friction Angle of Compacted Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (10): 1476.
- Bolton M D** (1986) The strength and dilatancy of sand. *Geotechnique*, 1: 65-78.
- Budhu, M** (2015) *Soil Mechanics Fundamentals*. ISBN: 978-1119019657, John Wiley and Sons, Ltd, West Sussex, 367 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Chakraborty T and Salgado R** (2010) Dilatancy and Shear Strength of Sand at Low Confining Pressures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136: 527–532.
- Cho G, Dodds J and Santamarina J C** (2006) Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (5): 591–602.
- Chu J** (1993) The strength and dilatancy of sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 30: 892-901.
- Cui L and O’Sullivan C** (2006) Exploring the macro- and micro-scale response of an idealised granular material in the direct shear apparatus. *Geotechnique*, 7: 455–468.
- Das M B** (2010) *Principles of Geotechnical Engineering*. 7th Edition, ISBN: 978-0495411307, Cengage Learning, Stamford, CT, 683 pp.
- Das M B** (2019) *Advanced Soil Mechanics*. Fifth Edition, ISBN: 978-0-8153-7913-3, CRC Press TaylorandFrancis Group, Newark, 735 pp.
- Doherty J and Fahey M** (2011) Three-dimensional finite element analysis of the direct simple shear test. *Computers and Geotechnics*, 38: 917–924.
- Fern J, Soga K and Sakanoue T** (2015) Modelling the shear strength and dilatancy of dry sand in triaxial compression tests. *Geomechanics from Micro to Macro*, 673-678.
- Frossard E** (2019) Effect of sand grain shape on interparticle friction; indirect measurements by Rowe’s stress dilatancy theory. *Geotechnique*, 29 (3): 341–350.
- Fu W, Zheng X, Lei X and Deng J** (2014) Using a modified direct shear apparatus to explore gap and size effects on shear resistance of coarse-grained soil. *Particuology*, 23: 82–89.
- Head K H** (1994) “*Manual of soil laboratory testing.*” *Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*. 2nd Ed., Vol. 2, ISBN: 978-1904445692, Pentech Press, London, 480 pp.
- Holtz R D, Kovacs W D and Sheahan T C** (2011) *An Introduction to Geotechnical Engineering*. 2nd edition, ISBN: 978-0-13-249634-6, Pearson, New Jersey, 846 pp.
- Houlsby G T** (1991) How The Dilatancy of Soils Affects Their Behaviour. *Tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4: 1189-1202.
- Ishibashi I and Hazarika H** (2010) *Soil Mechanics Fundamentals*. E-ISBN: 978-1-4398-9125-4, CRC Press TaylorandFrancis Group, Newark, 334 pp.
- Jewell R A** (1989) Direct shear tests on sand test. *Geotechnique*, 2: 309–322.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Jiang M, Liu J, Shen Z and Xi B** (2018) Exploring the critical state properties and major principal stress rotation of sand in direct shear test using the distinct element method, *Granular Matter*, 20: (25) 18-25.
- Li TX S and Dafalias Y F** (2000) Dilatancy for cohesionless soils. *Geotechnique*, 4: 449–460.
- Lings M L and Dietz M S** (2004) A numerical examination of the direct shear test. *Geotechnique*, 4: 245–256.
- MacIver B N and Hale G P** (1970) *Engineering and Design: Laboratory Soils Testing*. ISBN: 1110-2-1906, U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., 407 pp.
- Mohapatra S R, Mishra S R, Nithin S, Rajagopal K and Sharma J** (2019) Effect of Box Size on Dilative Behaviour of Sand in Direct Shear Test. *Geoenvironmental Engineering*, 16: 111–118.
- Oda M** (1975) On stress-dilatancy relation of sand in simple shear test. *Soils and Foundations*, 2: 17–29.
- Rowe P W** (1962) The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1339: 500-527.
- Schanz T and Vermeer** (1996) Angles of friction and dilatancy of sand. *Geotechnique*, 1: 145–151.
- Simoni A and Houlsby G T** (2006) The direct shear strength and dilatancy of sand–gravel mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 523-549.
- Stone K J L and Wood D M** (1992) Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand. *Soils and Foundations*, 4: 43–57.
- Stupkiewicz S and Mróz Z** (2001) Modelling of Friction and Dilatancy Effects At Brittle Interfaces For Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 39: 707-739.
- Taylor D W** (1948) *Fundamentals of Soil Mechanics*. ISBN: 978-1258768928, John Wiley and Sons, Inc. , New York, 711 pp.
- TS 1900-1** (2006) İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin Tayini. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara. 99 s.
- TS 1900-2** (2006) İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin Tayini. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara. 68 s.
- Wood D M** (1991) *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. ISBN: 978-0521337823, Cambridge University Press, Cambridge, 488 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Wood D M (2007) StrengthThe magic of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 44: 1329–1350.



ÖZGEÇMİŞ

23/05/1987 tarihinde Zonguldak'ta doğdu. İlköğrenim, orta ve lise öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. Lisans eğitimini 2006 yılında başladığı Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında mezun olarak tamamladı ve aynı yıl İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres: Mithat Paşa Mah. Uzun Mehmet Cad. No: 29/6 Merkez / ZONGULDAK

Tel: (+90) 530 434 45 46

E-posta: yrskorkmaz@gmail.com