

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

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

**SERBEST BASINÇ MUKAVEMENTİNİN MATRİK EMME İLE DEĞİŞİMİNİN
İNCELENMESİ**

**Yazar
Abdulsamet GÜVEN**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Seda DURUKAN**



MANİSA-2024

Abdulsamet GÜVENS

SERBEST BASINÇ MUKAVEMENTİNİN MATRİK EMME İLE
DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

2024

TAAHHÜTNAME

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

Abdulsamet GÜVEN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
TABLO DİZİNİ.....	VII
TEŞEKKÜR	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT	X
1. GİRİŞ	1
2. SUYA DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ÖZELLİKLERİ, ZEMİNDE DEĞİŞKEN KOŞULLAR VE ŞEV STABİLİTESİ ANALİZ METODLARI.....	4
2.1. Suya Doygun Olmayan Zeminlerin Genel Özellikleri	5
2.2. Zemin Emme gerilmesi kavramı ve ölçülmesi.....	9
2.2.1 Zeminlerde Emmenin Ölçülmesi	12
2.3 Filtre Kâğıdı Metodu	13
2.4 Eksen Kaydırma Tekniği.....	14
2.5. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi.....	17
2.6. Sızma Teorisi.....	21
2.7. Doygun Olmayan Zeminlerde Gerilme Durumu Değişkenleri	22
2.8. Doygun Olmayan Zeminlerin Kayma Mukavemeti	25
2.8.1. Zeminlerde Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi.....	28
2.8.2. Serbest basınç deneyi.....	28
2.9. Şevlerin Stabilitesi.....	29
2.9.1. Şev Hareketine Etki Eden Faktörler	31
2.9.2. Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması	32
a) Düşme	32
b) Devrilme	33
c) Kayma.....	33
d) Yayılmalar	34
e) Akmalar	34

2.9.3. Şev Stabilitesi Analizleri	35
2.10. Doygun Olmayan Zeminlerde Şev Duraylılığına Yağış Etkisinde Etki Eden Parametreler	37
2.11 Önceki Çalışmalar	39
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	41
3.1. Materyal.....	41
3.2. Deneyler	43
3.2.1. Filtre Kağıdı Deneyi	43
a) Numune Hazırlanması	44
b) Filtre kağıtlarının su içeriklerinin tayin edilmesi.....	48
3.2.2 Serbest Basınç (Tek Eksenli) Deneyi	50
a) Deney için Gerekli Malzemeler	50
b) Gereken Ölçümler.....	51
c) Deneyin Uygulanması.....	51
d) Hesaplamalar	52
e) Sonuçların Gösterilmesi.....	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	59
4.1. Filtre Kağıdı Yöntemi Deney Sonuçları.....	59
4.2. Serbest Basınç Deney Sonuçları.....	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

T_{min}	Sızmanın oluşması için gerekli minimum yağış süresi
c'	Efektif kohezyon
c_{ult}	Toplam kohezyon
d	Düzeltilme katsayısı
e	Boşluk oranı
f	Emme gerilmesi ve matrik emme arasındaki ilişki katsayısı
GS	Güvenlik sayısı
I_{min}	Minimum yağış yağunluğu
I_p	Plastisite indisi
K	Düzeltilme katsayısı
ϕ	Kayma mukavemeti açısı
ϕ'	Efektif Kayma mukavemeti açısı
P_{at}	Atmosferik basınç
ϕ^b	Matrik emmeye bağlı Kayma mukavemeti açısı
R	Genel gaz sabiti
S	Doygunluk derecesi
$SWCC$	Zemin su karakteristik eğrisi
T	Mutlak Sıcaklık
t^0	Sıcaklık
u_a	Boşluk hava basıncı
$\bar{u}_v$	Kısmi boşluk suyu buhar basıncı
$\bar{u}_{v0}$	Aynı sıcaklıktaki saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı
u_w	Boşluk suyu basıncı
v_{w0}	1/Suyun özgül hacmi
W_n	Doğal su muhtevası
W_{opt}	Optimum su muhtevası
x	Efektif gerilme katsayısı
α	Matrik emmeye bağlı başlangıçtaki kayma mukavemeti açısı
β_1	Matrik emmeye bağlı maksimum kayma mukavemeti
γ_k	Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmak}	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	Dane birim hacim ağırlığı

λ	Düzeltilme katsayısı
π	Osmatik emme
ρ_w	Suyun özgül hacmi
σ	Toplam gerilme
σ'	Efektif gerilme
σ^s	Emme gerilmesi karakteristik eğrisi fonksiyonu
τ	Kayma mukavemeti
τ_{Sr}	Kalıcı matrik emmenin Kayma mukavemetine katkısı
ψ	Zemin emme gerilmesi yada toplam emme
ψ_e	Hava giriş matrik emme değeri
ψ_r	Kalıcı matrik emme
ω_v	Su buharının moleküler kütlesi
Θ_r	Kalıcı hacimsel su muhtevası
Θ_s	Doygun hacimsel su muhtevası
Θ_w	Hacimsel su muhtevası
θ	Normalize su muhtevası

Kısaltmalar

AEV	Hava Giriş Değeri
ASTM	American Standarts for Testing and Materials
Cm	Santimetre
Gr	Gram
KBK	Kum Bentonit Karışımı
kPa	Kilopaskal
log	Logaritma
mm	Milimetre
Mpa	Megapaskal
No	Numara
TDR	Time Domain Reflectometry (Zaman Etkili Yansıma Ölçer)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Suyu doymamış bir zemin elemanında dört fazın görülmesi	6
Şekil 2.2. Doymuş zemin ve doymamış zemini ayıran bölgeler	8
Şekil 2.3. Toplam ve matris emmenin filtre kağıdı yöntemi ile ölçümü.....	14
Şekil 2.4. Boşluk suyu basıncının ölçülmesi için kullanılan Eksen kaydırma yöntemi.....	15
Şekil 2.5. Zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) özellikleri	17
Şekil 2.6. Zemin su karakteristik eğrisinin zemine göre değişimi	18
Şekil 2.7. Doymuş bir zeminin kuruma aşaması	19
Şekil 2.8. x ile doymuşluk derecesi arasındaki ilişki.....	23
Şekil 2.9. Doymuş ve doymamış zeminler için gerilme durum değişkenleri.....	25
Şekil 2.10. Mohr- Coulomb kırılma hipotezine göre kırılma durumu	26
Şekil 2.11. Suyu doymamış zeminlerde kırılma yüzeyi.....	27
Şekil 2.12. Şev hareketleri	35
Şekil 2.13. Kum- betonit karışımının içerdiği değişken su muhtevası ile dayanımı arasındaki grafik.....	40
Şekil 3.1. Deney organizasyonu.....	42
Şekil 3.2. Kompaksiyon eğrileri ve serbest basınç deneyi için seçilen sıkıştırma kriterleri.....	43
Şekil 3.3. Toplam ve matris emmenin filtre kağıdı yöntemi ile ölçümü.....	44
Şekil 3.4. Numunelerin karışım miktarlarına göre hazırlanması	46
Şekil 3.5. Numunelerin ring içerisinde sıkıştırılması ve çıkarılması	46
Şekil 3.6. Numuneler tartıldıktan sonra filtre kağıdının yerleştirilmesi	47
Şekil 3.7. Numunelerin sızdırmaz kaplara konulması	48
Şekil 3.8. Numunelerin inkübatöre yerleştirilmesi	48
Şekil 3.9. Alüminyum kapların soğuk daralarının alınması.	49
Şekil 3.10. ASTM D5298 standardında verilen kalibrasyon eğrisi	50

Şekil 3.11. Numune karışım miktarlarının tartılması.....	54
Şekil 3.12. Serbest basınç için kullanılacak numunelerdeki kum,kil ve suyun karıştırılması	55
Şekil 3.13. Hazırlanan numunelerin silindirik numune kalıbına yerleştirilmesi	55
Şekil 3.14. (a,b) Numunelerin ilk ve son tartılması	56
Şekil 3.15. Numunelerin serbest basınç cihazına yerleştirilmesi.....	57
Şekil 3.16. Numunelerin serbest basınç cihazında teste tabi tutulması ve kırılmanın gerçekleşmesi	58
Şekil 3.17. Tüm numunelerin serbest basınç cihazından alınması	58
Şekil 4.1. %10 KBK numunelerin hacimsel su içeriği - matrik emme ilişkileri	60
Şekil 4.2. %20 KBK numunelerin hacimsel su içeriği - matrik emme ilişkileri	61
Şekil 4.3. %10 KBK numunelerinin Gerilme – Deformasyon İlişkisi	64
Şekil 4.4. %10 KBK numunelerin su içeriğine göre serbest basınç değişimi	64
Şekil 4.5. %20 KBK numunelerinin Gerilme – Deformasyon İlişkisi	65
Şekil 4.6. %20 KBK numunelerin su içeriğine göre serbest basınç değişimi	65
Şekil 4.7. %10 ve %20 KBK Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemeti – Matrik Emme İlişkisi	66

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Emme Ölçümü İçin Geliştirilmiş Yöntemler	16
Tablo 2.2. Doygun Olmayan Zeminlerin Kayma Mukavemeti Eşitlikleri.....	28
Tablo 2.3. Şev Hareketinin Etkenleri	31
Tablo 2.4. Şev Göçmeleri İçin Varnes (1978) Mühendislik Sınıflandırması.....	32
Tablo 2.5. Limit Denge Analizine Göre Geliştirilmiş Bazı Yöntemler.	36
Tablo 2.6. Doygun Olmayan Zeminlerde Şev Stabilesi Üzerine Yapılmış Bazı Çalışmalar.	37
Tablo 3.1. Zeminlerin bazı geoteknik özellikleri	41
Tablo 3.2. %10 Bentonit Karışımı Numuneler ve Karakteristik Değerleri.....	45
Tablo 3.3. %20 Bentonit Karışımı Numuneler ve Karakteristik Değerleri.....	45
Tablo 3.4. %90 Kum - % 10 Bentonit Karışımı Numuneler.....	54
Tablo 3.5. %80 Kum - % 20 Bentonit Karışımı Numuneler.....	54
Tablo 4.1. %10 KBK numunelerin matrik emme sonuçları.....	60
Tablo 4.2. %10 KBK numunelerin Van Genuchten karakteristikleri	61
Tablo 4.3. %20 Bentonit %80 kum karışımı numunelerin Matrik Emme Sonuçları	61
Tablo 4.4. %20 KBK numunelerin Van Genuchten karakteristikleri	62
Tablo 4.5. %10 KBK numunelerinin Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	63
Tablo 4.6. %20 Kil İçeriğine Sahip Numunelerin Serbest Basınç Deneyi Sonuçları ve Hesaplamaları	63

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Seda Durukan’a

Jüri üyelerinden Doç.Dr. Tuğba Eskişar ile Doç. Dr. Barış Yılmaz hocalarıma ve Ege Üniversitesi zemin laboratuvarında deneylerin uygulanmasında yardımcı olan Ege Üniversitesi Yüksek Lisans öğrencisi Esma Rahat’a teşekkür ederim.

Abdulsamet GÜVEN
Manisa, 2024



ÖZET
Yüksek Lisans Tezi
Serbest Basınç Mukavementinin Matrik Emme ile Değişiminin İncelenmesi
Abdulsamet GÜVEN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seda DURUKAN

Zemin mekaniği ve geoteknik dünya üzerindeki tüm canlıları etkilemekte olan çalışmalar yürütmekte olup tüm canlıların daha kontrol edilebilir bir ortamda yaşama bilgi sunmaktadır. Büyük çalışma alanı olan geoteknik alanında oluşturulan çalışmanın kısa bilgilendirmesi aşağıda bulunmaktadır;

Suya doymun olmayan zeminler üzerine yapılan bu çalışma zemindeki matrik emme miktarı ve zeminin belli bir su içeriğindeki dayanımına gerçekçi bir yaklaşım sağlayabilmektir. Bu yaklaşım için öncelikle zemini iyi anlamak ve yorumlayabilmek gerekmektedir, bunun için zeminin karakteristik özelliklerini doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir. Zeminin özellikleri tespiti sonrası karşılaşılan probleme adım atılabilir. Yeryüzünde çok çeşitli zemin problemleriyle karşılaşılmaktadır, bu problemleri sıralarsak onlarca başlık gerekecek, yapılan bu çalışma doğrultusunda bir kaç örnek sırasıyla şev stabilitesi, zemin şişmeleri, heyelanlar, zemin oturması gibi çeşitli zemin problemleri sıralanabilir. Bu çalışma sonucunda karşılaşılabilecek bazı problemlere bir yaklaşım olması için zemindeki matrik emmenin dayanıma etkisi ve zemin içerisindeki su muhtevasının zemin dayanımını üzerindeki etkileri incelendi. Bu inceleme için laboratuvar ortamında oluşturulan örnekler üzerine çalışmalar gerçekleştirildi. İnceleme için iki adet farklı deney uygulanması gerekmektedir, ve her iki deneyde de 2 şer farklı grupta 6 ve 8 er adet deney olup toplamda 28 adet deney gerçekleştirilmiştir. 1. Deney Filtre kağıdı metoduyla zeminin matrik emme özelliğinin değerlendirilmesi için 1. Grupta %80 kum -%20kil ve su içeriği değişken miktarda olacak şekilde 8 adet ve 2. Grupta %90 kum -%10kil ve su içeriği değişken miktarda olacak şekilde 8 adet deney yapılmıştır. 2. Deney Serbest basınç deneyiyle zemindeki su muhtevası durumuna göre zeminin dayanımını ölçmek için 1. Grupta %80 kum -%20kil ve su içeriği değişken miktarda olacak şekilde 6 adet ve 2. Grupta %90 kum -%10kil ve su içeriği değişken miktarda olacak şekilde 6 adet deney yapılmıştır. Yapılan iki deney grubu için kullanılan zemin örnekleri kum-kil karışımı numuneler olup kum-kil miktarı sabit tutulup su muhtevası değiştirilip deneyler yapılmıştır ve bu deneyler neticesinde zeminin su içeri arttığında zeminin dayanımının çok net bir şekilde düştüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Şevler, Matrik Emme, Serbest Basınç Mukavemeti
2024, 72 sayfa

ABSTRACT
M.Sc. Thesis
Investigation of the Variation of Unconfined Compressive Strength with Matric Suction
Abdulsamet GÜVEN

Manisa Celal Bayar University
Postgraduate Education Institute
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst Prof.Dr. Seda DURUKAN

Soil mechanics and geotechnics carry out studies that affect all living things on earth and provide information for all living things to live in a more controllable environment. Brief information about the study created in the field of geotechnics, which is a large field of study, is below;

This study, conducted on unsaturated soils, aims to provide a realistic approach to the amount of matric suction in the soil and the strength of the soil at a certain water content. For this approach, it is first necessary to understand and interpret the soil well; for this, the characteristic features of the soil must be determined correctly. After determining the properties of the soil, steps can be taken to solve the problem encountered. A wide variety of soil problems are encountered in the world, if we were to list these problems, dozens of titles would be required. In line with this study, a few examples of various soil problems such as slope stability, soil swelling, landslides, soil settlement can be listed. As a result of this study, the effect of matric suction in the soil on strength and the effects of water content in the soil on soil strength were examined in order to provide an approach to some problems that may be encountered. For this investigation, studies were carried out on samples created in a laboratory environment. Two different experiments were required for the examination, and in both experiments, there were 6 and 8 experiments in 2 different groups, making a total of 28 experiments. 1st Experiment To evaluate the matric suction feature of the soil with the filter paper method, 8 experiments were conducted in the 1st Group with 80% sand - 20% clay and water content in variable amounts, and 8 experiments were conducted in the 2nd Group with 90% sand - 10% clay and water content in variable amounts has been made. 2nd Experiment to measure the strength of the soil according to the water content in the soil with the unconfined compression test, 6 pieces were used in the 1st Group with 80% sand - 20% clay and water content in variable amounts and in the 2nd Group 90% sand - 10% clay and water content in variable amounts. 6 experiments were conducted. The soil samples used for the two test groups were sand-clay mixture samples, and experiments were carried out by keeping the sand-clay amount constant and changing the water content. As a result of these experiments, it was observed that the strength of the soil clearly decreased when the water content of the soil increased.

Keywords: Slopes, Matric Suction, Unconfined Compressive Strength
2024, 72 pages

1. GİRİŞ

Mühendislik amaçlı şevlerde meydana gelen hareketler şev duyarsızlığı olarak adlandırılırlar. Şev hareketine ortamdaki mevcut dayanımın ortaya çıkan kuvvetleri karşılayamaması neden olmaktadır [1]. Şevin kayma mukavemetindeki azalma ya da zemin ortamındaki gerilmelerde meydana gelen artış sonucunda şevde stabilite problemi meydana gelmektedir. Şev stabilitesi problemlerine neden olan bazı etkenler aşağıda sunulmaktadır.

- İklimsel değişiklikler
- Depremler ve volkanik hareketler
- Zeminin aşınması ve yıpranması
- Yeraltı su seviyesinde meydana gelen değişiklikler
- Bitki örtüsünün kaldırılması veya doğal yollarla kaybı
- Şev üzerindeki sürşarj yüklerinin artması
- Doygun olmayan zeminin su ile dolması
- Kazık çakma, trafik gibi yapay titreşimler
- Zeminde meydana gelen şişme ve büzülme sonucu oluşan yıpranma

Görüldüğü üzere şev hareketleri doğal etkenler sonucu oluşabildiği gibi, insanların etkileriyle de meydana gelebilmektedir. Yeraltı suyunda meydana gelen değişimler şevlerin hareketini etkileyen en önemli faktördür. Ülkemizde meydana gelen şev göçmelerinin önemli bölümünün bahar aylarında görülmesi, bahar aylarında yoğun yağışların gerçekleşmesinin sonucudur [2].

Doğal ya da insan eliyle oluşturulan şevlerin stabilitesi elde edilen güvenlik sayısı ile belirlenir. Klasik zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan uzun dönem şev stabilite analizleri için kullanılan parametreler efektif kohezyon ve efektif kayma mukavemeti açısıdır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen güvenlik sayısı, gerçekte olan duruma göre çok fazla güvenli tarafta kalınmasına yol açmaktadır. Birçok insan aşırı güvenli tarafta kalmayı kabul edip, doygun olmayan zemin mekaniğinin gereksiz olduğunu düşünmektedir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar doygun zemin ile doygun olmayan zemin mekaniği arasında ciddi farklar olduğunu ortaya koymuştur

[1,3]. Şev stabilite problemleri genellikle klasik zemin mekaniği teorileri ile yani zemin doygun kabul edilerek çözülmüştür. Ancak 1960'lı yıllardan itibaren yapılan çalışmalar ışığında negatif boşluk suyu basıncının ya da emme basıncının şev stabilitesinde önemli bir rolü olduğu ortaya çıkmıştır [3,4].

Klasik zemin mekaniği zeminin doygun durumda olduğunu kabul ederek taşıma gücü, sızma, şev stabilitesi, oturma vb. analizler yapmaktadır. Analiz yapılırken seçilen parametreler, zemin boşluklarının tamamının suyla dolu olduğu kritik durumdur. Bu da yeraltı suyunun olmadığı ya da zemin yüzeyinden çok aşağıda gözlemlendiği zeminlerde yapılan hesapların çok güvenli olmasına yol açmaktadır. Doygun olmayan zemin mekaniği üzerine yapılan çalışmalar, zeminin kayma mukavemetini klasik zemin mekaniği kabullerine göre arttıran parametrelerin elde edilmesini ortaya koymuştur. Son yıllarda gelişen teknolojiyle beraber negatif boşluk suyu basıncının ölçülmesi kolaylaşmış olup, özellikle yer altı suyu seviyesinin çok derinde olduğu durumlarda negatif boşluk suyu basıncının kayma mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı ortaya çıkmıştır [3,5].

Doygun olmayan zemin mekaniği kabullerine göre yapılan şev stabilite analizlerinde elde edilen güvenlik sayısının; klasik zemin mekaniği kabullerine göre yapılan analizlere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiş ve bunun nedeninin hesaplara katılan matrik emme basıncı olduğu ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında zeminlerin kayma mukavemetine etkisi detaylı bir şekilde anlatılacak olan matrik emme basıncı; zeminin su tutma potansiyeli olarak tanımlanabilir. Doygun olmayan zeminlerin davranışını belirleyen diğer bir kavram da zemin su karakteristik eğrisidir (SWCC, Soil Water Characteristic Curve). Zemin su karakteristik eğrisi, matrik emme basıncının, zeminin doygunluk derecesi, su muhtevası veya hacimsel su muhtevası ile ilişkisiyle elde edilen eğridir [6]

Bu çalışmada, zeminlerin drenajsız kayma mukavemetleri ile matrik emme değerleri arasındaki ilişkiye katkıda bulunmak üzere, doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre kontrollü hazırlanacak olan zemin örneklerinin farklı suya doygunluk oranlarındaki serbest basınç mukavemetleri saptanacaktır. Bu kapsamda da zeminlerin emme basınçlarını belirlemek için filtre kâğıdı yöntemi kullanılacak olup, mukavemet değerleri için de serbest basınç deneyi gerçekleştirilecektir. Buradan elde

edilen sonuçlar doğrultusunda deneye tabi tutulan örneklere ait serbest basınç mukavemeti ile matrik emme arasında bir korelasyon elde edilmesi planlanmaktadır. Bununla beraber, geniş kapsamlı olarak da şev hareketleri sonucunda yaşanan maddi ve manevi kayıpların azalması üzerine yarar beklenmektedir. Ek olarak, şev stabilitesi analizleri sonucunda farklı durumlar için olası kayma koşullarının belirlenip şev hareketlerinde erken uyarı sistemi oluşturulması konulu yeni bir çalışmaya alt yapı oluşturması da hedeflenmektedir.



2. SUYA DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ÖZELLİKLERİ, ZEMİNDE DEĞİŞKEN KOŞULLAR VE ŞEV STABİLİTESİ ANALİZ METODLARI

Zemin mekaniği problemlerinde zemin; hava, su ve danelerden oluşan üç fazlı bir yapı olarak kabul edilmektedir. Bu üç fazlı zemin yapısının kesitinde suyun ve havanın toplamı toplam boşlukları oluşturmaktadır. Zemindeki boşluklar tamamen su ile dolduğunda ise suya doygun zemin, boşlukların tamamı su ile dolu olmayıp bir kısmında hava bulunuyorsa suya doymamış zemin olarak tanımlanmaktadır. Suya doygun olmayan zeminleri kısaca zemin içindeki boşluk miktarının tam anlamıyla su ile dolmaması diyebiliriz. Bu boşluk miktarı zeminin cinsine, maruz kaldığı yüke, içerisinde barındırdığı mevcut su miktarı, yeraltı su seviyesi, geçirimsizlik miktarı gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Suya doygun olmayan zemin mekaniği problemlerinin literatürdeki tarihsel gelişimine baktığımızda 1960-lı yıllardan önce pek dikkate alınmayıp doygun zemin problemleri gibi ele alınarak çözülmekteydi. 1960-lı yıllardan sonra problemlerde belli bir miktar güvenlik faktörü artırılarak çözümlere gidilmiştir. Ancak son yıllarda teknolojinin gelişmesi ve araştırma alanlarındaki bilim insanlarının artmasıyla yapılan araştırmalar sonucunda suya doygun olmayan -zeminler ile suya doygun olan zeminler arasında göz ardı edilemeyecek boyutta farklılıkların olduğu tespit edilmiştir bu farklılıklar büyük ekonomik değerlere denk gelmektedir. Konuyu biraz daha anlaşılır hale getirirsek suya doygun zeminler hem insanlar tarafından yapılan dolgu zeminlerde hem de yeraltı su seviyesi üzerinde kalan kuru olmayan doğal zemin kısımlarında şev stabilitesi problemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tarz problemlerin davranışını gerçeğe yakın bir tahminde bulunabilmek için zemin türünde bazı parametreleri bilmemizi gerekmektedir. Bu parametreler; doygun olmayan zeminlerde belirleyici kavramlar olan emme basıncı, geçirimsizlik, zemin su karakteristik eğrisidir. [1] Bu bölümün devamında bu konuları inceleyeceğiz.

Suya doygun olmayan zeminin karakteristik özelliklerinin tespitinden sonra zeminin durumu önem arz etmektedir konu gereği ve bir sonraki konuda anlatılacağı üzere zeminlerin şevli durumundaki davranışı üzerinde çalışma yürütülecektir.

Şev stabilite problemlerini son 20 yıllık dönemlere kadar genellikle klasik zemin mekaniği teorileri kullanılarak zeminin suya doymuş olduğu kabul edilerek

çözölmekte olduğından bahsetmiştik. Fakat 1960'lı yıllardan itibaren yapılan çalışmalarda şev stabilitesine emme basıncının ve negatif boşluk suyu basıncının önemli role sahip oldukları ortaya çıkmıştır.[4] Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte- negatif boşluk suyu basıncının tespiti daha gerçeğıne yakın olmuştur ve bu ölçümler bize özellikle çok derinlerde bulunan yer altı suyu seviyesinden kaynaklı negatif boşluk suyu basıncının önemli ölçüde -kayma mukavemetini arttırdığını ortaya çıkarmıştır [5].

Ayrıca Terzaghi'-ye göre '*Zemin mekaniğinde meydana gelen problemlerin kaynağı zeminin kendisi değil, boşluklarında tuttuğı sudur. Eğer su olmayan bir gezegende yaşasaydık, zemin mekaniğine bu denli ihtiyaç olmayacaktı.*' [7].

Yukarıdaki bilgiler ışığında şev tasarımında her zaman güvenli tarafta kalmak amaçlı tam suya doymun şekilde analiz yapılmaktadır ve bu bize çok ekonomik olmayan ve zeminin gerçek davranışı tahmin edilemeyen çözümlere itmektedir.

Bu bölümün 2. Kısımında suya doymun olmayan zeminde değışken koşulların oluşumu ve hesap metodları devamında ise günümüzde yaygın olarak kullanılan şev stabilite yöntemleri anlatılacaktır.

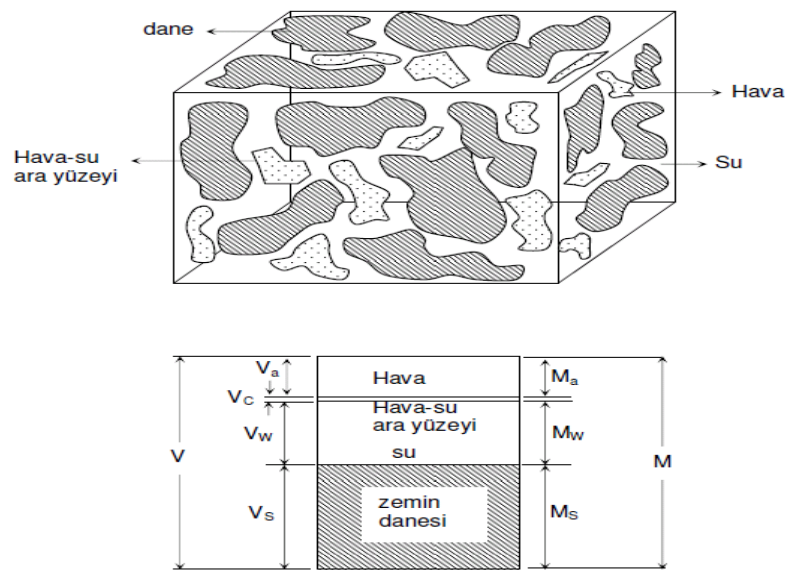
2.1. Suya Doymun Olmayan Zeminlerin Genel Özellikleri

Zeminler -klasik zemin mekaniğinde katı(dane), sıvı (su) ve gaz (hava) dan olmak üzere 3 fazdan bir araya geldiğı kabul edilmektedir.[7] Fakat son zamanlarda yapılan araştırmalar sonucunda hava-su arayüzeyi (contractile skin) olarak adlandırılan çok ince bir katman tespit edilmiş ve bu katmanın önemli bir rolünün olduğı anlaşılmıştır. Hava-su arayüzünü, fiziksel mekanizmaya dâhil edip 4. faz olarak kabul görmesi sağlanmıştır. Hava fazı sürekli olduğıunda; hava-su ara yüzeyi zeminle etkileşime geçerek zeminin mekanik davranışında etkinlik sağlamaktadır [5]. Bu etkinliğe neden olan hava-su arayüzünün zeminde çekme gerilmesi oluşmasına neden olmaktadır. Hava su arayüzeyi Gerilme etkisi altında zemin ile kenetlenmiş bir şekilde- elastik membran gibi hareket eder [8].

Kesit olarak modelini düşünürsek- zemin içerisindeki boşlukların %98'i ve üstü su ile dolmuşsa hava kabarcıkları zemindeki boşluklarda ayrı konumda olurlar. Ve bu duruma doymun zeminler demektediriz çünkü hava kabarcıklarının birbirleri arasında bağlantıları doğrudan olmadığı için bu- durumdaki zeminler suya doymun zeminler olarak isimlendirilir. Eğer su doluluk oranı boşluk miktarının %95 veya daha altında bir hacmi kaplıyorsa, zemindeki boşluklarda yer alan hava kabarcıkları ayrı konumdan çıkıp sürekli konuma geçip doymun olma özelliklerini kaybeder ve -bu durumdaki zeminleri doymun olmayan zeminler diye adlandırırız. [1].

Genel olarak doymun olmayan zeminler de 3 fazlı olarak kabul edilmektedir. Fakat bu 3 faza ek olarak son dönemlerde yapılan çalışmalar neticesinde 1 faz daha ilave edilmiştir bu faz ise su hava ara yüzeyi (contractile skin) dir, bu faz çok ince bir tabakadır. Kütle hacim ilişkisini doymun olmayan zeminler için incelerken, bu 4. Faz dediğimiz su hava arayüzeyi (contractile skin) çok küçük bir hacim oluşturduğu için ayrı bir ölçüm yapılmadan su fazının bir parçası olarak ele alınır. Fakat su hava ara yüzeyi gerilme durumları incelendiğinde elastik membran gibi bir davranış göstererek bir çekme gerilmesi oluşturmaktadır ve bundan dolayı su fazından bağımsız bir faz olarak ele alınır [5].

Şekil 2.1 zeminin dört fazlı olduğu durumdaki idealleştirilmiş zemin diyagramını doymun olmayan bir zemin elemanını temsili olarak göstermektedir.



Şekil 2.1. Suyu doymun olmayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi [9].

Şev stabilitesini oluşturan zemin kütlesindeki su içeriğinin değişiminde şev stabilitesi -büyük oranda etkilenmektedir. Ancak sadece su içeriği tek başına şevin yenilmesine neden olmayabilir bir şevin dengesizliğine yol açabilecek birçok olası faktör vardır. Genel olarak şevler, eğimi oluşturan zemindeki boşluk suyu basıncında herhangi bir değişiklik olmadıkça şev stabil kalır. Zemin kütlesindeki boşluk suyu basıncındaki değişimler genellikle iklim şartlarına bağlı su sızmasının bir etkisidir. Genellikle eğim dengesizliğini tetikleyen toprağın üst kısmındaki negatif boşluk suyu basıncındaki azalmalardır [5].

Sığ heyelanların en önemli nedenlerinin yağmur fırtınası sonrası matrik emilimin azalması ve su tablasının üstündeki pozitif basınçların artması olduğu ve zeminin kayma dayanımı artması, zeminin matris emme oranı artması, emmenin daha az negatif hale gelmesi durumlarında zeminde kopmalar daha hassas hale gelir. [10].

Bu bilgilerden yola çıkarsak, şev stabilize analizlerinden en doğru modellemeyi oluşturabilmek için emme sonuçlarının kullanması zorunlu hale gelmektedir. Normal doymuş zemin mekaniği metodları ile problemleri çözmek gerçekçi sonuçlar vermez. Özellikle şev stabilitesini sağlamak için bir drenaj sistemi uygulandığında negatif boşluk suyu basıncı kalıcıdır ve güvenlik faktörünü oldukça etkiler.

Zeminleri doymun olup olmadığını incelerken en önemli unsur yeraltı su seviyesidir. Bu seviye hakkında biraz bilgi verirsek; zemin kesitinin ne kadarlık kısmının -doymun olduğunu ve ne kadarlık kısmının doymun olmadığını bize göstermektedir ve boşluk suyu basıncının negatif ve pozitif kısımlarını belirler, yeraltı su seviyesinin altındaki durumlarda boşluk suyu basıncı pozitif değer üstündeki kısımda ise negatif değer almaktadır. Bu seviyenin üzerinde kalan kısma vadoz bölge (vadoz zone) denir ve bu bölgenin içerisinde zeminin cinsine göre değişen aralıklarla Yeraltı su seviyesinin hemen üzerindeki 1m ile 10m arası doymunluğu %100 ve yakın değerlerde olan kısma ise kapiler sınır denir, kapiler sınırın üzerindeki bölgede zemin cinsine bağlı olarak genellikle %90-%20 arası doymunluğa sahip hava ve su fazları sürekli halde bulunan iki fazlı bölge gelmektedir bu bölgenin üzerinde ise hava fazının sürekli su fazının süreksiz olduğu kuru bölge gelmektedir. [11].

Aşağıdaki şekil 2.2 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Doygun zemin ve doymamış zemini ayıran bölgeler [11].

Suya doymun olmayan zeminlerin incelenmesi geotekniğin üç ana başlığı altında incelenirler. Bunlar, sızma, kayma mukavemeti ve hacimsel değişim.

Suya doymun olmayan zeminlerin inceleme alanları ise;

- Şişen zeminler
- Vadoz bölgede; atıkların hareketi, kirlenme, katı atık depolama sahaları inşası
- Yoğun yağışlardan sonra meydana gelen şev stabilite problemleri
- Gevşek sıkıştırılmış dolguların stabilite problemleri
- İstinat yapıları arkasında yer alan kohezyonlu dolgular
- Vadoz bölgede yer alan temellerin taşıma kapasitesi [12] olarak sıralayabiliriz.

Suya doymun olmayan zeminlerin bugüne kadar problemlerin çözümüne parametrelerinin dahil edilmemesinin ana nedeni bu problemlerin çözümünde kullanılan temel parametre olan matrik emme gerilmesi ölçümü için gerekli olan teknolojinin son 20 yıl içerisinde gelişmiş olmasıdır ve bu teknolojiyle denklemler kabul görmüştür. Günümüzde geliştirilmiş olan teknoloji sayesinde suya doymun olmayan zemin mekaniği üzerine çalışmalar daha da derinleşmektedir ve gerçeğe daha yakın sonuçlar çıkmaktadır.

2.2. Zemin Emme gerilmesi kavramı ve ölçülmesi

Doğada her zeminin bir dengesi mevcuttur ve zeminin su muhtevası zemine etki eden yüklerle, yüzeyde terleme ve buharlaşma nedeniyle oluşan gerilmelerle ve kapiler kuvvetlerle kendi içerisinde bir denge halindedir. Ancak zeminde zamanla veya aniden oluşan su içeriği değişimleri ya da titreşimlerden dolayı -sistem yeni bir denge oluşturma eğiliminde olmaktadır. Yeni bir dengenin oluşması ise zemindeki suyun hareketi ile oluşur. Suyun hareketine neden olan kuvvet ise zemin su emmesidir. Zemindeki serbest su ile denge halinde olan bir zeminde su emmesi sıfırdır. Zeminin su içeriği sıfır olduğu -durumlarda ise su emilimi hızlı oluşur. Zemin üzerine yapılacak herhangi bir yüklemde ise boşluk suyu basıncını arttıracak için su emme miktarında azalma olmaktadır [13].

.Zemin emme gerilmesi genel olarak zemindeki bağımsız enerji olarak düşünülebilir.[14] Buna ilave olarak Ridley, 1993 yılında yaptığı çalışmada zemin emme gerilmesini buharlaşma yoluyla zemin matrisinden bir su molekülünü çıkarmak için gerekli enerjinin ölçümü olarak tarif etmiştir [15]. Bu bağımsız enerji zemindeki kısmi buhar basıncına göre ölçülebilir.[16] Buradan toplam emme miktarı, zemin suyunun serbest enerjisiyle ilişkili durumdadır. Ayrıca matrik emme ve ozmotik emme ise sistemdeki serbest enerjinin bileşenleridir. Toplam emme; matrik emme ve ozmotik emme olarak adlandırılan bileşenlerin toplamı olarak ifade edilmektedir.

Bu yukarda zemin su emmesi hakkında bahsettiğimiz çalışmaların geçmişine gittiğimizde 1900'li yılların başından itibaren emme basıncı teorik olarak incelenmiş ve doygun olmayan zeminlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerine ait çalışmalara İngiltere de 1948 yılında Croney ve Coleman tarafından başlanmıştır. 1965 yılında zemin mekaniği üzerine gerçekleştirilen sempozyumda Aitchison emme gerilmesini sayısal olarak tanımlamış ve termodinamik denklemlerden elde edildiğini ortaya koymuştur. Zemin emme gerilmesi, genellikle zemin suyunun serbest enerji durumu olarak ifade edilir [5]. Söz konusu bu enerjinin, zemin suyunun kısmi buhar basıncına göre ölçülebileceği Richards tarafından 1965 yılında ortaya konmuştur [5, 9].

Termodinamik yasalardan yararlanarak zemin emme gerilmesi ve kısmi boşluk suyu buhar basıncı arasındaki ilişkiler denklem 2.1 ile hesaplanır [9]

$$\psi = -\left(\frac{RT}{v_{w0} \cdot \omega_v}\right) \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.1)$$

Denklemde,

ψ = Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme (kPa)

R = Genel gaz sabiti [8,31432 J/(mol K)]

T = Mutlak sıcaklık [273,16 + t^0 + (K)]

t^0 = Sıcaklık (0C)

v_{w0} = 1/Suyun özgül hacmi [(m³/kg), (1/ ρ_w)]

ρ_w = Suyun özgül hacmi ($t^0 = 20$ C⁰ de $\rho_w = 998$ kg/m³)

ω_v = Su buharının moleküler kütlesi (18,016 kg/mol)

$\bar{u}_v$ = Kısmi boşluk suyu buhar basıncı

$\bar{u}_{v0}$ = Aynı sıcaklıktaki saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı

Denklem 2.1’de yer alan $\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}$ oranı rölatif nem olarak isimlendirilir. Referans sıcaklık olarak $t^0 = 20$ C⁰ alındığında sabit değer olarak 135022 kPa elde edilir. Denklem aşağıdaki ifadeye dönüşür.

$$\psi = -135022 \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.2)$$

Doygun olmayan zeminin toplam emme gerilmesi (ψ), pratik olarak matrik emme (kılcal emme) ve ozmotik emme (eriyik emme) olarak adlandırılan parametrelerin toplamı olarak elde edilir.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.3)$$

Denklemde,

$(u_a - u_w)$ = Matrik emme

u_a	= Boşluk hava basıncı (kPa)
u_w	= Boşluk suyu basıncı (kPa)
π	= Osmatik emme (kPa)

Boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanan matrik emme doygunluk derecesi, dane dağılımı ve onun yansıttığı boşluk çapı dağılımının bir başka deyişle boşluklarda oluşan menisklerin etkinliğinin bir göstergesidir [1]. Matrik emme, buharlaşma gerçekleşmeden zemin boşluk suyunu ortamdan uzaklaştırmak için gerekli enerji olarak da tanımlanır [9]. Buna göre metrik emme, çevresel değişimlerden doğrudan etkilenir.

Daha sonraki bölümlerde de gösterileceği üzere, bir şev mevcut olan stabilitesini yeraltı su seviyesinde meydana gelen artış nedeniyle matrik emme basıncında gerçekleşen azalma sonucu kaybedebilir. Yeraltı suyu seviyesindeki artışa neden olabilecek sebeplerden bir tanesi çevresel bir etki olan yoğun yağış olabilir.

Ozmotik emme ise, boşluk suyu içerisindeki eriyik tuzların saf su ile olan basınç farkı olarak tanımlanır [17]. Osmatik emme boşluk suyu içerisinde yer alan tuz içeriği ile direk olarak ilgilidir ve zeminin doygunluk derecesi azaldıkça ozmatik emmenin önemi artar. Osmatik emmede meydana gelen değişim, zeminin mekanik özelliklerini etkiler [1].

Osmatik emme, her ne kadar zeminlerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olsa da, ozmatik emmede meydana gelecek değişimler, matrik emme değişimleri kadar önemli değildir. Aynı zamanda zeminin toplam emme basıncını ozmatik emme olmadan tanımlamak daha kolay olduğundan ve zemin içerisinde yer alan çözünmüş tuz miktarı genel olarak az olduğu için ozmatik emme ihmal edilir ve zemin toplam emme basıncı matrik emmeye eşit olur.

Zeminlerde çeşitli nedenlerle meydana gelen kimyasal kirlenme sonucunda boşluk suyunda yer alan tuz oranında önemli bir artış meydana geliyorsa ya da tuz oranı yüksek olan zeminlerde yapılan inşaatlarda ozmatik emme hem klasik zemin mekaniği analizlerinde hem de doymun olmayan zemin mekaniği analizlerinde dikkate alınmalıdır [12]

Suya doygun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerinin hesaplanması için zemin emme gerilmesinin belirlenmesi gerekmektedir. Ozmatik emmenin deneysel olarak ölçümü hem zor hem de zeminlerde genel olarak tuz oranı sonucu etkileyecek boyutta önemli bir etkiye sahip olmadığından, hesaplarda kullanılacak emme gerilmesi matrik emmeye eşit kabul edilmektedir.

Doygun olmayan zeminlerde efektif gerilmeleri bulabilmek için boşluk suyu basıncı ve boşluk hava basıncının bilinmesi gerekmektedir. Bunun için de en etkili yol doğrudan ölçüm yapmaktır [1].

Suya doygun olmayan zemin parametrelerinin belirlenmesi niversite ve araştırma laboratuvarlarında gerçekleşmekte ancak hem kolaylık açısından hemde ekonomik açıdan suya doygun şekilde deneyler daha çok yapılmaktadır [18]

Ancak matrik emme basıncının belirlenmesi, doygun olmayan zeminlerin gerilme durumu değişkenlerinin belirlenebilmesi için çok önemlidir. Bununla beraber pratik olarak negatif su basıncının kontrolü ve ölçülmesi büyük kısıtlamalar içermektedir. Bu kısıtlamaları engellemek için Hilf 1956 yılında eksen kaydırma tekniğini geliştirmiş ve bu yöntemden matrik emme basıncının ölçülmesinde yararlanılmaya başlanmıştır [11]

Eksen kaydırma tekniği, doygun olmayan zeminlerde matrik emme basıncını, yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskler kullanılarak lme ve kontrol altında tutma işlemidir [17]

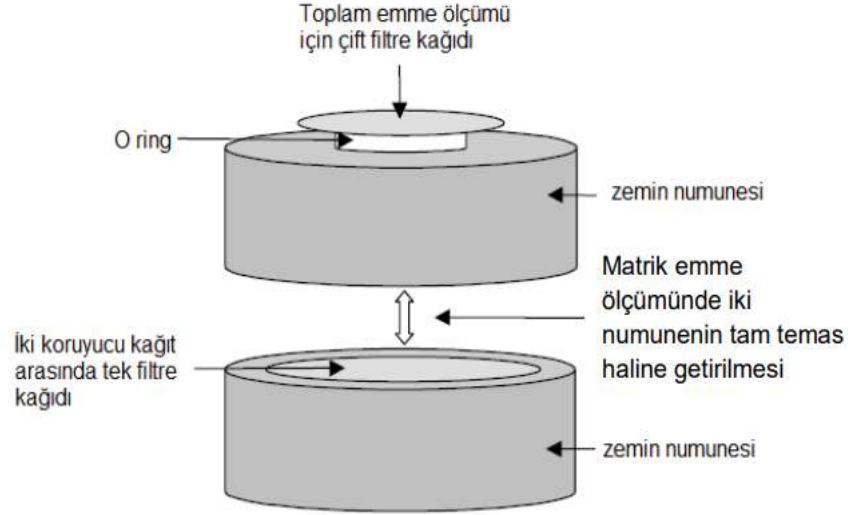
2.2.1. Zeminlerde Emmenin llmesi

Zemin emmesi tansiyometreler, basınç plakası vb. gibi doğrudan ölçüm yöntemleri veya filtre kâğıdı metodu, saykrometre tekniği, elektriksel ve termal iletkenlik ölçerler gibi dolaylı ölçüm yöntemleri olmak üzere pek çok yöntemle belirlenebilmektedir. Ancak her yöntemin kendine özel kısıtlamaları bulunduğu ve hiçbir yöntemin tüm şartlar altında yeterli sonuç vermeyebileceği ifade edilmiştir [19] Dolaylı lm aletleri çoğunlukla yüksek matrik emme değerlerinin ölçülmesinde kullanılmakta ve kk negatif basınçların ölçülmesinde daha az güvenilir olduğu

düşünülmektedir. Diğer taraftan doğrudan ölçüm aletleri genellikle zemin su içeriğinin yüksek olduğu durumdaki daha düşük emme değerlerini ölçebilmektedir. Bu nedenle bir zeminin ıslak durumdan, çok kuru duruma kadar değişen koşullardaki tüm emme basıncı değerlerinin ölçülebilmesi için doğrudan ve dolaylı ölçüm yöntemlerinin birlikte kullanılması gerekebilmektedir. Örneğin, mevsimsel su içeriği değişimlerine bağlı olarak, bir zeminin kuru olduğu dönemde emme basınçları yüksek olacağından, doğrudan ölçüm aletleri fonksiyonlarını yerine getiremeyeceklerdir. Ancak, zeminin düşük matrik emme değerlerine sahip olduğu yüksek su içeriği koşullarına dönmesi ile doğrudan ölçüm teknikleri tekrardan kullanılabilir [17].

2.3. Filtre Kâğıdı Metodu

Zemin emme ölçüm tekniklerinden biri olan filtre kâğıdı metodu 1920'li yıllarda Avrupa'da ortaya çıkmış ve 1937'de Gardner ile Birleşik Devletlerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu zamandan beri filtre kâğıdı metodu kullanılmakta ve pek çok araştırmaya konu olmaktadır. Farklı tür materyaller filtre kâğıdı, emme ölçüm cihazı ve farklı deneysel teknikler olarak kullanılmış, bunlarla filtre kâğıdının kalibrasyonu ve zemin örneğinin emme ölçümü yapılmıştır [7]. Filtre kâğıdı metodu, hem toplam hem de matrik emme basıncının ölçülmesinde kullanılabilen ucuz ve oldukça basit bir laboratuvar deney yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Filtre kâğıdı metodu ile sağlıklı olarak 0,01–100 MPa arasındaki emme basınçları ölçülebilmektedir [7]. Toplam emme basıncı, zemin numunesinin üst yüzeyine yerleştirilen ince bir ring üzerine üst üste konan iki adet filtre kâğıdı yardımıyla ölçülür (Şekil 2.3). Burada esas olan filtre kâğıtlarının zemin numunesine temas etmemesidir. Eğer toplam emme basıncı ile birlikte matrik emme basıncı da ölçülecekse belirli formdaki zemin numuneleri kullanılmaktadır.

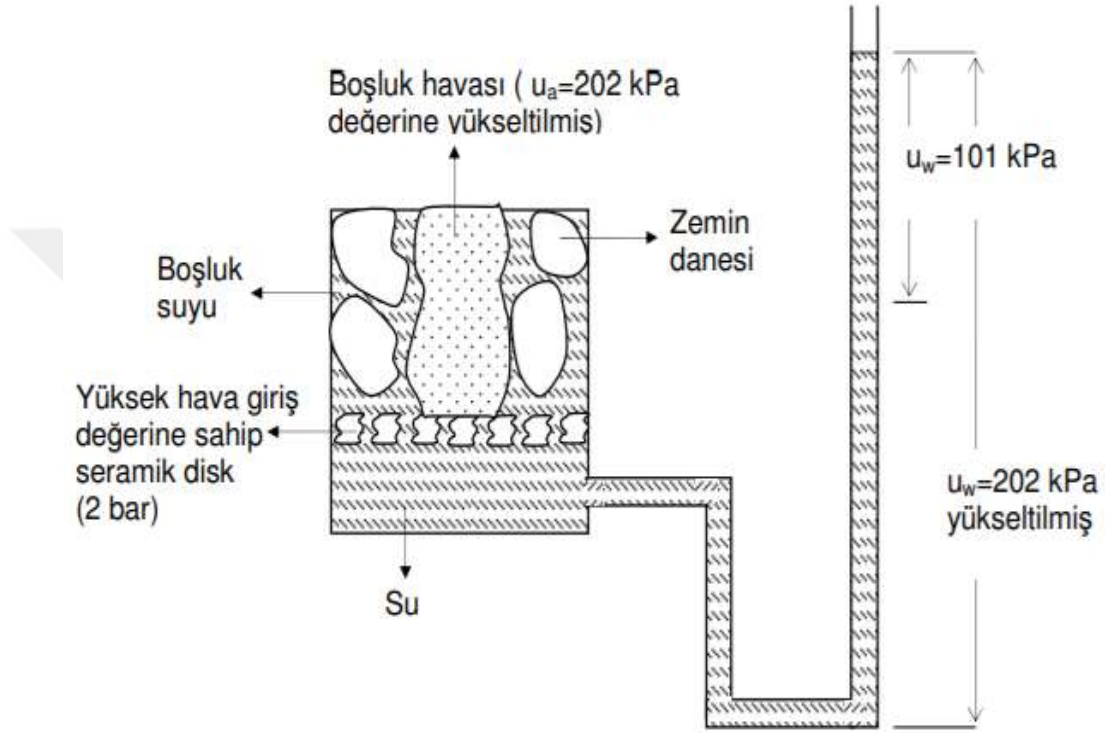


Şekil 2.3. Toplam ve matrik emmenin filtre kağıdı yöntemi ile ölçümü [20].

2.4. Eksen Kaydırma Tekniği

Eksen kaydırma tekniği, doymamış zeminlerin aşırı matrik emmeye maruz bırakılarak yapılan en temel laboratuvar deneylerinin başında gelmektedir. Doymamış zemin örneklerinde boşluk suyu basıncı, yüksek hava giriş limitlerine sahip olan seramik diskler kullanılarak, ölçümler yapılmaktadır. Şekil 2.4’de deney düzeneğini sembolize edilmiştir. Deney düzeneğinde ölçülmesi istenen zeminin numunesinin altına seramik bir disk yerleştirilmektedir. Seramik diskte hava boşluğu kalmayacak şekilde suya doygün hale getirilir ve bir su tablası üzerinde yüzer, diskin doygün durumda olmasının nedeni suyu geçirip havayı geçirmemesini sağlamak için bu işlem uygulanır. Bu sayede numunede bulunan boşluk suyu, ortam basıncının artmasıyla seramik diskten geçerek drene olmaktadır. Yükselen hava basıncı ise seramik diskten geçemediği ve numune içindeki boşlukların hava ile dolduktan sonra- havanın basıncı sabit değere ulaşmaktadır. Bu sistemde iki farklı ölçüm ile matrik emme değerlerine ulaşılır ilk ölçüm seramik disk altındaki suyun atmosfere açık olması durumu, bu durumda uygulanan hava basıncı numune içerisindeki boşluk suyunu tam drene edene kadar ulaşılan hava basıncı (u_a) değeri bize matrik emmeyi verir. İkinci ölçüm şekli ise seramik diskin altında kalan su bölmesinin drenaja kapalı olma durumudur, burada hava basıncı uygulanıp dengeye ulaştığında boşluk suyu basıncı değeri ölçülüp ($u_a - u_w$) matrik emme elde edilir.

Eksen kaydırma yönteminde seramik diskten suyun içerinden çözünerek bir miktar hava difüzyon yoluyla geçmektedir. Ancak bu difüzyon miktarı zeminin hava basıncını etkileyecek boyutta olmamaktadır, yalnızca çıkan su miktarında ölçüm hatalarının oluşmasına neden olmaktadır. Difüze olan havanın ölçümü için iki büretten oluşan kapalı sistem kullanılır, bu sistemle belli sürelerde sızan hava miktarları ölçülür ve düzeltmeler yapılır.



Şekil 2.4. Boşluk suyu basıncının ölçülmesi için kullanılan Eksen kaydırma yöntemi [5]

Laboratuarda kullanılan ve toplam emme, matrik emme ve ozmatik emme değerlerini kontrol eden ve ölçen yöntemler Tablo 2.1 de özetlenmiştir [1].

Tablo 2.1. Emme Ölçümü İçin Geliştirilmiş Yöntemler [1].

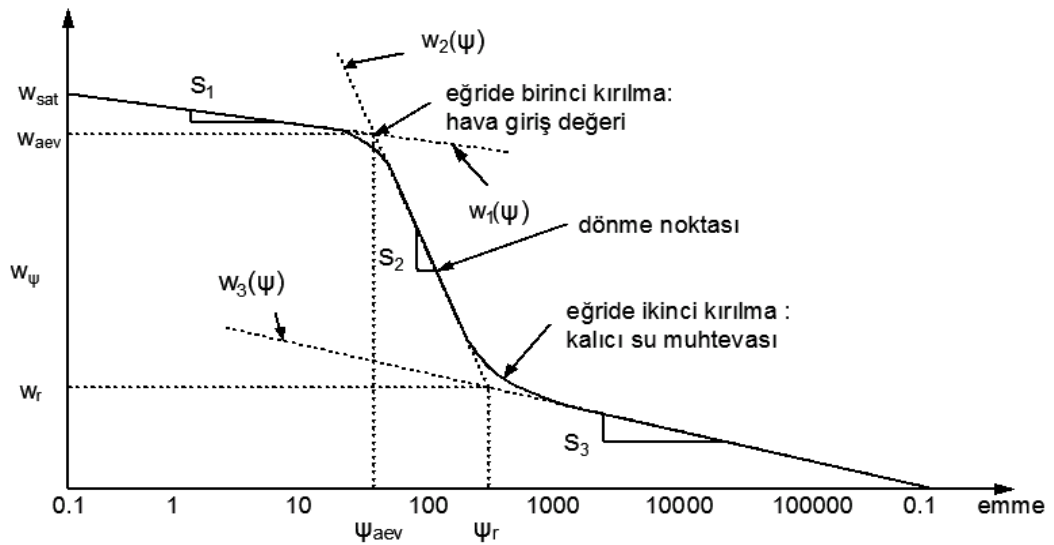
ÖLÇÜM SİSTEMİ	EMME	ÖLÇÜLEN DEĞİŞKEN	ÖLÇÜM ARALIĞI (kPa)	DENGE SÜRESİ	ÖLÇÜM YERİ	KAYNAK
Transistörlü psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-70000	Dak.	Lab/ Arazi?	Truong& Holden, 1995
Termokupl psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-8000	Dak.	Lab/ Arazi?	Brown& Collins, 1980
Çiğlenme noktası psikrometresi	Toplam	Bağıl nem	30000-300000	Dak.	Lab	ASTM
Süzgeç kağıdı (temas yok)	Toplam	Su içeriği	400-30000	7-14 gün	Lab/ Arazi	Al-Khafaf& Hanks, 1974
Süzgeç kağıdı	Matrik	Su içeriği	30-30000	7 gün	Lab/ Arazi	Gardner, 1930
Emme plakası	Matrik	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Saat	Lab	Dineen, 2000b
Basınç plakası/memb	Matrik	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-10000	Saat	Lab	Hilf, 1951
Tansiyometre	Matrik	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Dak.	Lab/ Arazi	Soil Mois.Equ.
TDR Sonda	Matrik	Su içeriği	0-1500	Saat	Lab/ Arazi	Cook & Fredlund, 1998
Eriyik tansiyometresi	Matrik /Toplam	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-1500	Saat	Lab/ Arazi	Bocking& Fredlund, 1979
Emme sondası	Matrik /Toplam	Boşluk suyu gerilmesi	0-1500	Dak.	Lab/Arazi?	Ridley& Burland, 1993
Alçı blok	Matrik	Elektiriksel direnç	30-30000	Hafta	Lab/Arazi	Aitchison&Richard, 1965
Isıl iletkenlik	Matrik	İletkenlik	0-300	Hafta	Lab/ Arazi	Sattler& Fredlund, 1989
Sızma	Ozmatik	İletkenlik	30-3000	Saat	Lab	Manheim, 1966
Süzme	Ozmatik	İletkenlik	30-3000	Saat	Lab	Manheim, 1966

2.5. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi (SWCC, Soil-Water Characteristic Curve)

Zemin su karakteristik eğrisi, suya doymun olmayan zeminlerin bir takım fiziksel özelliklerini belirlemesi açısından önemli bir duruma sahiptir. Zemin su karakteristik eğrisi kısaca tanımlarsak zeminlerin emme değerleri ile su içeriği değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu eğri, zeminlerin geçirimlilik, makaslama dayanımı, hacimsel değişim, hacimsel su içeriği, sıkışabilirlik ve gerilme durumu gibi birçok özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [1].

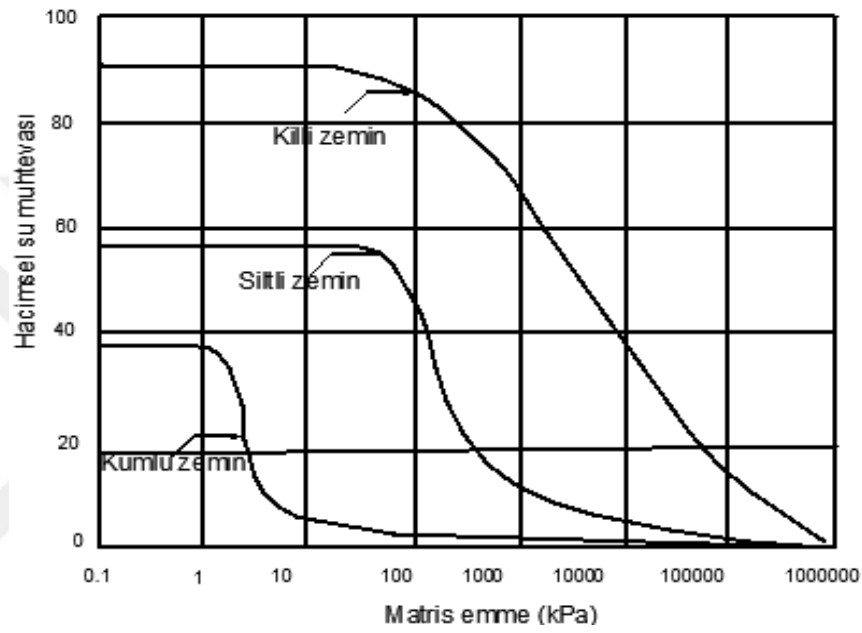
Doygun olmayan zeminlerdeki su içeriği zeminde mevcut olan matrik emmenin bir fonksiyonudur. Zeminin su içeriği ile emme gerilmesi arasındaki bu ilişki her hacimsel su muhtevasına karşılık gelen emme gerilmesinin gösterildiği; zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC, Soil-Water Characteristic Curve) olarak bilinen eğri ile ifade edilebilir [17] Laboratuvar çalışmaları doymun olmayan zeminlerin özellikleri ile zemin-su karakteristik eğrisi arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir [5].

Şekil 2.4 tipik bir zemin su karakteristik eğrisini göstermektedir. Eğrinin yatay eksenini matrik emme değerlerini gösteriyorken, dikey eksenine gravimetrik su muhtevası, hacimsel su muhtevası veya doymunluk derecesi yazılabilir. Doymunluk derecesinin kullanımı hava giriş değerini kesin göstermesi ve doymun olmayan zeminin özelliklerini yakından kontrol eden değişken olması sebebiyle mantıklı olmaktadır [1].



Şekil 2.5. Zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) özellikleri [1].

Şekil 2.5’de de gösterdiği üzere zemin su karakteristik eğrisinden elde edilen iki önemli değer; rezidüel doyumluk ve hava girişi basıncı değeridir. İki parametre de SWCC yardımı ile grafiksel olarak hesaplanır. Emme değeri arttıkça zeminin bir süre doyumluğunu koruduğu daha sonra boşluklardaki havanın sürekli hale gelmesiyle hızla doyumluğun azaldığı, daha sonra da rezidüel yani kalıcı doyumluğa ulaştığı görülmektedir. Şekil 2.6 zemin su karakteristik eğrisinin farklı zemin türlerine göre değişimini göstermektedir [15].

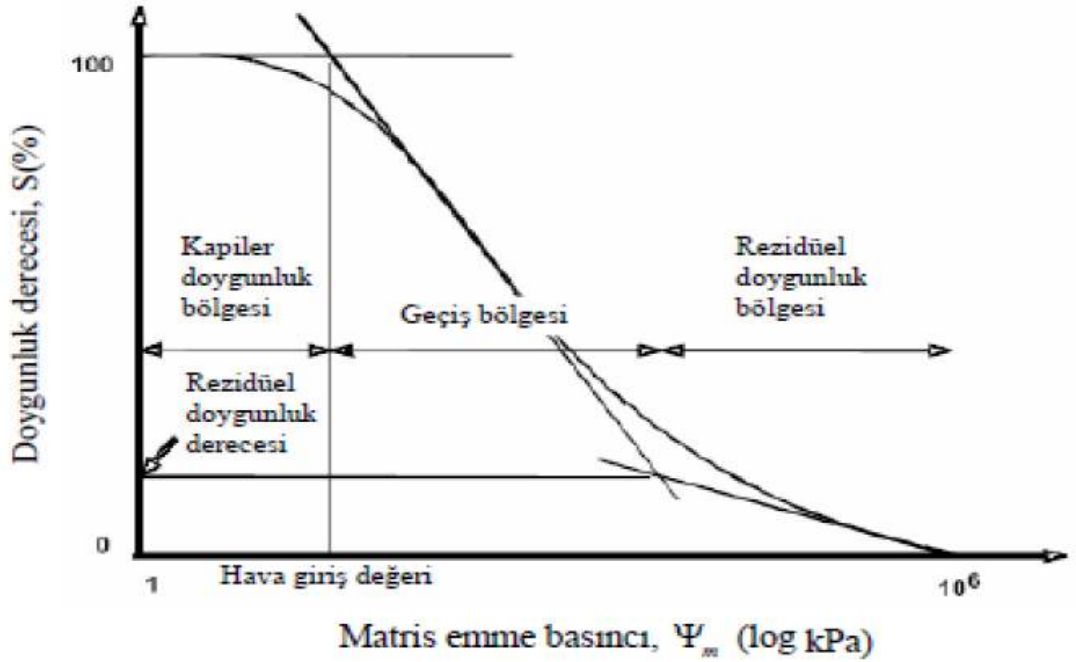


Şekil 2.6. Zemin su karakteristik eğrisinin zemine göre değişimi [15].

Şekil 2.6’da doymun bir zemin numunesinin, kuruma aşamalarını gösteren zemin su karakteristik eğrisi verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere bu eğri üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci bölge, kapiler doyumluk bölgesi olarak isimlendirilir ve matrik emme gerilmesinin uygulanması ile başlar; zeminin hava giriş değerlerine gelene kadar devam eder. İkinci bölge, geçiş bölgesidir. Bu bölge iki ayrı alt bölge olarak da gösterilebilir (Birincil geçiş bölgesi ve ikincil geçiş bölgesi olarak) [21]. Geçiş bölgesi zemin hava giriş değerinden başlar ve rezidüel (kalıcı) doyumluk derecesine kadar devam eder. Son bölge ise rezidüel (kalıcı) doyumluk bölgesidir. Bu bölgede rezidüel doyumluk derecesinden başlar ve doyumluk derecesinin sıfır olması sonucunda tamamlanır [22].

Zeminin hava giriş değeri, zemin içerisindeki en büyük boşluklardan suyun drene olması sonucunda havanın boşluklara girmesini sağlayan emme gerilmesidir. Bu

değer SWCC kullanılarak elde edilir. Öncelikle $S=100$ noktasından emme gerilmesi eksenine (x eksenine) paralel bir doğru çizilir. Bu doğru ile geçiş bölgesindeki doğrusal kısım uzatılarak kesiştirilir. Elde edilen değer hava giriş değeridir (Şekil 2.4). Rezidüel bölgeye geçişteki doygunluk derecesine *rezidüel doygunluk derecesi* denir. Eğer SWCC eksenleri doygunluk derecesi yerine su muhtevası değerini içeriyorsa, bu nokta *rezidüel (kalıcı) su muhtevası* olarak da isimlendirilir. Hava giriş değerinde olduğu gibi grafik yöntemle belirlenir. Öncelikle SWCC 1-000-000 (10^6) kPa değerine kesecek x eksenini (emme basıncı) ile birleştirilir Şekil 2.6’da gösterildiği gibi. Geçiş bölgesinde hava giriş değerini belirlemek için kullanılan lineer doğru, rezidüel doygunluk bölge içerisine kadar uzatılır. 1-000-000 (10^6) kPa değerini kesen lineer doğru ile geçiş bölgesi lineer doğrusunun kesişim noktasının, y eksenindeki (doygunluk derecesi) değeri rezidüel doygunluk derecesini verir.



Şekil 2.7. Doymuş bir zeminin kuruma aşaması [22]

Şekil 2.7’de SWCC kapiler doygunluk bölgesi çok küçük bir değer aralığındadır. Geçiş bölgesi ise zemin tipine ve özelliklerine bağlı olarak doygunluk derecesinde geçiş bir yelpazeye hükmeder, fakat emme basıncı değeri özellikle kumlu numunelerde daha az değişimler gösterir. Rezidüel doygunluk derecesi değerinin altında ise doygunluk derecesinde yavaş bir azalma gözlemlenirken, emme gerilmesi değerlerinde büyük artışlar oluşmaktadır.

SWCC elde etmek için farklı zemin türleri ve deneysel yöntemler kullanılarak çok sayıda çalışma yapılmıştır [2,22] Deneysel çalışmaların yanında araştırmacılar parametrik modeller ve denklemler de geliştirmişlerdir [23]. GeoStudio paket programında da doymamış zeminler üzerinde yapılacak analizlerde kullanılabilen Van Genuchten (1980) ve Fredlund ve Xing (1994) denklemleri teorik çalışmalarda en sık kullanılanlarıdır [24,25].

Van Genuchten zemin su karakteristik eğrisini elde edebilmek için Denklem 2.4' u önermiştir.

$$\theta_w = \left[\frac{\theta_s}{1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n} \right]^m \quad (2.4)$$

θ_w : Hacimsel su muhtevası

θ_s : doymun hacimsel su muhtevası

Ψ : Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme

a , n ve m : Uygun parametrelerdir. a değerinin birimi kPa^{-1} , n ; değeri zeminin boşluk büyüklüğü dağılımı ilgili, m ; değeri SWCC simetrisi ile ilgilidir. 'm' değeri genellikle $(1-1/n)$ ile $(1-1/2n)$ arasında değerler alabilmektedir [9].

Çok kullanılan denklemlerden biri olan Fredlund ve Xing denklemi Eşitlik 2.5 da verilmiştir. Bu model geliştirilirken araştırmacılar Van Genuchten modelinde kullanıldığı boşluk dağılımından yararlanmışlardır.

$$\theta_w = C(\psi) \left[\frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (2.5)$$

θ_w : Hacimsel su muhtevası

θ_s : doymun hacimsel su muhtevası

Ψ : Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme

e : Euler sayısı (2,71828)

$C(\psi)$: hacimsel su muhtevasının sıfır olduğu durumdaki düzeltme faktörü

a , n ve m : Uygun parametrelerdir. a hava giriş katsayısı, eğrideki dönme noktasına bağlı, n ; geçiş bölgesindeki doğrunun eğimi, m ; rezidüel su muhtevası ile ilgilidir.

2.6. Sızma Teorisi

Sızmayı zemine sulama yoluyla yada yağmur nedeniyle zemin üzerinde biriken ya da akan suyun zemin içerisine geçmesi olarak tanımlayabiliriz. Zemine etki etmekte olan su miktarı, zeminin sızma miktarını aşarsa akış ya da göllenme oluşturur. Ayrıca bu suların zemine sızması yer altı su seviyesinde yükselmeye ya da tünnek su tablaları oluşturmaya neden olmaktadır, bu durumdan dolayı da zeminin matrik emmesinde azalma ya da boşluk suyu basıncında artış oluşmaktadır.

Suya doymamış koşullardaki şevlerin yağış etkisindeki duraylılığına etki eden sızma durumunu kavramak için birçok teorik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar en yaygın olanı Pradel ve Raad (1993), Green-Ampt (1911) eşitliğini referans alan bir denklem önermişlerdir [26]. Bu denklemde yağış süresi ve yoğunluğu, zeminin ıslak cephe emme basıncı ve zeminin hacimsel su içeriği dikkate alınmaktadır. Denklem bize zeminin Belirli bir derinliğine (z_w) kadar doymunlaşması için gereken süreyi vermektedir ve denklem;

$$T = \frac{\mu}{k_s} \left[z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \quad (2.6)$$

şeklinde olmaktadır.

Denklemde;

T = yağış süresini,

μ = zeminin başlangıç ve doymun hacimsel su içerikleri arasındaki farkı,

k_s = zeminin doymun haldeki geçirgenliğini,

z_w = derinliği,

ψ = zeminin doymunlaşmadan hemen önce sahip olduğu negatif boşluk suyu basıncını ifade etmektedir.

Pradel ve Raad (1993), zeminin z_w derinliğine kadar doymunlaşması için; oluşacak yağış yoğunluğu (I), sızma oranından (v) büyük yada eşit olması ve yağışın süresi ise

T_{min} süresinden daha uzun olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bu göre sızma oranı;

$$v = k_s \left(\frac{\psi_f + Z_w}{Z_w} \right) \quad (2.7)$$

ile belirlenir.

Elde edilen denklemlerde $T=T_{min}$ ve $I_{min}=v$ alıp, (2.6) ve (2.7) denklemlerini birleştirerek (2.8)'yi önermişlerdir.

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} \left[Z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + Z_w}{\psi} \right) \left(\frac{\psi + Z_w}{Z_w} \right) \right] \quad (2.8)$$

I_{min} minimum yağış yoğunluğunu

T_{min} sızmanın meydana gelmesi için minimum yağış süresini belirtmektedir.

2.7. Doymun Olmayan Zeminlerde Gerilme Durumu Değişkenleri

Terzaghi'nin efektif gerilmeler üzerinde yaptığı çalışmalardan sonra, zeminlerin mühendislik özelliklerini belirleyen temel yaklaşım efektif gerilmelerin yorumlanması olmuştur [26] Birçok mühendislik problemin çözümünde efektif gerilmelerin hesaplanması büyük bir öneme sahiptir. Doymun durumdaki zeminlerde Terzaghi, efektif gerilmeyi toplam gerilme ile boşluk basıncı arasındaki fark olarak tanımlamış ve zemin iskeletinde aktif olan gerilme olarak adlandırmıştır [27]

Son— dönemlerde bu alanda yapılan çalışmalar neticesinde, suya doymun olmayan zeminlerde de efektif gerilme yaklaşımının uygulanabileceği tespit edilmiştir. Ancak, doymun zeminlerden farklı olarak, suya doymun olmayan zemin mekaniğinde önemli olan iki temel parametre vardır. Bunlardan ilki, boşluk hava basıncı, ikincisi de matrik emmedir. Bishop bu iki önemli farklılığı göz önünde bulundurarak 1959 yılında efektif gerilmeyi denklem 2.9 ile tanımlamıştır.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + x(u_a - u_w) \quad (2.9)$$

σ' : Efektif gerilme

σ : Toplam gerilme

u_a : Boşluk hava basıncı

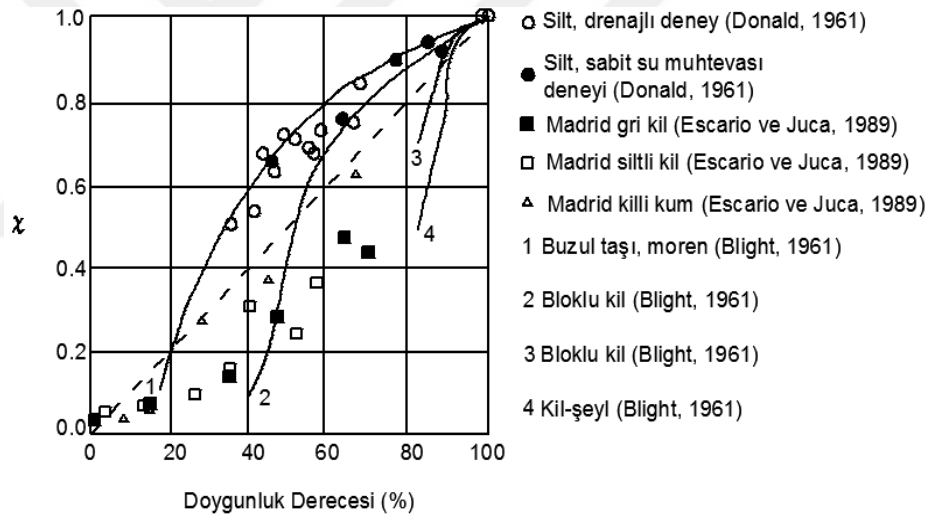
u_w : Boşluk suyu basıncı

$u_a - u_w$: Matrik Emme

x : Efektif gerilme katsayısı

Efektif gerilme katsayısı (x) zeminin doygunluk durumuna göre değişiklik göstermektedir. Suyla tam doygun zeminlerde; $x=1$ değerini almakta, boşluk hava basıncı sıfır değerinde olur ve boşluk suyu basıncı pozitif durumda görülmektedir [28]. x değerinin değişimi doygunluk derecesiyle doğru orantılı olmaktadır. Buradan Terzaghi tarafından tanımlanan efektif gerilme formülüne ulaşmaktayız.

Şekil 2.8 x ile doygunluk derecesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir [11] Matrik emme basıncı ölçülmüş numunelere Kesme kutusu ya da üç eksenli deneylerin uygulanmasıyla elde edilen Şekil 2.8’de zeminin doygun durumda iken $x = 1$ ’e eşit olduğunu göstermektedir. $x = 0$ olduğunda Zemin kuru duruma gelmektedir ve bu durumda boşluk suyu basıncı da sıfıra gelmektedir.



Şekil 2.8. x ile doygunluk derecesi arasındaki ilişki [11].

Sonraki araştırmalar sonucunda suya doygun olmayan zemin mekaniğinde kullanılan gerilmeler tensörleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. efektif gerilme tensörü Denklem 2.10’de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

denklem 2.11 de ise Matrik emme tensörü gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Doygun olmayan zeminlerde gerilme durumu ile ilgili çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmalardan bir tanesi de doygun olmayan zeminlerde gerilme durumu değişkenlerini emme gerilmesi karakteristik eğrisiyle tanımlamaktadır. Lu ve Likos efektif gerilmeyi Denklem 2.12 ile tanımlar [29].

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (2.12)$$

Denklemde,

σ' : Efektif gerilme

σ : Toplam gerilme

u_a : Boşluk hava basıncı

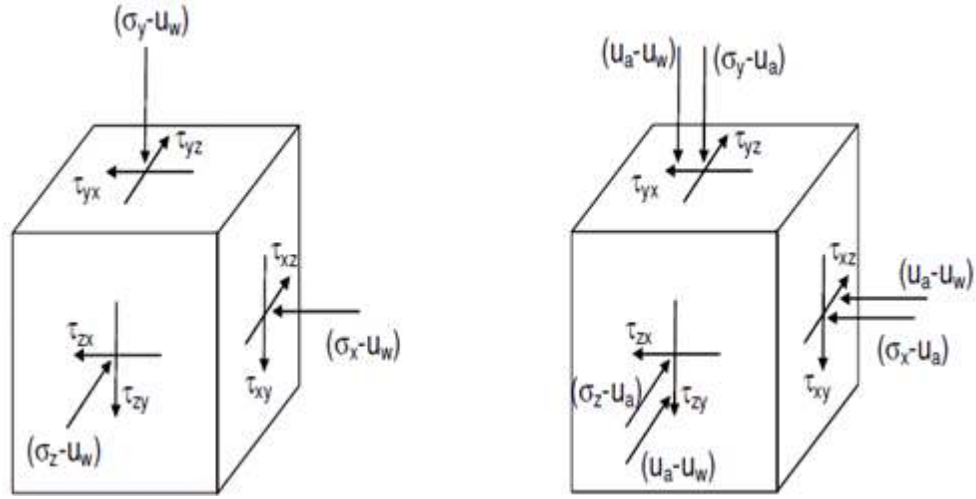
σ^s : Emme gerilmesi karakteristik eğrisi fonksiyonu

σ^s için tanımlanan fonksiyonlar aşağıda verilmektedir.

$$\sigma^s = (u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (2.13)$$

$$\sigma^s = f(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \geq 0 \quad (2.14)$$

Şekil 2.9'da doygun ve doygun olmayan durumlarda kübik elemana etkiyen gerilmeler gösterilmektedir [9].



Şekil 2.9. Doygun ve doymamış zeminler için gerilme durum değişkenleri [9].

2.8. Doygun Olmayan Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti bağımsız gerilme durum değişkenleri ile ifade edilebilir. Gerilme durum değişkenlerinden herhangi iki tanesi kayma mukavemeti denklemi için kullanılabilir. $(\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w)$ gerilme değişkenleri kullanılarak Denklem 2.15 elde edilmiştir. [30].

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.15)$$

Denklemde $(\sigma - u_a)$ net normal gerilmeyi, $(u_a - u_w)$ matris emmeyi ve son olarak ϕ^b ise matris emmeye bağlı olarak kayma mukavemeti artış miktarını gösteren açı olarak tanımlanır. Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti için önerilen denklem, doymuş zeminlerin kayma mukavemeti denkleminin genişletilmiş halidir. Vanapalli ve ark. (1996) doymuş olmayan zeminin kayma mukavemetini bir zemin-su karakteristik eğrisi boyunca farklı doymuşluk derecelerinde su alanının değişimini tanımlayarak elde edebilmek için fiziksel bir model geliştirerek Denklem 2.16'yı önermişlerdir. Bu denklem ile istenilen her matris emme değişimi için kayma mukavemeti belirlenebilir.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[(\tan \phi') \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (2.16)$$

Denklemde;

θ = hacimsel su içeriği,

θ_r = rezidüel hacimsel su içeriği

Θ_s = doymun hacimsel su içeriğini ifade etmektedir.

Kayma mukavemeti, zemin mekaniğinde karşılaşılan birçok problem incelenirken karşımıza çıkmaktadır. Zemin mekaniğinde yapılan araştırmaların önemli kısmı bu alanda yapılmış olmasına rağmen bugün de tümüyle anlaşılamayan yanları vardır [1].

Suya doymun zeminlerin kayma mukavemetini denklem 2.17 de Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre tanımlanmaktadır.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \phi' \quad (2.17)$$

Denklemde;

τ = kayma mukavemeti,

c' = efektif kohezyon,

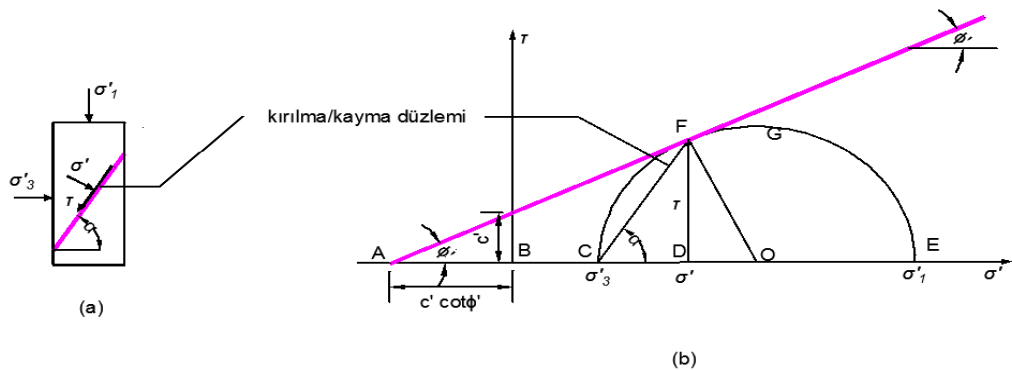
ϕ' = efektif kayma mukavemeti açısı,

σ_n = toplam normal gerilme,

$(\sigma_n - u_a)$ = efektif gerilme,

u_w boşluk suyu basıncı olarak tanımlanmaktadır.

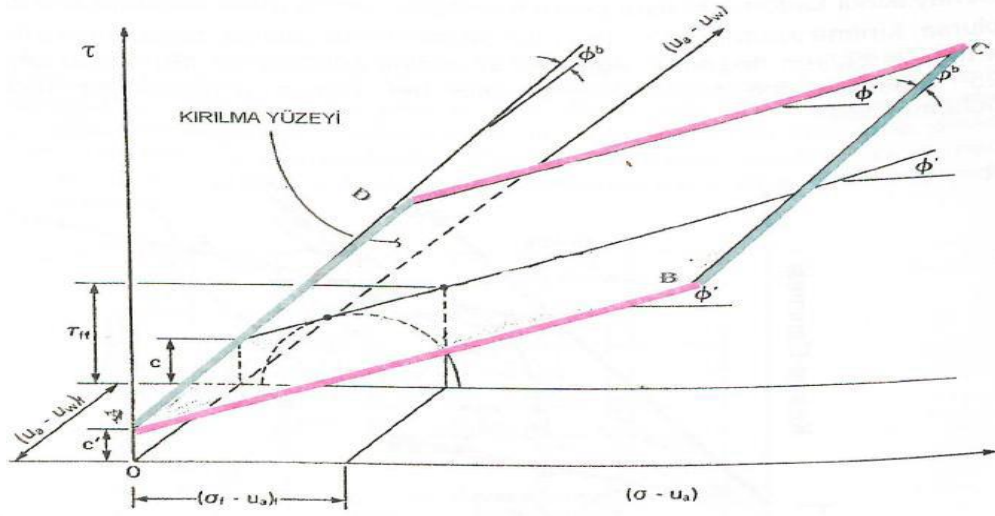
Kayma mukavemetinde matrik emme suya doymun olmayan zeminlerde efektif gerilmeye ek bir değişken olarak belirlemektedir. Ancak suya doymun zeminlerde ise sadece efektif gerilme ile tanımlamak yeterlidir.



Şekil 2.10. Mohr- Coulomb kırılma hipotezine göre kırılma durumu [1].

Fredlund tarafından 1978 yılında aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.18)$$



Şekil 2.11. Suyu doymun olmayan zeminlerde kırılma yüzeyi [1].

Suyu doymun olmayan zeminlerde; deneysel çalışmalardan ya da geliştirilmiş amprik formüllerle zeminin kayma mukavemetini belirleyebiliriz yukarıdaki iki seçenektten biriyle yola çıkılır bunlardan deneysel çalışmaları seçersek bize kesme kutusu deneyini ya da modifiye edilmiş üç eksenli basınç deneyini yaptırmayı gerekmektedir. Bu deneylerde ise suya doymun olmayan zemin parametrelerinden kritik olan emme gerilmesi ölçümü ve zemin-su karakteristik eğrisi belirlenip kesme mukavemeti hesaplanır.

Suyu doymun olmayan zeminlerde kullanılan amprik formüller için yapılan çalışmalar ise kayma mukavemeti eşitlikleri ya da zemin indeks özellikleri ile düzeltilmiş kayma mukavemeti eşitliklerinden oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalardan parametreleri elde etmek en doğru yol olur, ancak her zaman bunun için olanaklar olmayabilir ve amprik formüller kullanılabilir, ancak deneysel değerler numuneye özgü olduğundan daha özgün sonuçlar vermektedir.

Tablo 2.2 her iki yöntemle yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiş eşitlikleri göstermektedir [22].

Tablo 2.2. Doygun Olmayan Zeminlerin Kayma Mukavemeti Eşitlikleri [22].

<i>Geliştiren</i>	<i>Durum</i>	<i>Kayma Mukavemeti Eşitlikleri</i>
Fredlund (1978)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$
Shen ve Yu (1996)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{1}{1 + (u_a - u_w) a} \right) \tan \phi'$
Shen ve Yu (1996)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{1}{\cot \alpha + \frac{(u_a - u_w)}{\beta_1}} \right) \tan \phi'$
Vanapalli (1996)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + [(u_a - u_w) \theta^K] \tan \phi'$
Vanapalli (1996)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [\tan \phi' \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)]$
Oberg ve Sallfors (1997)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [(\tan \phi') (s)]$
Bao (1998)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \zeta (\tan \phi')$ $\zeta = \frac{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$
Khalili ve Khabbaz (1998)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) [(\lambda' (\tan \phi'))]$ $\lambda' = \left\{ \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right\}^{-55}$
Rassam ve Cook (2002)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \psi \tan \phi' - \varphi (\psi - \psi_e^\beta)$ $\varphi = \frac{\psi_r \tan \phi' - \tau_{sr}}{(\psi_r - \psi_e)^\beta}$, $\beta = \frac{\tan \phi' (\psi_r - \psi_e)}{\psi_r \tan \phi' - \tau_{sr}}$
Tekinsoy (2004)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \tan \phi' (\psi_e - P_{at}) \ln \left[\frac{\psi + P_{at}}{P_{at}} \right]$
Lee (2005)	Düzeltilme	$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)] \tan \phi'$ eğer $(u_a - u_w) \leq \text{AEV}$ $\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \text{AEV}] \tan \phi' + [(u_a - u_w) - \text{AEV}] \theta^K [1 + \lambda (\sigma - u_a)] \tan \phi'$ eğer $(u_a - u_w) \geq \text{AEV}$ (AEV : Hava Giriş Değeri)
Garven ve Vanapalli (2006)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + [(u_a - u_w) \theta^K] \tan \phi'$ $K = -0,0016 I_p^2 + 0,0975 I_p + 1$
Vilar (2006)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \frac{(u_a - u_w)}{[a + b(u_a - u_w)]}$ $\frac{1}{a} = \tan \phi'$, $b = \frac{1}{c_{ult} - c'}$

2.8.1. Zeminlerde Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlerin kayma mukavemeti değerlerini tespit etmek için çeşitli arazi ve laboratuvar deneyleri –mevcuttur. Yaygın şekilde kullanılan laboratuvar deneyleri serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi, kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi, laboratuvar Veyn deneyi ve basit kesme deneyi olarak sıralanabilmektedir.

2.8.2. Serbest basınç deneyi

Çoğunlukla konsolide olmuş doygun normal killi zeminlerde kullanılan zeminin kayma direncinin belirlenmesinde bize yardımcı olan bir deney olup, deney neticesinde zemine ait kayma direncini oluşturulan Mohr dairesinden

hesaplanabilmektedir. Deneyde genellikle 38mm çapında ve 76mm uzunluğunda silindirik formda kohezyonlu zemin örnekleri kullanılmaktadır.

Serbest basınç deneyi hızlı sonuç verdiğinden dolayı yaygın olarak tercih edilen bir deneydir. Serbest basınç deneyi, deformasyon kontrollü ve gerilme kontrollü olmak üzere iki şekilde yapılmakta olup, çoğunlukla birim boy kısalması dikkate alınan deformasyon kontrollü olanı tercih edilmektedir. Deneyin süresi 5-10 dk arasında tamamlanması gerekmektedir, bunun nedeni, deney süresince numunenin su içeriğinde değışiklikler olabileceğinden kaynaklıdır. Deney esnasında dikkat edilmesi gereken ayarlamalar ise birim uzunluk kısalması %0.5/dk-%2/dk arası olmalıdır. Deneye son verilmesi için boy kısalması ilk boya göre %20'ye ulaştığında ya da yüklemde yük azalmaya başladığında yani kırılmanın oluştuğı vakit deney sonlandırılır. [3]

Deneydeki en büyük eksenel yükleme değeri bize $-(q_u)$ 'yu yani serbest basınç dayanımını vermektedir. $\tau = c_u = q_u/2$ bağıntısı bize Drenajsız kayma mukavemetini verir. Bu deneyde hücre basıncının sıfıra eşit olduğu durumda drenajsız - konsolidasyonsuz üç eksenli basınç deneyinin (UU) özel bir türü olarak adlandırılabilir. Bu deney için numuneler suya doymun normal konsolide halinde olmalı, çatlak veya fisür içermemelidir. Aksi durumda elde edilen sonuçlar gereğı yansıtmayacaktır [31].

2.9. Şevlerin Stabilesi (Duraylığı)

Şevler genel manada “yatay ya da mevcut arazi yüzeyi ile belirli bir açı yapan kitle” olarak tanımlanabilir [5]. Geoteknikte temel ilgi alanlarından olan şev stabilesi problemleri, bütün dünya üzerinde gerek maddi gerekse ölümle sonuçlanan zararlara yol açabilmektedir. Depremler ve sellerle beraber en çok maddi ve can kaybına neden olan doğal felaketlerden şev hareketleri, deprem ve sel gibi felaketler ile daha sık aralıklarla karşılaşıldığı için toplumları daha fazla etkilemektedir. Son dönemde meydana gelen iklimsel değışiklikler şev hareketlerinin etkinliğinin artmasına neden olmaktadır [4]. Bu nedenle şev hareketlerinin kontrol altına alınabilmesi ile ilgili çalışmalar geoteknik alanında yaygınlaşmaktadır. Afet İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre, Türkiye topraklarının yüzde 25'i olan 194 000 kilometrekare heyelan

tehlikesiyle karşıya karşıyadır ve bu topraklarda yaşayan yaklaşık 8 milyon insan risk altındadır. Bu tüm nüfusumuzun yüzde 11'i demektir [32]. Yukarıdaki araştırmalar bize şev hareketlerinin dünyada ve ülkemizde önemli maddi zararlara ve can kayıplarına yol açtığını göstermektedir. Bu durum karşısında şev hareketlerinin neden olduğu olaylarda nedeni ve sonuçlarını araştırmak ve tedbirini almak için sayısal verilerle açıklamak geoteknik alanında çalışan mühendislere en temel görev olarak düşmektedir.

Bu kapsamda konunun daha anlaşılır olması için şev hareketlerini irdelememiz gerekmektedir. Şev hareketlerinin oluşumunu; zemindeki mevcut dayanımın kendisine karşı oluşan kuvvetleri karşılayamayıp yenik düşmesi diyebiliriz. Şevin kayma dayanımındaki azalma ya da zemin ortamında ki zamanla veya aniden ortaya çıkan gerilmelerde oluşan artış sonucunda şevde stabilite problemi meydana gelebilmektedir. Şev stabilitesi problemlerine neden olan bazı etkenler şu şekilde sıralanabilir.

- İklimsel değişiklikler
- Zeminde meydana gelen şişme ve büzülme sonucu oluşan yıpranma
- Depremler ve volkanik hareketler
- Kazık çakma, trafik gibi yapay titreşimler
- Zeminin aşınması ve yıpranması
- Doygun olmayan zeminin su ile dolması
- Yeraltı su seviyesinde meydana gelen değişiklikler
- Şev üzerindeki sürşarj yüklerinin artması
- Bitki örtüsünün kaldırılması veya doğal yollarla kaybı
- Yağış rejimindeki değişiklikler

Yukarıda sıralanan etkenlerden anlaşıldığı üzere şev hareketleri hem doğal etkenler sonucu oluşabildiği hem de insanlardan kaynaklı yapay etkilerle de meydana gelebilmektedir. Özellikle yeraltı suyunda ve zeminin doygunluk miktarında meydana gelen değişimler ve titreşimler (depremler) ve bunların etki süreleri şevlerin hareketini etkileyen en önemli faktörlerdir. Konumuz gereği zemindeki su etkisi altında olan şevlerden bahsedeceğiz. Ülkemizde meydana gelen şev göçmelerinin önemli bölümünün bahar aylarında görülmesi, bahar aylarında yoğun yağışların

gerçekleşmesinin sonucudur [2]. Bu önemli durumlar göz önünde bulundurulduğunda şevlerin stabilitelerinde yoğun yağış miktarları ve dönemleri belirleyici olmaktadır. Ayrıca en önemli durum olan yeraltı su seviyesindeki değişimlerin ölçülüp takip edilmesi mühendislik açısından daha sağlıklı çözümler sunulmasına yardımcı olmaktadır.

2.9.1. Şev Hareketine Etki Eden Faktörler

Şev hareketleri uzun zamanlarda biriken- veya ani gerçekleşen, sürekli bir olaylar dizisi olarak karşımıza çıkar. Bu yüzden, şev hareketleri tek ve kesin bir nedene bağlanamayabilir, birçok neden bir anda veya zamanla gerçekleşmiş olabilir.

Şev hareketlerinde diğer mekanik problemlerindeki gibi denge kaybı, ortamın mevcut dayanım gücünün göçmeye çalışan kuvvet ve gerilmelerden az olması durumunda belirir. Bu denge kaybına neden olan etkenlerin neler olduğunu Tablo 2.3 deki gibi sıralayabiliriz. Dengenin kaybolması, sadece göçmeye çalışan gerilmelerdeki artış olmayabilir, kayma mukavemetindeki azalmalar sonucu da görülebilir veya her iki durum aynı anda görülebilir.

Tablo 2.3. Şev Hareketinin Etkenleri [7]

I. Gerilme Artışı	II. Kayma Muk. Azalması
a) şev üstündeki yüklerin artışı b) Topuğa yakın bölgeden malzeme kaybı c) Deprem, diğer titreşim ivmeleri d) Boşluk veya çatlak suyu basınçlarının artışı e) Çekme çatlaklarına su dolması f) Giderek kırılma olayı g) Yamaç dışındaki su düzeyinde düşme	a) Aşınma ve yıpranma b) Süreksizlik yüzeylerinde su basıncı c) Kuru ortamda ani ıslanma, yapının bozulması d) Zaman ve hareket sonucu direnç kaybı e) Killi tabakanın şişmesi f) Çatlak ve boşluklarda oluşan buz mercleklerinin erimesi g) Çimentolayıcı malzemenin yıkanması

Tablodaki etkenlerin şev hareketlerini tetiklemesinde, büyük bir bölümünü doğa olaylarının oluşturduğu ve çevresel faktörlerin etkisinin büyük olduğu görülmektedir. Bu faktörlerin etki derecesinin bilinmesi, hareketin topoğrafik kapsamı

ve süresi hakkında sağlıklı tahminlerin yürütülmesi açısından alınacak tedbirlerde gerek projelendirme, gerekse inşaat esnasında bir çok avantaj sağlayacaktır.

2.9.2. Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması

Son dönemde yamaç hareketleri, sınıflandırma olarak yeni bir boyut kazanmıştır. Günümüzde yapılan kazılar ve dolgular büyük topoğrafik alanlara hükmetmektedir bundan dolayı artık- insan eliyle yapay- yamaçlar oluşturulmaktadır ve bu yapay yamaçlar doğal olan yamaçlardan farklı- sorunlar çıkartmamaktadır. Günümüzde “yamaç” ve “heyelan” terimleri daha çok doğal yamaçlar için kullanılırken, “şev” ve “kayma-göçme-gelme” terimleri yapay yamaçlar olanlar için kullanılır.

Mühendislik amaçlı şevlerde meydana gelen hareketler şev duyarsızlığı olarak adlandırılırlar [23]. Şev hareketleri olarak tanımladığımız kitle hareketleri toprak zeminde, kayada ve geçiş malzemesinde görülen ve günümüzde son olarak beş ana gruba ayrılmıştır. Tablo 2.4’teki kitle hareketleri sınıflandırması Varnes (1978) tarafından yapılmıştır [4]. Varnes’ten sonra farklı araştırmacılar tarafından başka sınıflandırmalar yapılmış olsa da Varnes’in sınıflandırması geçerliliğini korumaktadır.

Tablo 2.4. Şev Göçmeleri İçin Varnes (1978) Mühendislik Sınıflandırması [4].

<i>HAREKET TİPİ</i>		<i>İNCE DANELİ</i>	<i>İRİ DANELİ</i>
Düşme		Zemin düşmesi	Moloz düşmesi
Devrilme		Zemin devrilmesi	Moloz devrilmesi
Dönel Kayma		Zemin göçmesi	Moloz göçmesi
Düzlemsel Kayma	Az Birimli Çok Birimli	Zemin blok kayması Zemin kayması	Moloz blok kayması Moloz kayması
Yanal Yayılma		Toprak yayılması	Moloz yayılması
Akma		Zemin akması (sünme)	Moloz akması
Karmaşık		İki veya fazla tip hareketin karışımı	

a) Düşme

Düşmeler dik yamaçlarda kütlelerin koparak yerçekimi ivmesinin etkisiyle düşmesidir ve hareket eden kütleler genelde birbirlerine etkileri yok denecek kadar azdır.

Düşmeler, bir yamaçtan aşağıya hızla düşen, yol boyunca hızla yuvarlanan ve hatta havada savrulan zemin veya kaya parçalarından oluşan yamaç yenilmeleridir [24].

Düşmede beliren ivme yer çekimi ivmesine eşit olmaktadır [4].

Şev hareketine neden olan faktörleri sıralarsak erozyon, süreksizliklere uygulanan su ve buz basınçları, insanların yapmış olduğu kazılar, su yataklarının değiştirilmesi, ısı farklılıklarının yüksek olduğu bölgeler, patlatmalar ve yoğun yağışlarda şev duvarlarının aşınmaları olarak sıralanabilir.

b) Devrilme

Şevin tersi yönde eğimli ve devamlılığı yüksek süreksizlerin neden olduğu düşey elemanların belirli bir dönme noktası üzerinde domino etkisiyle kazı boşluğuna devrilmesi şeklinde gelişen bir duraysızlık mekanizmasıdır [23].

Bir zemin veya kaya kitlesinin yamaç dışına, kendi ağırlık merkezinin altında bir nokta veya eksen boyunca öne doğru dönmesidir [4].

Devrilme hareketinin nedeni blokların ağırlık merkezi vektörünün taban kesit alanı dışına çıkmasıdır. Ayrıca kütlelerin en/yükseklik oranı devrilmeye etki eder. Devrilmeler genellikle kaya kütlelerde meydana gelmektedir.

Şev duyarsızlığına neden olan devrilme çeşitleri ise blok devrilmesi, bükülme devrilmesi ve her ikisinin birlikte gerçekleştiği blok-bükülme devrilmesi olmak üzere üç çeşit devrilme türü vardır.

c) Kayma

Bir kitlenin belirgin kayma yüzeyi, yüzeyleri veya ince ve yoğun bir makaslama bölgesi boyunca şevde yamaç aşağı hareketidir [4]. Kayma hareketi bir düzlemde olursa kayan kütlede pek deformasyonlar oluşmaz, birden fazla düzlemde olursa kütlede büyük şekil değişimleri ve kırılmalar olur. Kaymalar ötelenmeli ve dönel (dairesel) olmak üzere iki şekilde kütle hareketleri gerçekleştirir. Dönel kayma türü hem yamaçlarda hem de

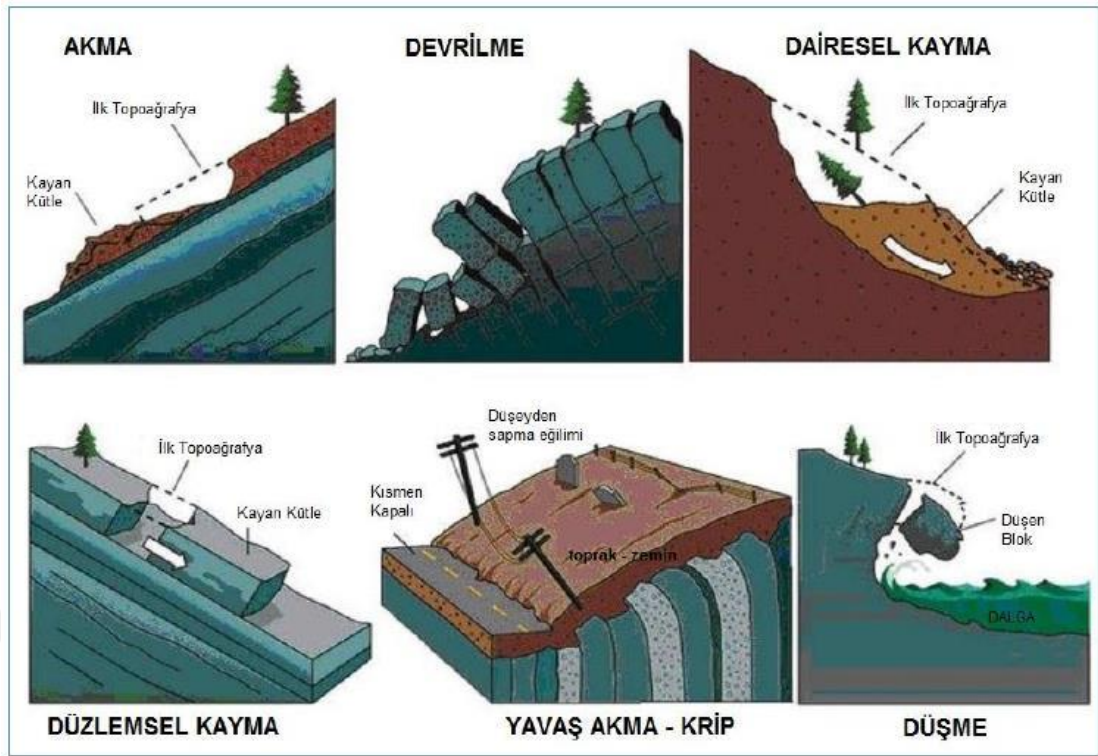
yapay şevlerde en çok karşılaşılan kayma türüdür. Dönel kayma kütleinin bir merkez çevresinde moment yaratacak biçimde dönme hareketi göstermesidir. İleri derece-de ayrıışmış kayalarda, akarsu yataklarında mevcut olan şevlerde, zeminlerde açılmış şevlerde, atık alanlarında ve dolgularda karşılaşılr. Ötelenmeli kayma hareketi ise öncelikle tabakalı kayaçlarda ve ortamda tek veya daha fazla süreksizlik yüzeyinin bulunması durumunda oluşur, duraysızlığın kaynağı kayma dirençlerindeki farklılıktır. Dayanımı düşük süreksizliklerin oluşturduğu tek veya birden fazla zayıflık düzlemi üzerinde gelişen duraysızlıklardır. Ötelenmeli kayma kama tipi, düzlemsel ve çok yüzeyli kayma tipleri olarak kendi arasında 3'e ayrılır.

d) Yayılmalar

Çekme ve makaslama kuvvetlerinden dolayı oluşan deformasyonların birlikte izlendiği hareket türüdür. Belirgin bir kayma yüzeyi veya bölgesi bulunmaz. Kayaçlarda, altta oluşan kilin kayma direncindeki azalma ile üstteki kayaç tabakalarının yanlara doğru hareket etmesi, hassas killerde ise titreşim, su etkisi gibi nedenlerle ortamın sıvılaşıarak yayılması sonucu oluşur. Kohezyonlu zemin ya da kayalarda gerçekleşen bu hareket, üstteki sağlam tabakanın alttaki yumuşak tabaka-da batması sonucunda oluşan zemin yayılmalarıdır. Yanal kaya yayılması ve yanal zemin yayılması olmak üzere iki çeşidi vardır [25].

e) Akmalar

Akma, sertleşmemiş toprak malzemesinin viskoz (kıvamlı) bir sıvı şeklinde yamaç aşağı hareket etmesi olarak tanımlanabilir. Kayma gerilmeleri yüzeylerinin çok sık ancak kalıcı ve belirgin olmadığı, sürekli ve üç boyutlu bir harekettir. Hareket eden kitle içinde hız dağılımı akışı yavaş olan bir sıvıyı andırır [4]. Kayma birim deformasyonlarını sadece kayma düzlemi boyunca değil, her yönde göstermiş olması kaymalardan farkı olarak belirir [24]. Akma hareketlerini tetikleyen en önemli nedenler yamaç eğimi ve su içeriğidir [23].



Şekil 2.12. Şev hareketleri [33]

2.9.3. Şev Stabilitesi Analizleri

Şev stabilite analizleri için en çok kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki limit denge analizleri ve ikincisi ise sonlu elemanlar yöntemidir. Tabi ki bunların dışında da başka yöntemler çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Ancak en yaygın olarak kullanılan bu iki yöntemdir. Bu yöntemlerden ilkin limit denge analiz yöntemini ele alırsak bir şevdeki var olan olası sayısız göçme yüzeyinin en düşük (kritik) olanın göçme yüzeyine göre güvenlik faktörünü oluşturmaya dayanır. Ve ikinci yaygın yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi ise göçme yüzeyi deformasyon analizi sonucunda oluşur. [34]

Sonlu eleman analizinde mukavemet azaltma ya da yerçekimi kuvvetini artırma metoduna gidilir. İlk metoda göre kayma açısı ve kohezyon şevin göçme anına kadar azaltılır. İkinci metot da ise yerçekimi kuvveti şevin göçmesi yaşanacak şekilde artırılır. Bu iki yöntemi kıyasladığımızda sonlu elemanlar yöntemi gerilme konturları ve deplasmanları bize verdiği için limit denge analizinden daha avantajlıdır [21]

Limit denge analizine dayanarak geliştirilmiş olan bazı yöntemler Tablo 2.5’de özetlenmiştir.

Tablo 2.5. Limit Denge Analizine Göre Geliştirilmiş Bazı Yöntemler.

Yöntem	Moment Dengesi	Kuvvet Dengesi	Dilimler Arası Normal Kuvvet (E)	Dilimler Arası Kesme Kuvveti (X)	İçsel Kuvvetlerle İlgili Kabuller
Ordinary ya da Fellenious	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Dilimler arası kuvvet yok
Basitleştirilmiş Bishop	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Yatay
Basitleştirilmiş Janbu	Hayır	Evet	Evet	Hayır	Yatay
Spencer	Evet	Evet	Evet	Evet	Sabit eğim
Morgenstern-Price	Evet	Evet	Evet	Evet	Değişken, kullanıcıya bağlı
Janbu	Evet	Evet	Evet	Evet	Yatay düzeltme faktörü
Sarma	Evet	Evet	Evet	Evet	$X = C + E \tan \phi$

Bu metotların hepsi dilim metodunu esas almakta Fellenius tarafından geliştirilmiş bir metottur ve farklı kabuller yapılmaktadır. Dilim metodunda kayma yüzeyi üzerinden bize en uygun sonuçları verecek kalınlıklarda düşey dilimlere ayırmak, homojen olmayan, boşluk suyu basıncı ve kayma yüzeyinin üniform olmamasından tüm kütleyi baz almak durumuna göre daha ayrıntılı bir analiz sunmaktadır. Yukarıdaki tabloda tüm yöntemlerde bir zemin kesiti dikkate alınarak dilimleme metoduyla ele alınmış ve yöntemlerin formülasyonu uygulanmıştır ve anlaşılacağı gibi her metodun kabulleri ve kullandığı ihtiyaç parametreleri değişkenlik göstermektedir. Çözüme tüm metodlar götürmekte ve elimizde hangi metodun verisi var ise onunla çözüme gitmemiz yeterli olacaktır.

Sev stabilitesi analizlerinde Suyu doymun olmayan zeminler için yapılmış bazı çalışmalar aşağıdaki tabloda gösterilmektedir. Yapılan bu çalışmaların temeli suya doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre geliştirilmiş kayma dayanımı teorileridir.

Tablo 2.6. Doygun Olmayan Zeminlerde Şev Stabilitesi Üzerine Yapılmış Bazı Çalışmalar.

<i>Çalışmanın Adı</i>	<i>Araştırmacıların Adı</i>	<i>Çalışma nın Yılı</i>
Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes (<i>Şev stabilitesi üzerinde yağmurun etkisi</i>)	Oh & Vanapalli	2010
Methods of slope stability analysis in unsaturated soils (<i>Doyunmuş zeminlerde şev stabilite analiz metodları</i>)	Fredlund & Rahardjo	1993
Studies of rainfall-induced slope failures (<i>Yağış kaynaklı şev kaymaları</i>)	Rahardjo, Leong & Rezaur	2002
The research of slope stability based on unsaturated soil theory (<i>Doygun olmayan zemin teorisine göre şev stabilitesinin araştırılması</i>)	Shao, Zhang & Lv	2014
Impacts of unsaturated zone soil moisture and groundwater table on slope instability (<i>Doygun olmayan bölge toprak nemi ve yeraltı suyu tablasının şev duraysızlığına etkileri</i>)	Ray, Jacobs & Alba	2010
Effect of initial suction on stability of unsaturated soil slopes (<i>İlk emmenin doyun olmayan zemin şevlerinin stabilitesi üzerindeki etkisi</i>)	Mossaad, Gomaa & Hussien	2013
Slope stability analysis for Champlain sea clay deposits using the mechanics of unsaturated soils (<i>Doygun olmayan zeminlerin mekanizmasını kullanarak Champlain deniz kili yatakları için şev stabilitesi analizi</i>)	Oh, Vanapalli & Sheikhtaheri	2014
Effects of soil suction on slope stability at Notch Hill (<i>Notch Hill'de toprak emmenin şev stabilitesi üzerindeki etkileri</i>)	Krahn, Fredlund & Klassen	1989

2.10. Doygun Olmayan Zeminlerde Şev Duraylılığına Yağış Etkisinde Etki Eden Parametreler (Yağış Etkisi Altında Şevlerin Duraylılığı İle İlgili Yapılan Çalışmalar ve Çıkan Sonuçlar)

Dünya geneline bakıldığında yağışlı mevsimlerde suya doyun olmayan zeminlerdeki şevlerin duraylılığını kaybettiği görülmektedir. [1] Suya doyun olmayan zeminler üzerinde sızmanın etkisinin kavranılması adına, şev duraylılığına etkisi incelenmelidir. Bu bağlamda yağış etkisine maruz kalan şevler hakkında çok sayıda çalışmalar yapılmıştır bunlardan bazıları aşağıdadır.

Oh ve Vanapalli (2010), yağış etkisi altında sıkıştırılmış homojen dolgu bir şevin duraylılığını incelemiştir. Çalışmaları, zeminin doyun şartlarda uzun ve kısa vade de şev analizleri ile doyun olmayan zemin şartlarında yağışın ve göllenmenin

baz alındığı şev analizlerinden oluşmaktadır. Yapılan analizler sonucunda şev göçmelerinin düzlemsel olmayıp, dairesel kayma şeklinde oluştuğu görülmüştür [5].

Oh ve Lu (2015) yağış nedeniyle göken iki farklı şev üzerinde yaptıkları çalışmalarda genişletilmiş limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak şevlerin göçmelerini incelemişlerdir. Bu iki farklı şevde; hidromekanik özelliklerinin, şev geometrilerinin, kayma mukavemetlerinin ve mağruz kaldıkları yağış miktarlarının farklı olmasına rağmen ; şevlerdeki göçme nedenlerinin güvenlik faktörü değerinin 1'in altına düştüğünden dolayı gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu çalışma, bize şev duraysızlığının yağış etkisindeyken önceden belirleyebileceğimizi mümkün kılmaktadır [4]

Kim ve arkadaşları (2006), yaygın olarak kore de görülen ayrıışmış iki farklı zemin üzerinde, yağış etkisi altında yaş yüzey derinliğindeki değişimleri tespit etmek için araştırmalar yapmışlardır. Araştırmalarında derinliği belirlemek için, zemin – su karakteristik eğrisi kullanarak green-Ampt ile sonlu elemanlar metoduyla belirlemişler. Sonuç olarak ayrıışmış zeminlerde yaş yüzey matrik emme değerinin şev duraylılığı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir [35].

Cho ve Lee (2002), şevlerin yağış etkisi altında kaldığı durumlarda güvenlik sayısını bulmak için farklı bir metod geliştirmek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında şev duraylılığına sızmanın etkisini görmek için sonlu elemanlar yardımıyla, iki boyutlu düzlemde akım-deformasyon durumunu incelemişlerdir ve buna ilave olarak her sonlu elemanların birleşim noktasındaki gerilmeleri ve deformasyonları bir düzlem üzerinde sürekli hale getirmişlerdir. Buradan zemin matrik emmesinin azalması ve buna bağlı olarak kayma mukavemetinde oluşan değişimler optimize edilerek muhtemel kayma yüzeyi tespit edilmiştir. Sonuç olarak şev duraylılığına sızmanın diğer yöntemlerdeki gibi etki ettiğine varılmıştır [36].

Taha ve Ayşenur (2019), Siirt ilin de bazı yüksek yol şevlerinde oluşan duraysızlıklar üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yüksek eğimli ve 10 m ve üzeri şevlerdeki duraysızlığın yağış etkisi altındaki durumu hakkında araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarını yağışa bağlı oluşan sızmadan kaynaklı güvenlik sayısındaki azalma üzerine yapmışlar ve yarı-parametrik metod kullanarak yağış

yoğunluğunun, şev eğiminin, zemin geçirgenliğinin ve yağış süresinin sızmaya bağlı olarak etkileri üzerinde durmuşlardır.

Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki durumlar ortaya çıkmıştır.

Yağış yoğunluğu; önemli derecede şev duraylılığını etkilediği ve şev güvenlik sayısı ile doğrusal olmayan bir bağıntı oluşturmaktadır yoğunluk artarken güvenlik sayısı azalmaktadır.

Şev eğimi; şevin ilk oluşan güvenlik değerinde etkili olduğu ancak yağış altındaki durumda etkisi diğer değişkenler kadar olamamaktadır.

Zemin geçirgenliği; zemin-drenaj durumunun etkin olduğu bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Geçirgenliğin azalmasıyla şev duraysızlığı düşmektedir.

Yağış süresi; kısa süreli ve yoğun yağışlarında uzun süreli ve düşük yoğunluklu yağışlar kadar etki etmektedir [37].

2.11. Önceki Çalışmalar

Magistris 1998 de yaptığı çalışmada zeminlere Bentonit eklenmesinin en önemli etkisi, eklendiğinde karışımın geçirgenliğinde azalma meydana getirmesidir. Bu; temel olarak betonitin yüksek minerolojik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yani bentonit su ile karşılaştığında yaklaşık 10 katına kadar, iri taneli yapının boşluklarına dolar ve suyun boşluk içerisinden akmasını engeller [38].

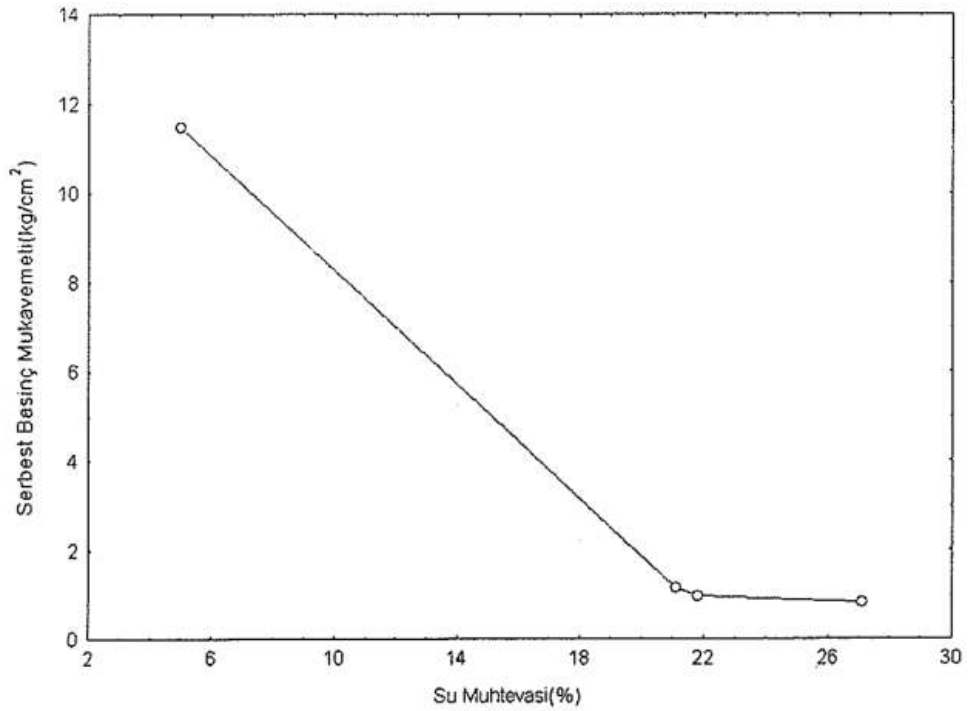
Seed, 1962 yılında sıkıştırılmış kum-kil mineral karışımlarının şişme potansiyelini belirlemek için bir takım laboratuvar deneyleri yapmıştır. Seed, yaptığı bu çalışmada optimum su muhtevasında kompaksiyona tabi tutulmuş kum-kil karışımı numunelerin şişme potansiyellerini, kil yüzdesi ile ilişkilendiren bağlantıları kurmuştur [39].

1984 yılında yapılan bir çalışmada Wang (1984), zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan özelliklerle ilgili olarak geçirgenliğin maksimum kuru sıkılık ve optimum su muhtevasına göre değişimini gösteren korelasyon eşitliklerini sunmuş ve sonuçları bir bilgisayar programı oluşturarak elde etmiştir [40].

Kenney (1992) yaptığı laboratuvar çalışmalarında kum-bentonit karışımlarının geçirgenliğini i) sıkışma su muhtevasını, ii) sistem kimyasını, iii) sistem kimyasındaki değişikliklere bağlı olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Yine Kenney'e göre düşük geçirimli bentonit kum karışımlarının elde edilmesi, karışımda yeterli bentonit bulunması ve bu bentonitin, karışım üniform dağılmış olmasına bağlıdır [41].

Kurumadan dolayı oluşan çatlamların duyarlılığı su muhtevası oranına ve karışımda kullanılan bentonitin miktarına bağlıdır. Bentonit oranı fazla olan karışımlarda su muhtevasının azalması yüzeysel çatlamalara neden olur [42].

Elif karabüyük 2001 de yüksek lisans tezinde yapılan deneyler sonucunda aynı miktar bentonit karışımda değişken su muhtevalarında basınç mukavemetinin su muhtevası artışlarında büyük ölçüde düştüğünü tespit etmişlerdir. Ve grafik halinde gösterimi aşağıdadır [43].



Şekil 2.13. Kum- betonit karışımının içerdiği değişken su muhtevası ile dayanımı arasındaki grafik [43].

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Materyal

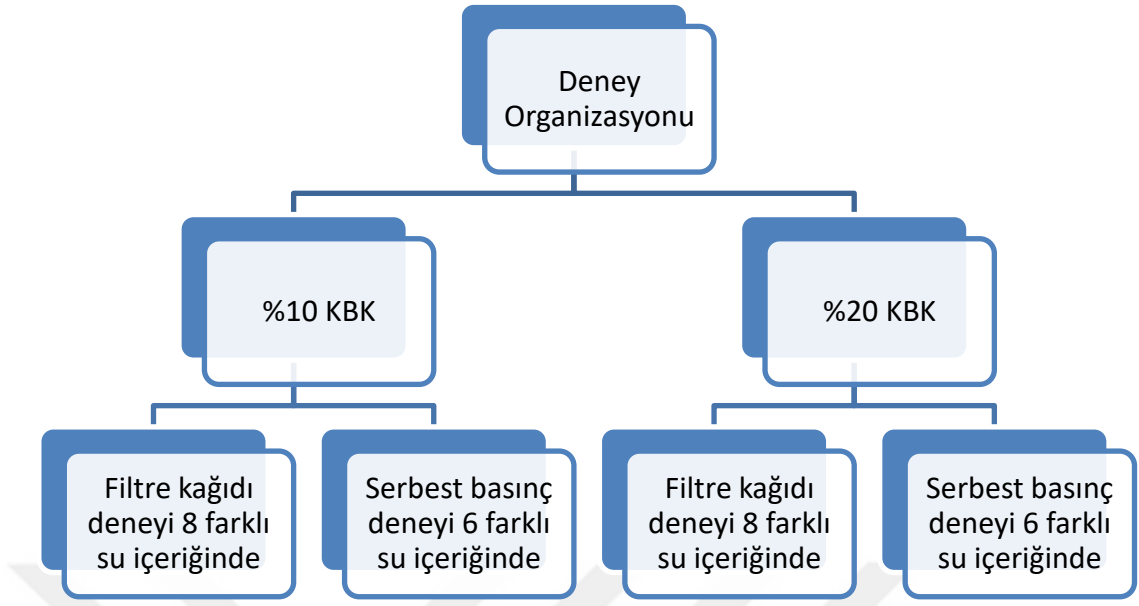
Çalışma sürecinde kum bentonit karışımları (KBK) kullanılmıştır. Kuru ağırlığın %10'u ve %20'si bentonit olacak şekilde hazırlanan örnekler üzerinde farklı su içerikleri için hem filtre kağıdı deneyleri hem de serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Filtre kağıdı deneylerinde kullanılan filtreler Whatman No.42 tipi filtre kağıtlarıdır ve herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan direkt olarak kullanılmışlardır. Kum malzeme Aydınlar taş ocağı Turgutlu Manisa'dan, bentonit ise Ankara Karakaya Bentonit firmasından sağlanmıştır. Bentonit, toz halinde olup kum da No.40 elekten elenmiş hali ile kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere ait bazı geoteknik parametreler Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Zeminlerin bazı geoteknik özellikleri

Özellikler	Bentonit	Kum
<u>Mineraloji</u>	Smektit Kristabolit Kuars	Kuars
<u>Kıvam Limitleri</u>		
Likit limit	%405	
Plastik limit	%57	NP*
Plastisite İndisi	%348	
Özgül Ağırlık	2,71	2,65

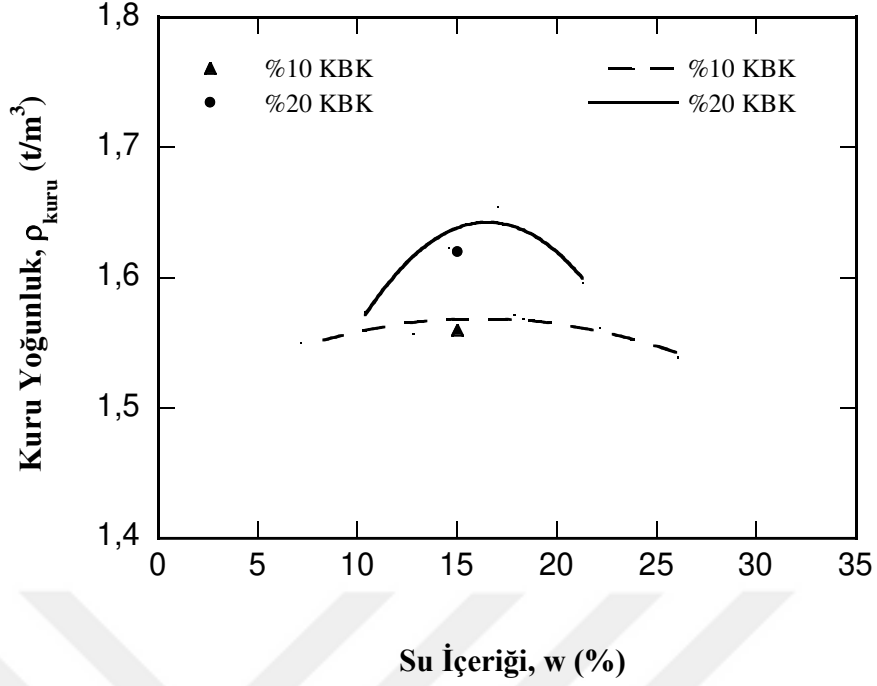
*NP: Non-plastik

Çalışma boyunca bentonit oranı %10 olan örnek için %10 KBK, %20 olan örnek içinse %20 KBK isimlendirmesi yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerin organizasyonu ait görsel anlatım da Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Deney organizasyonu

Her iki karışım için de örnekler kontrollü su içeriklerinde ve kompaksiyon kriterlerine göre sıkıştırılmış şekilde hazırlanmıştır. Örneklere ait kompaksiyon eğrileri Şekil 3.2’de verilmiştir. Filtre kağıdı deneyinde her örnek farklı su içeriklerinde kontrollü şekilde hazırlanmıştır. Serbest basınç deneylerinde ise farklı bir yol izlenmiş olup örneklerin hepsi önce seçilen sıkıştırma kriterlerine uygun şekilde sıkıştırılmış ve 1’er tanesi ile deney hemen gerçekleştirilmiş diğerleri ise serbest şekilde kurumaya bırakılmıştır. Buradaki amaç mümkün mertebe doğal kuruma döngüsünü laboratuvar ortamında oluşturmaya çalışmaktır. Kuruyan örnekler hem tartım yolu ile kontrol edilerek hem de serbest basınç deneyi akabinde etüve atıldıktan sonra belirlenen su içeriği miktarları ile değerlendirilmiştir. Serbest basınç deneylerinde seçilen sıkışma kriterleri birer nokta olarak Şekil 3.2’de kompaksiyon eğrileri üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kompaksiyon eğrileri ve serbest basınç deneyi için seçilen sıkıştırma kriterleri

Her iki karışım için de örnekler kontrollü su içeriklerinde ve kompaksiyon kriterlerine göre sıkıştırılmış şekilde hazırlanmıştır. Örneklere ait kompaksiyon eğrileri Şekil 3.2'de verilmiştir. Filtre kağıdı deneyinde her örnek farklı su içeriklerinde kontrollü

3.2. Deneyler

3.2.1. Filtre Kağıdı Deneyi

Bu tez çalışmasında kullanılan numuneler belli oranlarda karışımlar yapılarak hazırlanmıştır ve bu sabit karışım değerleri üzerine filtre kağıdı metodu uygulayarak zemin-su karakteristik eğrilerini oluşturmaya çalışılmıştır.

Filtre kağıdı metodu zeminlerdeki matrik ve toplam emme basıncı oranlarını tespit etmek için çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu deney yönteminin en önemli kolaylıklarından birisi de hem matrik hem toplam emmeyi tek deney üzerinden elde edilebilmesidir. Tercih edilmesindeki neden ise hem ucuz olması hem de basit bir şekilde deneyin yapılabilmesi olmasıdır. Bu metodla 0.01-100 Mpa arası değişkenlik gösteren emme basıncı değerleri ölçülebilmektedir [44]. Diğer alternatif metodlara kıyasla daha geniş bir yelpazede değerlere en güvenilir şekilde ulaşılabilir.

ilişkisi belirlenmek üzere sadece matrik emme ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Toplam emme ölçümü için çift filtre kağıdı

O ring

zemin numunesi

Matrik emme ölçümünde iki numunenin tam temas haline getirilmesi

iki koruyucu kağıt arasında tek filtre kağıdı

zemin numunesi

a) Numune Hazırlanması

44

gerekmektedir. Her parça hassas terazide tartıldı filtre kağıtları yerleştirilip sızdırmazlık sağlanacak şekilde cam şişelere konulup 20 C°'de 1 hafta boyunca inkübatörde bekletilmiştir. 1 hafta sonunda inkübatörden çıkartılan numunelerdeki filtre kağıtları hassas teraziyle ölçülmüştür ve sonrasında numunelerin su içeriklerinin belirlenmesi amacı ile zemin numuneleri de ölçülmüştür. Hazırlanan numunelerin ayrıntılı sunumu Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te sunulmuştur.

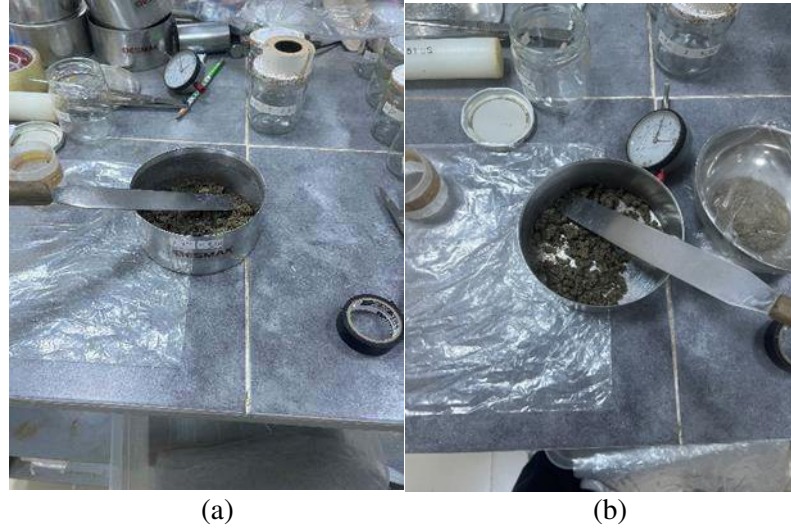
Tablo 3.2. %10 Bentonit Karışımı Numuneler ve Karakteristik Değerleri

%10 KBK KARIŞIMI							
$\rho_{kuru} (t/m^3)$	1,56						
Su İçeriği (%)	10	12	14	16	18	20	24
W_{kuru} (gr)	39,203	39,203	39,203	39,203	39,203	39,203	39,203
W_{su} (gr)	3,92	4,70	5,49	6,27	7,06	7,84	9,41
W_{toplam} (gr)	43,12	43,91	44,69	45,48	46,26	47,04	48,61
$\rho_{ıslak} (t/m^3)$	1,72	1,75	1,78	1,81	1,84	1,87	1,93
e (boşluk oranı)	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702

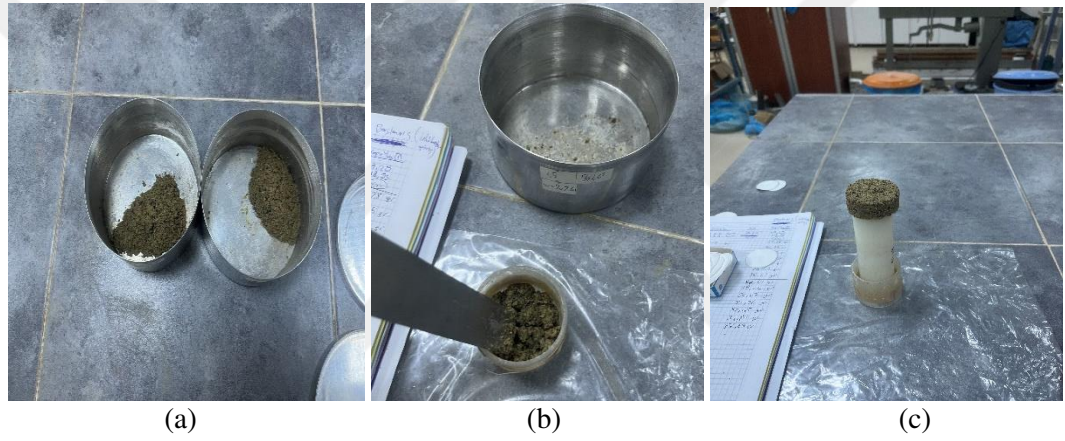
Tablo 3.3. %20 Bentonit Karışımı Numuneler ve Karakteristik Değerleri

%20 KBK KARIŞIMI							
$\rho_{kuru} (t/m^3)$	1,6						
Su İçeriği (%)	10	12	14	16	18	20	24
W_{kuru} (gr)	40,208	40,208	40,208	40,208	40,208	40,208	40,208
W_{su} (gr)	4,02	4,82	5,63	6,43	7,24	8,04	9,65
W_{toplam} (gr)	44,23	45,03	45,84	46,64	47,45	48,25	49,86
$\rho_{ıslak} (t/m^3)$	1,76	1,79	1,82	1,86	1,89	1,92	1,98
e (boşluk oranı)	0,664	0,664	0,664	0,664	0,664	0,664	0,664

Deney öncesinde kullanacağımız malzemelerin barındırdıkları nemden arındırılmış olması gerekir. Bundan dolayı deneylerimizde kullanmak üzere matrik emme basıncı için kullanılan filtre kağıtları 24 saat süre ile 110°C deki etüvde bekletilir. Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te belirlenen zemin örnekleri belirlenen hacimde (her bir parça için 4 cm çap ve 2 cm yükseklik) bir tokmak yardımı ile el kuvveti kullanılarak manuel şekilde kontrollü sıkıştırılır. Taneli malzemeyi keserken meydana gelebilecek hasarı önlemek adına alt ve üst parçalar ayrı ayrı sıkıştırılmıştır. Önceden belirlenen hacme uygun sıkıştırma gerçekleştirilmesi önemlidir, az ya da çok sıkıştırılan malzeme çıkartılarak işlem tam ölçüye denk gelecek şekilde yinelenir (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5)

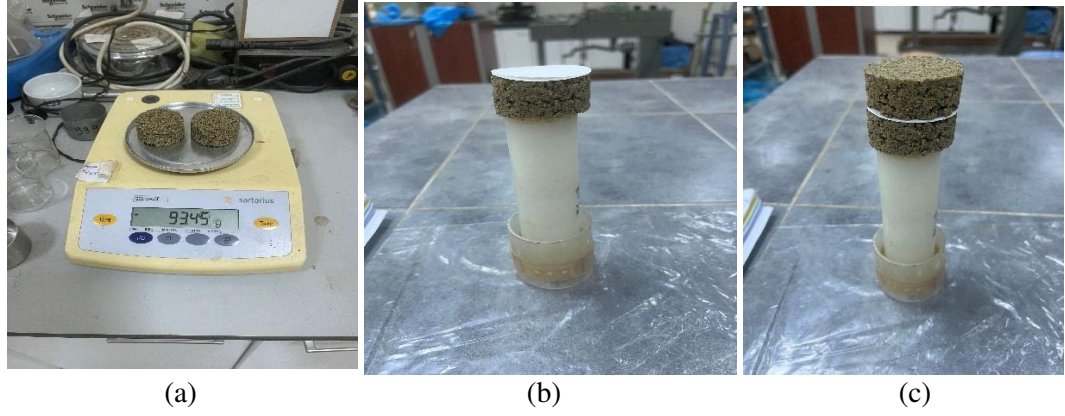


Şekil 3.4. Numunelerin karışım miktarlarına göre hazırlanması



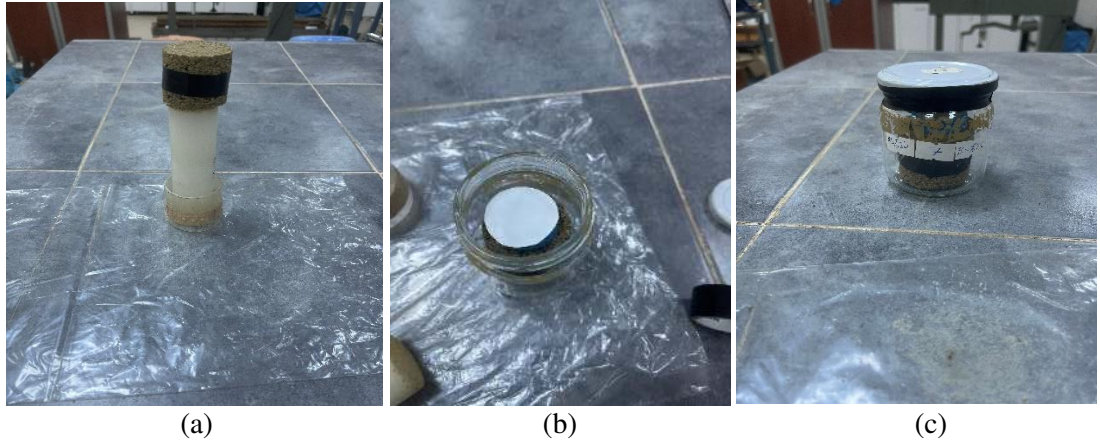
Şekil 3.5. Numunelerin ring içerisinde sıkıştırılması ve çıkarılması

Hazırlanan numune parçalarının arasında kalacak şekilde 2 adet 4 cm çapındaki diğer filtre kağıtlarının arasında kalacak şekilde ölçüm yapılacak esas filtre kağıdını sandviç yapıp iki zemin numunesinin arasına yerleştirecek şekilde hazırlıyoruz bu filtre kağıdıyla Matrik emme basıncını öğrenmiş olacağız (Şekil 3.6). Sandviç görevi gören diğer 2 kağıt ise asıl kullanacağımız kağıdın kirlenmemesi için kullanılmaktadır. Bu işlemler esnasında filtre kağıtlarında ortamdan kaynaklı veya müdahale ile nem almaması için cımbız ve eldiven kullanılmalı ve mümkün olduğu kadar hızlı yapılmalıdır.



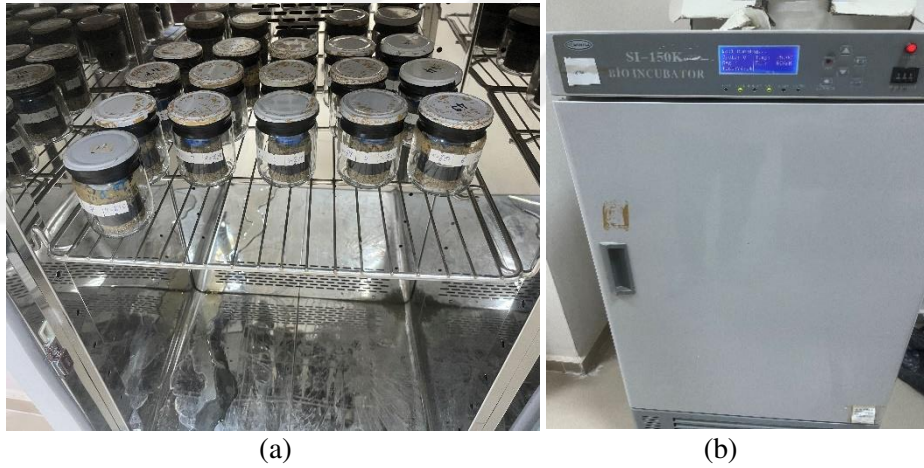
Şekil 3.6. Numuneler tartıldıktan sonra filtre kağıdının yerleştirilmesi

Numunelerden kaynaklı kavanozun içerisinde oluşacak olan zemin neminden filtre kağıdının etkilenmemesi için numunelerin birleşim yerleri olan kısmı elektrik bandı ile izole edilir. Kavanozun kenarlarına temas etmeyecek şekilde hazırlanan zemin numunesi kavanoz içerisine yerleştirilir. Kavanoz hacminin yaklaşık olarak %75 ini dolduracak şekilde numune boyutları oluşturulmuş ve hazırlanmıştır. Filtre kağıtları ile zemin numuneleri arasındaki nem dengelenmesinin en kısa zamanda gerçekleşmesi ve minimum dış nem kaybının sağlanması için boşluk miktarının minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Toplam emme basıncını ölçmek için de kavanoz içerisinde bulunan numunelerin üzerine 1 cm çapında ve 0.5 cm yüksekliğinde ring numunenin ortasına gelecek şekilde yerleştirilir. Toplam emme basıncı için ring üzerine 1 adet filtre kağıdını numuneyi ortalayacak şekilde Şekil 3.7.'deki gibi yerleştirilir. Filtre kağıdı yerleştirilirken kavanozun kapağına, yana çeperlerine ve zemin numunesine temas etmeyecek şekilde yerleştirilmelidir. Ring kullanılmasıdaki neden toplam emmeyi tespit etmek için kullanılan 2 cm çapındaki tek adet filtre kağıdının zemin numunesine direkt temasını engellemektir. Tüm filtre kağıtları yerleştirildikten sonra kavanozun kapağı sıkıca kapatılır ve yine elektrik bandı ile sızdırmazlık için izolasyon sağlanır.



Şekil 3.7. Numunelerin sızdırmaz kaplara konulması

Hazırlanan numuneler inkübatör içinde 20 C° sıcaklıkta ve sabit bağıl nem durumunda olacak şekilde 1 hafta boyunca dengelenme sağlanıncaya kadar bekletilmiştir (Şekil 3.8). Bu aşamada kullanılan inkübatör SI-150 Bio-incubator tipidir.



Şekil 3.8. Numunelerin inkübatöre yerleştirilmesi

b) Filtre kağıtlarının su içeriklerinin tayin edilmesi

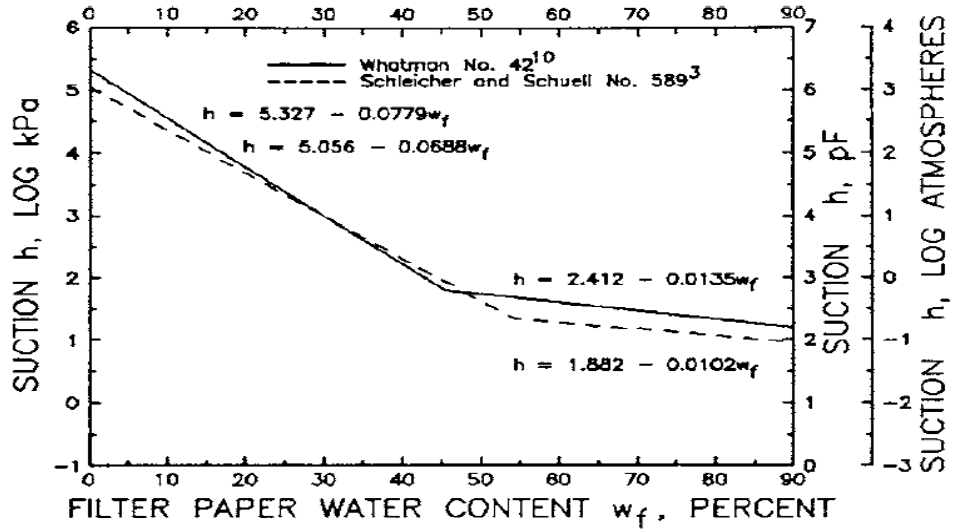
İnkübatörde kap içerisinde 1 hafta dengelenme süresinin tamamlanması için bekletilen numuneler, 1 hafta sonunda cam kaplardan çıkarılır. Numuneler içerisindeki filtre kağıtlarının su içeriklerini tayin etme aşamaları aşağıdaki adımlar izlenerek tespit edilmiştir. 7 gün boyunca inkübatör içerisinde bekletilen zemin numunelerinin nem içeriği değerlerinin tespit edilmesi için yağ ağırlıkları tartılmıştır. Yağ ağırlıkları ölçülen numuneler etüv de 24 saat bekletilmiş, kuru ağırlıkları da tartılmıştır.

Öncelikle teker teker cam şişeler çıkartılır ortamdan dolayı filtre kağıtlarındaki nemin ortamdan mümkün olduğu kadar az etkilenmesi için bu işlem yapılır. Filtre kağıtlarının içine koyulup tartılacak kapların daraları hassas teraziyle alınıp devamında toplam emmeyi ölçmek için ringin üzerindeki filtre kağıdı ıslak olarak ölçülür daha sonrasında da iki adet numune arasındaki matrik emmeyi ölçen filtre kağıdı yine ıslak olarak ölçülür (Şekil 3.9). Bu aşamada ıslak filtre kağıtlarının hareket esnasında su içeriklerinin etkilenmemesi için el ile temastan uzak durulmuş ve cımbız kullanılmış olup yine süreçte olabildiğince hızlı davranılmış ve ölçüm gerçekleştirilen kapların kapakları da hızlıca kapatılmıştır.



Şekil 3.9. Alüminyum kapların soğuk daralarının alınması.

Ağırlıkları filtre kağıdıyla beraber ölçülen kaplar, 110 °C deki etüvde kapakları yarı kapalı olacak şekilde 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda kaplar etüvden çıkarılmadan önce kapakları kapatılıp 15 dk daha bekletilmiştir bunun nedeni ise ısı dengenin sağlanması için. Devamında kaplar etüvden çıkartılıp 1 dk gibi bir süre içinde soğuması sağlanmıştır ve 0.0001gr hassaslığa sahip hassas teraziyle tartımlar yapılmıştır ve filtre kağıtlarının su içerikleri hesaplanmıştır. Su içerikleri hesaplanan filtre kağıtlarının emme miktarları ASTM D5298’de verilen kalibrasyon eğrisi yardımı ile saptanır (Şekil 3.10)



Şekil 3.10. ASTM D5298 standardında verilen kalibrasyon eğrisi

3.2.2 Serbest Basınç (Tek Eksenli) Deneyi

Üç eksenli basınç deneyinin konsolidasyonsuz-drenajsız deneyiyle aynı şartlara sahip ve üç eksenli basınç deneyinin özel bir hali olan serbest basınç deneyi, çoğunlukla doymuş killi zeminlerde ($\phi = 0$) kayma mukavemetinin tespitinde tercih edilir. Tek eksenli basınç deneyi birim boy kısalması gerilme kontrollü ya da gerilme kontrollü olarak iki şekilde yapılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan Birim boy kısalması kontrollü deneydir yaygın olarak kullanılmasının nedeni ise basit ve hızlı olmasıdır.

a) Deney için Gerekli Malzemeler

- Serbest basınç deneyi cihazı,
- 0,01 mm hassaslı değer okuma saati,
- numuneleri çıkartmak için kriko,
- Su içeriği belirleme için kaplar,
- Etüv (110 ± 5 C° sıcaklıkta),
- Numune düzeltme tüpü,
- Maket bıçağı,
- Plastik kılıf (Gerekliyse),
- Kronometre,
- Terazî (0,01 gr hassaslıkta),
- Açölçer,

- Kumpas.

b) Gereken Ölçümler

- Deney öncesi numune çapı (D),
- Deney öncesi numune boyu (L),
- Deney öncesi su içeriği,
- Deney sonrası su içeri,
- Deney öncesi numune ağırlığı,
- Deney sonrası numune ağırlığı,
- Yük halkası numarası ile faktörü
- Deney süresi boyunca yada 1 dk'da oluşan düşey deformasyon değeri okuması,
- t zamanının da deformasyon saatinde okunan değer,
- t zamanının da kuvvet halkasında okunan değer,
- Kırılma düzlemi ile yatay düzlem arasındaki açı (θ).

c) Deneyin Uygulaması

American Society of Testing Materials (ASTM) D 2166 (2016) [45] standartları göz önünde bulundurularak Serbest basınç (tek eksenli) deneyleri yapılır. Aşağıdaki aşamalar şeklinde yapılır.

Belli ölçülerde hazırlanmış zemin numunesi deney cihazının alt tablasının merkezine gelecek şekilde yerleştirilir. Cihaz aktif hale getirilerek numunenin cihazın üst tablasına temas ettirilir. numunenin üst ve alt yüzeyleri deney cihazının üst ve alt tablalarındaki merkezlere denk gelecek şekilde ayarlaması yapılır.

Cihazdaki kuvvet halkası ve Deformasyon okuması saatleri sıfırlanır.

Cihazdan yapılan Yükleme hızı numune yüksekliğinin mm cinsinden %0,5-2'si arası bir değere denk olacak şekilde ayarlaması yapılır. Zemin numunesinin yüklenmesine başlandığında deformasyon saati üzerinde 10-15-20-25-... gibi eşit aralıklarında kuvvet halkasındaki saatte okumalar not edilir. Yükleme hızını numuneyi en fazla 10-15 dk içerisinde kırılmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır.

Numunede gözle görülebilir bir kırılmanın olması durumunda; kırılma düzlemi numunede görülünceye kadar yüklemeler devam ettirilir. Böyle durumlarda yükleme değerleri önce artarak pik (maksimum) bir değere ulaşır. Sonrasında Okumalardan birbirini izleyen birkaçı sabit kalabilir. Devamındaki okumalarda ise genelde ani azalmalar oluşur.

Bazı numunelerde ise kırılma düzlemini görmek pek mümkün olmamaktadır. Birden çok kırılma düzlemi veya numunenin orta kısmında genişleme (varilleşme) oluşabilmektedir. Kırılmanın bu türde olması durumunda; numune boyunda % 15 kısılma oluşana kadar yükleme devam edilir. Boydaki %15 kısılmanın oluşması durumunda kırılmanın olduğu varsayılır.

Numunenin kırılma şekli şematik bir şekilde çizilir ya da fotoğrafı çekilir. Numunede belirgin bir halde kırılma düzlemi varsa bu düzlem ile yatay düzlem arasındaki açı ölçülür.

Deney sonu numune ağırlığı için numune 0,01 gr hassaslıktaki tartı ile tartılır.

Deney sonu su içeriğini belirlemek için numunenin kırılma yüzeyinden alınan bir parça ya da örneğin tamamı 110 ± 5 C°'lik etüvde 24 saat bekletilerek kuru halinin ağırlığı hassas tartıda tartılır [46, 47].

d) Hesaplamalar

Kuvvet (Yük) değeri, P :

$P = (\text{Kuvvet Halkası Okuması}) \times (\text{Kuvvet Halkası Faktörü})$

ΔL Numunede ölçülen eksenel şekil değiştirme (mm),

L_0 Numunenin ilk boyu (mm) dur.

ϵ Düşey yöndeki eksenel birim şekil değiştirmesi,

A_0 Numunenin deney başındaki kesit alanı (m²)'dir.

P Göçmeyi sağlayan yük (kN) tür.

· Birim Deformasyon değeri, ϵ :
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.5)$$

· Düzeltilmiş Alan değeri, A_d :
$$A_d = \frac{A_0}{1 - \epsilon} \quad (3.6)$$

- Serbest Basınç Gerilmesi değeri, S: $s = \frac{P}{Ad} \text{ (kPa)}$ (3.7.)
- Numunenin serbest basınç direnci, $qu: S_{max}$ (3.8.)
- Kohezyon, C: $C = qu / 2$ (3.9.)
- İçsel sürtünme açısı (teorik), Φ : $\Phi = 2q - 90$ (3.10.)
- Hassaslık katsayısı, St: $St = qu / q$ (3.11.)

e) Sonuçların Gösterilmesi

Numunenin serbest basınç dayanımı, numunenin nasıl hazırlandığı (örselenmemiş veya sıkıştırılmış), gözle teşhis, su muhtevası ve birim hacim ağırlığı, göçmede anındaki birim boy kısalması ve dikkate değer gözlemler rapor edilmelidir.

Numuneler 50 mm çapında, boyu çapının iki katı, doygun ve kılcal çatlak içermeyen kohezyonlu zemin olmalıdır. Zorunlu durumlarda, raporda belirtilmek şartıyla, deney çapı 38 mm olan numuneler üzerinde gerçekleştirilebilir. Hazırlanan numune karışımı çapı 5 cm boyu 10 cm olan numune kabına 3 aşamada olacak şekilde ve toplamda 25 adet serbest düşme sağlayan tokmakla sıkıştırır, numunelerin üstü ve altı düzgün yüzey olacak şekilde hazırlanmalı numune kalıptan deformasyona uğratılmadan çıkartılıp tartılır. İstenilen su içeriğine gelene kadar etüvde kurumaya bırakılır ve aralıklı olarak çıkartılıp tartılır uygun su içeriğe gelince soğumaya bırakılır ve soğuduktan sonra son kez tartılıp serbest basınç cihazına yerleştirilir.

Çalışma için kum ve kil karışımı numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedir. katı madde oranı olarak kum oranı %90 ve bentonit oranı %10 sabit tutularak su miktarında değişim yapılarak oluşturulan 6 adet numune 1. Grup, katı madde oranı olarak kum oranı %80 ve bentonit oranı %20 sabit olup su miktarı değiştirilerek oluşturulan diğer 6 numune ise 2. Grup olarak hazırlanmıştır. Karışım oranları ve miktarları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.4. %90 Kum - % 10 Bentonit Karışımlı Numuneler

NUMUNE NO	NUMUNE AĞIRLIĞI	kum miktarı		kil miktarı		Su içeriği	
		Gr.	%	Gr.	%	Gr.	w (%)
1	352.82	270.1	90	30.08	10.0	52.64	17.54%
2	339.60	270.1	90	30.08	10.0	39.42	13.13%
3	329.99	270.1	90	30.08	10.0	29.81	9.93%
4	322.23	270.1	90	30.08	10.0	22.05	7.35%
5	313.64	270.1	90	30.08	10.0	13.46	4.48%
6	300.18	270.1	90	30.08	10.0	0.00	0.00%

Tablo 3.5. %80 Kum - % 20 Bentonit Karışımlı Numuneler

NUMUNE NO	NUMUNE AĞIRLIĞI	kum miktarı		kil miktarı		Su içeriği	
		Gr.	%	Gr.	%	Gr.	W (%)
1	373.07	256.18	80.00	64.05	20	52.84	16.50%
2	359.67	256.18	80.00	64.05	20	39.44	12.32%
3	351.33	256.18	80.00	64.05	20	31.10	9.71%
4	343.16	256.18	80.00	64.05	20	22.93	7.16%
5	332.89	256.18	80.00	64.05	20	12.66	3.95%
6	320.23	256.18	80.00	64.05	20	0.00	0.00%

**Şekil 3.11. Numune karışım miktarlarının tartılması**



Şekil 3.12. Serbest basınç için kullanılacak numunelerdeki kum,kil ve suyun karıştırılması

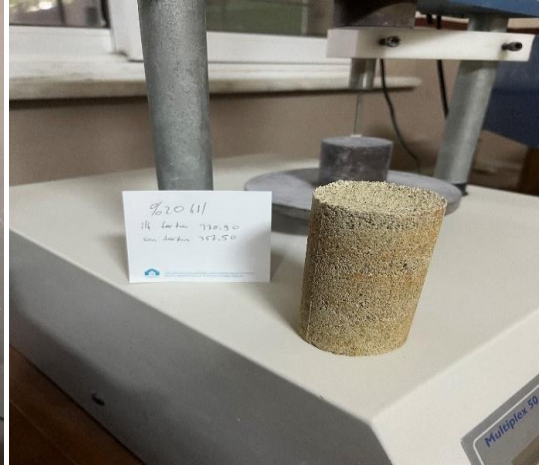
Tablodaki karışımlar hazırlanıp su miktarını kaybetmeyecek şekilde 2 saat dinlendirildikten sonra 50 mm çapında 100 mm uzunluğunda kalıbın içerisine 3 aşamada ve her aşamada 15 adet tokmak darbesiyle sıkıştırılır, sıkıştırma işlemi sona erdikten sonra numunenin üst ve alt kısımları düzgün kalacak şekilde kalıptan krik o veya başka metodlarla çıkartılır. Çıkartılan numune hassas teraziyle tartılıp içerisindeki su miktarına göre etüve konulup istenilen su miktarına gelene kadar kontrol edilmiştir bu şekilde 12 adet numune hazırlanmıştır ve tablodaki su miktarlarına göre serbest basınç cihazına konulup değerler okunmuştur. Okunan değerler excel ortamında tablolaştırarak aşağıdaki tablolar oluşturulmuştur.



Şekil 3.13. Hazırlanan numunelerin silindirik numune kalıbına yerleştirilmesi



a) Kalıptan çıkarılınca



b) Etüvden çıkarılınca

Şekil 3.14. (a,b) Numunelerin ilk ve son tartılması



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

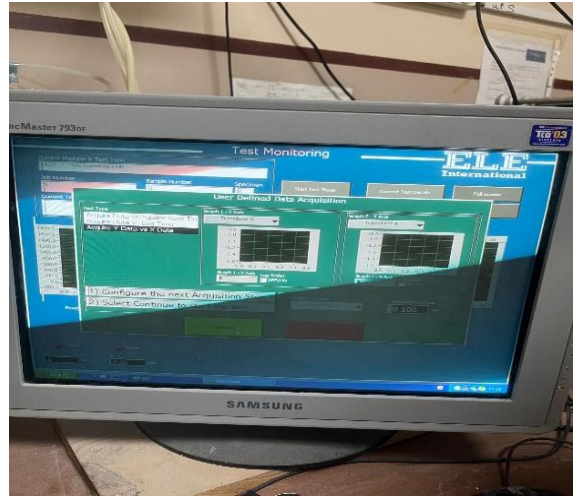


(f)

Şekil 3.15. Numunelerin serbest basınç cihazına yerleştirilmesi



(g)



(h)

Şekil 3.15. (devam). Numunelerin serbest basınç cihazına yerleştirilmesi



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

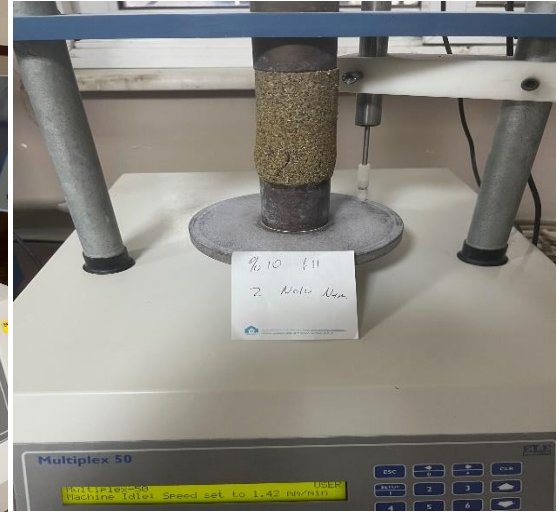


(f)

Şekil 3.16. Numunelerin serbest basınç cihazında teste tabi tutulması ve kırılmanın gerçekleşmesi



(g)



(h)

Şekil 3.16. (devam). Numunelerin serbest basınç cihazında teste tabi tutulması ve kırılmanın gerçekleşmesi



Şekil 3.17. Tüm numunelerin serbest basınç cihazından alınması

Yapılan serbest basınç deneylerinin sonuçları 4. Bölümde tabloya aktarılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

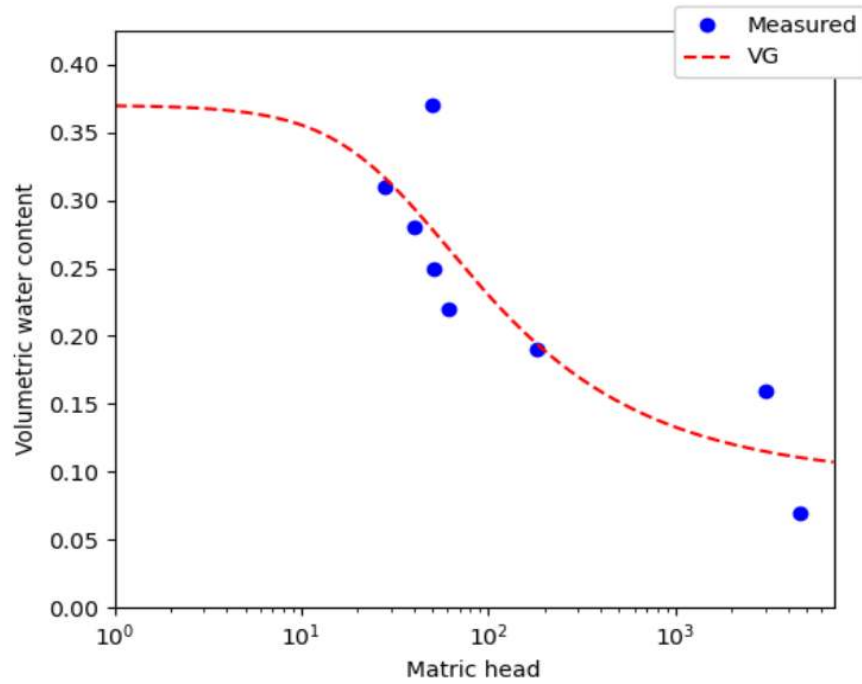
Filtre kağıdı ile matrik emme değerlerini hesapladığımız deneyler ve serbest basınç ile dayanımlarını hesapladığımız deney sonuçları bu bölümde ele aldık. Aşağıda filtre kağıdı yöntemi ile bulunan matrik emme değerleri karşılığında su içerikleri ve suya doygunluk oranları belli olan zemin numuneleri eşleştirilmiş ve zemin-su karakteristik eğrileri (SWCC) oluşturulmuştur. Bu eğri yardımı ile istenilen herhangi bir su içeriği ya da suya doygunluk değerindeki matrik emme değerine ulaşılabilir hale gelinir. Ardından, zemin örneklerinin serbest basınç değerleri de yine karşılık gelen su içeriği ya da suya doygunluk değerleri ile belirtilmiş ve bu su içeriklerindeki matrik emme değerleri ilgili SWCC eğrilerinden okunup değerlendirilmiştir. Sonuç olarak da matrik emme ile serbest basınç değerleri arasında bir ilişki olup olmadığı incelenmiş ve bulgular sunulmuştur.

4.1. Filtre Kağıdı Yöntemi Deney Sonuçları

Filtre kağıdı deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuş ve zemin-su karakteristik eğrilerinde yerleştirilmiştir. Bu aşamada matrik emme ve hacimsel su içeriği (Θ) değerleri kullanılmıştır. Eğrilerin oluşturulması aşamasında laboratuvar da elde edilen dataların girilebildiği ve bu datalara eğri uyduran SWRC Fit programı kullanılmıştır. SWRC Fit programı serbest şekilde kullanıma açık olan internet ulaşılabilir bir programdır. İlgili programda farklı çalışmacıların yaklaşımlarından belirlenen eğri karakteristikleri uygulanabilmektedir. Bu çalışmada ise literatürde en çok tercih edilen van Genuchten (1980) çalışmasında önerilen yöntem seçilmiş ve datalar bu çalışmanın önerdiği şekilde eğri halinde dönüştürülmüştür. Tablo 4.1’de %10 KBK numunelerine ait filtre kağıdı deney sonuçları sunulmuştur. Ardından, bu su içerikleri kontrollü hazırlanmış örneklerden karşılık gelen hacimsel su içeriği değerleri ile matrik emme bulguları kullanılarak SWCC eğrilerinin oluşturulmuş ve ilgili grafik gösterim Şekil 4.1’de verilmiştir. SWRC Fit programında verilen grafikler üzerinde değişiklik yapılamamaktadır. Dolayısı ile İngilizce parametreler ile sunulmuştur. Grafikteki mavi noktalar laboratuvar verilerini kesikli kırmızı çizgi ise programın uydurduğu eğriyi temsil etmektedir. Paragrafın başında da belirtildiği üzere; x ekseninde matrik emme, y ekseninde de hacimsel su içeriği değerleri girilmiştir.

Tablo 4.1. %10 KBK numunelerin matrik emme sonuçları

	Kap ağırlığı (gr)	Kap+yaş ağırlığı (gr)	Kap+kuru ağırlığı (gr)	Su içeriği (w, %)	Matrik emme (logh)
doğal	48,3374	48,4678	48,4449	21,30	3,67
1	23,9046	24,0818	24,0478	23,74	3,48
2	48,3281	48,4692	48,4293	39,43	2,26
3	48,4572	48,6081	48,5603	46,36	1,79
4	50,8818	51,0439	50,9884	52,06	1,71
5	24,7714	24,9231	24,8664	59,68	1,61
6	23,3802	23,5376	23,4719	71,65	1,44
7	25,975	26,1376	26,0815	52,68	1,70



Şekil 4.1. %10 KBK numunelerin hacimsel su içeriği - matrik emme ilişkileri

Şekil 4.1'deki grafiğe ait Van Genuchten karakteristikleri ise yine programda elde edilen orijinal hali ile aşağıda Tablo 4.2'de verilmiştir. Bu karakteristikler, ilgili eğrinin bağıntısını vermekte ve dolayısı ile istenilen herhangi bir su içeriği değerine karşılık gelen matrik emmeyi bulmada kolaylıkla kullanılmaktadır. Konu ile ilgili ayrıntılar yukarıda literatür kısmında sunulmuştur. Laboratuvar datalarına göre uydurulan eğride R^2 değeri %75 olarak elde edilmiş olup yeterli bir uyumun yakalandığı düşünüldüğü için deneyler tekrar edilmemiş ve bu hali ile kullanılmıştır.

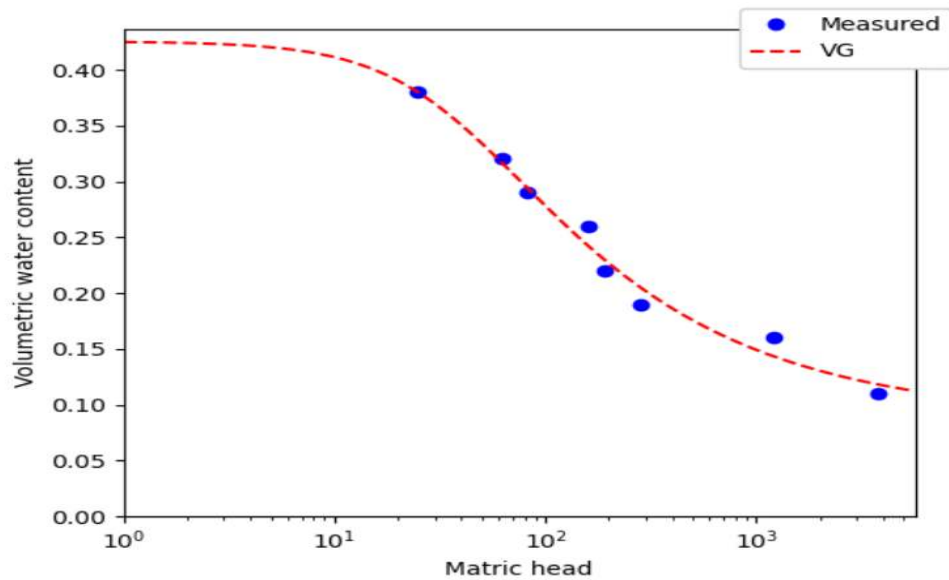
Tablo 4.2. %10 KBK numunelerin Van Genuchten karakteristikleri

Model	Equation	Parameters	R ²	AIC
van Genuchten	$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$ ($m = 1 - 1/n$)	$\theta_s = 0.37012$ $\theta_r = 0.094434$ $\alpha = 0.031338$ $n = 1.5718$	0.7543	-42.23

%20 KBK numunelerine ait filtre kağıdı deney sonuçları ise Tablo 4.3'te sunulmuştur. Ardından, yine bu su içerikleri kontrollü hazırlanmış örneklerden karşılık gelen hacimsel su içeriği değerleri ile matrik emme bulguları kullanılarak SWCC eğrilerinin oluşturulmuş ve ilgili grafik gösterim %20 KBK için Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.3. %20 Bentonit %80 kum karışımli numunelerin Matrik Emme Sonuçları

	Kap ağırlığı (gr)	Kap+yaş ağırlığı (gr)	Kap+kuru ağırlığı (gr)	Su içeriği (w, %)	Matrik emme (logh)
doğal	52,5172	52,6397	52,6172	22,50	3,57
1	52,5111	52,6459	52,6157	28,87	3,08
2	45,6911	45,8406	45,8003	36,90	2,45
3	48,6057	48,75	48,7094	39,15	2,28
4	30,3926	30,5373	30,4959	40,08	2,20
5	49,0384	49,1888	49,143	43,79	1,92
6	45,8954	46,0348	45,991	45,82	1,79
7	47,5884	47,7276	47,6676	75,76	1,39

**Şekil 4.2.** %20 KBK numunelerin hacimsel su içeriği - matrik emme ilişkileri

Şekil 4.2'deki grafiğe ait Van Genuchten karakteristikleri ise yine programda elde edilen orijinal hali ile aşağıda Tablo 4.4'te verilmiştir. Bu karakteristikler, ilgili eğrinin bağıntısını vermekte ve dolayısı ile istenilen herhangi bir su içeriği değerine karşılık gelen matrik emmeyi bulmada kolaylıkla kullanılmaktadır. %20 KBK numuneleri için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen laboratuvar datalarına göre uydurulan eğride R^2 değeri %98 olarak elde edilmiş olup oldukça başarılı bir uyumun yakalandığı görülmektedir. Ek olarak, bentonit miktarının artması ile matrik emme değerlerinin de arttığı görülmüştür. Doygun hacimsel su içeriğinin (θ_s) de yine aynı şekilde bentonit miktarının artması ile arttığı belirlenmiştir. Bununla beraber, hava giriş değeri ile ters orantılı olan α katsayısının da beklendiği üzere bentonit oranı arttıkça azaldığı belirlenmiştir.

Tablo 4.4. %20 KBK numunelerin Van Genuchten karakteristikleri

Model	Equation	Parameters	R^2	AIC
van Genuchten	$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (m = 1 - 1/n)$	$\theta_s = 0.42538$ $\theta_r = 0.086558$ $\alpha = 0.026318$ $n = 1.5163$	0.9816	-63.79

Bu aşamadan sonra artık serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesine geçilecek ve bulunan tüm datalar birleştirilerek ilgili su içeriği değerlerine karşılık gelen mukavemet bulguları eşleştirilerek değerlendirilecektir.

4.2. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Farklı su içeriklerinde özel sıkıştırma yöntemi kullanılarak Standart Proktor enerjisi sağlanarak hazırlanan zemin numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Hazırlanan örnekler için karakteristikler ve sonuç olarak elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri %10 ve %20 KBK örnekleri için sırası ile Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de sunulmuştur. Tüm test numunelerinin kontrollü hazırlanan su içeriklerine göre suya doygunluk oranları ya da hacimsel su içeriklerine karşılık gelen matrik emme değerleri SWCC eğrisinden elde edilerek ilgili tablolarda belirtilmiştir.

Tablo 4.5. %10 KBK numunelerinin Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

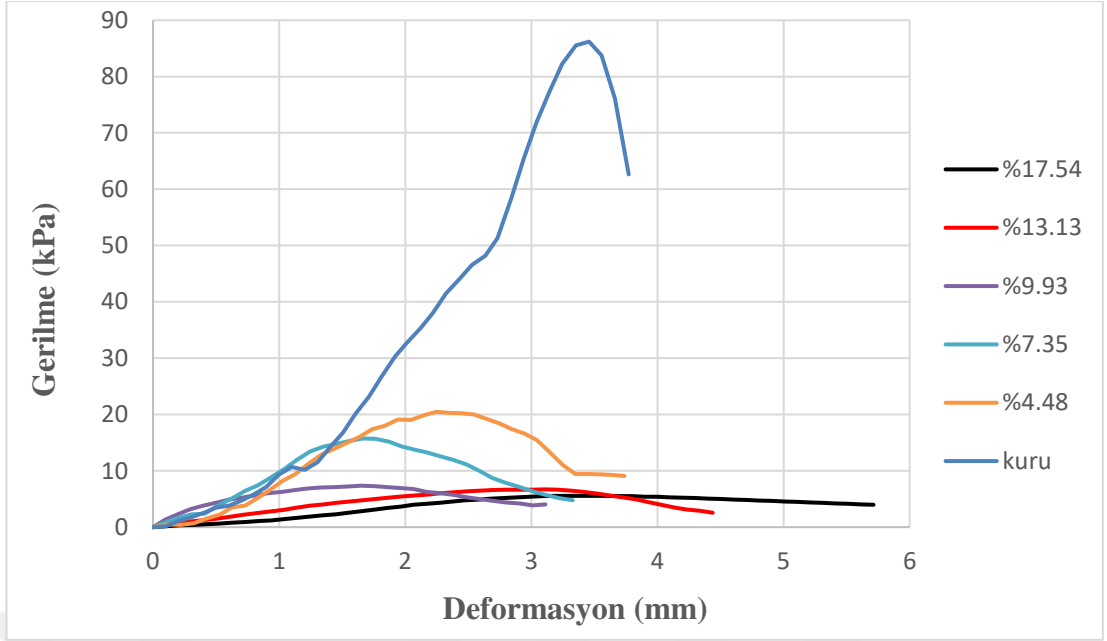
N. NO	kum miktarı		kil miktarı		Su içeriği		Def.	$\epsilon = \frac{\Delta H}{H}$	A cm ²	Ring okuması	Serbest Basınç Mukavemeti	Matrik emme
	Gr.	%	Gr.	%	Gr.	w (%)	ΔH mm				σ_1 (kPa)	(kPa)
1	270,1	90	30,08	10	52,64	17,54	3,60	0,04	19,635	109,1	5,6	75,68
2	270,1	90	30,08	10	39,42	13,13	3,11	0,03	19,635	131,8	6,7	149,74
3	270,1	90	30,08	10	29,81	9,93	4,75	0,05	19,635	144,6	7,4	268,16
4	270,1	90	30,08	10	22,05	7,35	1,66	0,02	19,635	309,1	15,8	492,47
5	270,1	90	30,08	10	13,46	4,48	2,25	0,02	19,635	402,0	20,5	1284,17
6	270,1	90	30,08	10	0,00	0,00	3,46	0,03	19,635	1692,6	86,4	Kuru

Tablo 4.6. %20 Kil İçeriğine Sahip Numunelerin Serbest Basınç Deneyi Sonuçları ve Hesaplamaları

N. NO	kum miktarı		kil miktarı		Su içeriği		Def.	$\epsilon = \frac{\Delta H}{H}$	A cm ²	Ring okuması	Serbest Basınç Mukavemeti	Matrik emme
	Gr.	%	Gr.	%	Gr.	w (%)	ΔH mm				σ_1 (kPa)	(kPa)
1	256,18	80	64,05	20	52,84	16,50	6,11	0,06	19,635	284,8	14,5	45,06
2	256,18	80	64,05	20	39,44	12,32	4,97	0,05	19,635	300,7	15,4	89,62
3	256,18	80	64,05	20	31,10	9,71	2,91	0,03	19,635	346,3	17,7	144,18
4	256,18	80	64,05	20	22,93	7,16	2,56	0,03	19,635	504,4	25,7	252,24
5	256,18	80	64,05	20	12,66	3,95	2,16	0,02	19,635	639,5	32,6	734,22
6	256,18	80	64,05	20	0,00	0,00	4,75	0,05	19,635	1639,5	83,7	Kuru

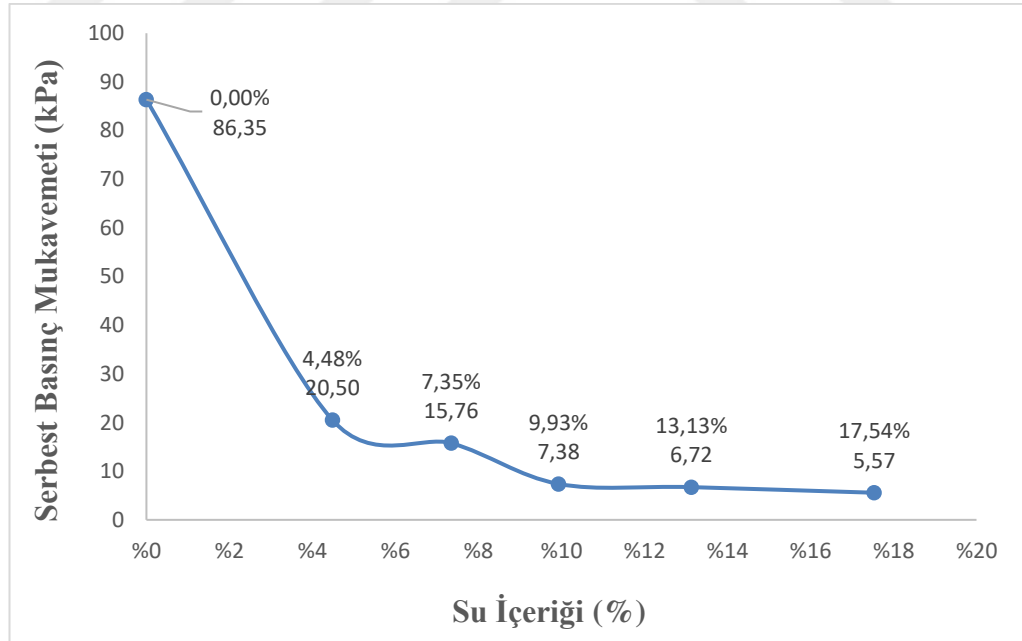
Her iki zemin için de en kuru örneğin en yüksek mukavemet değerine sahip olduğu görülmektedir. En yüksek su içeriğine sahip örnekler ise en düşük mukavemet değerlerine sahiptirler. Su içeriği değerleri azaldıkça, diğer bir deyişle, matrik emme değerleri arttıkça mukavemetin de arttığı ilgili tablolardan görülmektedir.

Her bir su içeriğinde kırılan örneklerin deformasyon gerilme grafikleri ise %10 KBK örneği için Şekil 4.3'te sunulmuştur. Deformasyon grafiklerinde en kuru örneğin en kırılğan yapıda olduğu görülmektedir. Bununla beraber, deformasyonlar karşılaştırıldığında en kuru örneğin en ıslak ve en sünek davranış gösteren ilk iki örneğin (%17,54 ve %13,13 su içeriğinde olan örnekler) deformasyon değerlerine ulaştığı da görülmüştür. Arada kalan diğer su içeriklerine sahip örneklerin deformasyon değerlerinde ise düşüş ve kırılğanlık gözlenmiştir.



Şekil 4.3. %10 KBK numunelerinin Gerilme – Deformasyon İlişkisi

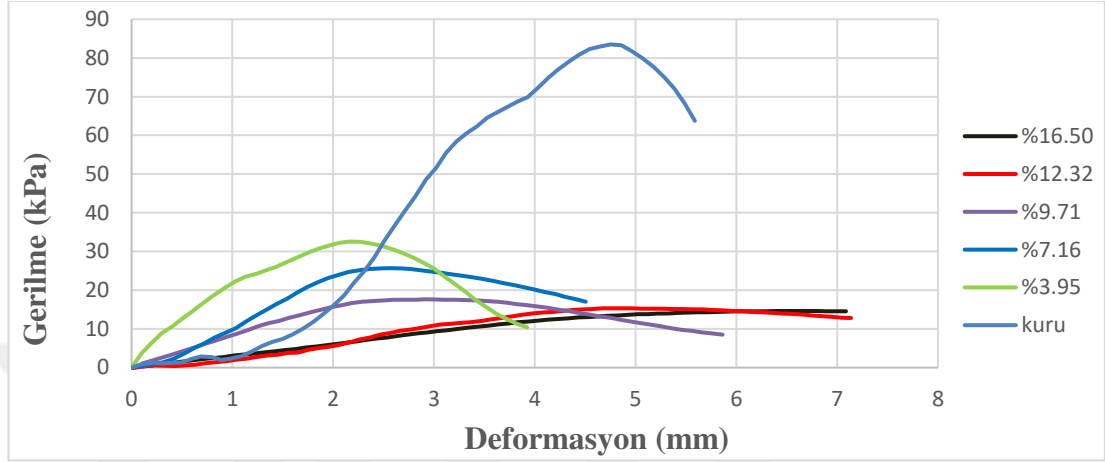
Şekil 4.4'te ise %10 KBK numuneleri için serbest basınç mukavemetleri ile numunelerin su içerikleri arasındaki ilişki sunulmuştur. Su içeriğinin artışı ile net bir şekilde serbest basınç mukavemetinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.4. %10 KBK numunelerin su içeriğine göre serbest basınç değişimi

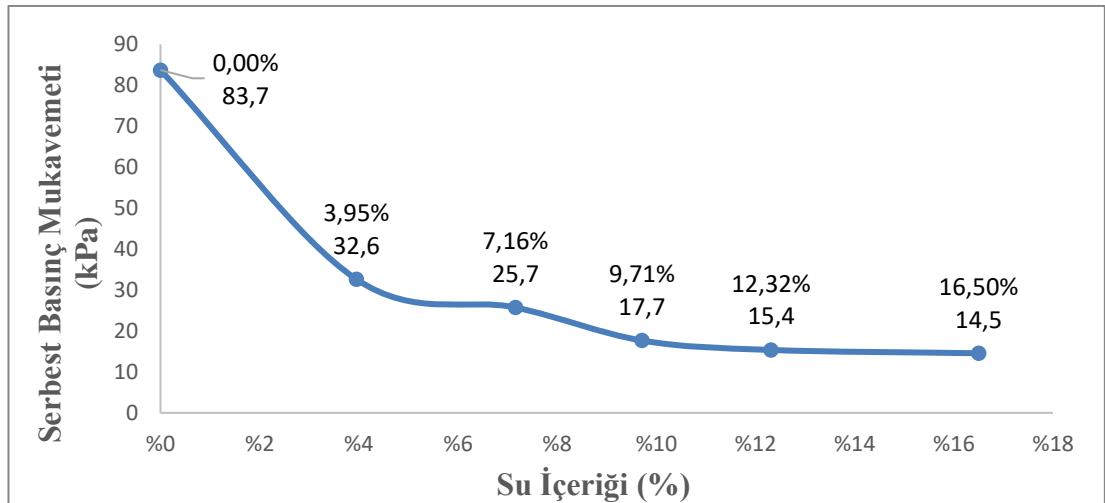
Her bir su içeriğinde kırılan örneklerin %20 KBK örneği için deformasyon gerilme grafikleri de Şekil 4.5'te sunulmuştur. Benzer şekilde bu karışım için de deformasyon grafiklerinde en kuru örneğin en kırılabilir yapıda olduğu görülmektedir.

Yine benzer davranışla en kuru örneğin en ıslak ve en sünek davranış gösteren ilk iki örneğin (%16,50 ve %12,32 su içeriğinde olan örnekler) deformasyon değerlerine ulaştığı görülmüştür. Arada kalan diğer su içeriklerine sahip örneklerin deformasyon değerlerinde ise düşüş ve kırılmalık gözlenmiştir.



Şekil 4.5. %20 KBK numunelerinin Gerilme – Deformasyon ilişkisi

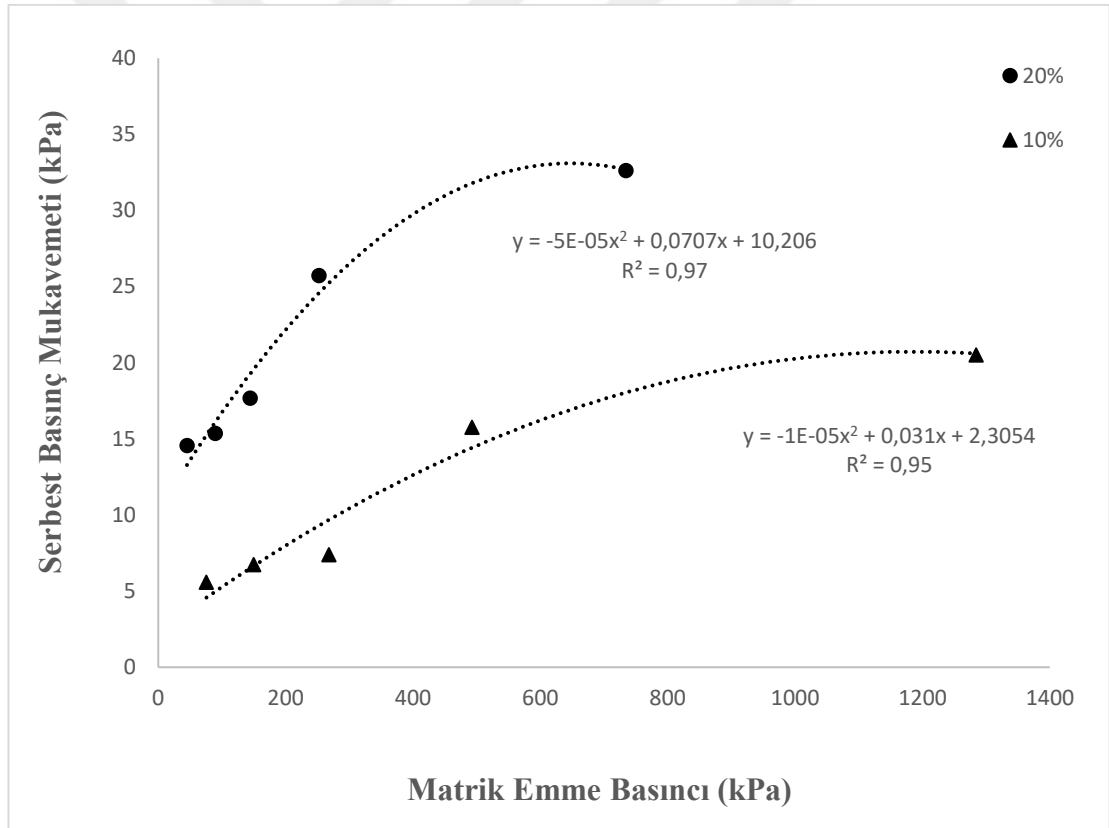
%20 KBK numuneleri için serbest basınç mukavemetleri ile numunelerin su içerikleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.6'da sunulmuştur. Yine %10 KBK örneği ile benzer şekilde su içeriğinin artışı ile net bir şekilde serbest basınç mukavemetinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.6. %20 KBK numunelerin su içeriğine göre serbest basınç değişimi

Tüm numunelerin serbest basınç değerlerinin matrik emme ile değişiminin incelenebilmesi için de kendi su içeriklerine karşılık gelen matrik emme değerleri Şekil 4.7'de sunulmuştur. Etüv kurusu numunenin matrik emme değeri ölçülmediği

için bu grafikte yer verilmemiştir. Şekil 4.7’deki sonuçlardan genel olarak %20 KBK numunelerine ait serbest basınç dayanımlarının %10 KBK numunelerine ait serbest basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bentonit oranındaki artış ile serbest basınç mukavemetinin de arttığı bu iki numune tipi için söylenebilir. Matrik emme ile serbest basınç ilişkisi için de her bir KBK için veriler arasında eğilim çizgisi çizdirildiğinde parabolik olarak oldukça anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Veriler arasındaki uyuma işaret eden R^2 değeri, %10 KBK için %95, %20 KBK için de %97 değerlerine ulaşarak oldukça net bir ilişki ortaya koyulmuştur. Ek olarak, mukavemetteki artış %20 KBK numunesi ile çok daha düşük matrik emme değerlerinde dahi ulaşılmakta olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın esas amacı olan matrik emmenin serbest basınç mukavemeti ile ilişkisi her iki zemin karışımı için de belirlenmiş olup sunulmuştur.



Şekil 4.7. %10 ve %20 KBK Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemeti – Matrik Emme İlişkisi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zeminin emme basıncını belirlenmesi için kullanılan zemin numuneleri, farklı iki bentonit oranı (%10 ve %20) ile hazırlanmış kum karışımları ve bunların 8 farklı özellikte alt gruba sahip su içeriklerinde sıkıştırılmıştır. Her iki karışım için de numuneler, 7'si farklı su içeriklerinde hazırlanmış 1 tanesi de doğal kurumaya bırakılmış halde kullanılmıştır. Bu zeminlerde su içerikleri değiştirilerek emme basınçlarındaki değişimi belirlenmiştir. Zeminin emme basınçlarını belirlemek için filtre kâğıdı yöntemi kullanılmıştır.

Zeminin kayma dayanımını belirlemek için ise tek eksenli serbest basınç deneyi tercih edilmiş olup, 2 adet grupta 6'şar adet deney numunesi hazırlanarak deney gerçekleştirilmiştir. 1. Grupta % 10 bentonit ve 2. Grupta %20 bentonit kullanılmış olup, iki grupta da farklı su içeriklerindeki numuneler kullanılmıştır buna göre de su içeriğine göre kayma dayanımının nasıl değiştiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan bu çalışma kapsamında zeminin değişken su içeriklerinde göstereceği davranışı tahmin edebilmek adına şu sonuçlar ortaya çıkmıştır;

- a) Zeminin su emme basıncı arttıkça, zeminin içerdiği su miktarı artmakta ve zemin suya doymuş olduğunda zeminin matrik emmesinin sıfır (0) olduğu, zemin doymamış durumdayken maksimum durumda olduğu, değişken su içeriklerine sahip olduğunda ise doymunluk oranına göre su emme miktarı ters orantılı bir şekilde değişmektedir.
- b) Serbest basınç deneylerine göre zemindeki su içeriğinin artması, matrik emmeyi azaltarak zemindeki kayma gerilmesi değerinin düşmesine neden olmuştur.
- c) Zemindeki bentonit miktarının artması ile matrik emmenin de arttığı belirlenmiştir.
- d) Bu çalışma içinde kullanılan karışımlarda zemindeki bentonit miktarının artması ile sıkışmanın da arttığı ve mukavemetin de arttığı belirlenmiştir.
- e) Karışımlardaki matrik emme değerleri ile serbest basınç mukavemetleri ilişkilendirildiğinde oldukça uyumlu sonuçlar ortaya çıkmış olup %10 KBK örnekleri için R_2 değeri %95, %20 KBK örnekleri için ise %97

olarak bulunmuştur. Dolayısı ile bu çalışmanın amacı olan matrik emmenin ile mukavemet üzerindeki etkisi de anlamlı şekilde ortaya konulmuştur.

- f) Zemindeki bentonit miktarı arttıkça; numunelerin davranışı okunan değerleri göz önünde bulundurulduğunda %10 kil karışımlı numunelerin kırılma noktasına ulaşma deformasyonu 3.5 mm civarındayken %20 kil karışımlı numunelerin kırılma noktasındaki birim deformasyon miktarı 4.5 mm civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bundan yola çıkıldığında zeminde süneklik artmaktadır denilebilir.
- g) Zemin örneklerinin deformasyon grafiklerine bakıldığında, deformasyon davranışının karakteristik bir hali olduğu görülmektedir. En yüksek iki su içeriğine sahip deformasyon değerleri de diğer sonuçlara göre daha yüksek ölçülmüş olup aynı zamanda en sünek davranışı da göstermiştir. Ardından gelen su içerikleri azaldıkça deformasyon değerleri de azalmıştır. En son kuru numunede ise yine en baştaki deformasyon değerine ulaştığı gözlenmiştir. Her iki karışım için de bu davranış karakteristik olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Önalp, A. & Arel, E. (2013). *Geoteknik bilgisi I zeminler mekaniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi
- [2] Çetin, T. (2010). *Şev stabilite analizleri için bilgisayar programının geliştirilmesi ve analiz yöntemlerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- [3] Yılmaz, E. (2006). *Zeminlerin endeks özelliklerinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Önalp, A. & Arel, E. (2004). *Geoteknik bilgisi II yamaç ve şevlerin mühendisliği*. İstanbul: Birsen Yayınevi
- [5] Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Fredlund, M. D., Wilson, G. W., & Fredlund, D. G. (1997, October). Indirect procedures to determine unsaturated soil property functions. In *Proceedings of the 50th Canadian Geotechnical Conference, Golden Jubilee, Ottawa, Ont* (pp. 20-22).
- [7] Kumbasar, V. & Kip, F. (1999). *Zemin mekaniği problemleri*. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- [8] Davies, J. T. & Rideal, E. K. (1963). *Interfacial Phenomena*, chapter 6.
- [9] Kayadelen, C. (2005). *Doygun olmayan ince daneli zeminlerin k₀ koşullarındaki yanıl basınçlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [10] Bitelli, G., Simone, A., Girardi, F., & Lantieri, C. (2012). Laser scanning on road pavements: A new approach for characterizing surface texture. *Sensors*, 12(7), 9110-9128.
- [11] Charles, W.W., Ng, & Menzies, B. (2007). *Advanced unsaturated soil mechanics and engineering*. New York: Taylor & Francis
- [12] Fredlund, D.G., Wilson, G.W. & Barbour, S.L. (2001). 5. *Unsaturated Soil Mechanics and Property Assessment*
- [13] Genç, S. (2009). *Şişen zeminler ve bentonit – kaolin karışımlarının şişme özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] Edlefsen, N. E., Anderson, A. B. C., ‘*Thermodynamics of Soil Moisture*’, *Hilgardia*, Vol:15, pp: 31-298, 1943.
- [15] Gökşan, T. Ş. (2007). *Zeminlerin emme özelliklerinin belirlenmesinde bir yaklaşım*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [16] Richards, B.G. 1965, ‘Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors, in *Moisture Equilibria and Moisture*

Changes in Soils Beneath Covered Areas', 1965, A Symp. in Print, Australia: Butterworths,

- [17] Gülşen, F. (2013). *Doygun ve doymayan zemin mekaniği kavramları ile sığ temellerin taşıma gücü*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] Fredlund, D.G. (1998). *The Practice of Unsaturated Soils*. Geotechnical Hazards, Rotterdam
- [19] Bulut, R., & Leong, E.C. (2008). Indirect measurement of suction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, 633-644
- [20] Al-Khafaf, S., & Hanks, R. J. (1974). Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential. *Soil Science*, 117(4), 194-199.
- [21] Keskin, S.M. & Laman, M. (2007). Sonlu elemanlar yöntemiyle şev stabilitesi problemlerinin analizinde kullanılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(1), 101-114.
- [22] Guan, G. S., Rahardjo, H., & Choon, L. E. (2010). Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(4), 594-606.
- [23] Ulusay, R. (2007). Heyelanlar ve mühendislik şevlerindeki duraysızlıklar: Türleri, etkileri ve zararların azaltılması. *Sel-Heyelan-Çığ Sempozyumu, Samsun*, 157-185.
- [24] Akçakal, Ö. (2009). *Şev stabilite analizinde geri hesap yöntemi ve bir vaka analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] Tekin, A. (2011). *Sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile şev stabilite analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Vanapalli, S.K. & Oh, T. (2011). *Application of Total Stress Analysis for Unsaturated Soils in Engineering Practice*, 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference
- [27] Lu, N. & Likos, W.J. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [28] Lu, N., & Griffiths, D. V. (2004). Profiles of steady-state suction stress in unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 1063-1076.
- [29] Lu, N., Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46(5).
- [30] Fredlund, D. G. (1978). Usage, requirements and features of slope stability computer software (Canada, 1977). *Canadian Geotechnical Journal*, 15(1), 83-95.
- [31] Satı Y. (2016). *sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin kayma mukavemetinin drenajlı koşullarda incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [32] Ersoy, Ş. (2013). Afet Raporu “Dünya ve Türkiye”. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Araştırma Merkezi*, 7-12.
- [33] Insapedia (2024). *Heyelan nedir? Heyelan çeşitleri ve sınıflandırılması*. <https://insapedia.com/heyelan-nedir-heyelan-cesitleri-ve-siniflandirilmesi/>
- [34] Isakov, A., & Moryachkov, Y. (2014). Estimation of slope stability using two-parameter criterion of stability. *International Journal of Geomechanics*, 14(3), 06014004.
- [35] Kim, J., Park, S., Jeong, S. (2006). Effect of wetting front suction loss on stability of unsaturated soil slopes. *Seepage and Enviromental Geotechnics/ASCE*, 148, 70-77,
- [36] Cho, S. E., & Lee, S. R. (2002). Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, 128(9), 756-763.
- [37] Taşkıran, T., & Fidan, A. A. (2019). Doymamış koşullardaki bir şevin yağış etkisindeki duraylılığını etkileyen parametrelerin incelenmesi. *Teknik Dergi*, 30(5), 9483-9506.
- [38] Silvestri, F.S. (1998). *Geotechnical Engineering Department, University of Napoli Federico II. Via Claudio, 21, 80125, Naples Italy*
- [39] Seed, H. B., Woodward Jr, R. J., & Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(3), 53-87.
- [40] Wang, M. C., & Huang, C. C. (1984). Soil compaction and permeability prediction models. *Journal of Environmental Engineering*, 110(6), 1063-1083.
- [41] Kenney, T. C., Veen, W. V., Swallow, M. A., & Sungaila, M. A. (1992). Hydraulic conductivity of compacted bentonite–sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3), 364-374.
- [42] Stewart, D. I., Cousens, T. W., Studds, P. G., & Tay, Y. Y. (1999). Design parameters for bentonite-enhanced sand as a landfill liner. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 137(4), 189-195.
- [43] Karabüyük, E. (2001). *Kumlu zeminlerin stabilizasyonunda bentonit kullanılmasının geoteknik özelliklere etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [44] ASTM D5298-16, Standard Test Methods for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.
- [45] ASTM, D. (2016). 2166; Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *West Conshohocken, PA, United States*.