

**ARTIK TOPRAK ZEMİNLERİN ZEMİN-SU  
KARAKTERİSTİK EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ**

**THE DETERMINATION OF SOIL-WATER  
CHARACTERISTIC CURVES OF RESIDUAL SOILS**

**ECENUR ÖZEL**

**PROF. DR ADİL BİNAL**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

olarak hazırlanmıştır.

2019

ECENUR ÖZEL'in hazırladığı "Artık Toprak Zeminlerin Zemin-Su Karakteristik Eğrilerinin Belirlenmesi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Aykut AKGÜN

Başkan



Prof. Dr. Adil BİNAL

Danışman



Prof. Dr. Dilek TÜRER

Üye



Doç. Dr. Hakan NEFESLİOĞLU

Üye



Doç. Dr. Celal TUNUSLUOĞLU

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak ..... / ..... / ..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

05 / 07 / 2019

ECENUR ÖZEL



## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

05 / 07 / 2019

ECENUR ÖZEL



# ÖZET

## ARTIK TOPRAK ZEMİNLERİN ZEMİN-SU KARAKTERİSTİK EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ

**Ecenur ÖZEL**

**Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adil BİNAL**

**Haziran 2019, 103 sayfa**

Matrik ve toplam emme basıncı, doymun olmayan zemin mekaniğinde kullanılan önemli kavramlardır. Artık toprak zeminlerin birçok mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan zemin su karakteristik eğrilerinin çizilmesi bu tez çalışmasının amacını oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda Ankara ili Solfasol Mahallesi'nden alınan üç farklı artık toprak numunesi üzerinde zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama temel zemin mekaniği deneylerini kapsamaktadır. Deneyler sırası ile elek analizi, hidrometre, piknometre, Atterberg limitleri, standart Proktor ve kesme kutusu deneyleridir. Her üç artık toprak numunesi için de bu deneyler gerçekleştirilmiş ardından doymun olmayan zemin mekaniği kavramlarını incelemek amacıyla deneysel çalışmalarda ikinci aşamaya geçilmiştir. İkinci aşamada ise artık toprak numunelerinin doymunluk dereceleri, matrik ve toplam emme basınç değerlerini tayin etmek amacıyla filtre kağıdı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zeminlere ait matrik emme basınçlarına karşılık filtre kağıdı nem içeriği grafikleri çizilmiş, zemin su karakteristik eğrileri (SWCC) oluşturulmuştur. Tez kapsamında zemin numunelerinin matrik emme basıncı değerlerini farklı bir yöntemle

belirlemek amacıyla basınç plakası deney düzeneği tasarlanmıştır. Yeni cihazda yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile de artık toprak numunelere ait zemin su karakteristik eğrileri (SWCC) çizilmiştir. Basınç plakası deneyleri sırasında killi zeminlerde numune üzerine sık aralıklarla matrik emme basıncı değerleri uygulanarak daha düzgün zemin su karakteristik eğrileri elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Hem basınç plakası hem de filtre kağıdı deneyleri sonucunda çizilen zemin su karakteristik eğrileri incelendiğinde numunelerdeki kil oranı arttıkça eğrilerin yukarı doğru kaydığı görülmüştür. Kil içeriği %21 grimsi-yeşil renkli artık toprak örneğinde, filtre kağıdı deneylerinde elde edilen SWCC analizleri sonucu, en yüksek matrik emme basıncı değeri (4.44 bar) saptanmıştır. Kil içeriği en düşük oranda bulunan (%2.7) kırmızımsı-pembe renkli artık toprak örneklerinde ise matrik emme basıncı değeri (4.19) bar olarak bulunmuştur. Filtre kağıdı ve basınç plakası deney verilerine göre ise; ince tane boyu artışına bağlı olarak matrik emme basıncı değerinin arttığı, kaba tane boyu artışına bağlı olarak ise matrik emme basıncı değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Andezitik Artık Toprak, Matrik Emme, Filtre Kağıdı, Basınç Plakası, Zemin-Su Karakteristik Eğrisi.

# **ABSTRACT**

## **THE DETERMINATION OF SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVES OF RESIDUAL SOILS**

**Ecenur ÖZEL**

**Master of Science, Department of Engineering Geology**

**Supervisor: Prof. Dr. Adil BİNAL**

**June 2019, 103 pages**

Matric and total suction pressure are two key concepts used in unsaturated soil mechanics. The soil water characteristic curves which are used to determine many engineering features of residual soil are the main purpose of this thesis. For this purpose, the soil mechanic experiments were carried out by using three different residual soil samples which were taken from Solfasol district in Ankara. The laboratory studies were conducted in two different phases. The first phase covers soil mechanics experiments. The experiments carried out in this stage are subsequently sieve analysis, Atterberg limits test, standard Proctor tests and direct shear box tests. Following the experiments carried out on each three soil samples, the second phase was initiated to examine unsaturated soil mechanics concepts. In the second phase, filter paper experiments were conducted to determine saturation degree, matric and total suction pressure values of the samples of residual soil. The filter paper moisture content graphs which are suitable for the matric suction pressure of the soil were drawn and soil water characteristic curves were formed. Within the scope of the thesis, pressure plate extractor testing apparatus were designed to determine matric suction pressure of the

soil samples in a different way. Soil water characteristic curves (SWCC) were drawn with the results obtained from the experiments which were carried out using new device. The result of this study revealed that smoother soil water characteristic curves can be obtained by implementing matric suction pressure at a frequent interval to samples on clay soil during pressure plate experiments. Examining the soil water characteristic curves obtained from both the pressure plate and filter paper tests, it has been observed that the curves slope upwards as the clay proportion in the samples increased. As a result of SWCC analysis obtained from filter paper tests, the highest matric suction pressure value (4.44 bar) was found in the residual soil sample which has %21 clay content. On the other hand, matric suction pressure was observed as 4,19 bar in the reddish-pink colored soil samples containing the lowest proportion of clay %2,7. Filter paper and pressure plate test data show that the matric suction pressure value has increased based on the increase in fine grain size while it decreased due to the increase in coarse grain size.

**Keywords:** Andesitic Residual Soil, Matric Suction, Filter Paper, Pressure Plate, Soil-Water Characteristic Curve.



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyerek deneyimi ve katkılarıyla yol gosteren değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Adil Binal'a, tez çalışması kapsamında gerçekleştirmiş olduğum laboratuvar çalıŐmalarım boyunca yardımcı olan Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvar teknisyeni Özgür Erol'a, bölümümüz araştırma görevlisi değerli arkadaşım Levent Bayram'a, bütün bu süreçte desteğini her zaman yanımda hissettiğim Sertaç Demir'e, geçmiŐten bugüne almış olduğum her kararda arkamda olan maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen canım annem babam ve kardeŐime sonsuz teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ İLE İLGİLİ KAVRAMLAR .....	11
3.1. Zemin Toplam Emme Kavramı .....	12
3.1.1. Matrik emme basıncı .....	15
3.1.2. Osmotik emme basıncı .....	17
3.1.3. Emme basıncının ölçülmesi .....	18
3.1.3.1. Filtre kağıdı tekniği .....	19
3.1.3.2. Basınç plakası .....	20
3.2. Zemin Su Karakteristik Eğrisi (SWCC) .....	23
4. İNCELEME ALANI VE ARAZİ ÇALIŞMALARI .....	26
4.1. İnceleme Alanının Tanıtımı .....	26
4.2. Arazi çalışmaları .....	27
4.3. İnceleme Alanının Jeolojisi .....	30
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI.....	33
5.1. Laboratuvar Çalışmaları .....	34
5.1.1. Elek analizleri ve hidrometre deneyi .....	34
5.1.2. Kıvam (Atterberg) limitleri analizi .....	36
5.1.3. Özgül ağırlığın belirlenmesi (piknometre deneyi).....	38
5.1.4. Standart Proktor deneyi.....	39
5.1.5. Kesme kutusu deneyi .....	40

5.1.6.	Filtre kağıdı deneyi.....	42
5.1.6.1.	Filtre kağıdı deneyi ile toplam ve matrik emme basıncı belirlenmesi aşamaları .....	45
5.1.6.2.	Filtre kağıtlarının su içeriklerinin tayin edilmesi .....	49
5.1.6.3.	Filtre kağıtlarının su içeriklerinin hesaplanması.....	53
5.1.6.4.	Filtre kağıdı deneyi sonucu toplam ve matrik emme değerlerinin hesaplanması.....	53
5.1.7.	Basınç plakası deneyi .....	54
5.2.	Numunelerin Mühendislik Özellikleri .....	61
5.2.1.	Numune 1 .....	61
5.2.2.	Numune 2 .....	67
5.2.3.	Numune 3 .....	73
5.3.	Filtre Kağıdı Deney Sonuçları .....	79
5.3.1.	Numune 1 Filtre kağıdı deney sonuçları.....	79
5.3.2.	Numune 1 Filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen SWCC.....	81
5.3.3.	Numune 2 Filtre kağıdı deney sonuçları.....	81
5.3.4.	Numune 2 Filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen SWCC.....	83
5.3.5.	Numune 3 Filtre kağıdı deney sonuçları.....	83
5.3.6.	Numune 3 Filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen SWCC.....	85
5.4.	Basınç Plakası Deneyi Sonucu Elde Edilen SWCC .....	86
5.4.1.	Numune 1 .....	86
5.4.2.	Numune 2 .....	87
5.4.3.	Numune 3 .....	88
6.	DEĞERLENDİRMELER .....	90
7.	ÖNERİLER .....	99
8.	KAYNAKLAR .....	100
9.	EKLER.....	104
9.1.	EK 1 Kırmızımsı-pembe numuneye ait filtre kağıdı deneyi sonuçları .....	105
9.2.	EK 2 Sarı-boz numuneye ait filtre kağıdı deney sonuçları.....	106
9.3.	EK 3 Grimsi-yeşil renkli filtre kağıdı deney sonuçları .....	107
9.4.	EK 4 Numune 1, 2 ve 3' e ait filtre kağıdı sonucu elde edilen SWCC .....	108

9.5.	EK 5 Numune 1, 2 ve 3' e ait doygunluk derecesi sonuçları.....	109
9.6.	EK 6 – Tez çalışması orjinallik raporu.....	110
ÖZGEÇMİŞ	.....	111

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Saykrometre deney düzeneği (Mikrovoltmetre, bilgisayar ve termos çanta).....	4
Şekil 2.2 Tempe basınç hücresi [8]. .....	5
Şekil 2.3 Tempe hücresi açık şekli [8].....	6
Şekil 2.4 Basınç plakası deney düzeneği açık şekli.....	6
Şekil 2.5 Basınç plakası deney düzeneği kapalı şekli.....	7
Şekil 2.6 Gökoğlu tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında kullanılan basınç plakası deney aleti [9]. .....	8
Şekil 2.7 Türker tarafından filtre kağıdı deneyi sonucu çizilen SWCC [11]. .....	9
Şekil 2.8 Fattah vd. zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş oldukları filtre kağıdı deney aşamaları [12].....	10
Şekil 3.1 Doygun olmayan zeminde dört fazın görülmesi [1].....	11
Şekil 3.2 Bağlı nem - toplam emme ilişkisi [1]. .....	13
Şekil 3.3 Toplam emme ve bileşenleri, matrik emme ve osmotik emme [1]. .....	15
Şekil 3.4 Kapiler su yükselmesinin fiziksel modellenmesi [13,16]. .....	17
Şekil 3.5 Basınç plakası şematik görünümü [19]. .....	21
Şekil 3.6 Basınç plakası kapalı görünümü [19]. .....	21
Şekil 3.7 Basınç plakası (tenceresi) içerisine yerleştirilen seramik disk.....	22
Şekil 3.8 Farklı tane boyuna sahip zeminlere ait zemin su karakteristik eğrisi [1]. .....	23
Şekil 4.1 İnceleme alanı yer bulduru haritası [22]. .....	26
Şekil 4.2 İnceleme alanına ait ARGIS haritası [22]. .....	27
Şekil 4.3 Kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesinin alındığı bölge. ....	28
Şekil 4.4 Sarı-boz renkli artık toprak numunesinin alındığı bölge. ....	28
Şekil 4.5 Grimsi-yeşil renkli artık zemin numunesinin alındığı bölge. ....	29
Şekil 4.6 Tipik bozunma profili [23].....	29
Şekil 4.7 Çalışma alanına ait jeolojik harita [26]. .....	30
Şekil 4.8 Çalışma alanına ait genelleştirilmiş stratigrafik istif (ölçeksizdir). .....	31
(Kasapoğlu'ndan alınarak basitleştirilmiştir [27].) .....	31
Şekil 5.1 Elek analizi deneyi.....	35
Şekil 5.2 Üç zemin türünde gerçekleştirilen hidrometre deneyi .....	36
Şekil 5.3 Likit limit deneyi. ....	37
Şekil 5.4 Likit limit deneyi sonucunda su içeriğini belirlemek için alınan numuneler .....	37
Şekil 5.5 Plastik limit deneyi. ....	37
Şekil 5.6 Piknometre deneyi. ....	38
Şekil 5.7 Standart Proktor deneyi uygulaması.....	39
Şekil 5.8 Kesme kutusu deney düzeneği. ....	40
Şekil 5.9 Kesme kutusu deney aletinde makaslanması için hazırlanan zemin numunesi.....	41
Şekil 5.10 Makaslanan zemin numunesinin deney sonrası görünümü. ....	41

Şekil 5.11 Toplam ve matrik emme basıncının ölçülmesi [18].....	43
Şekil.5.12 Filtre kağıdı deneyinin şematik olarak gösterilmesi [37].....	43
Şekil 5.13 Filtre kağıdında kullanılan örneklerin hazırlanması.....	45
Şekil 5.14 Filtre kağıtlarının nem almasını önlemek amacıyla desikatörde bekletilmesi.....	45
Şekil5.15 Örneklerin sıkıştırılması ve ringden çıkarılması. ....	46
Şekil 5.16. Filtre kağıtlarının sandviç şeklinde hazırlanması.....	46
Şekil 5.17 Filtre kağıtlarının zemin numuneleri arasına yerleştirilmesi. ....	47
Şekil 5.18 Zemin numunelerinin bantlanması.....	47
Şekil 5.19 Zemin numunesi üzerine plastik ring yerleştirilmesi. ....	48
Şekil 5.20 Filtre kağıtlarının plastik ring üzerine yerleştirilmesi.....	48
Şekil 5.21 Kavanoz kapaklarının sıkıca bantlanması.....	49
Şekil 5.22 Matrik ve toplam emmeyi belirleme de kullanılan alüminyum kaplar .....	50
Şekil5.23 Alüminyum kapların soğuk daralarının ( $T_c$ ) alınması.....	50
Şekil 5.24 Kavanozun kapağında bulunan bantın çıkarılması.....	51
Şekil 5.25 Ring üstündeki filtre kağıtlarının alüminyum kutulara alınması.....	51
Şekil 5.26 Ortadaki filtre kağıdının kutu içerisine alınması. ....	52
Şekil 5.27 Emme basıncı - su içeriği ilişkisini veren kalibrasyon eğrisi [17].....	54
Şekil 5.28 Laboratuvarda kullanılan basınç plakası deney düzeneği ekipmanları.....	56
Şekil 5.29 Basınç tenceresinin içten görünümü. ....	57
Şekil 5.30 Seramik disk üzerine numunelerin yerleştirilmesi.....	57
Şekil 5.31 Seramik disk üzerindeki zemin numunelerinin saf su ile doyurulma aşamaları.....	58
Şekil 5.32 Basınç tenceresinin vidalarının sıkılması.....	58
Şekil 5.33 Basınç plakası deneylerinde kullanılan manometrenin yakından görünümü. ....	59
Şekil 5.34 Tahliye borusundan su çıkışının gözlemlenmesi.....	60
Şekil 5.35 Kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesinin X-ışınları analizi sonuçları.....	62
Şekil 5.36 Numune 1 Kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğinin tane boyu dağılım grafiği.....	62
Şekil 5.37 Numune 1 Kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğinin Atterberg limit deneyleri sonucu elde edilen grafiği. ....	63
Şekil 5.38 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak zemine ait nem içeriği - maksimum kuru yoğunluk grafiği.....	64
Şekil 5.39 Numune 1 kırmızımsı - pembe renkli örneğin $1.2 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	66
Şekil 5.40 Numune 1 kırmızımsı - pembe renkli örneğin $1.4 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	66
Şekil 5.41 Numune 1 kırmızımsı - pembe renkli örneğin $1.6 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	67
Şekil 5.42 Sarı-boz renkli artık toprak numunesinin X-ışınları analizi sonuçları.....	68
Şekil 5.43 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğinin tane boyu dağılım grafiği.....	68

Şekil 5.44 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğinin Atterberg limit deneyleri sonucu elde edilen grafiği.....	69
Şekil 5.45 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak zemine ait nem içeriği- maksimum kuru yoğunluk grafiği.....	70
Şekil 5.46 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin 1.2 g/cm <sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	72
Şekil 5.47 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin 1.4 g/cm <sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	72
Şekil 5.48 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin 1.6 g/cm <sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	73
Şekil 5.49 Grimsi-yeşil renkli artık toprak numunesin X-ışınları analizi sonuçları.....	74
Şekil 5.50 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğinin tane boyu dağılım grafiği.....	74
Şekil 5.51 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğinin Atterberg limit deneyleri sonucu elde edilen grafiği.....	75
Şekil 5.52 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak zemine ait nem içeriği- maksimum kuru yoğunluk grafiği.....	76
Şekil 5.53 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin 1.2 g/cm <sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	78
Şekil 5.54 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin 1.4 g/cm <sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	78
Şekil 5.55 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin 1.6 g/cm <sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.....	79
Şekil 5.56 Filtre kağıdı deneyi sonucu numune 1 kırmızımsı-pembe renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).....	81
Şekil 5.57 Filtre kağıdı deneyi sonucu numune 2 sarı-boz renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).....	83
Şekil 5.58 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).....	85
Şekil 5.59 Basınç plakası deneyi sonucunda numune 1 kırmızımsı-pembe renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).....	87
Şekil 5.60 Basınç plakası deneyi sonucu numune 2 sarı-boz renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).....	88
Şekil 5.61 Basınç plakası deneyi sonucu numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğine ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).....	89
Şekil 6.1 Kil yüzdelere karşılık matrik emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.....	93
Şekil 6.2 Silt yüzdelere karşılık matrik emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.....	94

Şekil 6.3 Kum yüzdelere karşılık matrik emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.....	95
Şekil 6.4 Çakıl yüzdelere karşılık matrik emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.....	96



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Çalışma alanındaki andezitlerin bozunma profili [25].	31
Çizelge 5.1 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğe ait elek analizi sonuçları.	63
Çizelge 5.2 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğe ait Atterberg limitleri deney sonuçları.	64
Likit Limit (%)	64
Çizelge 5.3 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğe ait standart Proktor deneyi sonuçları.	65
Çizelge 5.4 Numune 1 kırmızımsı-pembe renkli artık toprağın kesme kutusu deney sonuçları.	65
Çizelge 5.5 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğe ait elek analizi sonuçları.	69
Çizelge 5.6 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğe ait Atterberg limitleri deney sonuçları.	70
Çizelge 5.7 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak zemine ait standart Proktor deneyi sonuçları.	71
Çizelge 5.8 Numune 2 sarı boz renkli artık zeminin kesme kutusu deney sonuçları.	71
Çizelge 5.9 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğine ait elek analizi sonuçları.	75
Çizelge 5.10 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğine ait Atterberg limitleri deney sonuçları.	76
Çizelge 5.11 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak zemine ait standart Proktor deneyi sonuçları.	77
Çizelge 5.12 Numune 3 grimsi yeşil renkli artık zeminin kesme kutusu deney sonuçları.	77
Çizelge 5.13 Numune 1 kırmızımsı – pembe renkli örneğin filtre kağıdı deney sonuçları.	80
Çizelge 5.14 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin filtre kağıdı deney sonuçları.	82
Çizelge 5.15 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin filtre kağıdı deneyi sonuçları.	84
Çizelge 6.1 Basınç plakası deney sonuçlarına göre 3 numune için tane boyu- matrik emme ilişkisi.	97

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\Theta$	Hacimsel Su İçeriği
$S_r$	Doygunluk Derecesi
$\psi$	Zeminin Toplam Emme Basıncı
$u_a$	Boşluk Hava Basıncı
$u_w$	Boşluk Suyu Basıncı
$\pi$	Osmotik Emme
$\psi_m$	Matrik Emme
$G_s$	Özgül Ağırlık
$\phi'$	Efektif İçsel Sürtünme Açısı
$c'$	Efektif Kohezyon

### Kısaltmalar

SWCC	Zemin Su Karakteristik Eğrisi
ASTM	American Society for Testing and Materials
LL	Likit Limit
PL	Plastik Limit
PI	Plastisite İndeksi

# 1. GİRİŞ

Jeoteknik mühendisliği; ihtiyaçların daha hızlı, ekonomik ve güvenilir biçimde karşılanması için sürekli gelişim halindedir. Günümüz koşullarında deneysel çalışmaların yaygınlaşması ve deney alet teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak doymuş ve doymuş olmayan zemin mekaniği üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Daha önceleri zemin mekaniği uygulamalarında incelenen zeminler kuru veya tamamen suya doymuş olarak kabul edilmekte ve hesaplamalar yapılmaktaydı. Fakat dünyada yeryüzünün büyük bir çoğunluğunun kurak ve yarı kurak iklim koşullarına sahip olması sebebiyle zeminler hiçbir zaman tamamen suya doymuş durumda olmamaktadır. Bu sebeple son yıllarda doymuş olmayan zeminlerin mekaniği üzerine yapılan çalışmalar günümüz laboratuvar teknolojilerinin gelişmesine ve deney düzeneklerinin modernleşmesine paralel olarak artış göstermiştir.

Kurak ve yarı kurak bölge zeminleri, negatif boşluk suyu basıncına sahiptirler. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar doymuş olmayan zeminlerde emme basıncı değişimlerine bağlı olarak zeminlerin mekanik davranışlarının büyük oranda değişiklik gösterebileceğini işaret etmektedir [1]. Zemin emmesindeki değişim zemin davranışına katkıda bulunan tüm mekanizmaları doğrudan etkilemektedir.

Toplam emme, matrik emme ve osmotik emme olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Bileşenlerden ilki zeminlerin makaslama dayanımına etkisi bulunan ve boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanan matrik emme basıncı, ikincisi ise boşluk suyu içerisinde bulunan çözünmüş tuzların varlığına bağlı olarak değişim gösteren osmotik emme kavramıdır. Matrik emme; zeminin kapileritesi, dokusu ve yüzey emme kuvvetlerinden oluşur ve zeminin su tutma potansiyeli olarak da tanımlanır [1].

Doymuş olmayan zeminlere ait mekanik davranışlar, zeminlerin emme basınç değişimlerinden etkilenmektedir. Örnek olarak doymuş olmayan zeminler, doymuş

zeminlere oranla yüksek dayanıma sahiptirler ve düşük sıkışabilirlik göstermektedirler [1].

Doymun olmayan zemin mekaniğinde zeminlerin davranışını belirlemede kullanılan ve toprakta tutulan suyun miktarını tanımlayan bir başka kavram ise zemin su karakteristik eğrileridir (SWCC, Soil Water Characteristic Curve). Zemin su karakteristik eğrisi, doymunluk derecesi ile matrik emme basıncı, toplam veya hacimsel su içeriği ile matrik emme basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren eğridir.

Zemin su karakteristik eğrisinin belirlenmesinde birkaç deney aleti ve yöntem kullanılmaktadır. Toplam emme ve matrik emme basıncını ölçmede kullanılan bazı laboratuvar yöntemleri; basınç membranı, basınç plakası, tensiyometre, filtre kağıdı, santrifüj tekniği vb. [2, 3, 4]. Doymun olmayan zeminlerin matrik emme basıncının ölçümünü belirleyebilmek amacıyla Hilf 1956 yılında eksen kaydırma tekniğini geliştirmiştir. Eksen kaydırma yöntemi doymun olmayan zemin mekaniği uygulamaları için önemli bir kavram olup, matrik emme basıncını yüksek basınca dayanıklı seramik diskler ile belirlemeye yarayan yöntemdir [5]. Doymun olmayan ince taneli farklı artık toprak numunelerinin laboratuvar çalışmaları sonucunda zemin su karakteristik eğrilerinin belirlenmesi tezin amacını oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda bu tez çalışması, aşağıda tanımlanan aşamalar izlenerek yürütülmüştür.

1. Ankara Solfasol Mahallesi'nden üç farklı lokasyondan artık toprak örnekleri arazi çalışmaları sonucu temin edilmiştir.
2. Toprak örneklerinin fizikomekanik özelliklerini belirlemek amacıyla Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarında elek analizi, hidrometre, özgül ağırlık (piknometre), likit limit, plastik limit, kesme kutusu ve standart Proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3. Fiziksel özellikleri belirlenen zemin numunelerinin toplam ve matrik emme basıncı değerlerinin belirlenmesi ve zemin su karakteristik eğrilerinin çizilmesi amacıyla laboratuvar koşullarında yaklaşık 48 adet filtre kağıdı deneyi yapılmıştır.
4. Artık toprak numunelerinin matrik emme basıncını belirleyerek zemin su karakteristik eğrilerinin çizilmesini sağlayacak olan basınç plakası deney düzeneği Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi proje desteği ile tarafımızdan tasarımı gerçekleştirilmiş olup, bölümümüz zemin mekaniği laboratuvarında eksen kaydırma tekniği kullanılarak basınç plakası deneyleri gerçekleştirilmiştir.
5. Laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda üç farklı artık toprak örneklerine ait zemin su karakteristik eğrileri çizilmiştir.

Bu çalışma Türkiye’de, Uygulamalı Jeoloji alanında, artık topraklar üzerinde, filtre kağıdı ve ASTM standardı göz önünde bulundurularak tasarımı gerçekleştirilen basınç plakası deneyleri kullanılarak gerçekleştirilen ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bayrak, 2008 yılında gerçekleştirmiş olduğu yüksek lisans tezi çalışmasında [6], Ankara yöresine ait zemin numuneleri üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirerek toplam ve toplam emme bileşenlerinden olan matrik emme ve osmotik emme kavramlarını incelemiştir. Tez çalışması kapsamında ilk olarak zemin numunelerinin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla standart sınıflama deneyleri gerçekleştirmiştir. Toplam emme değerleri belirlenecek olan zemin numuneleri saf su ve saf su ile aynı su içeriğine sahip farklı molalitelere farklı tuz çözeltileri ilave edilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin toplam emme değerleri saykrometre tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Saf su kullanılarak hazırlanan zemin numunelerinin toplam emme değerleri ile tuz çözeltileri kullanılarak hazırlanan zemin numunelerinin toplam emme değerleri kıyaslanmıştır.



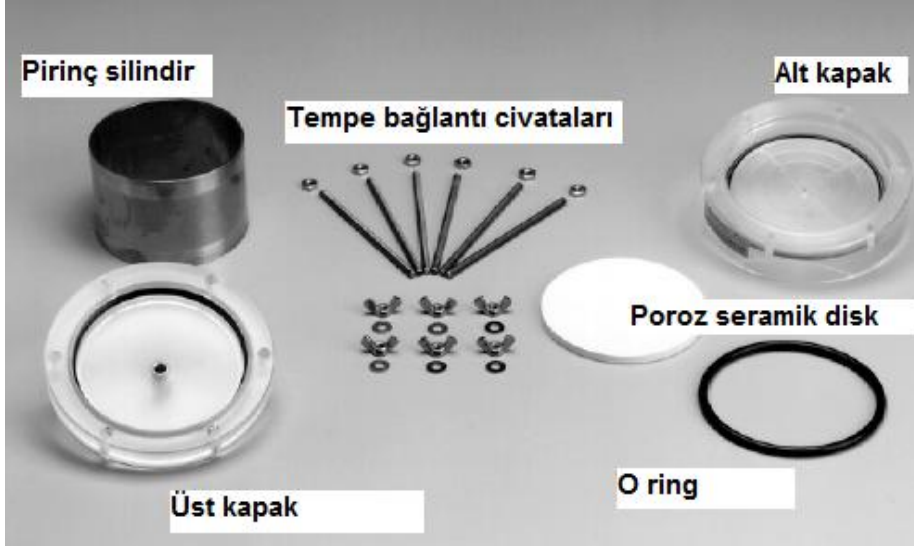
Şekil 2.1 Saykrometre deney düzeneği (Mikrovoltmetre, bilgisayar ve termos çanta).

Ayrıca tuz çözeltilerinin osmotik emme değerleri Van't Hoff denklemi kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler ve hesaplamalar sonucunda tuz çözeltisi ilave edilerek hazırlanan zemin numunelerinin toplam emme değerleri ile osmotik emme değerlerinin bir uyum içerisinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Gülşen, 2013 yılında yapmış olduğu çalışmada [7], zeminlerin kuru, doymun ve doymun olmadığı koşullarda zemin mekaniği kavramları ile sığ temellerin taşıma gücüne ilişkin durumları incelemiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan GeoStudio Sigma-W programı kullanarak değişik tane boyuna sahip zeminler için analizler gerçekleştirmiştir. Sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere iki adet literatürde gerekli özellikleri belirlenmiş olan zemin türleri ve ayrıca çalışma kapsamında özellikleri belirlenmiş olan dört adet zemin numuneleri kullanılarak toplamda altı adet zemin türü kullanılmıştır. Deneyler başlıca iki başlık altında toplanacak olursa ilk aşamada klasik zemin mekaniği deneylerinden olan elek analizi, hidrometre, standart Proktor, kıvam limitleri analizleri, ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ise, doymun olmayan zemin numunelerinin matrik emme basınç değerleri; tempe basınç hücresi ve basınç plakası deney düzenekleri kullanılarak belirlenmiştir.

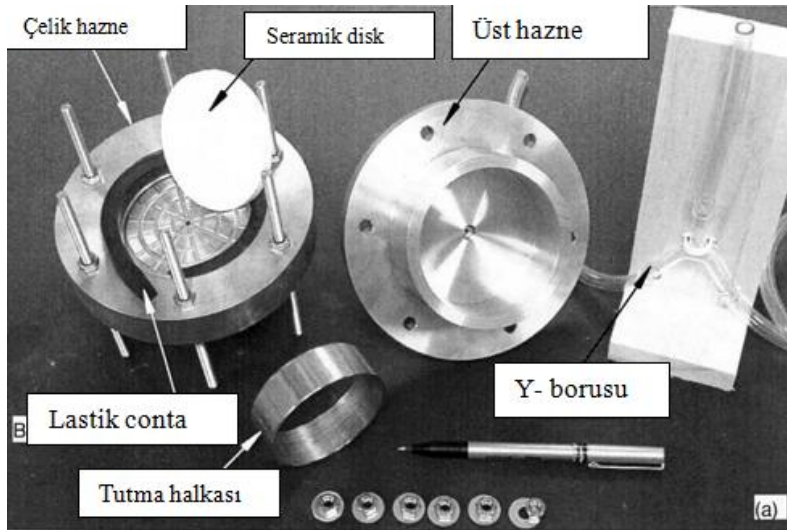


Şekil 2.2 Tempe basınç hücresi [8].



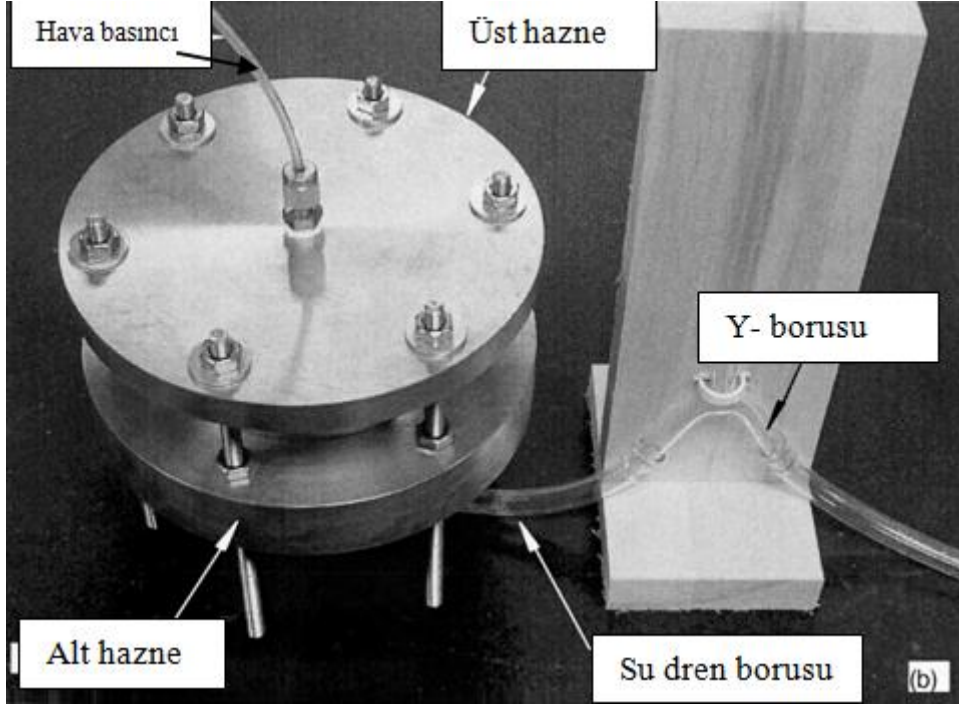
Şekil 2.3 Tempe hücresi açık şekli [8].

Tempe hücresi genelde iri taneli zeminlerde zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğidir. Basınç plakasında ise kil gibi daha ince taneli numunelerin eksen kaydırma tekniği kullanılarak matrik emme basıncı değerleri belirlenebilmektedir. Tempe basınç hücresi ile basınç plakası arasındaki bir diğer fark, basınç plakasında daha yüksek basınç kademelerinde çalışılabilir iken tempe basınç hücresinde daha düşük kademelerde basınç değerleri ölçülmektedir. ASTM D6836 (American Society of Testing Material) standartlarındaki basınç plakası deney düzeneği gösterilmektedir (Şekil 2.4 ve Şekil 2.5).



Şekil 2.4 Basınç plakası deney düzeneği açık şekli.





Şekil 2.5 Basınç plakası deney düzeneği kapalı şekli.

Gülşen, yapmış olduğu deneyler sonucunda, ince taneli zeminlerde düzgün bir SWCC elde etmenin güç olduğunu, bu sorunun çözümü için düzeltilmiş eğriler kullanıldığını belirtmiştir. İri taneli zeminlerde ise tempe basınç hücresi kullanarak tam bir SWCC elde edilebileceği sonucuna varmıştır.

Gökoğlu, 2015 yılında yapmış olduğu çalışmada [9], kumlu kil, düşük plastisiteli kil ve kumlu zeminlerin yer altı suyu değişimine bağlı olarak gelişen şev duraylılık analizlerini ve güvenlik katsayılarını incelemiştir. Numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla, Atterberg limitleri analizi, elek analizi, hidrometre deneyi, piknometre, kesme kutusu ve standart Proktor deneylerini gerçekleştirmiştir. Fiziksel özellikleri belirlenen numuneler üzerinde daha sonra basınç plakası deneyleri tamamlanmıştır. Basınç plakası deney düzeneği ile zeminlerin doygun olmayan zemin mekaniği parametrelerini belirlemek amaçlanmıştır. Elde edilen veriler ile zeminlerin doygun olmayan ve doygun koşullarda şev duraylılık analizleri gerçekleştirilmiş, doygun olmayan parametrelerin güvenlik katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Doygun olmayan zemin mekaniği parametrelerini belirlemek için kullanmış olduğu deney düzeneği Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

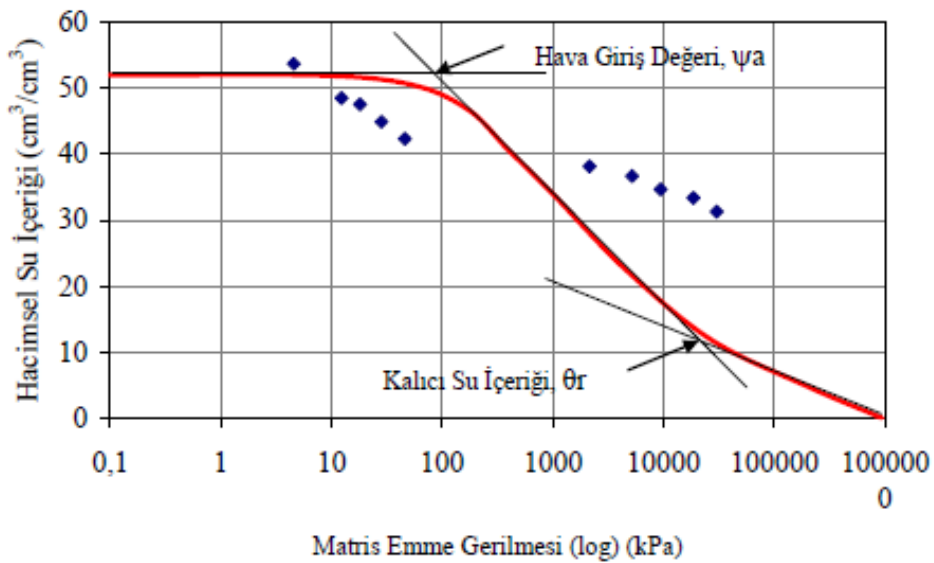


Şekil 2.6 Gökoğlu tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında kullanılan basınç plakası deney aleti [9].

Deneylerde kullanılmış olan alet “1600 Pressure Plate Extractor” modelinde basınç plakasıdır. Deney düzeneğine uygulanan matrik emme basıncı 1.5 kPa ile 450 kPa arasında değişmektedir. Deney numuneleri standart Proktor deneyi sonucunda elde edilen optimum koşullar içerisinde hazırlanmıştır. Gökoğlu, gerçekleştirmiş olduğu deneyler sonucunda numunelerde kum oranı artıkça yani kaba tane oranı artışına bağlı olarak zemin su karakteristik eğrisini çizebilmenin kolaylaştığı sonucuna varmıştır. Numunelerdeki kum oranı artışına bağlı olarak doymun olmayan ve doymun zemin mekaniği ilkeleri doğrultusunda gerçekleştirilen analiz sonuçları arasındaki farkın az olduğunu gözlemlemiştir. Doymun olmayan zemin mekaniği verileri ile kil oranı yüksek olan numunelerin şevlerin güvenlik katsıyına etkisinin diğer tane boyuna sahip numunelere kıyasla en fazla olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca yapılan basınç plakası deneyleri sonucunda kil oranı artışına bağlı olarak matrik emme değerlerinin yükseldiğini tespit etmiştir.

Angın, 1997 yılında yapmış olduğu çalışmada [10], plak temellerinin ve karayolu çevresinde ve altında oluşabilecek zemin su emme basınç değerlerini ve bu emme basınçlarının zamana bağlı değişimlerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmiştir. Havaalanı, karayolu, bina inşaatı ve daha birçok inşaat alanında temel inşa edilirken temel zeminin şişme büzülme özelliklerine dikkat etmek gerekmektedir. Çünkü bu gibi zemin özellikleri inşaat esnası ve sonrasında büyük hasarlar yol açabilmektedir. Temelerde zemin emme basınç değerinin belirlenmesi hasarların oluşumunu engelleyebilmek açısından önemlidir. Angın yapmış olduğu sonlu elemanlar yöntemi analizi sonucunda kaplanmış alanların altındaki zeminlerin geçirimli birimler olması halinde, kaplanmış alan altına doğru oluşan su akımı neticesinde, zamana bağlı olarak kenar ve denge zemin emme basıncının aniden azaldığı sonucuna varmıştır.

Türker 2006 yılında yapmış olduğu çalışmada [11], Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkez Kampüsü Maden Mühendisliği Bölümü İstinat Duvarı Temeli'nden almış olduğu zeminlerin su tutma eğrilerini belirlemiştir. Zeminlerin toplam ve matrik emme basıncı değerlerini belirlemek amacıyla filtre kağıdı deney yöntemini kullanmıştır. Zemin su karakteristik eğrisini belirlerken ASTM D 5298-94' e uygun olarak Whatman – Grade 42 filtre kağıtlarını kullanarak zeminin emme basınç değerlerini belirlemiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda düşey eksende hacimsel su içeriği ( $\Theta$ ), yatay eksende matrik emme basıncı olacak şekilde kampüs zeminine ait zemin su karakteristik eğrilerini çizmiştir.



Şekil 2.7 Türker tarafından filtre kağıdı deneyi sonucu çizilen SWCC [11].

Fattah vd. 2018 yılında yaptıkları çalışmada [12], Irak'ın başkenti Bağdat şehrinin Rasafa bölgesinden almış oldukları beş farklı zemin numunesi üzerinde matrik emme ve toplam emme basınçlarını belirlemek üzere filtre kağıdı deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Zemin numuneleri farklı doygunluk derecelerinde hazırlanmıştır. Filtre kağıdı deneyleri sonucunda zeminin özellikleri ve toplam ve matrik emme basıncı arasındaki ilişki incelenmiştir. Filtre kağıdı deneyi gerçekleştirirken kullanmış oldukları cam kavanozlar 250-500 ml hacime sahip zemin örneğini içerisinde barındırabilecek şekilde tercih edilmiştir. Zemin numunelerinin tane boyu dağılımını belirlemek amacıyla ilk olarak elek analizi ve hidrometre daha sonra özgül ağırlık, Atterberg limit deneyleri ve standart Proktor testleri tamamlanmıştır.



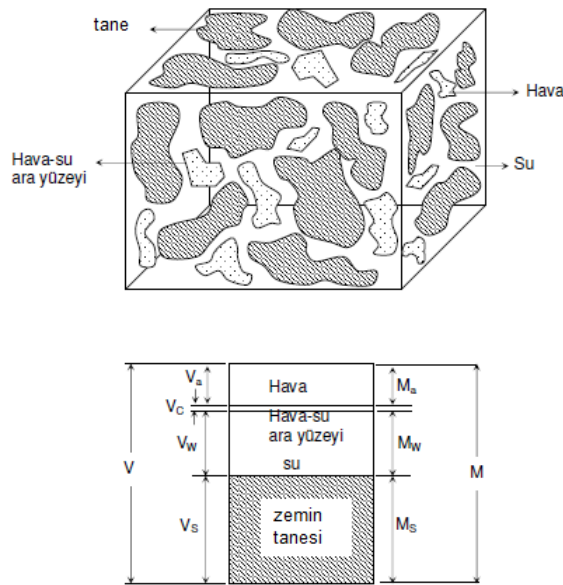
Şekil 2.8 Fattah vd. zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş oldukları filtre kağıdı deney aşamaları [12].

Gerçekleştirilen analizler; doygunluk derecesi azaldıkça emme basıncının arttığı sonucunu göstermiştir. Toplam emme, matrik emme ve filtre kağıdının su içeriği arasındaki ilişki yaklaşık olarak doğrusal ve filtre kağıdının su içeriği artışına bağlı olarak emme basıncı değerlerinin azalış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca zeminin makaslama dayanımı artışına bağlı olarak toplam ve matrik emme basınç değerlerinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

### 3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ İLE İLGİLİ KAVRAMLAR

Zeminlerin klasik zemin mekaniği ilkelerine göre katı (tane), sıvı (su), gaz (hava) olmak üzere üç bileşenden oluştuğu kabul edilmektedir. Klasik zemin mekaniğinde zemin taneleri arasındaki boşluklar su ve hava ile doludur. Zemin taneleri arasındaki boşlukların su ile dolu olduğu koşullarda zeminler, doymuş zeminler olarak adlandırılırken boşlukların bir kısmı hava ile doluysa doymamış zeminler olarak adlandırılır. Zemin mekaniğinde; boşluk hacmindeki suyun, toplam boşluk hacmine oranı, doymuluk derecesi ( $S_r$ ) olarak ifade edilmektedir. Doymuluk derecesinin ( $S_r$ ) %98'in altına düştüğü durumlardaki zeminler, doymun olmayan zemin olarak kabul edilmektedir [1].

Doymun olmayan zemin mekaniği çalışmalarında zeminler üç fazlı olarak kabul edilmektedir. Fakat son dönemlerde yapılan çalışmalar doymun olmayan zeminlerde hava fazı ile su fazı arasında ince bir fazın olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır [1]. Bu faz; hava-su ara yüzeyi (contractile skin) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.1'de doymun olmayan bir zeminin dört fazlı olduğu durumdaki zemin diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Doymun olmayan zeminde dört fazın görülmesi [1].

Doygun olmayan zemin mekaniği üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, günümüz teknolojisinin ilerlemesine paralel olarak son zamanlarda artış göstermiştir. Daha önceleri doygun olmayan zemin mekaniğinin önemli kavramlarından olan matrik emme basıncı ölçüm teknolojisi gelişmemiş olduğundan çalışmalar sınırlı kalmıştır.

### 3.1. Zemin Toplam Emme Kavramı

Zeminlerin emme basıncı ile ilgili kavramlar 1900' lü yılların başında gelişmeye başlamıştır [13,14]. Doygun olmayan zeminlerin mühendislik davranışlarını doğrudan etkileyen ve mühendislik problemler üzerinde önemli etkisi bulunan zemin emmesi ve emme basıncının önemi ilk olarak İngiltere'de Road Research Laboratory' de ortaya konulmuştur [1].

Zemin emmesi, zemin suyunun serbest enerji bileşeni olarak ifade edilmiştir [14]. Mühendislik problemleri üzerinde zemin suyunun bu serbest enerjisinin zemin-su kısmi buhar basıncı ile ölçülebileceği Richards 1965 tarafından ileri sürülmüştür [15]. Termodinamik teoremler kullanılarak zemin emmesi (zemin suyunun serbest enerjisi) ile zemindeki gözenek su buharının kısmi basıncı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [1].

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

$\psi$  = Zeminin toplam emme basıncı (kPa),

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

$T_K$  = Mutlak sıcaklık [  $T_K = 273.15 + T$  (K)],

T = Sıcaklık (°C),

$v_{w0}$  = Suyun özgül hacmi ( $1/\rho_w$ ) m<sup>3</sup>/kg,

$\rho_w$  = Suyun yoğunluğu ( T = 20 ° C de 998 kg/m<sup>3</sup>),

$\omega_v$  = Su buharının molekül kütlesi (18.016 kg/kmol),

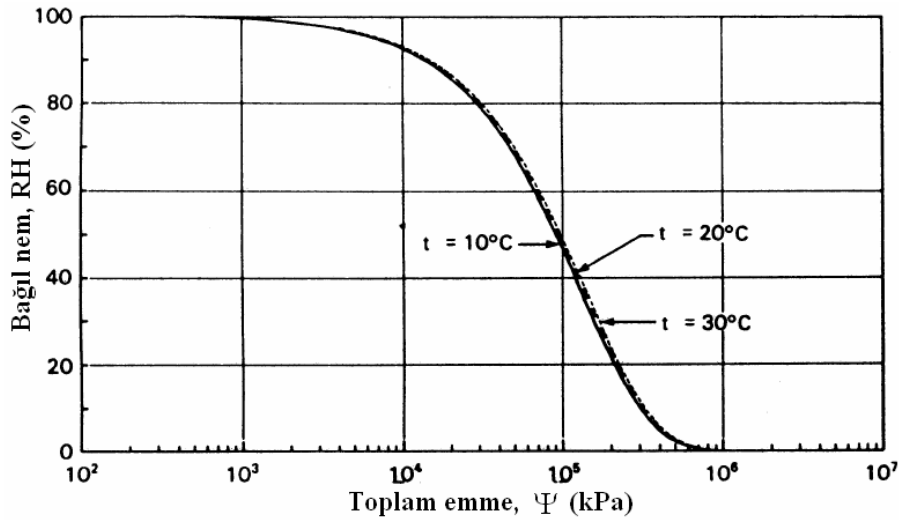
$\bar{u}_v$  = Kısmi boşluk suyu buhar basıncı (kPa),

$\bar{u}_{v0}$  = Aynı sıcaklıkta saf su üzerindeki doymuş su buhar basıncı (kPa).

Sıcaklık  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  olarak alındığında yukarıdaki eşitlikteki  $\frac{RT_K}{v_{w0}\omega_v}$  terimi 135.022 kPa değerini alır. Bu durumda kPa cinsinden toplam emme ve nispi buhar basıncı arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\psi = -135.022 \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right)$$

Bağıl nem ve toplam emme basıncı arasındaki ilişki üç farklı sıcaklık için Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Bağıl nem - toplam emme ilişkisi [1].

Zeminlerde bağıl nem %100 ün altında olduğu koşullarda zemin toplam emme değerinden bahsedilmektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere bağıl nem % 100 iken toplam emme 0’dır [1].

Toplam emme ( $\psi$ ) başlıca iki bileşenden oluşur. Bunlardan birincisi matrik emme ( $u_a - u_w$ ), ikincisi ise osmotik emme ( $\pi$ ) dir. Toplam emme matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanır [1].

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

Burada,

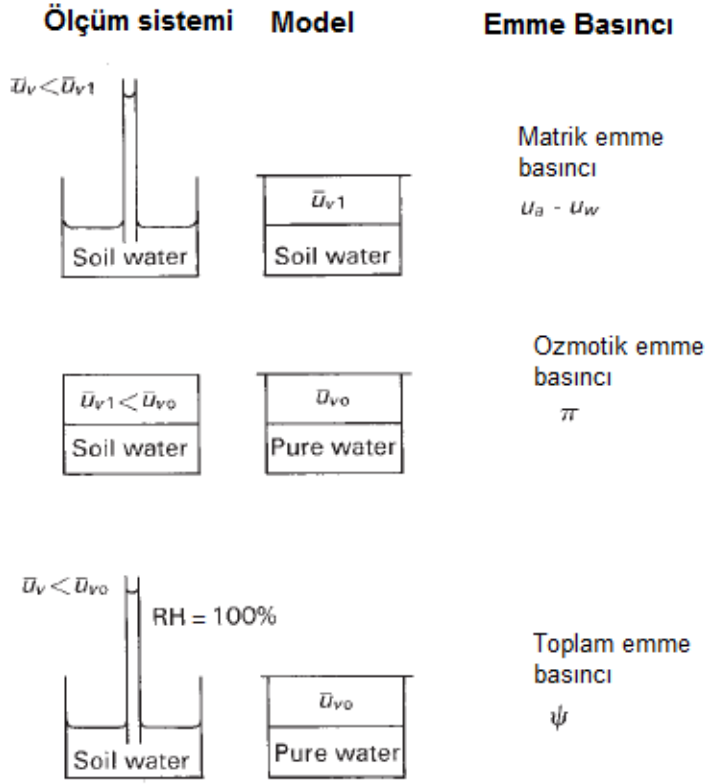
$\psi$  = Toplam emme,

$u_a$  = Gözenek hava basıncı,

$u_w$  = Gözenek suyu basıncıdır.

Zemin suyu doldurulmuş kapiler bir tüp yüzeyine dikkat edilecek olursa suyun yüzeyi kavisli bir şekil almaktadır ve bu kavisli yüzeye menüsküs adı verilmektedir. Fakat aynı zemin suyu daha geniş bir kaba konulursa düzgün bir yüzeye sahip olacaktır. Zemin suyunun kavisli yüzeyindeki kısmi su buharı basıncı  $\bar{u}_v$ , aynı zeminin düzgün yüzeyi üzerindeki su buharının kısmi basıncından  $\bar{u}_{v1}$  küçük olacaktır ( $\bar{u}_v < \bar{u}_{v1}$ ). Başka bir ifadeyle zemindeki bağıl nem kapileritenin sonucu olarak su yüzeyinde gelişen kavisliğin oranına bağlı olarak azalacaktır. Bağıl nem su yüzeyi eğriliğinin yarıçapının küçülmesiyle orantılı olarak azalacaktır. Aynı zamanda eğriliğin yarıçapı yüzey boyunca hava basıncı ve su basıncı arasındaki farkla ters orantılı olacaktır. Bu da matrik emme basıncını tanımlar ve bağıl nemdeki azalmaya sebep olmaktadır [1,3].





Şekil 3.3 Toplam emme ve bileşenleri, matrik emme ve osmotik emme [1].

### 3.1.1. Matrik emme basıncı

Matrik emme basıncı buharlaşma olmadığı durumlarda zemin içindeki boşluk suyunu çıkarmak için gerekli olan enerji olarak ifade edilir. En genel ifade ile boşluk hava basıncı ve boşluk su basıncının farkı matrik emme basıncına eşittir denilmektedir [1].

$$\psi_m = (u_a - u_w)$$

$\psi_m$  = Matrik emme,

$u_a$  = Gözenek hava basıncı,

$u_w$  = Gözenek suyu basıncıdır.

Matrik emme zeminin kapileritesi, dokusu (tekstürü) ve yüzey adsorbif kuvvetlerinden etkilenir. Suyun yüzey geriliminden doğan kapileritesi ile doğrudan ilişkilidir. Matrik emme basıncı zemin suyunun kapiler hareketi ve çevresel değişimler ile değişiklik

göstermektedir. Yer altı su seviyesindeki farklılıklara neden olan etkenler, matrik emme gerilmesinde de değişiklikler yaratmaktadır. Doygun olmayan zeminlerde meydana gelen birçok mühendislik problemi çevresel koşulların değişimi sonucunda oluşmaktadır. Örnek olarak bir yapı tabanında suyun birikmesi sonucu temel zemindeki kabarma, matrik emmenin azalması sonucu olabilir. Ya da aşırı yağışlar sonucu zemin matrik emme gerilmesinin azalmasına bağlı olarak doymun olmayan bir zeminde şev duraysızlığı meydana gelebilir. Bu değişimler zeminin öncelikle matrik emme bileşenini etkiler osmotik emme değişimlerine olan katkısı ise ihmal edilecek boyuttadır [1,6].

Matrik emme gerilmesi kapilerite olayıyla doğrudan ilişkilidir. Kapilerite; zeminin su ile temasa geçtiğinde boşluklarda bulunan suyun yükselmesi olarak bilinmektedir. Yüzey gerilim kuvvetlerinin de etkisiyle su bir katı ile temasa geçtiğinde temas noktalarında serbest enerji açığa çıkar. Çıkan serbest enerji suyun kapiler olarak yükselmesine sebep olmaktadır. Kapiler yükseklik ve menisküsün eğrilik yarıçapı doymun olmayan zeminlerde zemin su karakteristik eğrisi (su içeriği-matrik emme ilişkisi) üzerinde etkilidir [1]. Atmosfer koşullarında tüp içerisinde yüzey gerilimine bağlı olarak yukarı yönde hareket eden su kütesini dengede tutan kuvvetler eşitlendiğinde aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$2\pi T_s \cos a = \pi r^2 h_c \rho g$$

$r$  = kapiler tüpün yarıçapı,

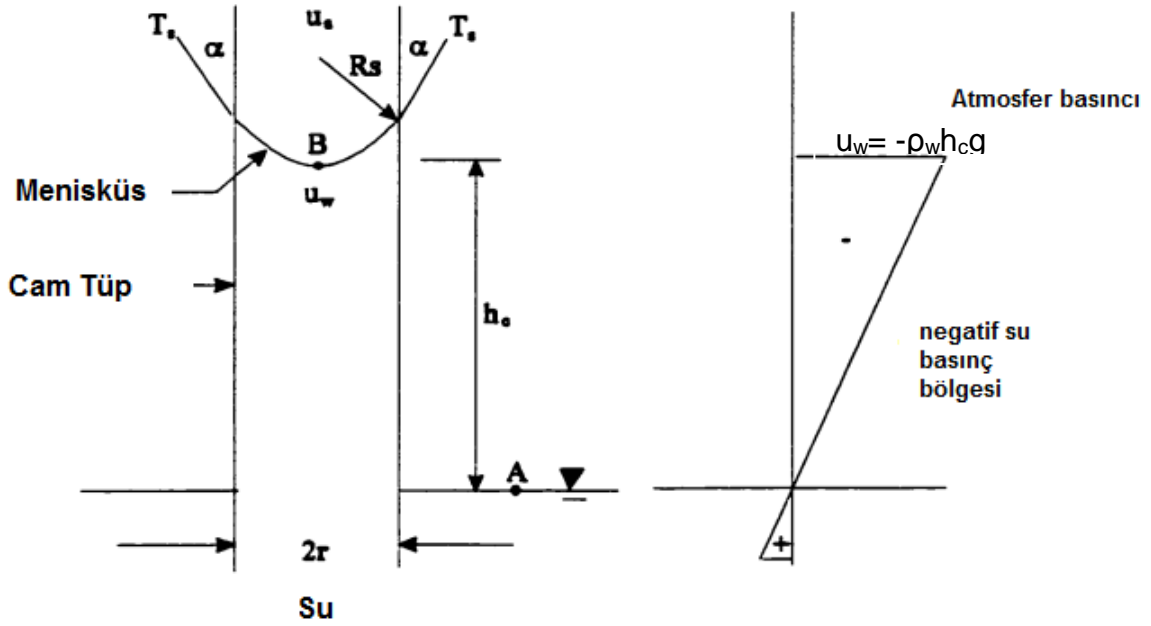
$T_s$  = suyun yüzey gerilimi,

$a$  = değme açısı, ıslanma açısı,

$h_c$  = kapiler yükseklik,

$u_a$  = menisküs üzerindeki hava basıncı,

$u_w$  = menisküs altındaki su basıncı.



Şekil 3.4 Kapiler su yükselmesinin fiziksel modellenmesi [13,16].

Geçmişte yapılan bir takım çalışmalar doymun olmayan zeminlerde matrik emme basıncı ile zeminlerdeki başlangıç su içeriği arasında bir ilişki olduğunu fakat osmotik emme basıncının su içeriğinde meydana gelen bu değişimlerden etkilenmediğini göstermiştir. Böylece matrik emmede meydana gelen değişim doğrudan toplam emme basıncındaki değişimi temsil etmektedir [1].

### 3.1.2. Osmotik emme basıncı

Osmotik emme gözenek suyundaki çözülmüş tuz konsantrasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Tuz doymun ve de doymun olmayan zeminlerde gözenek boşluğunda var olduğu için doymun ve doymun olmayan zeminlerinde osmotik emme basıncının üstlenmiş olduğu rol eşittir. Osmotik emme değişimleri yani zemindeki tuz yoğunluğundaki değişimler zeminin toplam hacim ve makaslama dayanımı gibi mekanik davranışlarını etkileyebilir [1].

Termodinamik yasalarına göre tuz çözeltilerinin osmotik emme değeri aşağıda belirtilmiş olan Van't Hoff denklemi kullanılarak tahmin edilebilmektedir [17].

$$\pi = RT_K C$$

$\pi$  = Osmotik emme (kPa),

R = Genel gaz sabiti (8.314 J/molK),

$T_K$  = Mutlak sıcaklık (K),

C = Çözeltideki molar konsantrasyon (mol/L).

Çevre şartlarındaki farklılık en çok matrik emme basıncında değişime neden olmaktadır. İncelenen doygun veya doygun olmayan zeminde kimyasal kirlenmeye bağlı olarak tuz konsantrasyonundaki artış osmotik emme basıncında değişime neden olacağı için bu durumda osmotik emme değeri göz önünde bulundurulmalıdır [3].

### 3.1.3. Emme basıncının ölçülmesi

Doygun olmayan zeminlerde önemli bir parametre olan emme basıncı değerini ölçmek için güvenilir tekniklere ihtiyaç vardır.

Matrik emme basıncı doğrudan ve dolaylı yöntemler olmak üzere iki farklı şekilde ölçülmektedir. Doğrudan yöntemler negatif gözenek suyu basıncını ölçmektedir. Çoğunlukla matrik emme basıncını ölçmede kullanılmaktadır. Dolaylı yöntemlerde ise özellikle seramik materyal tasarımların (porous materials) kullanılmasıyla negatif gözenek suyu basıncından farklı değişkenler ölçülerek matrik emme basıncı belirlenmektedir. Dolaylı ölçüm yöntemleriyle toplam emme, matrik emme ve osmotik emmenin ölçümü yapılabilmektedir [1].

Doğrudan ölçüm teknikleri;

- Basınç plakası,
- Null tipi basınç plakası,
- Basınç membranı,

- Tensiyometreler vb. örnek olarak verilebilir. Örnek olarak verilen bu doğrudan ölçüm tekniklerinin tamamı matrik emme basıncını belirlemek için kullanılmaktadır.

Dolaylı ölçüm teknikleri;

- Filtre kağıdı (toplam emme, matrik emme),
- Saykrometre (toplam emme),
- Isıl iletkenlik sensörleri (matrik emme),
- Santrifuj tekniği (matrik emme ),
- Boşluk sıvısı sızdırıcı (osmotik emme) vb. örnek olarak verilmektedir [1].

Bu tez çalışması kapsamında doygun olmayan üç farklı artık toprak numunesinin matrik ve toplam emme basınç değerlerinin belirlenmesi için ilk olarak dolaylı ölçüm tekniklerinden olan filtre kağıdı deney düzeneği kullanılmıştır. İkinci olarak ise zemin numunelerinin matrik emme basıncı değerlerini bulabilmek için doğrudan ölçüm tekniği olan basınç plakası deney düzeneği ile deneyler gerçekleştirilmiştir. 5. Bölümde filtre kağıdı deneyi ve basınç plakası deneylerinin nasıl gerçekleştirildiği ve hesaplamalarının nasıl yapılmış olduğundan bahsedilecektir. Bu bölümde filtre kağıdı yöntemi ve basınç plakası yöntemi hakkında bazı genel bilgilere yer verilecektir.

### **3.1.3.1. Filtre kağıdı tekniği**

Matrik ve toplam emme basıncını belirlemek için kullanılan filtre kağıdı yöntemi dolaylı ölçüm yöntemlerindedir ve çok geniş emme aralığında ölçüm yapılabilmektedir.

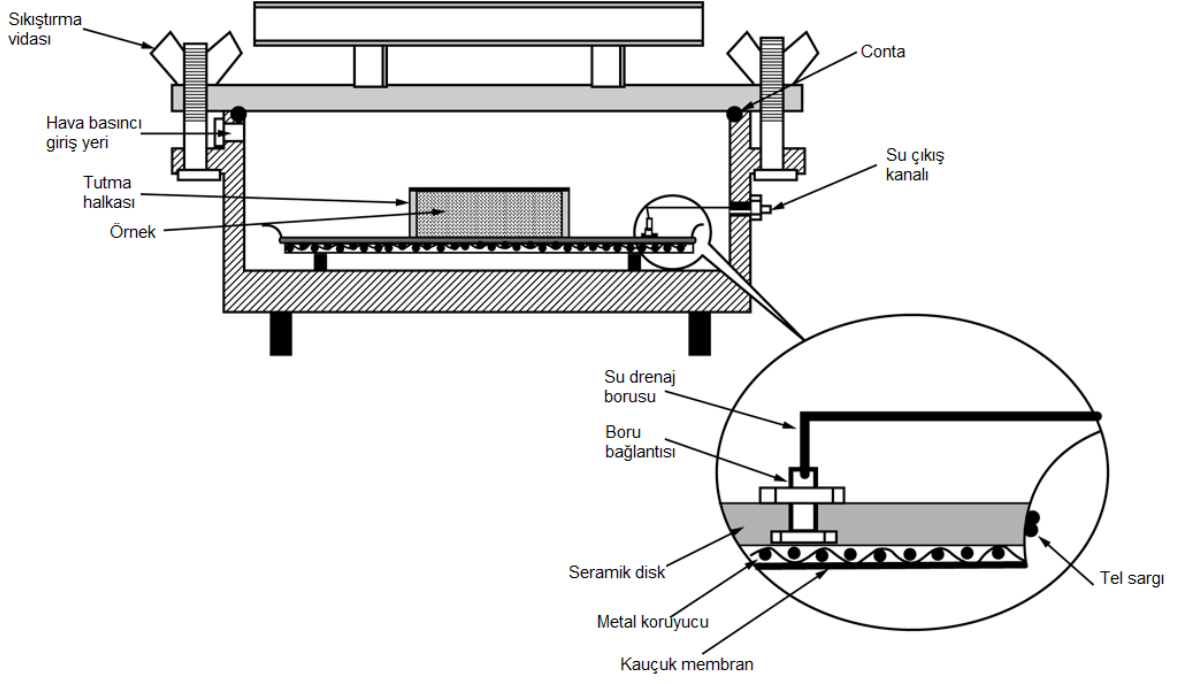
Ağız kapaklı bir kap içerisinde doygun olmayan zemin numunesi arasına temas halinde yerleştirilmiş olan kuru filtre kağıdı ile zemin numunesi arasında nem transferi olmaktadır. Bu nem transferi, filtre kağıdı ile zemin arasındaki denge sağlanıncaya kadar devam etmektedir. Denge şartları sağlandığında (yaklaşık 7 gün) filtre kağıdının

su içeriği ölçülebilir. Kalibrasyon eğrileri ve eşitlikler kullanılarak filtre kağının su içeriği değerine karşılık gelen emme basıncı değeri elde edilebilmektedir [18]. Teorik olarak, zeminle temas halinde olan filtre kağı ile zemin arasındaki zemin suyu akışı dengeye geldikten sonra filtre kağı denge su içeriği, zeminin matrik emme basıncı değerini vermektedir. Kuru filtre kağı numune üzerine numuneye değmeyecek şekilde (ring üzerine) yerleştirilir ve denge sağlanıncaya kadar zemin suyu buharı filtre kağına doğru meydana gelirse, filtre kağının su içeriği zeminin toplam emme basıncı değerini vermektedir [1].

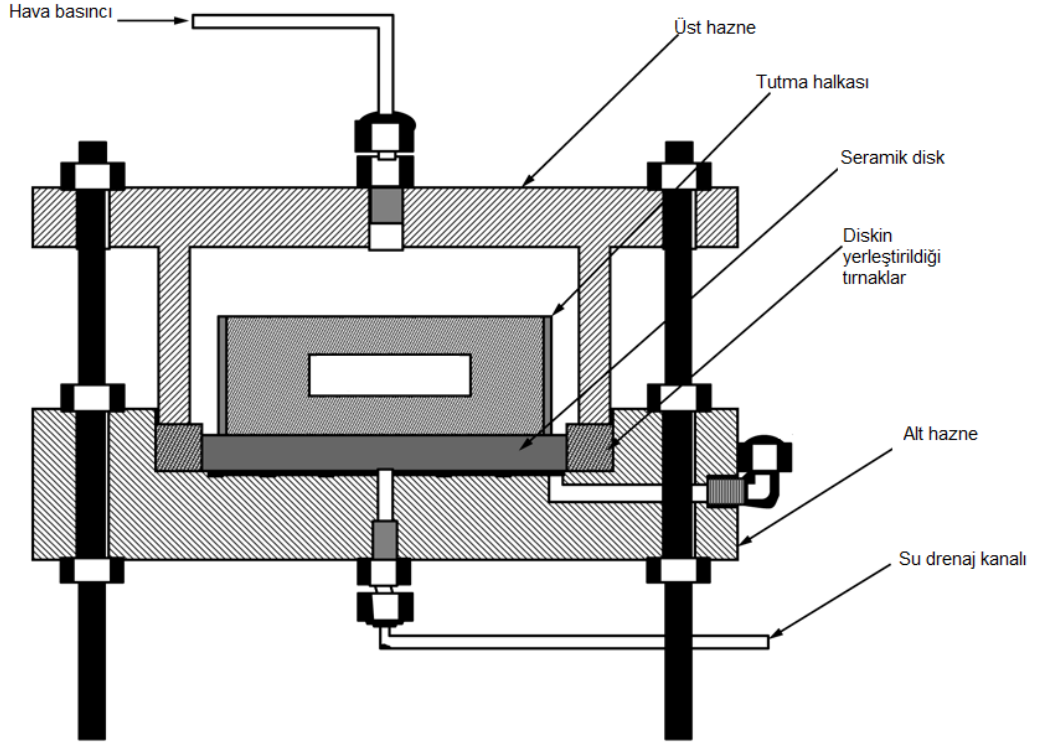
Kırmızımsı-pembe, sarı-boz, grimsi-yeşil renkli andezitik kayadan bozunma sonucu türeyen artık toprak numunelerinin farklı kuru yoğunluk ve su içeriğinde hazırlanan örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiş olan filtre kağı deneyleri yapılış aşamalarına ve sonuçlarına bölüm 5 de ayrıntılı olarak yer verilecektir.

#### **3.1.3.2. Basıncı plakası**

Basıncı plakası yöntemi matrik emme basıncını belirlemek amacıyla kullanılan doğrudan ölçüm tekniklerindedir. Diğer adı basıncı tenceresidir. Düzenek; yüksek hava basıncına dayanıklı tencere, hava basıncı sağlayan kompresör ve tencere içerisine yerleştirilen gözenek çapı küçük ve seramikten imal edilen diskten oluşmaktadır. Seramik diskin alt kısmında diskin içinden geçen suyu drene edebilmeye yarayan kauçuk membran monte edilmiştir.

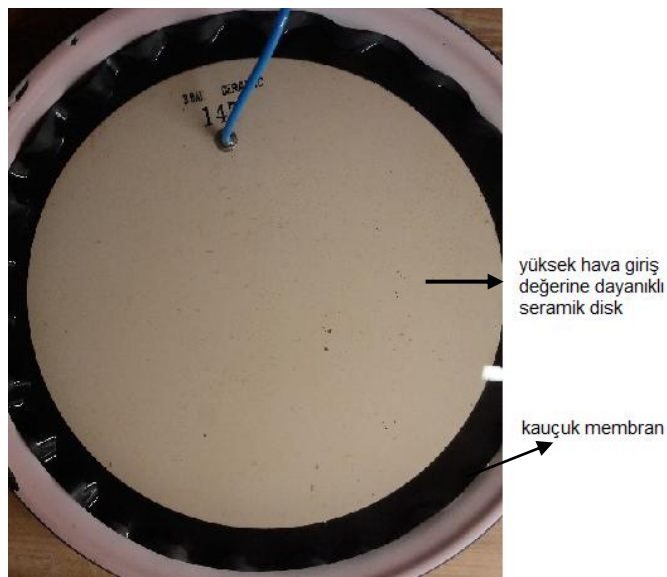


Şekil 3.5 Basınç plakası şematik görünümü [19].



Şekil 3.6 Basınç plakası kapalı görünümü [19].

Laboratuvarda negatif gözenek suyu basıncını ölçmek amacıyla kullanılan teknik eksen kaydırma tekniği olarak adlandırılmaktadır. Eksen kaydırma tekniği ilk kez Hilf (1956) tarafından önerilmiştir [5]. Ayrıca bu teknik 1965 yılında Olson ve Langfelder; 1980 yılında ise Fredlund tarafından desteklenmiş ve kullanılmıştır. Matrik emme basıncı değeri belirlenmek istenen zemin numunesi ring içerisine alınır ve seramik disk üzerine oturtulur. Daha sonra basınç tenceresi içerisine yerleştirilir ve tencerenin kapağı hava sızdırmayacak şekilde sıkıca kapatılır. İstenilen matrik emme basınç değerine yaklaşık olarak eşit bir hava basıncı eksen kaydırma tekniğine göre tencere içerisine uygulanır. Tencere içerisine kompresör yardımıyla uygulanan hava basıncı zemin numuneleri içerisinden geçerken aynı zamanda gözeneklerde hapsolmuş boşluk suyunun dışarı doğru tahliyesini sağlar. Çıkan su, seramik disk içerisinden geçer ve seramik disk altına monte edilmiş kauçuk membrana bağlı su tahliye borusundan tencerenin dışına iletilmiş olur. Numune üzerine uygulanan hava basıncı, zemin numunesi içerisindeki suyun tahliye borusundan damlaması bitene kadar sabit bir şekilde devam eder. Damlama bittiği andaki durumda uygulanmış olan hava basıncı zeminin matrik emme basıncı olarak kabul edilir. Ardından zemin numunesinin su içeriği değeri belirlenir. Daha sonra bir sonraki farklı basınç kademesinde aynı işlemler tekrarlanır [1]. Farklı basınç kademesinde, matrik emme basıncı değerlerinde zemin numunesinin su içeriği değerleri tespit edilerek zemine ait zemin su karakteristik eğrileri çizilmiş olur. 5. Bölümde ayrıntılı olarak basınç plakası deney aşamaları ve deney sonuçlarına yer verilecektir.



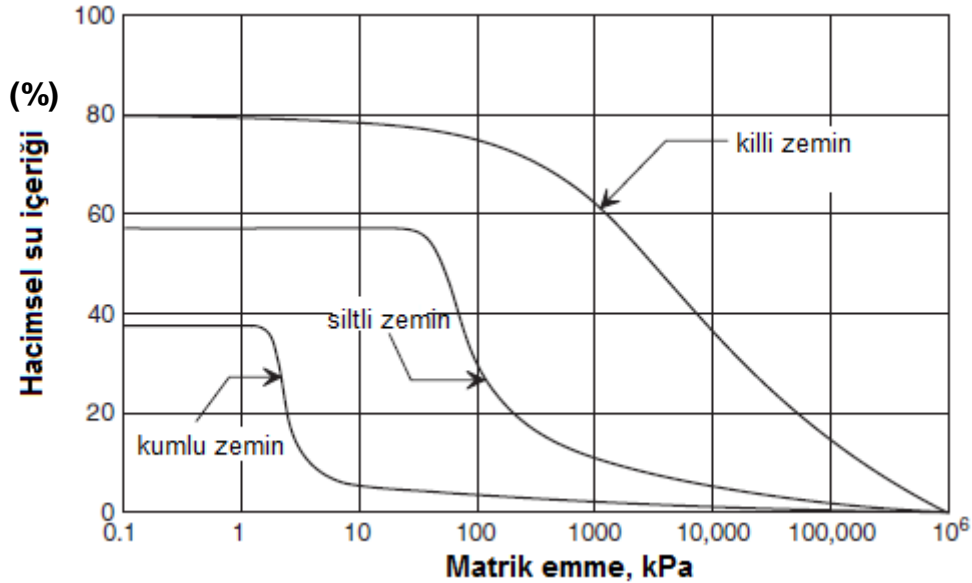
Şekil 3.7 Basınç plakası (tenceresi) içerisine yerleştirilen seramik disk



### 3.2. Zemin Su Karakteristik Eğrisi (SWCC)

(SWCC, Soil-Water Characteristic Curve) zemin su karakteristik eğrisi, doymun olmayan zeminlerin bazı fiziksel özelliklerini belirlemek açısından önemli bir yere sahiptir. SWCC, kısaca zeminlerin su içeriği değerleri ile emme değerleri arasındaki ilişkiyi ifade eder. Zemin su karakteristik eğrisi, zeminlerin makaslama dayanımı, geçirimsizlik, hacimsel değişim, sıkışabilirlik, hacimsel su içeriği ve gerilme durumu gibi daha birçok özelliğinin belirlenmesinde kullanılabilir [1].

Şekil 3.8’ de örnek olarak gösterilen zemin su karakteristik eğrisinde yatay eksen logaritmik ölçekte matrik emme basıncını, düşey eksen ise hacimsel su içeriğini göstermektedir. Doymun olmayan zeminlerin emme basıncı değerleri negatiftir. Ancak değerler logaritmik eksen de negatif yazılamayacağından emme basınç değerleri eksen üzerine pozitif olarak kaydedilir [7].



Şekil 3.8 Farklı tane boyuna sahip zeminlere ait zemin su karakteristik eğrisi [1].

Zemin su karakteristik eğrileri doymun olmayan zeminlerin toplam ve matrik emme değerlerine karşılık gelen hacimsel su içeriği, gravimetrik su içeriği, doymunluk derecesi gibi değerler ile çizilebilir.

Birçok araştırmacı tarafından zemin su karakteristik eğrisinin teorik olarak belirlenmesi amacıyla çeşitli deneysel eşitlikler verilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan SWCC denklemlerinden ilki olan Van Genuchten (1980) aşağıdaki eşitlikte verilmektedir [20].

$$\Theta_w = \left[ \frac{\Theta_s}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n} \right]^m$$

$\Theta_w$  = hacimsel su içeriği

$\Theta_s$  = doygun hacimsel su içeriği

$\psi$  = Toplam zemin emme basıncı

a, n ve m = Uygun parametreler a 'nın birimi  $\text{kPa}^{-1}$ , n; zemin boşluk büyüklüğü dağılımı ile ilişkili bir parametre ve m ise SWCC simetrisi ile ilgili bir parametredir [21].

En yaygın olarak kullanılan SWCC denklemlerinden ikincisi Fredlund ve Xing (1994), aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [20].

$$w(\psi), \Theta_w = C(\psi) \frac{w_s}{\{\ln[e + (\psi/a_f)^{n_f}]\}^{m_f}}$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left[1 + \left(\frac{10^6}{\psi_r}\right)\right]}$$

$\psi$  = Toplam zemin emme basıncı

$w(\psi), \Theta_w$  = hacimsel su içeriği

$\psi_r$  = rezidüel su içeriğindeki zemin emmesine karşılık gelen bir katsayı

$a_f$  = zemine bağlı hava giriş katsayısı

$w_s$  = doygun hacimsel su içeriği

$n_f$  = zemin su karakteristik eğrisinde dönme noktasının eğimine bağlı bir parametre

$m_f$  = Rezidüel su içeriğine bağlı bir parametre

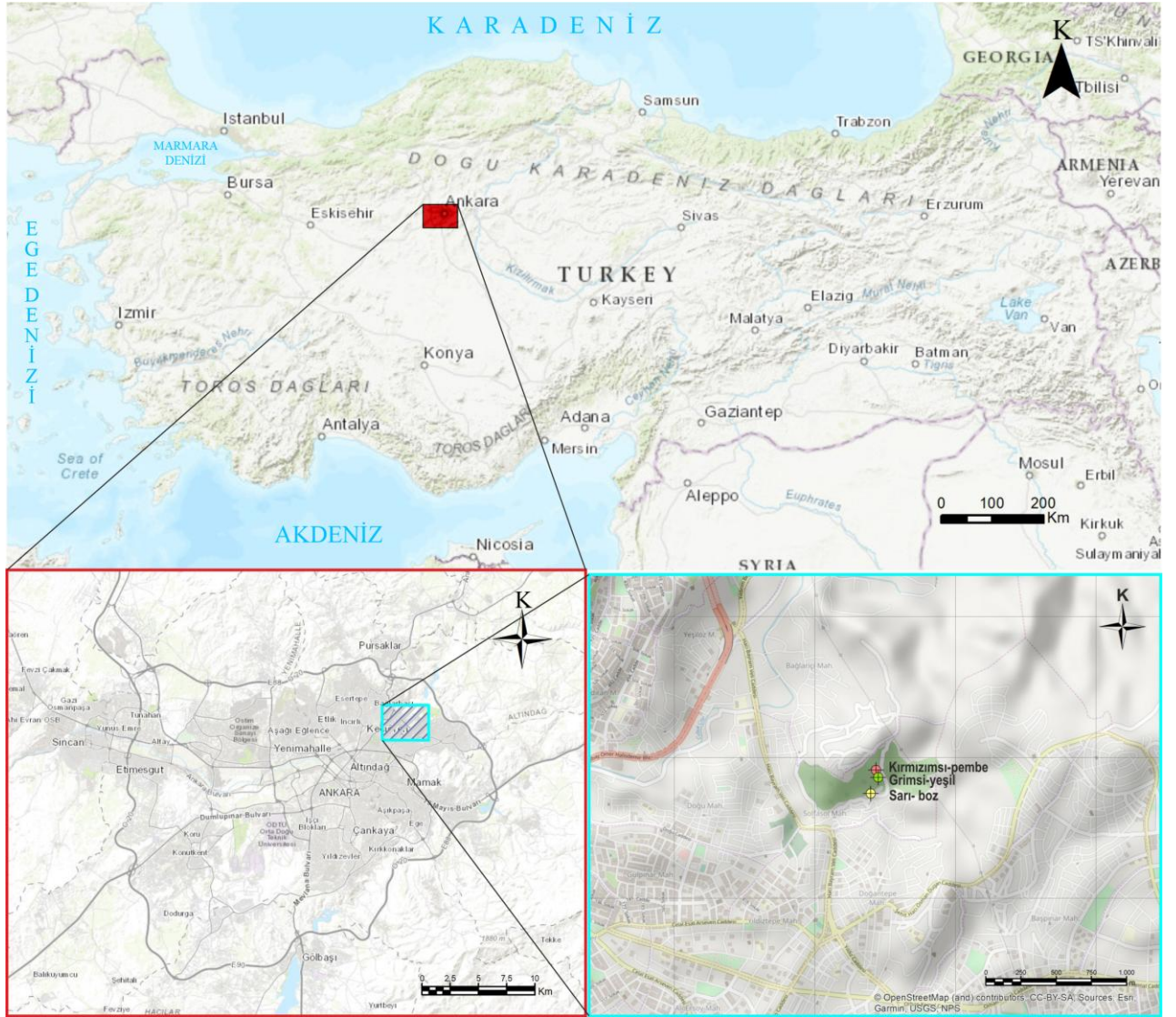
$C(\psi)$  = hacimsel su içeriğinin sıfır olduğu durumdaki düzeltme faktörü

$e$  = euler sayısı (2.71828) [1].

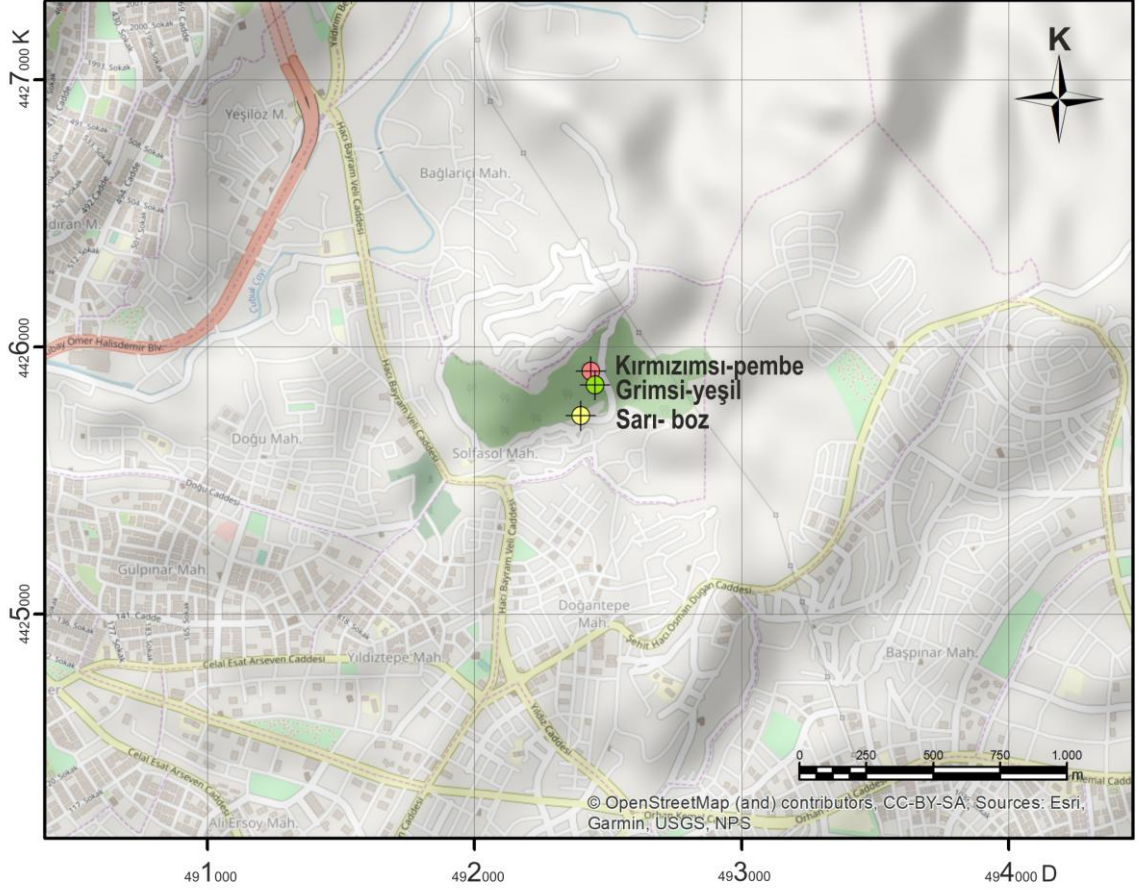
## 4. İNCELEME ALANI VE ARAZİ ÇALIŞMALARI

### 4.1. İnceleme Alanının Tanıtımı

Tez çalışması kapsamında incelenen alan, Ankara ili Altındağ ilçesine bağlı Solfasol Mahallesi' nde yer almaktadır. Solfasol Mahallesi, Ankara'nın merkezine yaklaşık 20 km uzaklığa sahiptir ve kentin kuzeydoğusunda bulunmaktadır. Semtin genel yapısı göz önünde bulundurulduğunda gecekondü mahalleleri geniş yer kapsamaktadır.



Şekil 4.1 İnceleme alanı yer bulduru haritası [22].



Şekil 4.2 İnceleme alanına ait ArGIS haritası [22].

#### 4.2. Arazi çalışmaları

Tez çalışması kapsamında tüm deneylerde kullanılmış olan artık toprak numuneleri Solfasol Mahallesi'nden temin edilmiştir. Örnekleme yapılan zeminler kırmızımsı pembe, sarı-boz ve grimsi-yeşil olmak üzere üç farklı renkte bulunmaktadır. İnceleme alanındaki andezitlerin bazı kesimlerde dayanımını korumuş olduğu gözlenmektedir. Birkaç metre mesafede sağlam kaya kalitesindeki andezitler ve bloklu andezitlerin ayrılmış andezitler ile birlikte bulunduğu arazi içerisinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Örnek alımı yapılırken artık toprakların olduğu bölgelerden numune alınmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesinin alındığı bölge.

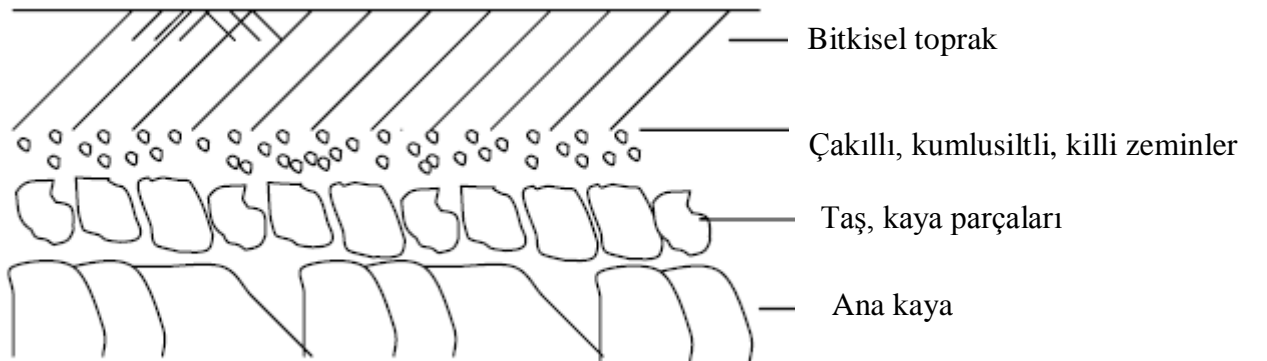


Şekil 4.4 Sarı-boz renkli artık toprak numunesinin alındığı bölge.



Şekil 4.5 Grimsi-yeşil renkli artık zemin numunesinin alındığı bölge.

Bir kaya kütlesi ayrışır ve ayrışan bu kalıntı malzemenin ana kaya üzerinde birikmesi halinde oluşan toprağa artık (kalıntı) toprak denilmektedir.



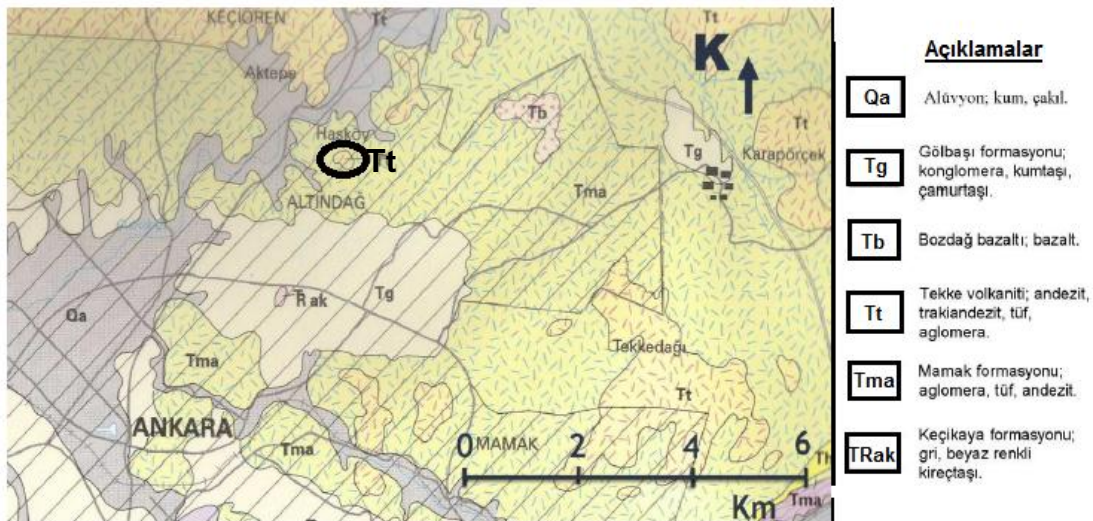
Şekil 4.6 Tipik bozunma profili [23].

Artık topraklar, kayaçların kimyasal bozunma ürünü olarak ortaya çıkmaktadır ve artık toprakların fiziksel özellikleri iklim, ana kaya, topografya gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Sıcaklık, yağış gibi iklimsel değişimler, ana kaya, suyun hareketi, drenaj ve topografya toprak profiline etki eden özelliklerdir. Özellikle tropikal bölgelerde yağış ve yüksek sıcaklıklarda tepkimeler hızlandığı için kimyasal bozunma süreci hızlanmakta ve dolayısıyla artık toprak oluşumu süreci etkilemektedir [24].

Ertürk, 1997 de Solfasol Mahallesi'ndeki artık toprak zeminler üzerinde yapmış olduğu çalışmada [25], donma çözünme etkisi, nem, yağış, ıslanma-kuruma, iklim ve bitki örtüsü gibi faktörlerin artık toprak oluşum süreçlerini hızlandıran fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler olduğunu belirtmiştir.

### 4.3. İnceleme Alanının Jeolojisi

Arazi çalışmaları gerçekleştirilen ve örnekleme yapılan Solfasol Mahallesi'nin jeolojisi hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla daha önceki çalışmalar incelenmiştir. Ertürk yapmış olduğu çalışmada [25], bölgedeki birimlerin Miyosen yaşlı ve Tersiyer volkanizması sonucu oluşan pembemsi renkte Payamlıtepe andezitlerinin bozunması sonucunda oluştuğunu belirtmiştir. MTA ise bölgedeki andezitleri 1997 yılında yapmış olduğu çalışmada [26], kırmızı, pembe ve boz renkli akma izlerine sıkça rastlanan Tekke volkaniti olarak isimlendirmiştir.



Şekil 4.7 Çalışma alanına ait jeolojik harita [26].



OROJENEZ	ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR	
GENÇ ALPİN	S E N E Z O Y İ K	Kuvaterner			Allüvyon (çakıl, kum, silt)	
ORTA ALPİN		Neojen	Pliyosen	Üst		Gevşek çimentolu konglomera, kırmızı renkli kumlu siltli kil, kireçyumrulu kırmızı killler
				Alt		Pembe renkli marn ve killerde karışık lav çakılları ve tüfler
		Miyosen		Siltli-killi gösel kireçtaşları, marn, kilitaş, konglomera, andezit, bazalt, aglomera ve tüfler		
		Paleojen	Oligosen		Konglomera, kumtaşı, marn, jips	
			Eosen		Bol fosilli kumlu kireçtaşları ve kumtaşları	
			Paleosen		Fliş (konglomera, kumtaşı, silttaşı, marn, kireçtaşı)	

Şekil 4.8 Çalışma alanına ait genelleştirilmiş stratigrafik istif (ölçeksizdir).

(Kasapoğlu'ndan alınarak basitleştirilmiştir [27].)

Çizelge 4.1 Çalışma alanındaki andezitlerin bozunma profili [25].

Bozunma Derecesi	Kalınlık	Açıklamalar	
Bitkisel Toprak	0-20 cm	Ağaç ve bitki kökleri bulunduran, kırmızımsı kahverengi, gevşek, yer yer iri çakıl boyutunda ve elle ufalanamayan sert andezit çakılları bulunduran, az plastik yüzey toprağı.	
I	0-3 m	Koyu pembe - kahverengi, çoğunlukla silt ve ince kuma dönüşmüş andezit artık toprağı; kalıntı kaya dokusu gözlenmekte ve kolaylıkla silt- ince kum halinde dağılılabilen kayaç parçaları içermektedir.	
II	II-a	3-7 m	Yeşilimsi gri-açık morumsu kırmızı renkli ince-iri taneli, elle kolay parçalanabilen, zayıf dayanımlı, çok-tamamen ayrıışmış, porfirik dokulu andezit kayacı.
	II-b	?	
III	?	Koyu morumsu kırmızı rekli, ince-iri taneli, çok sert, yüksek dayanımlı, sağlam-az ayrıışmış, porfirik dokulu andezit taban kayacı.	

Çalışma alanının bozunma profiline bakıldığında (Çizelge 4.1), alt kısımlardaki taze kayaç üzerine bozunmuş kayaçlar ve en üstte yüzeye doğru artık toprak zonu geçişi gözlemlenmektedir. Artık toprak zonuna bakıldığında; renk olarak kirli sarı ve kahverengi olarak görülmekte, pembe renkli andezit üzerini kaplamaktadır. Kaya dokusu neredeyse bozulmuş silt-kum boyutunda malzeme içeren zonun kalınlığı 0-3 m dir. Artık toprak zonunun alt kısmında dayanımı düşük, elle kolayca dağılabilen, yeşilimsi-gri renkli bozunmuş kayaç zonu bulunmaktadır. Çalışma alanı içinde çok az yer kaplayan sağlam kaya zonunda ise ince kristalli, mineralli kırmızımsı renkte andezit bulunmaktadır [25].

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Solfasol Mahallesi'nden alınan üç zemin numunesinin zemin su karakteristik eğrilerinin belirlenmesi amacıyla zeminlerin mühendislik davranışlarını belirlemek için gerçekleştirilen klasik zemin mekaniği deneyleri ve doymun olmayan zemin mekaniğinde kullanılan filtre kağıdı ve basınç plakası deneylerinin yapıış ve sonuçları bu bölümde anlatılmaktadır.

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar iki sınıfa ayrılacak olursa, ilk olarak yapılan deneyler zeminlerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesini sağlayan klasik zemin mekaniği deneyleridir. İkinci aşamada ise doymun olmayan zeminlere ait zemin mekaniği parametrelerin belirlenmesi amacıyla filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen klasik zemin mekaniği deneyleri aşağıda verilmiştir.

- Elek analizi ve hidrometre deneyleri,
- Yoğunluk tayini,
- Özgül ağırlık tayini,
- Atterberg limitleri tayinleri,
- Standart Proktor deneyi,
- Kesme kutusu deneyleri.

İkinci laboratuvar deney aşamaları zeminlere ait zemin su karakteristik eğrilerini çizibilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler aşağıda verilmiştir.

- Filtre kağıdı deneyi,
- Basınç plakası deneyi.

## **5.1. Laboratuvar Çalışmaları**

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümü zemin mekaniği laboratuvarlarında, American Society of Testing Materials (ASTM) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

### **5.1.1. Elek analizleri ve hidrometre deneyi**

Bir zemindeki tanelerin (çakıl, kum, silt, kil) yüzdelerini belirlemek, zeminlerin mühendislik özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi açısından büyük öneme sahiptir. Bir zeminde bulunan tanelerin boylarının farklı boydaki tanelerin ağırlığına oranı 'elek çözümlenmeleri' yapılarak bulunmaktadır. Ayrıca, kil ve silt boyu tanelerin belirlenmesi içinde yaş çözümü (hidrometre deneyi) gerçekleştirilir. Elek analizi ve hidrometre deneyi sonucunda malzemeyi oluşturan farklı boydaki tanelerin ağırlık olarak yüzde miktarları belirlenir ve yarı logaritmik kağıdın, logaritmik ekseninde tane boyu, aritmetik eksenine elekten geçen % de değeri yazılarak tane boyu dağılım eğrisi elde edilmektedir [28].

Hidrometre ve elek analizi deneyleri gerçekleştirilirken ASTM D6913 standardı göz önünde bulundurulmuştur. Elek analizi deneyinde kullanılan standart numune miktarı 400-500 g kadardır. 110 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilen zemin numunesi üzerinde deney uygulanmıştır. Numuneler standart eleklerden geçirilerek elek üzerinde kalan zemin tartılır ve işlem tamamlanır. Zeminlerde ince ve iri taneli zeminler karışık olarak bulunabileceği için tane çapları 76.2 mm ile 0.075 mm arasında olan kısım elek analizine tabi tutulurken, çapları 0.075 mm den küçük olan zeminlerde hidrometre analizi kullanılmaktadır [29].



Şekil5.1 Elek analizi deneyi.

Tane çapı 0.075 mm den küçük veya 200 nolu elekten geçen zemin numunesi üzerinde hidrometre deneyi yapılır. Deney; 1000 ml'lik süspansiyon içerisinde yaklaşık 50 gr kuru numune tanelerinin çökme hızlarının oranının tane çapı ile değiştiğini gösteren Stoke yasasına dayanmaktadır [30].

Deneyin yapılış aşamaları kısaca aşağıda özetlenmiştir.

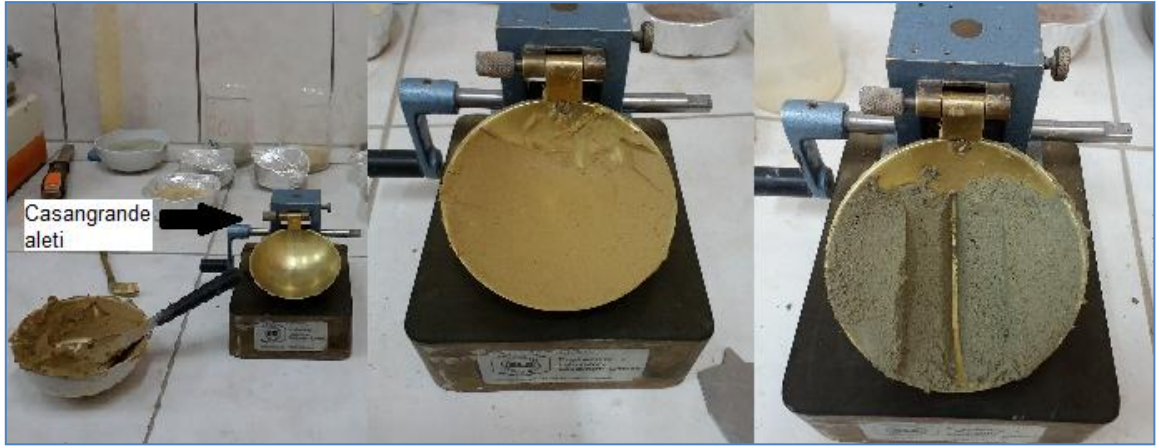
- 50 g numune %4'lük (125 ml)  $(\text{NaPO}_3)_6$  içerisinde dökülür. Numune bu çözelti içinde 16 saat bekletilir. 16 saat sonunda çözelti karıştırıcı ile karıştırılıp 1000 ml'lik süspansiyon silindire dökülür.
- Daha sonra silindirin ağzı el ile kapatılarak 1 dakika süre ile çalkalanıp 20 °C' deki sabit sıcaklıkta su banyosu içine yerleştirilir.
- Hidrometre, silindir içerisine daldırılır. İlk olarak 30. saniye okuması yapılır. Bu şekilde 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120 ve 240. dakikalar ile 8, 24 ve 48. saat okumaları kaydedilir.
- Hidrometre okumaları yapıldığı zaman süspansiyon sıcaklığı da ölçülmelidir [28].



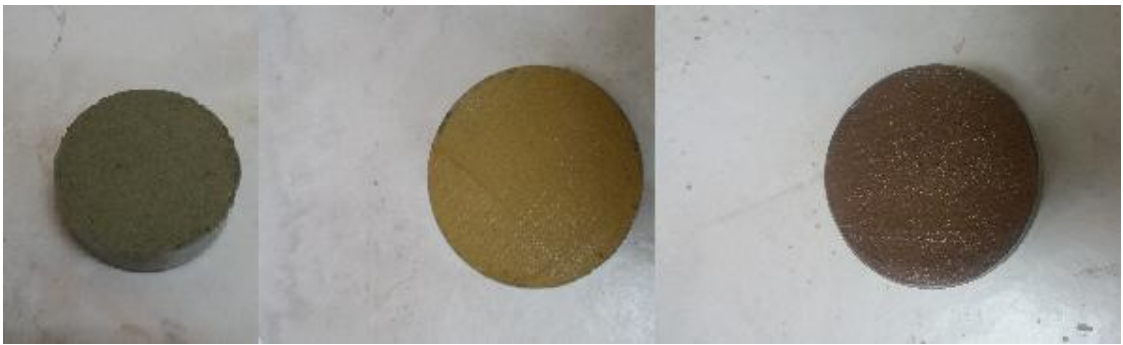
Şekil 5.2 Üç zemin türünde gerçekleştirilen hidrometre deneyi .

### 5.1.2. Kıvam (Atterberg) limitleri analizi

Kıvam (Atterberg) limitleri analizi, ince taneli zemin sınıflandırılmasında kullanılan bir yöntem olup, ASTM D4318 standardına uygun olarak yapılmıştır [31]. Üç zemin numunesinin kıvam limitlerini belirlemek amacıyla likit limit deneyi ve plastik limit deneyi Üniversitemiz zemin mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Casagrande yöntemi kullanılarak likit limit sonuçları elde edilmiştir. Likit limit deneyinde etüvde kurutulan 40 nolu elek altı malzeme kullanılır. Numuneler değişik su içeriklerinde hazırlanır ve Casagrande aletine yerleştirilir. Daha sonra numune, yüzeyi tabana paralel olacak şekilde düzeltilir ve oluk açma bıçağı ile ortadan ikiye bölünür. Krank kolu saniye de iki devirlik bir hızla çevrilerek numune açıklığının 13 mm kapanması sağlanacak şekilde vuruşlar gerçekleştirilir. Değmenin sağlandığı kesimin uzunluğu cetvelle ölçülür ve kapanmayı sağlayan vuruş sayısı kaydedilir. Kapanmanın gerçekleştiği bölge ve çevresinden yaklaşık 10 g ağırlığında numune deney kabına konur ve su içeriği belirlenir. Elde edilen veriler neticesinde su içeriği ve vuruş sayısı grafiği çizilerek 25 vuruşa karşılık gelen su içeriği değeri zeminin likit limit değeri olarak belirlenir [31].



Şekil 5.3 Likit limit deneyi.



Şekil 5.4 Likit limit deneyi sonucunda su içeriğini belirlemek için alınan numuneler.

Plastik limit deneyinde amaç; zeminin plastik kıvamda bulunduğu durumdaki en düşük su içeriğinin belirlenmesidir. Top şeklindeki numuneler cam plaka üzerinde el ile yuvarlanıp yaklaşık 3 mm çaplı silindirik şekiller elde edilir. Çap 3 mm' ye düştüğü anda çatlamlar görülürse numune parçaları toplanarak alüminyum kap içerisine konur ve su içeriği belirlenir [31].



Şekil.5.5 Plastik limit deneyi.

### 5.1.3. Özgül ağırlığın belirlenmesi (piknometre deneyi)

Tane birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı özgül ağırlık ( $G_s$ ); olarak ifade edilmektedir.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Eşitlikteki;  $\gamma_s$  tane birim hacim ağırlığı ve  $\gamma_w$  ise suyun birim hacim ağırlığıdır. Piknometre deneyinde 4 numaralı elekten elenmiş ve etüvde kurutulmuş zemin numunesi kullanılmaktadır. Kurutulmuş örnek desikatörde soğumaya bırakıldıktan sonra piknometreye aktarılır. İçinde örnek bulunan piknometre tartılır ( $W_2$ ) [28].

$$G_s = \frac{(W_2 - W_1)}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)}$$

Eşitlikte;

$W_1$ : Piknometrenin boş ağırlığı (g)

$W_2$ : Piknometre + zemin ağırlığı (g)

$W_3$ : Piknometre + zemin + su ağırlığı (g)

$W_4$ : Sadece su ile dolu piknometre ağırlığı (g)

Üç zemin numunesi için yapılan özgül ağırlık deneylerinde ASTM D854 standardı göz önünde bulundurulmuştur [32].



Şekil 5.6 Piknometre deneyi.



#### 5.1.4. Standart Proktor deneyi

Basınç plakası deneylerinde kullanılan numuneler optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Optimum su içeriğinin belirlenmesi için; üç zemin numunesi üzerinde zemin mekaniği laboratuvarında standart Proktor deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken ASTM D698 standardı, A yöntemi dikkate alınmıştır [33].

Açıktaki kurutulup 4 nolu elekten geçirilen yaklaşık %5 su içeriğinde hazırlanmış yeterli zemin numunesi, hacmi ve ağırlığı bilinen Proktor kalıbı içerisine üç eşit tabaka halinde sıkıştırılır. Her bir tabaka 30.5 cm lik serbest düşüş yapan tokmakla 25 vuruş darbesiyle kalıp içerisine sıkıştırılır. Sıkıştırılan zemin numunesi tartılır ve zeminin su içeriğini belirleyebilmek için bir miktar numune alınır. Gerçekleştirilen işlemler bir önceki zemin numunesinin su içeriği %5 arttırılacak şekilde tekrarlanır [34].

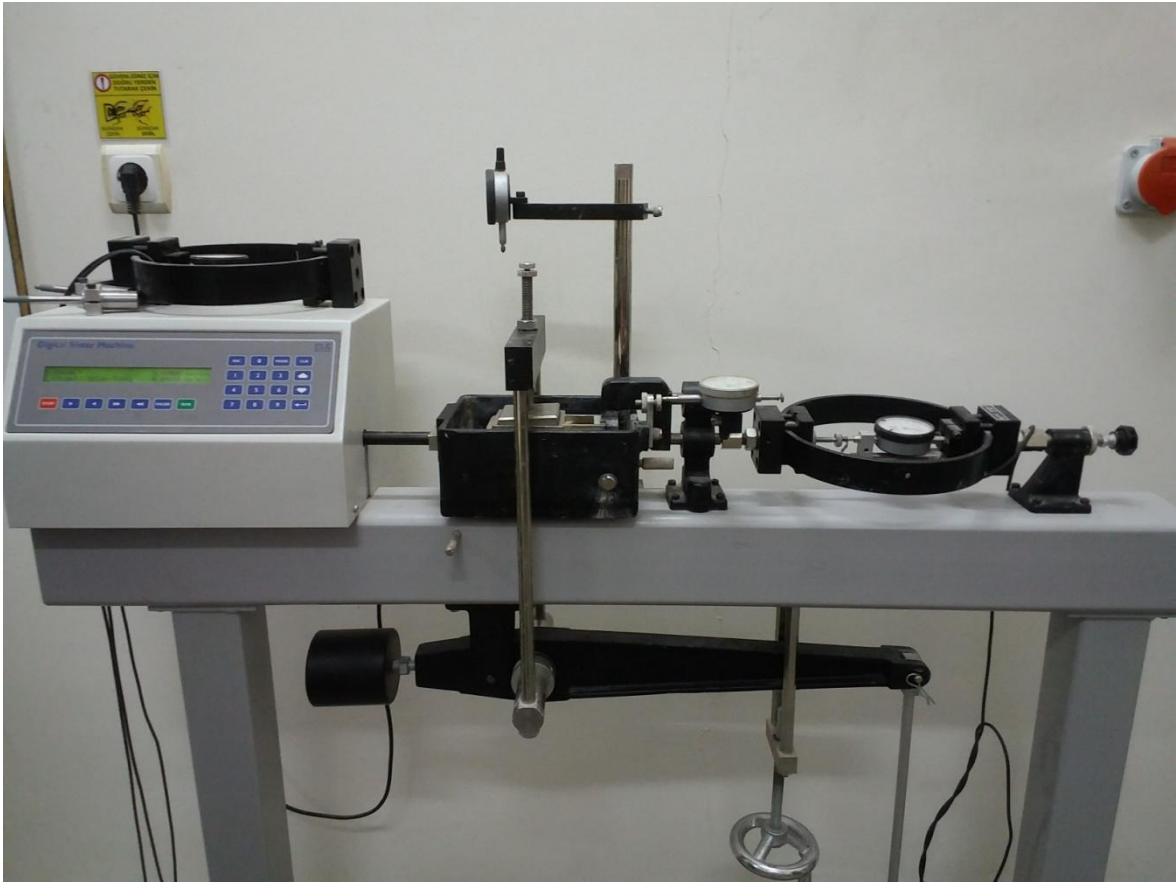
Tez kapsamında standart Proktor deneyleri gerçekleştirilirken üç farklı zemin numunesi için ayrı ayrı 5, 6 noktada deney tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler sonucunda çizilen kuru yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ ) – su içeriği (%) eğrisinden zeminin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri belirlenebilmektedir.



Şekil 5.7 Standart Proktor deneyi uygulaması.

### 5.1.5. Kesme kutusu deneyi

Temellerin taşıma gücü hesaplamalarında, şevlerin denge analizinde, toprak dolgularda ve hava alanlarının projelendirilmesinde vb., zeminlerin kayma dayanımını belirlemek çok önemlidir [28]. Bu çalışma kapsamında zeminlerin kayma dayanımı, efektif kohezyon ( $c'$ ) ve içsel sürtünme açısını ( $\phi'$ ) belirleyebilmek için zemin mekaniği laboratuvarında kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ASTM D3080 standardı göz önünde bulundurulmuştur [35].



Şekil 5.8 Kesme kutusu deney düzeneği.



Şekil 5.9 Kesme kutusu deney aletinde makaslanması için hazırlanan zemin numunesi.

Öncelikle kesme kutusu deneyi yapılacak olan zemin numunesi, dikdörtgen şeklindeki iki parçadan oluşan Şekil 5.9’da gösterilen kutu içerisine yerleştirilir. İçinde zemin numunesi bulunan rijit kutu deney düzeneğine yerleştirilir. Numune üzerine normal gerilme kuvveti uygulayarak, kesmeden önce zeminin konsolide olması sağlanır. Daha sonra sabit bir normal kuvvet numune üzerine uygulanır ve numune belirli bir kesme kuvvetiyle kesilir. Uygulanan kuvvet etkisiyle haznenin üst kısmı hareket eder iken, alt kısmı ise sabit kalır. Uygulanan kayma kuvveti, bir yük halkası ile ölçülür. Deney sırasında hem yük halkası okumaları hem de düşey deformasyon saatinden okumalar kaydedilir. Zemin numuneleri kesildikten bir süre sonra deney sonlandırılır ve kırılma anındaki normal ve kayma gerilmeleri hesaplanır [28].



Şekil 5.10 Makaslanan zemin numunesinin deney sonrası görünümü.

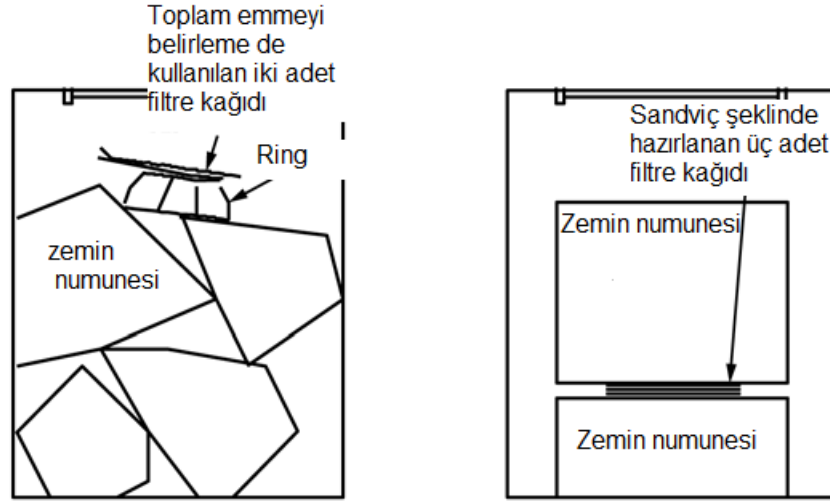
Laboratuvarda gerçekleştirilen kesme kutusu deneyleri drenajlı koşullarda tamamlanmıştır. Numune 1, Numune 2 ve Numune 3 için hazırlanan kesme kutusu deneyi örnekleri kuru yoğunluk değerleri sırasıyla  $1.2 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.4 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.6 \text{ g/cm}^3$  olmak üzere optimum su içeriği değerlerinde hazırlanmıştır. Her zemin numunesi için en az 3 adet örnek hazırlanıp, farklı sabit yükler (1 kg, 2 kg, 3 kg ) altında deney tekrarlanarak veri setleri elde edilmiştir. Elde edilen verilerin neticesinde Numune 1, Numune 2, Numune 3 için normal gerilme ( $\sigma$ ) ye karşılık kayma gerilmesi ( $\tau$ ) grafikleri çizilmiştir.

#### **5.1.6. Filtre kağıdı deneyi**

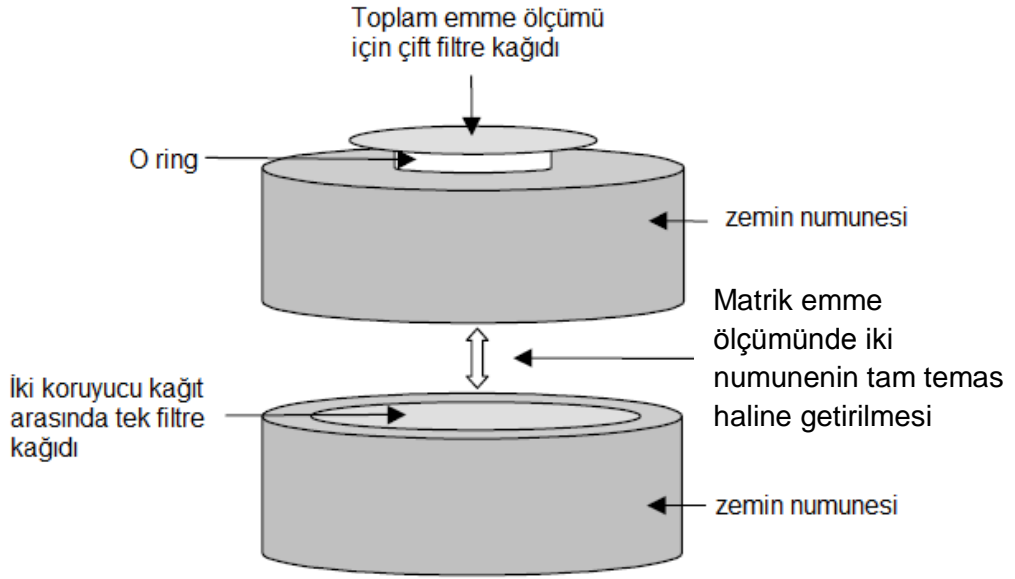
Bu tez çalışmasında, artık toprakların, zemin su karakteristik eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden ilki filtre kağıdı tekniğidir.

Filtre kağıdı deneyini uygulamadaki asıl amaç zeminin toplam ve matrik emme basıncını belirleyebilmektir. Son yıllarda toplam ve matrik emme basıncı değerlerini belirleyebilmek için filtre kağıdı yöntemi çokça tercih edilmektedir. Bunun sebebi filtre kağıdı yönteminin diğer yöntemlere göre daha basit ve oldukça ucuz bir yöntem olmasıdır [36]. Filtre kağıdı yöntemiyle, 0.01–100 MPa arasında değişen emme basıncı değerleri ölçülebilmektedir [18]. Aynı deney içerisinde hem toplam emme hem de matrik emme basıncı verileri elde edilebilmektedir. Ayrıca filtre kağıdı yöntemi diğer yöntemler ile kıyaslandığında daha geniş ve güvenli ölçüm aralığına sahiptir.

Zemin numuneleri ile filtre kağıtları arasındaki zemin suyu buharının dengeye gelme sıcaklığı sabit bir sıcaklıkta yaklaşık ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de gerçekleşir. Dengelenme süresi ortalama 1 hafta kadardır. Genellikle 1 hafta sonunda zemin numunesinin emme basıncı değerinin filtre kağıdının emme basıncı değerine eşit olduğu kabul edilir. Dengelenme süresi sonunda kap içerisinde çıkarılan filtre kağıtlarının 0.001g hassasiyete sahip hassas terazi ile ölçümü gerçekleştirilir [18]. Hassas terazi ölçümleri sonucunda zemin numunelerine ait emme basıncı değerlerini belirleyebilmek için filtre kağıdının su içeriği ile emme basıncı arasındaki ilişkiyi veren kalibrasyon eğrileri kullanılır. Böylece zeminin matrik ve toplam emme basıncı değerleri tespit edilmiş olur.



Şekil 5.11 Toplam ve matrik emme basıncının ölçülmesi [18].



Şekil.5.12 Filtre kağıdı deneyinin şematik olarak gösterilmesi [37].

Bu tez çalışması kapsamında uygulanan tüm filtre kağıdı deneylerinde ASTM D5298-16 deney standardı göz önünde bulundurulmuştur. Deneylerde Whatman 42 numaralı filtre kağıtları kullanılmıştır. Deneylerde; 40 no' lu elek altı zemin numuneleri tercih edilmiştir. Üç farklı artık toprak için numuneler farklı kuru yoğunluk ve su içeriğinde

hazırlanmıştır. Artık toprak numuneleri hazırlanırken zeminlerin Proktor deney sonuçları göz önünde bulundurulmuştur.

1. Numune için hazırlanan kuru yoğunluk değerleri sırasıyla, 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 g/cm<sup>3</sup> tür.

1. Numune için kullanılan su içeriği değerleri ise, %10, 15, 20 ve 25 tir.

2. Numune için hazırlanan kuru yoğunluk değerleri sırasıyla, 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 g/cm<sup>3</sup> tür.

2. Numune için kullanılan su içeriği değerleri ise, %5, 10, 15, 20 dir.

3. Numune için hazırlanan kuru yoğunluk değerleri sırasıyla, 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 g/cm<sup>3</sup> tür.

3. Numune için kullanılan su içeriği değerleri ise, %10, 15, 20 ve 25 tir. Üç artık toprak için de 40 nolu elek altından geçen zemin örnekleri hazırlanırken Proktor deney sonucuna göre belirlenen optimum su içeriği değerleri aşılmamaya özen gösterilmiştir. Tüm zeminler için ayrı ayrı hazırlanan her bir numune için yaklaşık 16 filtre kağıdı deneyi gerçekleştirilmiş olup, toplamda 48 adet veri elde edilmiştir.

Farklı kuru yoğunluk ve su içeriğine göre hazırlanmış numuneler; 7 cm çapında 3 cm yüksekliğinde dairesel kalıplar içerisinde dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Kalıpların boyutlarının 7 cm çap ve 3 cm yüksekliğe sahip olarak tercih edilmesindeki amaç; deneylerde kullanılmış olan kavanoz boyutlarıdır. Çünkü deney standartları kapsamında zemin numunesi, kavanoz içerisine yerleştirildiğinde mümkün olan en küçük boşluğun kalması gerekmekte, en az %75 ini kaplamalıdır denilmektedir [18]. Her bir zemin numunesinden 2 adet örnek hazırlanmıştır. Sıkıştırılan numuneler kalıplardan çıkartılarak, deneye hazırlanmıştır.



Şekil 5.13 Filtre kağıdında kullanılan örneklerin hazırlanması.

Filtre kağıdı deney aşamaları ve hesaplamaları gerçekleştirilirken Göksan' ın 2007 yılında yapmış olduğu Doktora tez çalışmasındaki [38], filtre kağıdı deney çalışmaları doğrultusunda hareket edilmiştir.

#### **5.1.6.1. Filtre kağıdı deneyi ile toplam ve matrik emme basıncı belirlenmesi aşamaları**

- Öncelikle tüm filtre kağıdı deneylerinde kullanılmak üzere matrik emme basıncını belirlemede kullanılan 5.5 cm ve 7 cm çapındaki filtre kağıtları ve toplam emme basıncı değerini belirlemede kullanılan 4 cm çapındaki filtre kağıtları 110 °C deki etüvde 24 saat süre ile bekletilir.
- 24 saat bekletilen kuru filtre kağıtları etüvden çıkarıldıktan sonra nem almasını engellemek amacıyla eldiven ve cımbız kullanılarak vakit kaybetmeden desikatöre alınır.



Şekil 5.14 Filtre kağıtlarının nem almasını önlemek amacıyla desikatörde bekletilmesi.

- 40 nolu elekten elenmiş 110 °C etüvde kurutulmuş zeminler belirlenen kuru yoğunluk ve su içeriği değerlerine göre 7 cm çap ve 3 cm yüksekliğe sahip plastik ringler içerisinde dinamik olarak sıkıştırılır.



Şekil5.15 Örneklerin sıkıştırılması ve ringden çıkarılması.

- Matrik emme basıncını tayin etmek amacıyla 5.5 cm çapındaki filtre kağıdı koruyucu olarak yerleştirilen iki adet 7 cm çaplı filtre kağıtları arasına Şekil 5.16'daki gibi sandviç şeklinde yerleştirilir. Koruyucu filtre kağıtlarının kullanılmasındaki amaç, ortadaki filtre kağıdının kirlenmemesi ve zemin numunesinin bulaşmasını engellemektir. Bu işlemler gerçekleştirilirken filtre kağıtlarının nem almaması için eldiven ve cımbız kullanılmaktadır.



Şekil 5.16. Filtre kağıtlarının sandviç şeklinde hazırlanması.



- Hazırlanan filtre kağıtları iki zemin numunesi arasına yerleştirilir. Filtre kağıtları numuneler arasına tam bir temas sağlayacak şekilde yerleştirilir.



Şekil 5.17 Filtre kağıtlarının zemin numuneleri arasına yerleştirilmesi.

- Kavanozun içerisinde oluşacak zemin nemi buharının hazırlanan filtre kağıtlarına temasının engellenmesi amacıyla numunelerin birleşim yerleri elektrik bantı ile çevrilir.



Şekil 5.18 Zemin numunelerinin bantlanması.

- Hazırlanan zemin numunesi kavanoz içerisine kavanoz kenarlarına temas etmeyecek şekilde yerleştirilir. Zemin numunesi boyutları kavanoz hacminin

yaklaşık %75 ini dolduracak şekilde seçilmiştir. Zemin numuneleri ile filtre kağıtları arasındaki dengelenme süresinin en kısa sürede gerçekleşmesi sağlanması için boşluk hacminin minimum düzeyde olması gerekmektedir. Kavanoz içerisine koyulan numunelerin üzerine 3 cm çapında ve 0.7 cm yüksekliğinde ring Şekil 5.19’da gösterildiği gibi yerleştirilir. Ring yerleştirilmesinde ki amaç toplam emmeyi belirlemede kullanılan 4 cm çapındaki iki adet filtre kağıdının zemin ile temasını engellemektir.



Şekil 5.19 Zemin numunesi üzerine plastik ring yerleştirilmesi.

- Bir sonraki adım da, ring üzerine iki adet toplam emmeyi belirlemeye yarayan 4 cm çapına sahip filtre kağıtları Şekil 5.20’de gösterildiği gibi yerleştirilir. Filtre kağıtları yerleştirilirken zemin numunesine, kavanoz yan çeperlerine ve kavanozun kapağına temas etmemesine özen gösterilmelidir.



Şekil 5.20 Filtre kağıtlarının plastik ring üzerine yerleştirilmesi.

- Son aşamada ise kavanozların kapakları sıkıca kapatılmaktadır. Daha sonra kavanoz içinden ve dışından nem transferi olmasını engellemek için kapakların ağzı elektrik bantı ile sıkıca bantlanmaktadır. Kavanozların kapaklarına filtre kağıdı deneylerinin karışmasını önlemek için deney numaraları yazılı olan kağıtlar Şekil 5.21’de gösterildiği gibi yapıştırılmıştır.

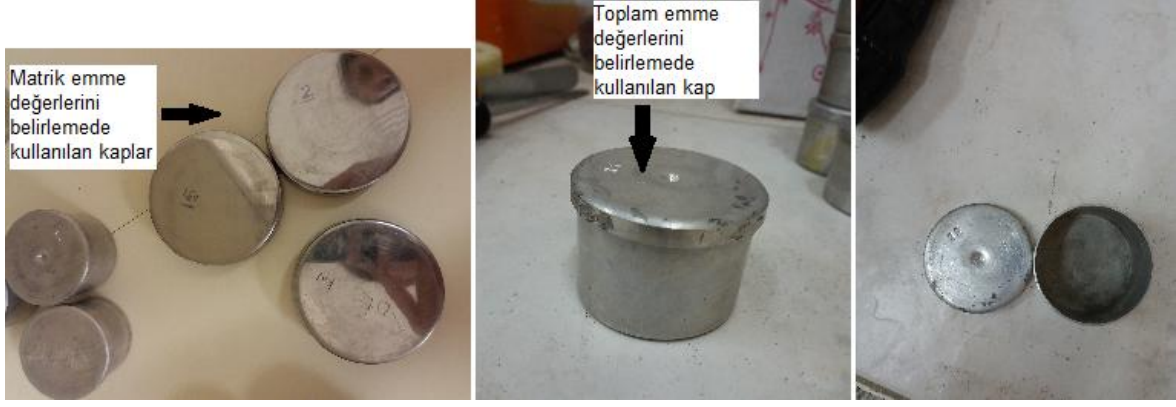


Şekil 5.21 Kavanoz kapaklarının sıkıca bantlanması.

- Hazırlanan numuneler termos çanta içinde 1 hafta dengelenme süresi sağlanıncaya kadar beklemeye alınmaktadır.

#### **5.1.6.2. Filtre kağıtlarının su içeriklerinin tayin edilmesi**

Termos çanta içerisinde 1 hafta dengelenme süresinin tamamlanması için bekletilen numuneler, 1 hafta sonunda termos çantadan çıkarılır. Numuneler içerisindeki filtre kağıtlarının su içeriklerini tayin etme aşamaları aşağıdaki adımlar izlenerek tespit edilmiştir.



Şekil 5.22 Matrik ve toplam emmeyi belirleme de kullanılan alüminyum kaplar

- İlk olarak üç adet kapaklı alüminyum numune kaplarının soğuk daraları ( $T_c$ ) 0.0001 g hassasiyete sahip terazi ile Şekil 5.23’de gösterildiği gibi tartılmıştır. Kaplardan iki tanesi numunenin üzerindeki ring üzerine yerleştirilen toplam emmeyi ölçmeye yarayan iki adet 4 cm çaplı filtre kağıtlarının su içeriğini belirlemek için kullanılmıştır. Üçüncü kapaklı alüminyum kap ise iki zemin numunesi arasında bulunan, iki adet 7 cm çapındaki filtre kağıtları arasına yerleştirilen 5.5 cm çaplı filtre kağıdının su içeriğini belirlemek için kullanılmıştır.



Şekil5.23 Alüminyum kapların soğuk daralarının ( $T_c$ ) alınması.

- Termos çanta içerisinde çıkarılan kavanozların kapakları hızlı bir şekilde açıldıktan sonra vakit kaybetmeden ring üzerine yerleştirilen iki adet filtre kağıdı ayrı ayrı alüminyum kutular içerisine yerleştirilmiştir. Filtre kağıtlarının nem kaybı olmasını engellemek için kutuların kapakları hızlıca kapatılmıştır. Daha sonra vakit kaybetmeden içinde ıslak filtre kağıtları bulunan kapaklı kutuların ağırlıkları ( $M_1$ ) belirlenmiştir. Yapılan işlemler birkaç saniye içerisinde tamamlanmıştır.



Şekil 5.24 Kavanozun kapağında bulunan bantın çıkarılması.



Şekil 5.25 Ring üstündeki filtre kağıtlarının alüminyum kutulara alınması.

- Ardından kavanoz içerisinden çıkarılan zemin numunelerinin ortasındaki bant çıkarılmış ve sandviç şeklinde yerleştirilen filtre kağıtlarından ortadaki 5.5 cm çaplı filtre kağıdı vakit kaybetmeden Şekil 5.25’de gösterildiği gibi alüminyum kap içerisine alınarak tartılmıştır ( $M_1$ ).



Şekil 5.26 Ortadaki filtre kağıdının kutu içerisine alınması.

- $M_1$  ağırlıkları belirlenen alüminyum kutular, kapakları yarı kapalı olacak şekilde 110 °C deki etüvde 24 saat bekletilmiştir. Kutular etüvden çıkarılmadan önce kutu içinde ısı dengenin sağlanması için kapakları tam olarak kapatılmıştır. Kapakları kapanan kutular etüvde 15 dakika daha bekletilmiştir. Daha sonra etüvden teker teker çıkarılan kutular hızlı soğumanın sağlanması için 30-35 sn süre ile metal tezgah üzerinde bekletilmiş, ardından 0.0001 g hassas terazi ile hızlı bir şekilde tartılmış,  $M_2$  ağırlıkları belirlenmiştir. Bu işlemi takiben kuru filtre kağıdı alüminyum kutu içerisinden çıkarılarak alüminyum kutunun boş sıcak ağırlığı ( $T_h$ ) kaydedilmiştir.
- Ayrıca 7 gün boyunca termos çanta içerisinde bekletilen iki adet zemin numunesinin nem içeriği değerlerinin tayin edilmesi için ıslak ağırlıkları kaydedilmiştir. Islak ağırlıkları kaydedilen numuneler etüv de bir gece bekletilmiş, kuru ağırlıkları da kaydedilmiştir.

### 5.1.6.3. Filtre kağıtlarının su içeriklerinin hesaplanması

Farklı kuru yoğunluk ve su içeriği değerleri ile hazırlanan zemin numunelerinin toplam ve matrik emme basıncını belirleyebilmek için yukarıda belirtilmiş olan aşamalar sonunda filtre kağıtlarının su içerikleri hesaplanmalıdır. Bu sebeple tüm filtre kağıdı deneyleri sonunda ASTM D 5298–16’da belirtilmiş olan Eşitlikler (5.1), (5.2), (5.3) kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

$$M_f = M_2 - T_h \quad (5.1)$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad (5.2)$$

$$W_f = \frac{M_w}{M_f} \times 100 \quad (5.3)$$

Burada,

$M_f$  = Filtre kağıdının kuru ağırlığı

$M_2$  = Kuru filtre kağıdı + numune kutusu ağırlığı

$T_h$  = Numune kutusunun sıcak ağırlığı

$M_w$  = Filtre kağıdının emdiği suyun ağırlığı

$M_1$  = 7 gün sonunda kavanozdan çıkarılan filtre kağıtlarının ıslak ağırlığı + numune kutusunun ağırlığı

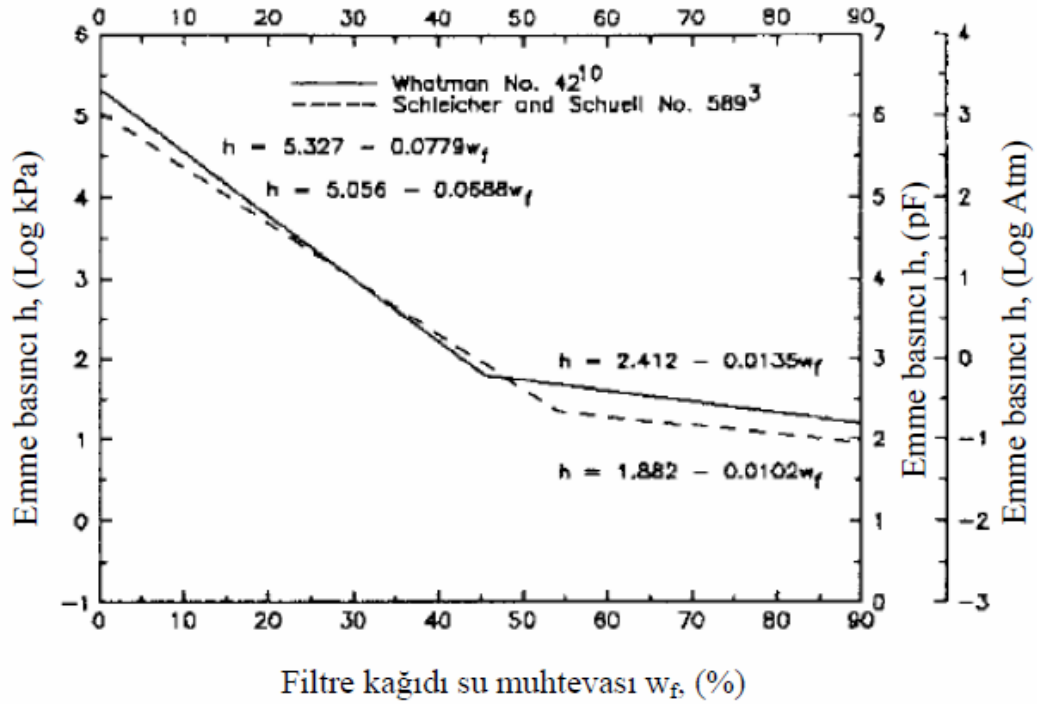
$T_c$  = Soğuk haldeki numune kutusunun ağırlığı

$W_f$  = Filtre kağıdının su içeriği (%)

### 5.1.6.4. Filtre kağıdı deneyi sonucu toplam ve matrik emme değerlerinin hesaplanması

Tez kapsamında kullanılan farklı su içeriği ve yoğunluk değerlerinde hazırlanan üç farklı artık toprak numunelerinin toplam emme basıncı belirlenirken kullanılan iki adet

4 cm çaplı filtre kağıtlarının su içerik değerleri yukarıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. İki adet filtre kağıdı için hesaplanan su içeriği değerlerinin ortalaması alınarak tek bir su içeriği değeri elde edilmiştir. Elde edilen su içeriği değerinden, ASTM D5298-16 standardında verilen kalibrasyon eğrisi veya Eşitlik (5.4) ve Eşitlik (5.5) kullanılarak zemin numunelerinin toplam emme basıncı değerleri belirlenmiştir. Zemin numunelerinin ortasına yerleştirilmiş olan 5.5 cm çapındaki filtre kağıtlarının su içerikleri değerleri, matrik emme basıncı değerlerini hesaplamak üzere kalibrasyon eğrileri veya Eşitlik (5.4) ve Eşitlik (5.5) kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 5.27 Emme basıncı – su içeriği ilişkisini veren kalibrasyon eğrisi [17].

$$\Psi(\log kPa) = 5.327 - 0.0779 w_f \quad (w_f < \%54) \quad (5.4)$$

$$\Psi(\log kPa) = 2.412 - 0.0135w_f \quad (w_f > \%54) \quad (5.5)$$

### 5.1.7. Basınç plakası deneyi

Doygun olmayan zeminlerin matrik emme basıncını tayin etmek için kullanılan bir başka deney yöntemi ise basınç plakası deney düzeneğidir. Tez kapsamında Solfasol



Mahallesi'nden alınan üç farklı artık toprak numunesinin zemin su karakteristik eğrilerinin belirlenmesinde filtre kağıdı deneyinden sonra ikinci bir deney olarak basınç plakası deney düzeneği tercih edilmiştir.

Basınç plakası deney düzeneği, ilk kez Hilf tarafından 1956'da önerilmiş ve eksen kaydırma tekniği olarak adlandırılan yöntem ile matrik emme basınçları kontrol edilmiştir [5]. Doymun olmayan zeminlerde matrik emme basıncını, yüksek hava giriş değerine dayanıklı seramik diskler ile kontrol altında tutma ve belirleme işlemi, eksen kaydırma tekniği olarak ifade edilmektedir [7].

Basınç plakası deney düzeneği, emme aralığının 0–1500 kPa arasında değiştiği durumlar için kullanılması uygun olarak tasarlanmıştır. Genelde ince taneli zeminler için kullanılabilir. Düzenek; yüksek basınca dayanıklı tencere, yüksek basınca dayanıklı seramik disk ve seramik diskin altına yerleştirilen kauçuk membrandan oluşmaktadır [18]. Kauçuk membranın görevi ise diskin içerisinden geçen suyu drene etmektir. Laboratuvarda basınç plakası deneylerinde kullanılan seramik disk maksimum 300 kPa basınç değerine dayanıklıdır. Bu yüzden deneylerde güvenli tarafta kalınabilmesi için seramik diske en fazla 250 kPa değerinde matrik emme basıncı uygulanmıştır. Deneylerde ayrıca matrik emme basıncını tencereye uygulamak için yüksek hava basıncı sağlayan kompresör kullanılmıştır.



Şekil 5.28 Laboratuvarda kullanılan basınç plakası deney düzeneği ekipmanları.

Deneylerde kullanılacak numunelerin kuru yoğunluk değerleri 3 zemin numunesi için de ayrı ayrı olmak üzere sırasıyla 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Kuru yoğunluk değerleri kalıp hacmi göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Ayrıca numuneler optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Deneyler aşağıdaki adımlar takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

- İlk olarak seramik disk basınç tenceresinin içerisinde bulunan tırnaklara siyah kauçuk membran yukarıya gelecek şekilde yerleştirilir. Daha sonra tencereye yerleştirilen 300 kPa dayanıma sahip seramik disk saf su ile doyurulur. Doyurulma işlemi alet içerisinde gerçekleştirilir. Doyurma sırasında üzerine saf su dökülen seramik diske kompresörden küçük değerlerde (5–10 kPa) değerinde basınç uygulanır. Ayrıca doyurma işlemi devam ederken seramik diskin gözeneklerinde hava kabarcıkları kalmamasına özen gösterilmelidir.



Şekil 5.29 Basınç tenceresinin içten görünümü.

- Hazırlanan numuneler 5 cm çap ve 2 cm yüksekliğe sahip plastik O-ringler içerisine dökülüp yerleştirilerek seramik disk üzerine oturtulur. Fakat numunenin doyurulması sırasında zemin parçacıklarının seramik diske bulaşmasını engellemek için O-ring yerleştirilmeden seramik disk ile O-ring arasına filtre kağıdı konulmalıdır.



Şekil 5.30 Seramik disk üzerine numunelerin yerleştirilmesi.

- Yerleştirilme işlemi gerçekleştirildikten sonra seramik disk üzerindeki numuneler saf su ile doyurulur. Doyurma sırasında dikkat edilmesi gereken bir husus ise saf suyun direkt numuneye temasından kaçınılmasıdır. Su ekleme işlemi maksimum ring boyutuna ulaşana kadar devam ettirilir. Seramik disk üzerine dökülen saf su numuneler tarafından emilir ve bir süre beklendikten sonra zemin numuneleri doygun duruma gelir.



Şekil 5.31 Seramik disk üzerindeki zemin numunelerinin saf su ile doyurulma aşamaları.

- Ardından seramik disk üzerinde bulunan mavi tahliye kablosu ile basınç tenceresindeki tahliye borusu arasındaki bağlantı sağlanır.
- Basınç tenceresinin ağzı kapatılır ve vidaları iyice sıkılır.



Şekil 5.32 Basınç tenceresinin vidalarının sıkılması.

- Daha sonra zemin numuneleri üzerine uygulanmak istenen matrik emme basıncı değeri manometreye girilir ve kompresör eşliğinde basınç tenceresine uygulanır. Kompresör yardımıyla tencere içerisine uygulanmış olan hava basıncı, zemin numunesinin boşluklarında bulunan boşluk suyunun dışarı tahliyesine sebep olur.



Şekil 5.33 Basınç plakası deneylerinde kullanılan manometrenin yakından görünümü.

- Basınç verme işlemi zemin numunelerinin gözenek boşluklarında hapsolan suyun tahliye borusundan damlaması bitene kadar devam eder. Bu işlem süresi 7 saat ile 7 gün arasında değişebilir. Su damlaması sona erdiğinde uygulanan hava basıncı, zeminin matrik emme basıncı olarak alınır. Uygulanan basınç kademesindeki su damlaması bittikten sonra farklı basınç kademesinde deneylere devam edilir. Tez çalışması kapsamında basınç plakası deneyinde numuneler üzerine ilk olarak 40 kPa matrik emme basıncı uygulanmış ve seramik diskin en çok dayanabileceği basınç değeri göz önünde bulundurularak 250 kPa ile deneyler sonlandırılmıştır.



Şekil 5.34 Tahliye borusundan su çıkışının gözlemlenmesi.

- Su damlamasının sona ermesinin ardından basınç verme işlemi sonlandırılır. Tencere içinde biriken basınç tahliye edilir ve tencerenin kapağı dikkatle açılır. Çıkarılan ring numuneler tartılır ve tartılma işlemi sonrası numuneler 75 °C de 48 saat süre ile etüvde bekletilir. Böylece kaybedilen su ağırlığı kaydedilir. Aşağıdaki eşitlikler kullanılarak zemin numunelerinin nem içerikleri belirlenir [39].

$$M_w = M_{w+r} - M_r$$

$$M_d = M_{d+r} - M_r$$

$$\theta = 100 \left( \frac{M_d}{M_w} \right)$$

$M_w$  = ıslak örnek ağırlığı (g)

$M_{w+r}$  = ıslak örnek ağırlığı + ring ağırlığı (g)

$M_r$  = ring ağırlığı (g)

$M_d$  = kuru örnek ağırlığı (g)

$\theta$  = örneğin nem içeriği (%)

Elde edilen veriler doğrultusunda zeminlerin matrik emme basınçlarına karşılık su içeriği grafikleri çizilerek zemin su karakteristik eğrileri belirlenmiş olur.

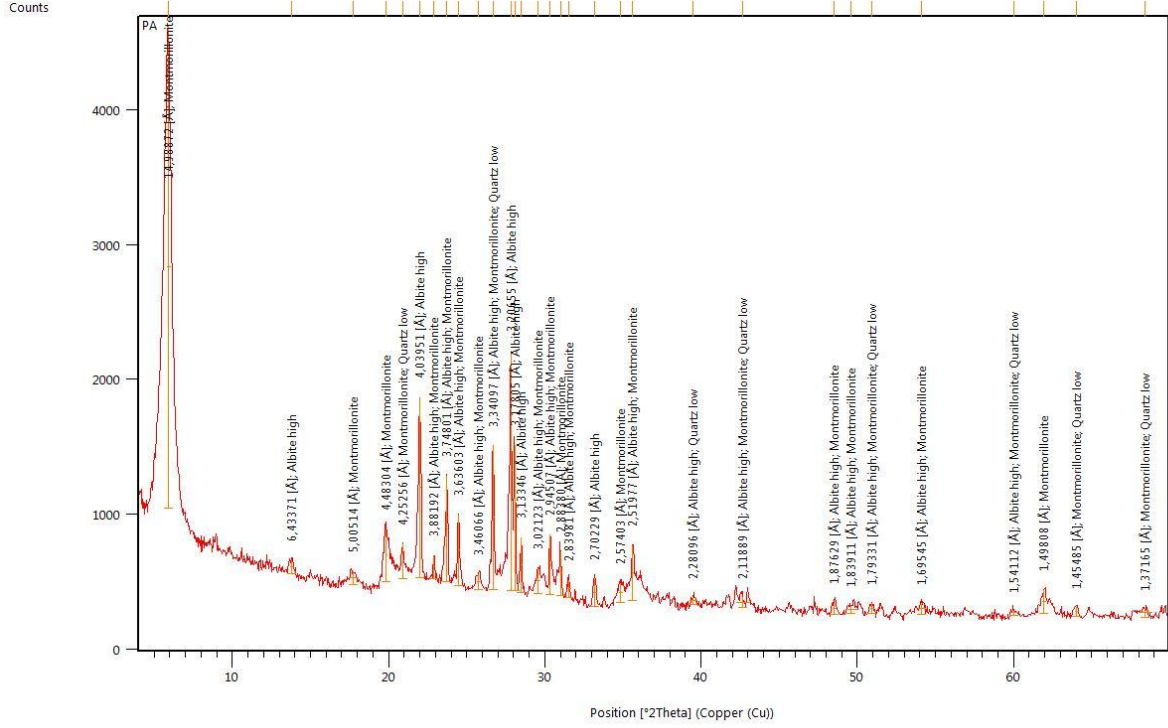
## **5.2. Numunelerin Mühendislik Özellikleri**

Bu bölümde üç farklı artık toprak numunesinin elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, standart Proktor, piknometre, kesme kutusu, filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleri sonucunda elde edilmiş olan mühendislik özellikleri belirtilecektir. Elde edilen tüm sonuçlara Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olan deneyler sonucunda ulaşılmıştır.

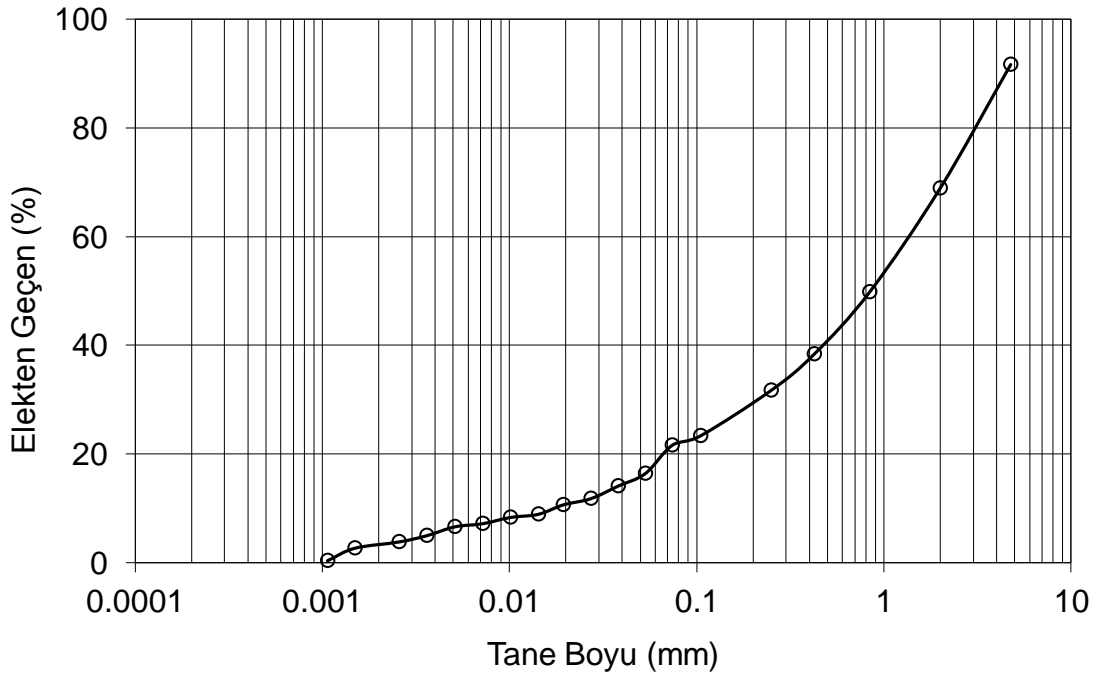
### **5.2.1. Numune 1**

Numune 1 olarak adlandırılan ve laboratuvar deneyleri yapılan kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesi, tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan arazi çalışmaları sonucunda Ankara ili Altındağ ilçesi Solfasol Mahallesi civarında yer alan andezitik artık topraklardan temin edilmiştir. Kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesi üzerinde X-ışınları analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda kırmızımsı-pembe renkli artık toprak zeminin ana bileşenini kil minerallerinden montmorillonitin oluşturduğu, tali bileşeninin ise düşük kuvars olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.35).

İlk olarak numune 1 üzerinde elek analizi ve hidrometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.36'da deney sonuçlarından edilen tane boyu dağılım eğrisi gösterilmiştir. Birleştirilmiş toprak sınıflama sistemi (USCS) ne göre kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesi SM (siltli kum) olarak sınıflandırılmaktadır



Şekil 5.35 Kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesinin X-ışınları analizi sonuçları.



Şekil 5.36 Numune 1 Kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğinin tane boyu dağılım grafiği.

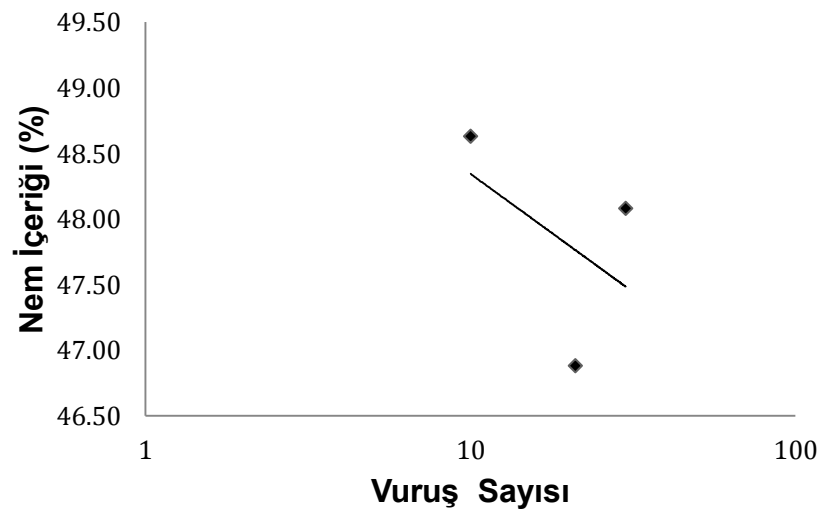


Yapılan elek analizi ve hidrometre sonucuna göre, örneğin %31,04' ünün çakıl, % 50,96' sinin kum ve %15,30' unun silt ve %2,70' inin kil olduğu saptanmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğe ait elek analizi sonuçları.

<b>Örnek Adı:</b>	Kırmızımsı-pembe	
<b>Top. Malz. (g):</b>	556.68	
<b>Elek No</b>	<b>Elek Çapı (mm)</b>	<b>El. Geçen (%)</b>
4	4.76	91.73
10	2	68.96
20	0.84	49.85
40	0.425	38.43
60	0.25	31.74
140	0.105	23.38
200	0.074	21.64
<b>İnce Tane Oranı = %21.64</b>		

Kırmızımsı pembe renkli artık toprak numunesi üzerinde gerçekleştirilen kıvam (Atterberg) limitleri deneyi sonucunda elde edilen vuruş sayısına karşılık nem içeriği (%) grafiği Şekil 5.37' de verilmiş, numuneye ait likit limit değeri %47.11 ve plastik limit değeri %29.11 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.2).

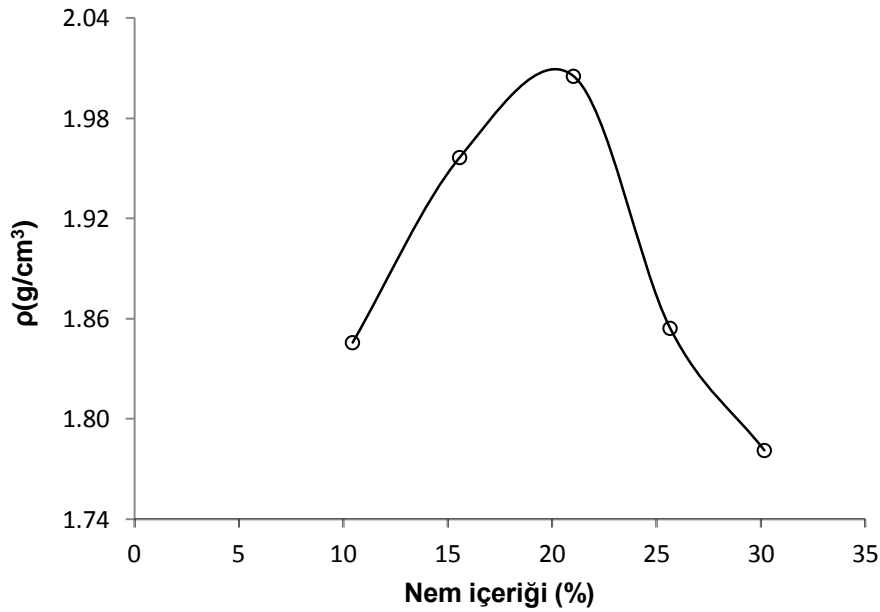


Şekil 5.37 Numune 1 Kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğinin Atterberg limit deneyleri sonucu elde edilen grafiği.

Çizelge 5.2 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğe ait Atterberg limitleri deney sonuçları.

Likit Limit (%)	47.71
Plastik Limit (%)	29.11
Büzülme Limiti (%)	22.31
Plastisite indeksi (%)	18.6

Numune 1 olarak adlandırılan kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğinin piknometre deneyi sonucu elde edilen özgül ağırlık değeri ( $G_s$ ) 2.49 olarak belirlenmiştir. Numune üzerinde gerçekleştirilen standart Proktor deneyi sonucu elde edilen kompaksiyon eğrisi grafiği Şekil 5.38’de gösterilmiştir. Standart Proktor deneyi sonucuna göre kırmızımsı- pembe artık toprak örneğinin maksimum kuru yoğunluk değeri ( $\rho$ )  $2.01 \text{ g/cm}^3$ , optimum su içeriği değeri ise % 21 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.3).



Şekil 5.38 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak zemine ait nem içeriği - maksimum kuru yoğunluk grafiği.

Çizelge 5.3 Numune 1 kırmızımsı-pembe andezitik artık toprak örneğe ait standart Proktor deneyi sonuçları.

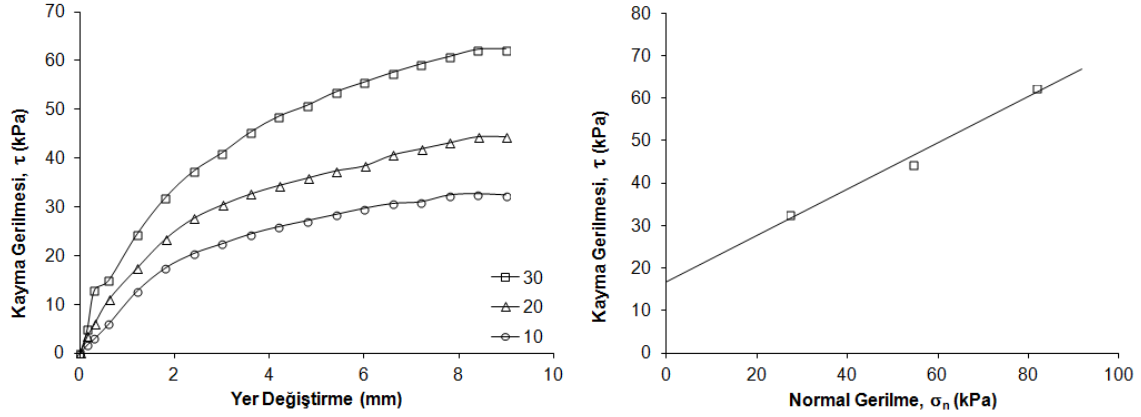
Örnek No	Su İçeriği (%)	Doğal Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	Kuru yoğunluk ( $\rho$ ) ( $\text{g/cm}^3$ )
1	10.44	2.04	1.85
2	15.58	2.26	1.96
3	21.03	2.43	2.01
4	25.66	2.33	1.85
5	30.17	2.32	1.78

Numune üzerinde kesme kutusu deneyi gerçekleştirilirken deney örnekleri sırasıyla 1.2  $\text{g/cm}^3$ , 1.4  $\text{g/cm}^3$  ve 1.6  $\text{g/cm}^3$  olmak üzere üç farklı yoğunluk değerinde ve optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 10, 20 ve 30 kg normal yükler altında drenajlı koşullarda test edilmiştir. Kesme kutusu deney sonucuna göre 1.2  $\text{g/cm}^3$  yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 15 kPa ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değeri 25°, 1.4  $\text{g/cm}^3$  yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 18 kPa ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değeri 34, 1.6  $\text{g/cm}^3$  yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 15 kPa ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değeri 35° olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4 Numune 1 kırmızımsı-pembe renkli artık toprağın kesme kutusu deney sonuçları.

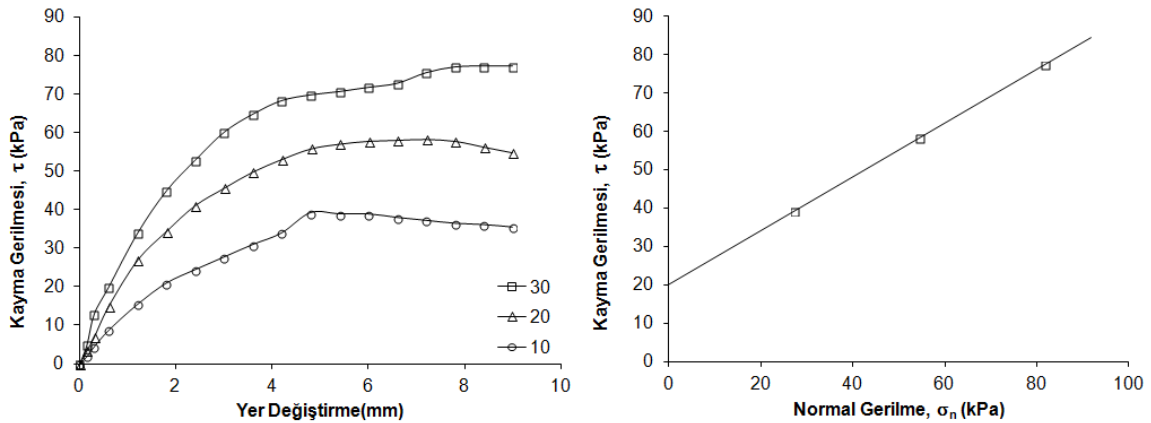
Örnek	Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	Kohezyon c (kPa)	İçsel sürtünme açısı $\phi$ (°)
Kırmızımsı - pembe	1.2	15	25
Kırmızımsı - pembe	1.4	18	34
Kırmızımsı - pembe	1.6	15	35

1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki kırmızımsı-pembe artık toprak numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$  (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) grafikleri Şekil 5.39’ da gösterilmektedir.



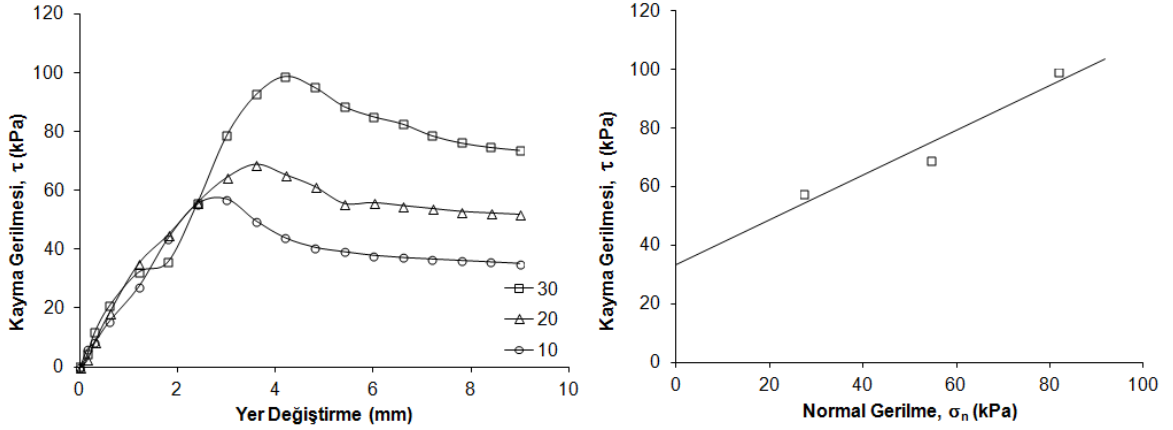
Şekil 5.39 Numune 1 kırmızımsı – pembe renkli örneğin 1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki kırmızımsı-pembe artık toprak numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$  (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) grafikleri Şekil 5.40’ da gösterilmektedir.



Şekil 5.40 Numune 1 kırmızımsı – pembe renkli örneğin 1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki kırmızımsı-pembe artık toprak numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$  (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) grafikleri Şekil 5.41’ de gösterilmektedir.

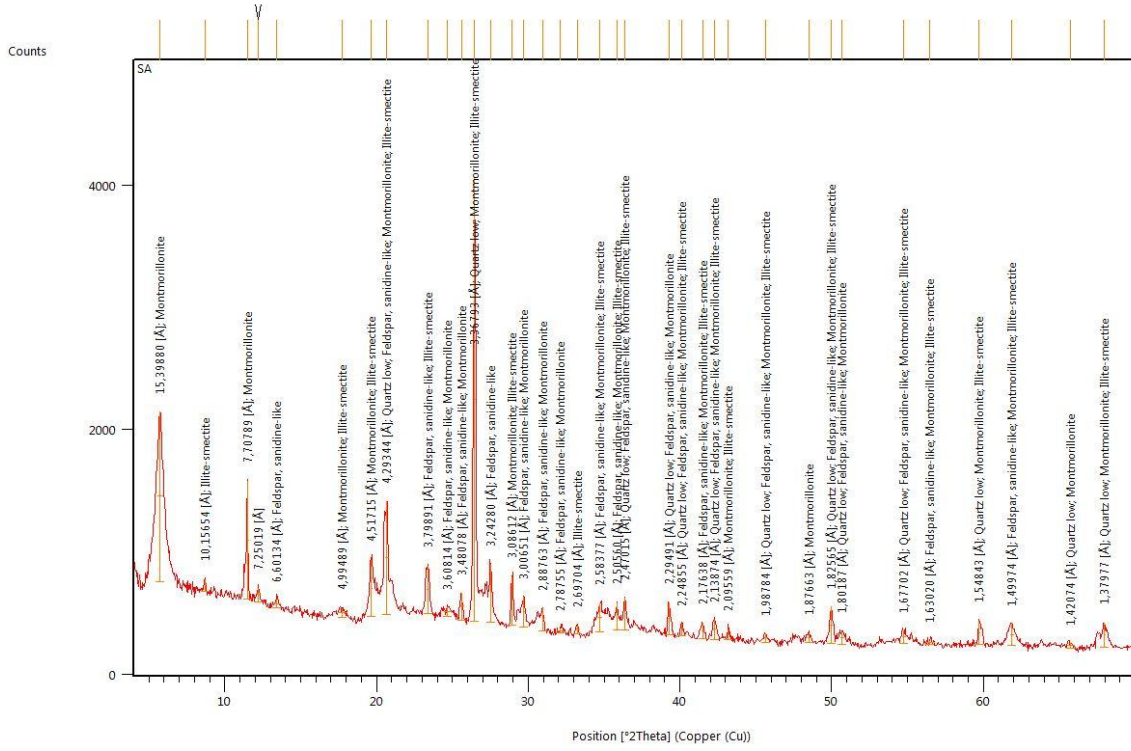


Şekil 5.41 Numune 1 kırmızımsı – pembe renkli örneğin 1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

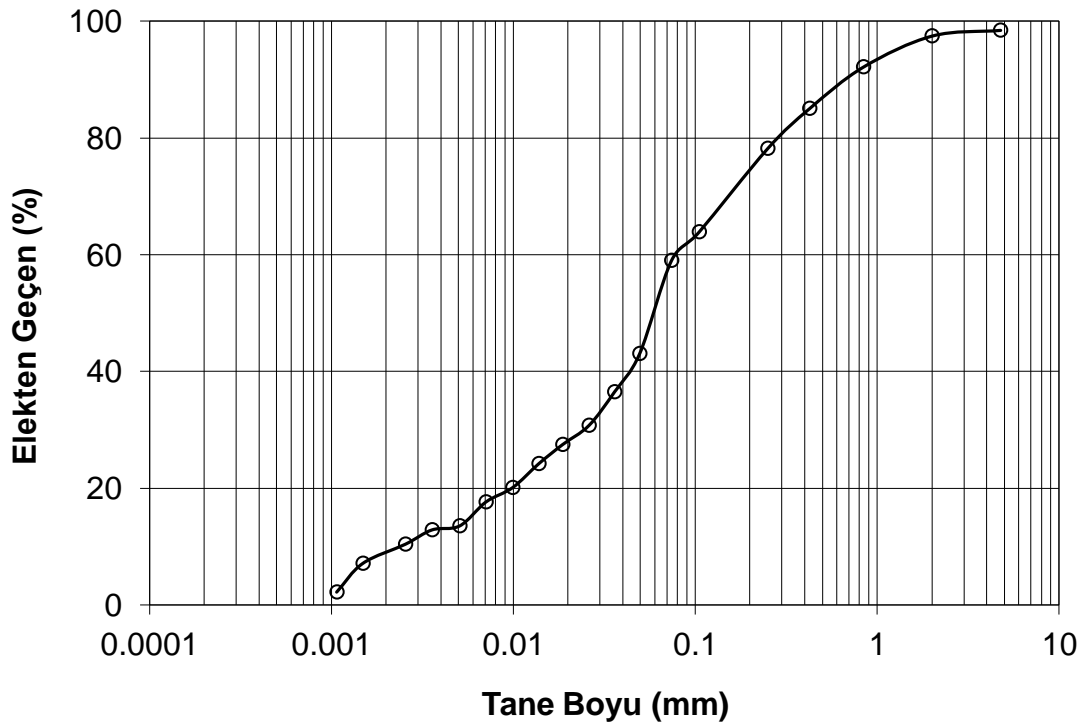
### 5.2.2. Numune 2

Numune 2 olarak adlandırılan ve laboratuvar deneyleri yapılan sarı-boz renkli artık toprak numunesi, tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan arazi çalışmaları sonucunda Ankara ili Altındağ ilçesi Solfasol Mahallesi civarında yer alan andezitik artık topraklardan temin edilmiştir. Sarı-boz renkli artık toprak numunesi üzerinde X-ışınları analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda sarı-boz renkli artık toprak montmorillonit, illit-simektit killeri ile kuvars ve feldispat minerallerinden oluştuğu sonucuna varılmıştır Şekil 5.42.

Numune 2 için gerçekleştirilen elek analizi ve hidrometre deneyleri sonuçlarında elde edilen tane boyu dağılım eğrisi Şekil 5.43’ de verilmektedir. Birleştirilmiş toprak sınıflama sistemi (USCS) ne göre sarı-boz renkli artık toprak numunesi CH (yüksek plastisiteli kil) olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 5.42 Sarı-boz renkli artık toprak numunesinin X-ışınları analizi sonuçları.



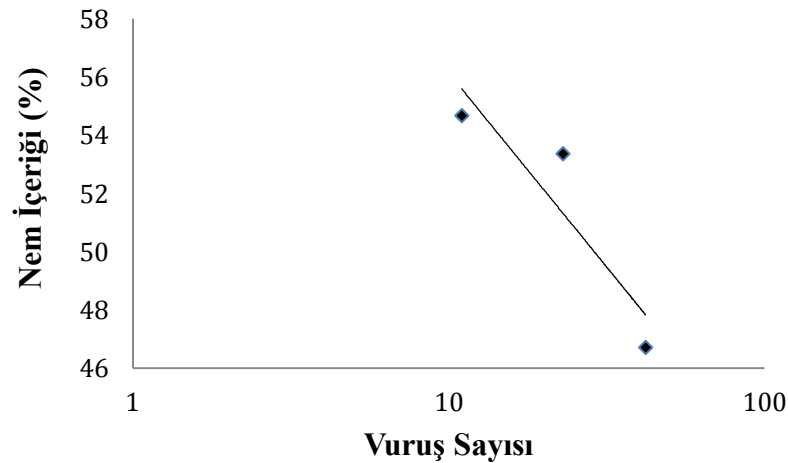
Şekil 5.43 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğinin tane boyu dağılım grafiği.

Yapılan elek analizi ve hidrometre sonucuna göre, örneğin %2,53' ünün çakıl, %7,47' sinin kum ve %81,00' inin silt ve %9,00' unun kil olduğu saptanmıştır (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.5 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğe ait elek analizi sonuçları.

<b>Örnek Adı:</b>	Sarı-boz	
<b>Top. Malz. (g):</b>	548.47	
<b>Elek No</b>	<b>Elek Çapı (mm)</b>	<b>El. Geçen (%)</b>
4	4.76	98.45
10	2	97.47
20	0.84	92.17
40	0.425	85.05
60	0.25	78.20
140	0.105	63.90
200	0.074	59.01
<b>İnce Tane Oranı = %59.01</b>		

Sarı-boz renkli artık toprak numunesi üzerinde gerçekleştirilen kıvam (Atterberg) limitleri deneyi sonucunda elde edilen vuruş sayısına karşılık nem içeriği (%) grafiği Şekil 5.44' de verilmiş, numuneye ait likit limit değeri %51.67 ve plastik limit değeri %25.48 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.6).

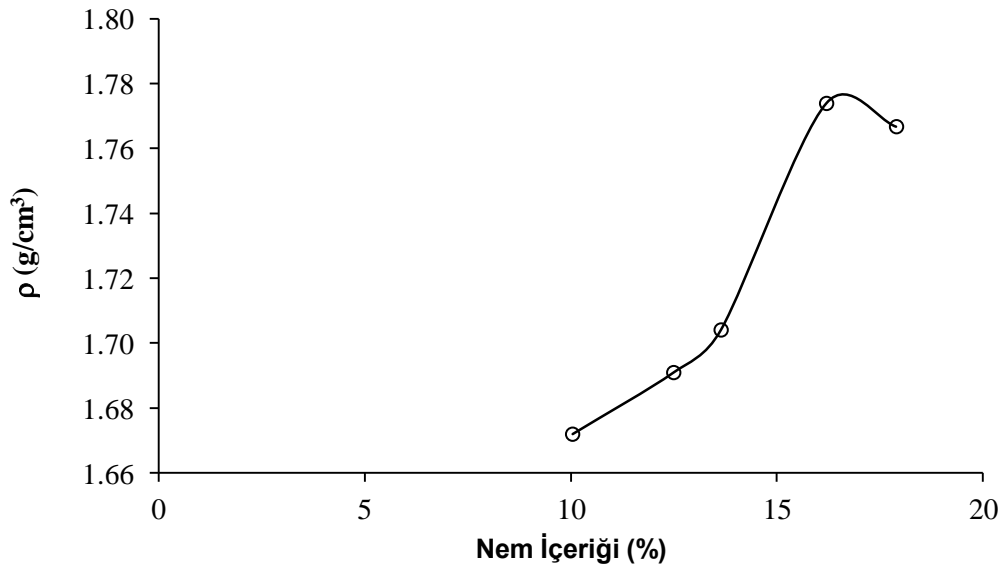


Şekil 5.44 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğinin Atterberg limit deneyleri sonucu elde edilen grafiği.

Çizelge 5.6 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak örneğe ait Atterberg limitleri deney sonuçları.

Likit Limit (%)	51.67
Plastik Limit (%)	26.19
Büzülme Limiti (%)	25.91
Plastisite indeksi (%)	25.48

Numune 2 olarak adlandırılan sarı-boz andezitik artık toprak örneğinin piknometre deneyi sonucu elde edilen özgül ağırlık değeri ( $G_s$ ) 2.46 olarak belirlenmiştir Numune üzerinde gerçekleştirilen standart Proktor deneyi sonucu elde edilen kompaksiyon eğrisi yani nem içeriği değerlerine karşılık kuru yoğunluk grafiği Şekil 5.45’de gösterilmiştir. Standart Proktor deneyi sonucuna göre sarı-boz andezitik artık toprak örneğinin maksimum kuru yoğunluk değeri ( $\rho$ )  $1.77 \text{ g/cm}^3$ , optimum su içeriği değeri ise %18 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.7).



Şekil 5.45 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak zemine ait nem içeriği- maksimum kuru yoğunluk grafiği.



Çizelge 5.7 Numune 2 sarı-boz andezitik artık toprak zemine ait standart Proktor deneyi sonuçları.

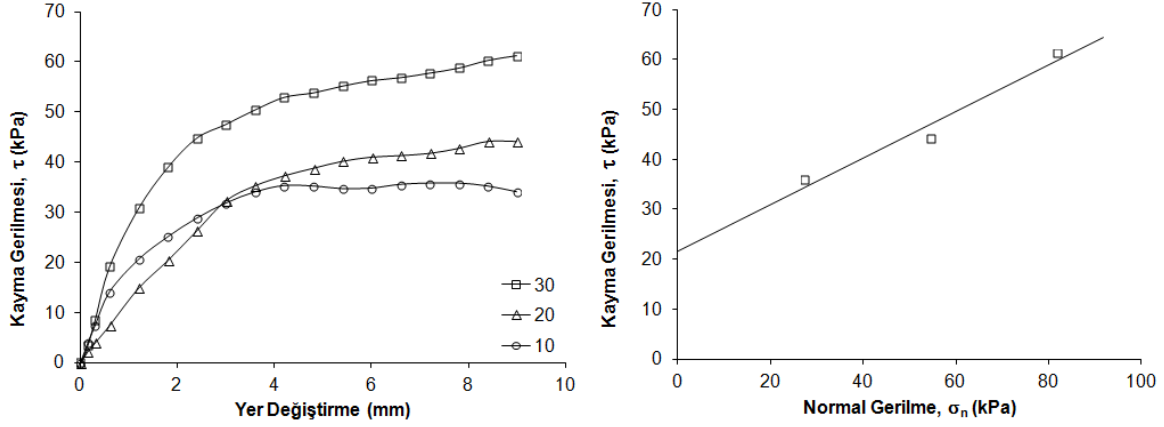
Örnek no	Su İçeriği (%)	Doğal Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Kuru yoğunluk ( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )
1	10.04	1.84	1.67
2	12.49	1.9	1.69
3	13.64	1.94	1.7
4	16.2	2.06	1.77
5	17.9	2.08	1.77

Numune üzerinde kesme kutusu deneyi gerçekleştirilirken deney örnekleri sırasıyla 1.2 g/cm<sup>3</sup>, 1.4 g/cm<sup>3</sup> ve 1.6 g/cm<sup>3</sup> olmak üzere 3 farklı yoğunluk değerinde ve optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 10 kg, 20 kg ve 30 kg normal yükler altında drenajlı koşullarda kesme deneyleri uygulanmıştır. Kesme kutusu deney sonucuna göre 1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 22 kPa ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değeri 22°, 1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 18 kPa ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değeri 38, 1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 10 kPa ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değeri 42° olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.8).

Çizelge 5.8 Numune 2 sarı boz renkli artık zeminin kesme kutusu deney sonuçları.

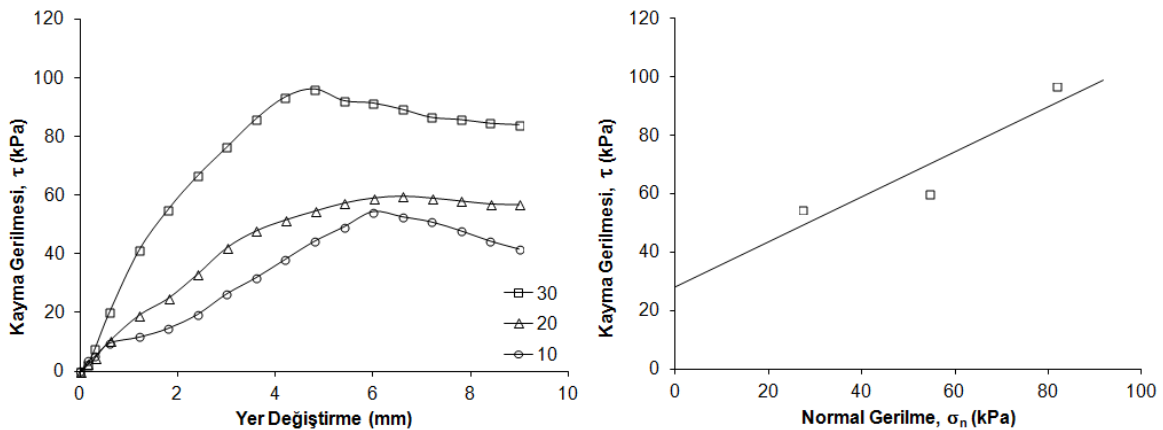
Örnek	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Kohezyon c (kPa)	İçsel sürtünme açısı $\phi$ (°)
Sarı boz	1.2	22	22
Sarı boz	1.4	18	38
Sarı boz	1.6	10	42

1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki sarı boz renkli artık toprak numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$ (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) grafikleri Şekil 5.46' da gösterilmektedir.



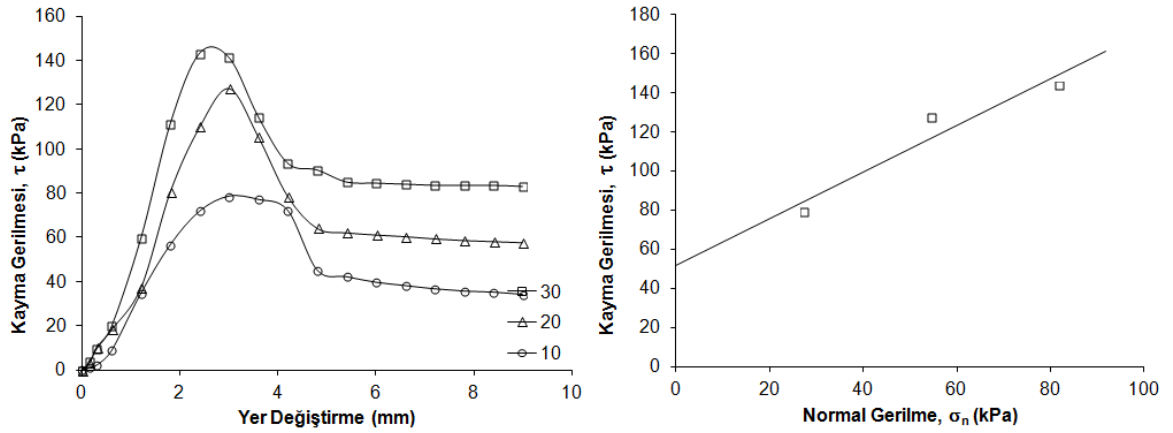
Şekil 5.46 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin 1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki numunenin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$ (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) grafikleri Şekil 5.47' de gösterilmektedir.



Şekil 5.47 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin 1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

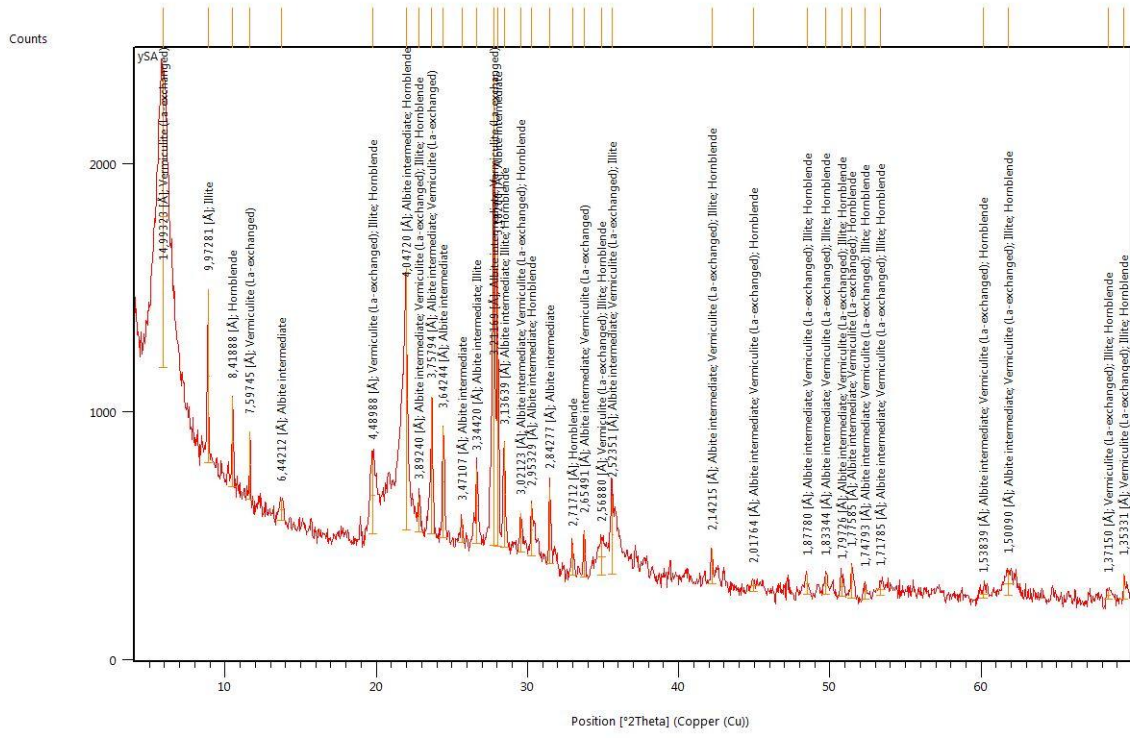
1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki zemin numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$ (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) grafikleri Şekil 5.48' de gösterilmektedir



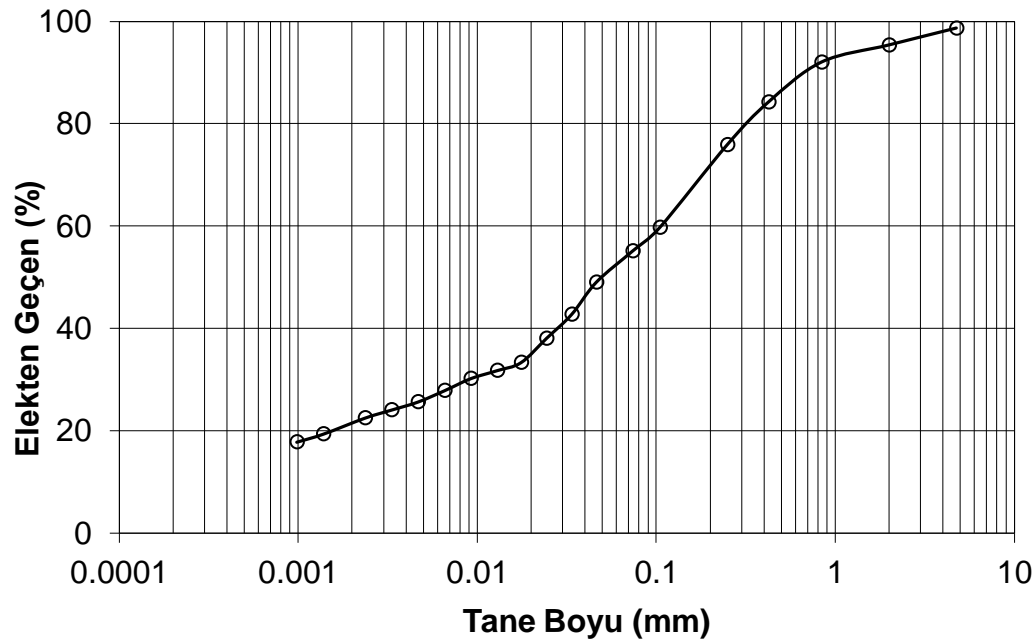
Şekil 5.48 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin 1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

### 5.2.3. Numune 3

Numune 3 olarak adlandırılan ve laboratuvar deneyleri yapılan grimsi-yeşil renkli artık toprak numunesi, tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan arazi çalışmaları sonucunda Ankara ili Altındağ ilçesi Solfasol Mahallesi civarında yer alan andezitik artık topraklardan temin edilmiştir. Grimsi-yeşil renkli artık toprak numunesi üzerinde X-ışınları analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda grimsi-yeşil renkli artık toprak zeminin illit killeri ile albit feldispat minerallerinden oluştuğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.49). Gerçekleştirilmiş olan elek analizi ve hidrometre deney sonuçlarında elde edilen tane boyu dağılım eğrisi Şekil 50' de verilmektedir. Birleştirilmiş toprak sınıflama sistemi (USCS) ne göre grimsi-yeşil renkli artık toprak numunesi CH (yüksek plastisiteli kil) olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 5.49 Grimsi-yeşil renkli artık toprak numunesin X-ışınları analizi sonuçları.



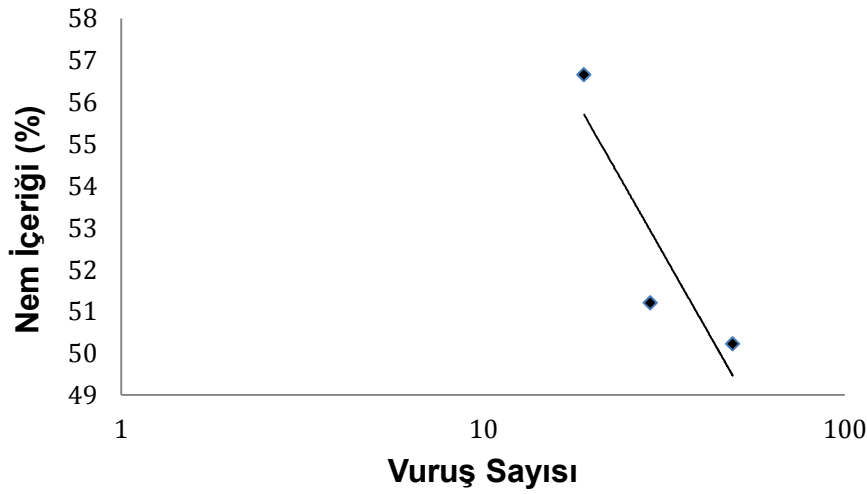
Şekil 5.50 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğinin tane boyu dağılım grafiği.

Yapılan elek analizi ve hidrometre sonucuna göre, örneğin %4,66' sının çakıl, % 7,34' ünün kum ve %67,00' sinin silt ve %21' inin kil olduğu saptanmıştır (Çizelge 5.9)

Çizelge 5.9 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğine ait elek analizi sonuçları.

<b>Örnek Adı:</b>	Grimsi-yeşil	
<b>Top. Malz. (g):</b>	545.15	
<b>Elek No</b>	<b>Elek Çapı (mm)</b>	<b>El. Geçen (%)</b>
4	4.76	98.64
10	2	95.34
20	0.84	91.99
40	0.425	84.20
60	0.25	75.86
140	0.105	59.70
200	0.074	55.10
<b>İnce Tane Oranı = %55.10</b>		

Grimsi-yeşil renkli artık toprak numunesi üzerinde gerçekleştirilen kıvam (Atterberg) limitleri deneyi sonucunda elde edilen vuruş sayısına karşılık nem içeriği (%) grafiği Şekil 5.51' de verilmiş, numuneye ait likit limit değeri %54.09 ve plastik limit değeri %24.68 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.10).

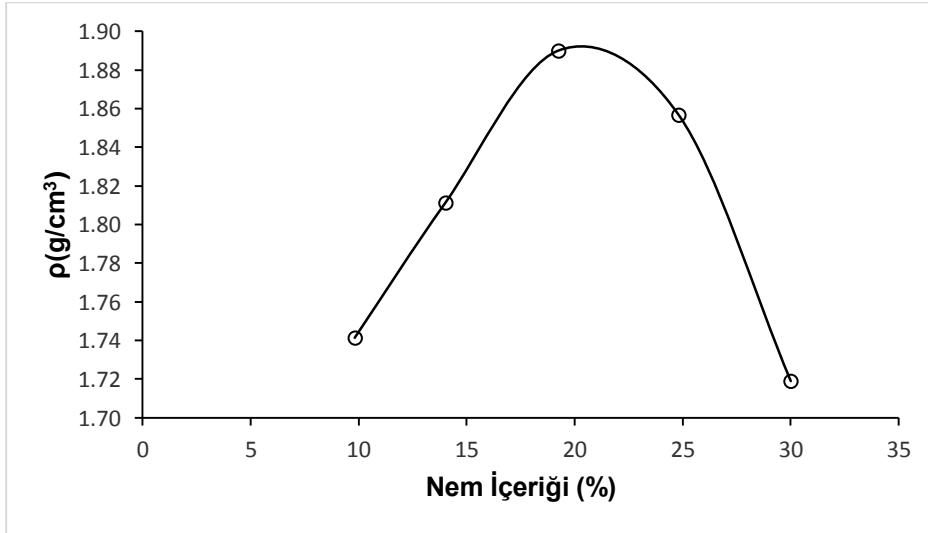


Şekil 5.51 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğinin Atterberg limit deneyleri sonucu elde edilen grafiği.

Çizelge 5.10 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğine ait Atterberg limitleri deney sonuçları.

Likit Limit (%)	54.09
Plastik Limit (%)	24.68
Büzülme Limiti (%)	23.82
Plastisite indeksi (%)	29.41

Numune 3 olarak adlandırılan grimsi-yeşil andezitik artık toprak örneğinin piknometre deneyi sonucu elde edilen özgül ağırlık değeri ( $G_s$ ) 2.55 olarak belirlenmiştir. Numune üzerinde gerçekleştirilen standart Proktor deneyi sonucu elde edilen kompaksiyon eğrisi yani nem içeriği değerlerine karşılık kuru yoğunluk grafiği Şekil 5.52’de gösterilmiştir. Standart Proktor deneyi sonucuna göre grimsi-yeşil artık toprak örneğinin maksimum kuru yoğunluk değeri ( $\rho$ )  $1.86 \text{ g/cm}^3$ , optimum su içeriği değeri ise %25 olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.11).



Şekil 5.52 Numune 3 grimsi-yeşil andezitik artık toprak zemine ait nem içeriği-maksimum kuru yoğunluk grafiği.

Çizelge 5.11 Numune 3 grimsi–yeşil andezitik artık toprak zemine ait standart Proktor deneyi sonuçları.

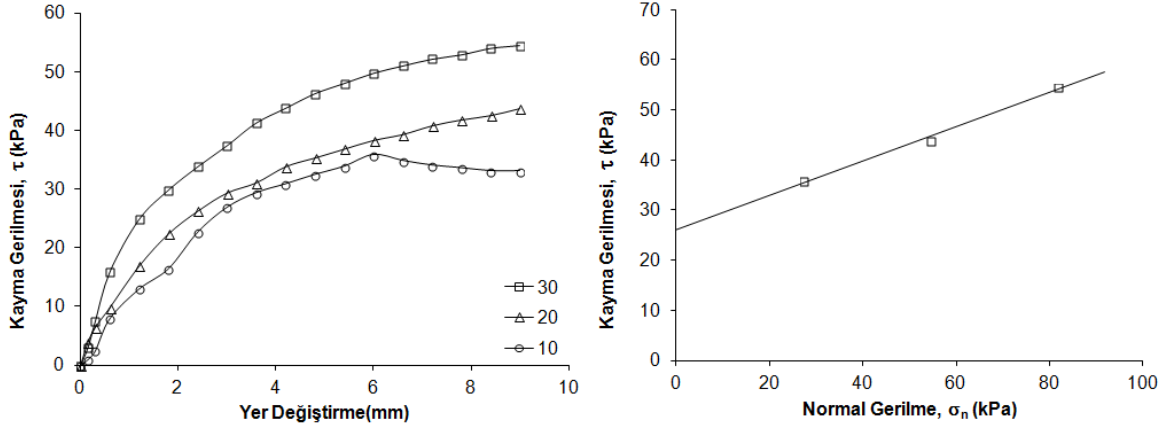
Örnek No	Su İçeriği (%)	Doğal Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Kuru yoğunluk (ρ) (g/cm <sup>3</sup> )
1	9.82	1.91	1.74
2	14.02	2.07	1.81
3	19.24	2.25	1.89
4	24.81	2.32	1.86
5	29.99	2.23	1.72

Numune üzerinde kesme kutusu deneyi gerçekleştirilirken deney örnekleri sırasıyla 1.2 g/cm<sup>3</sup>, 1.4 g/cm<sup>3</sup> ve 1.6 g/cm<sup>3</sup> olmak üzere 3 farklı yoğunluk değerinde ve optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 10 kg, 20 kg ve 30 kg normal kuvvetleri ile drenajlı koşullarda kesilmiştir. Kesme kutusu deney sonucuna göre 1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin artık kohezyon (c) değeri 24 kPa ve artık içsel sürtünme açısı (φ) değeri 17°, 1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 9 kPa ve içsel sürtünme açısı (φ) değeri 33, 1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve optimum su içeriğinde hazırlanan artık toprak numunesinin kohezyon (c) değeri 12 kPa ve içsel sürtünme açısı (φ) değeri 34° olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.12).

Çizelge 5.12 Numune 3 grimsi yeşil renkli artık zeminin kesme kutusu deney sonuçları.

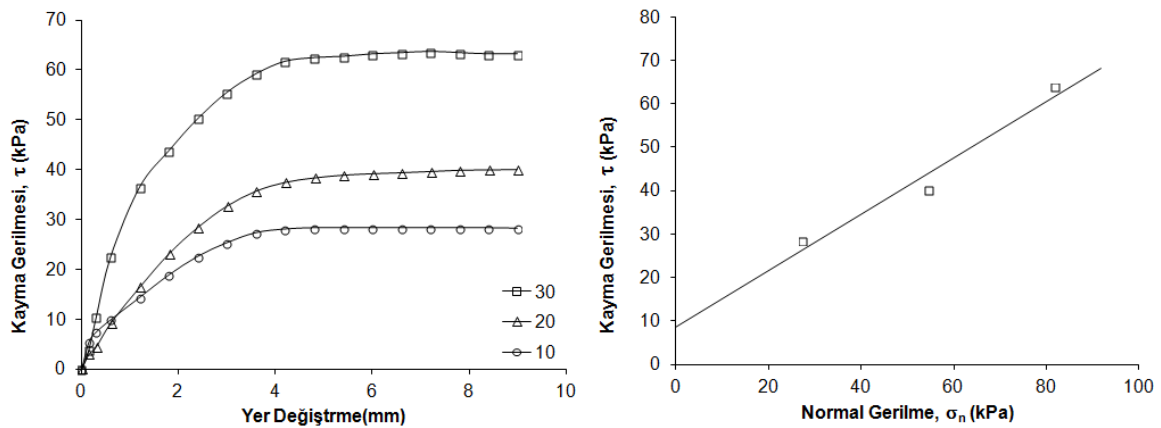
Örnek	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Kohezyon c (kPa)	İçsel sürtünme açısı φ (°)
Grimsi-yeşil	1.2	24	17
Grimsi-yeşil	1.4	9	33
Grimsi-yeşil	1.6	12	34

1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki grimsi yeşil renkli artık toprak numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme(mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$ (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$ (kPa) grafikleri Şekil 5.53’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.53 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin 1.2 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

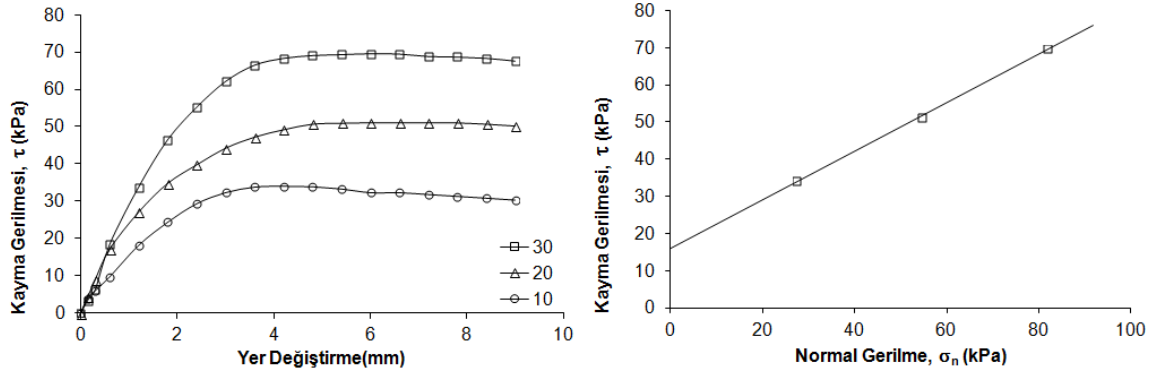
1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki grimsi yeşil renkli artık toprak numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$  (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) grafikleri Şekil 5.54’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.54 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin 1.4 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.



1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluktaki grimsi yeşil renkli artık toprak numunesinin kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen yerdeğiştirme (mm) ye karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) ve normal gerilmeye  $\sigma_n$  (kPa) karşılık kayma gerilmesi  $\tau$  (kPa) grafikleri Şekil 5.55’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.55 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin 1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta kesme kutusu deneyi sonuçları.

### 5.3. Filtre Kağıdı Deney Sonuçları

#### 5.3.1. Numune 1 Filtre kağıdı deney sonuçları

Deneyisel çalışmaların ilk aşamasında artık toprakların mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, kıvam limitleri analizi, standart Proktor ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda zeminlerin doymun olmayan zemin mekaniği kavramlarından olan toplam emme basıncı ve matrik emme basıncı değerlerini belirlemek amacıyla ikinci aşamaya geçilmiştir. İkinci aşamada ilk olarak artık toprak numunelerinin toplam ve matrik emme basıncı değerlerinin hesaplanması için filtre kağıdı tekniği kullanılmıştır. Bu tekniğin kullanılmasındaki amaç diğer doymun olmayan zemin mekaniğinde emme basıncını belirlemek için kullanılan ölçüm tekniklerinden daha düşük maliyette olmasıdır.

Standart Proktor deneyi sonucunda elde edilen maksimum yoğunluk ve optimum su içeriği verileri göz önünde bulundurularak Numune 1, kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numuneleri sırasıyla kuru yoğunluk değerleri 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 g/cm<sup>3</sup> ve su içeriği değerleri de sırasıyla %10, %15, %20, %25 olarak belirlenmiş ve numuneler bu değerler doğrultusunda filtre kağıdı deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Önceki

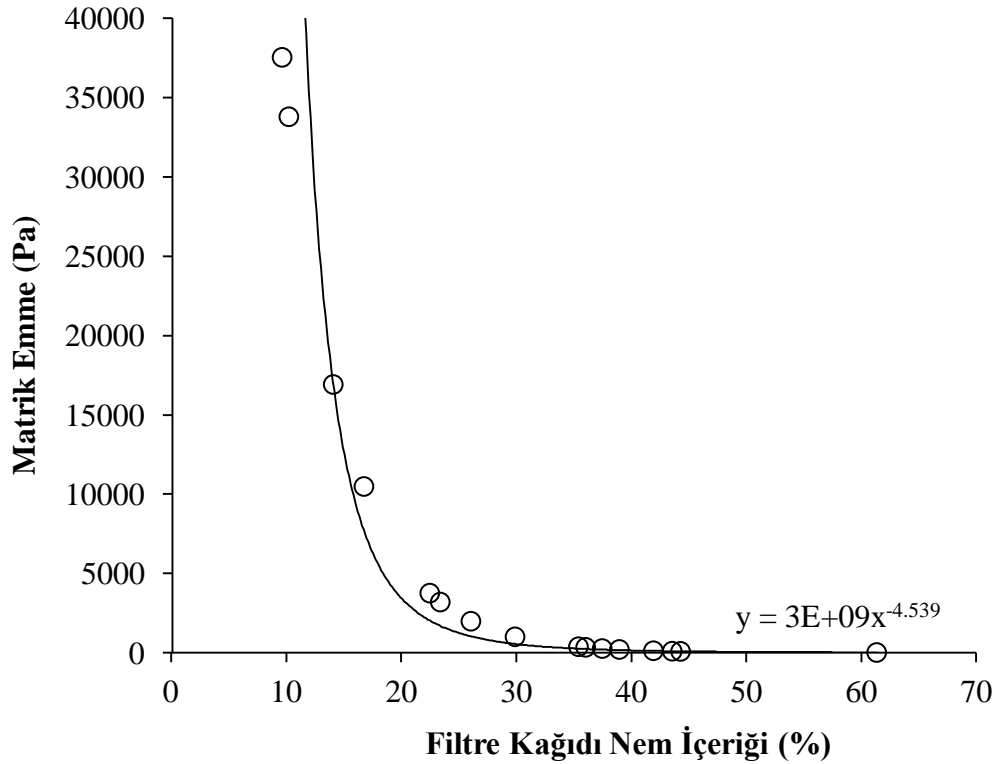
bölümlerde filtre kağıdı deney aşamalarına ayrıntılı olarak değinilmiştir. Filtre kağıdı deney aşamaları sırasıyla takip edilerek deneyler sonucunda kırmızımsı-pembe zemine ait matrik emme ve toplam emme değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.13’ de matrik emme ve toplam emme değerleri tablo halinde sunulmaktadır. Elde edilen veriler ve sonuçlar EK 1 de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 5.13 Numune 1 kırmızımsı – pembe renkli örneğin filtre kağıdı deney sonuçları.

<b>Deney No</b>	<b>Kuru Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Su İçeriği, w (%)</b>	<b>Filtre Kağıdı Nem İçeriği, (%)</b>	<b>Toplam Emme Log kPa</b>	<b>Matrik Emme Log kPa</b>
1	1.2	10	13.66	4.21	4.26
2	1.2	15	26.08	3.54	3.30
3	1.2	20	36.06	3.16	2.52
4	1.2	25	44.31	2.79	1.87
1	1.3	10	9.66	4.35	4.57
2	1.3	15	23.42	3.24	3.50
3	1.3	20	35.44	2.48	2.57
4	1.3	25	43.59	1.91	1.93
1	1.5	10	14.11	4.26	4.23
2	1.5	15	16.78	3.86	4.02
3	1.5	20	29.92	2.69	3.00
4	1.5	25	37.50	2.74	2.41
1	1.7	10	10.25	4.52	4.53
2	1.7	15	22.51	3.65	3.57
3	1.7	20	61.37	3.02	3.00
4	1.7	25	41.95	3.03	2.06

### 5.3.2. Numune 1 Filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen SWCC

Filtre kağıdı deneyi sonucunda elde edilen tüm veriler doğrultusunda Şekil 5.56'da kırmızımsı- pembe artık toprak numunesinin filtre kağıdı nem içeriğine (%) karşılık matrik emme basınç (Pa) grafiği yani zemin su karakteristik eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 5.56 Filtre kağıdı deneyi sonucu numune 1 kırmızımsı-pembe renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

### 5.3.3. Numune 2 Filtre kağıdı deney sonuçları

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında sarı-boz artık toprakların mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, kıvam limitleri analizi, standart Proktor ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda zeminlerin doygun olmayan zemin mekaniği kavramlarından olan toplam emme basıncı ve matrik emme basıncı değerlerini belirlemek amacıyla ikinci aşamaya geçilmiştir. İkinci şamada ilk olarak artık toprak numunelerinin toplam ve matrik emme basıncı değerlerinin hesaplanması için filtre kağıdı tekniği kullanılmıştır.

Standart Proktor deneyi sonucunda elde edilen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği verileri göz önünde bulundurularak Numune 1, kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numuneleri sırasıyla kuru yoğunluk değerleri 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 g/cm<sup>3</sup> ve su içeriği değerleri de sırasıyla %5, %10, %15, %20 olarak belirlenmiş ve numuneler bu değerler doğrultusunda filtre kağıdı deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Önceki bölümlerde filtre kağıdı deney aşamalarına ayrıntılı olarak değinilmiştir. Filtre kağıdı deney aşamaları sırasıyla takip edilerek deneyler sonucunda sarı-boz zemine ait matrik emme ve toplam emme değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.14' de matrik emme ve toplam emme değerleri tablo halinde sunulmaktadır. Elde edilen veriler ve sonuçlar EK 2 de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

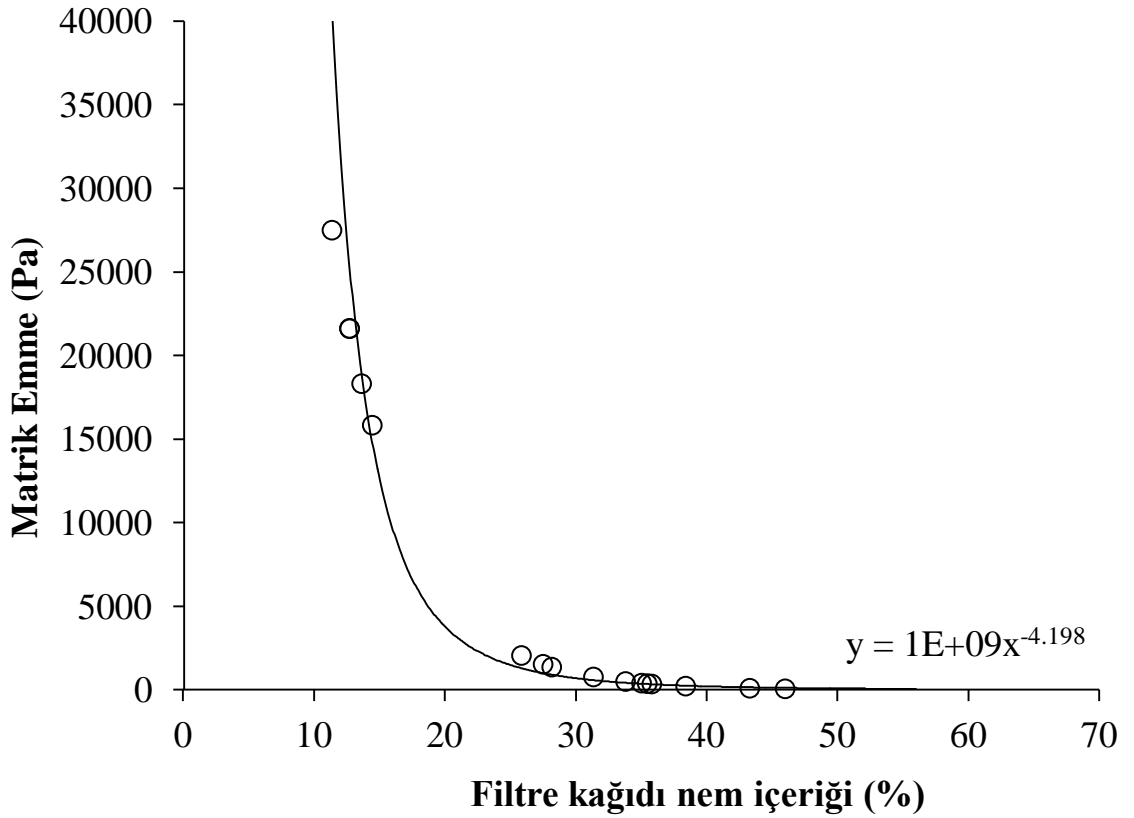
Çizelge 5.14 Numune 2 sarı-boz renkli örneğin filtre kağıdı deney sonuçları.

Deney No	Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Su İçeriği, w (%)	Filtre Kağıdı Nem İçeriği, (%)	Toplam Emme Log kPa	Matrik Emme Log kPa
1	1.2	5	14.48	4.16	4.20
2	1.2	10	13.67	4.21	4.26
3	1.2	15	27.53	3.28	3.18
4	1.2	20	35.84	3.27	2.54
1	1.3	5	12.74	4.30	4.33
2	1.3	10	31.37	3.44	2.88
3	1.3	15	35.05	3.22	2.60
4	1.3	20	46.02	3.17	1.74
1	1.5	5	11.40	4.40	4.44
2	1.5	10	28.19	3.14	3.13
3	1.5	15	35.49	2.88	2.56
4	1.5	20	43.32	2.63	1.95
1	1.7	5	12.74	4.37	4.33
2	1.7	10	25.88	3.26	3.31

3	1.7	15	33.83	3.06	2.69
4	1.7	20	38.42	2.70	2.33

### 5.3.4. Numune 2 Filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen SWCC

Filtre kağıdı deneyi sonucunda elde edilen tüm veriler doğrultusunda Şekil 5.57’de sarı-boz renkli artık toprak numunesinin filtre kağıdı nem içeriğine (%) karşılık matrik emme basınç (Pa) grafiği yani zemin su karakteristik eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 5.57 Filtre kağıdı deneyi sonucu numune 2 sarı-boz renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

### 5.3.5. Numune 3 Filtre kağıdı deney sonuçları

DeneySEL çalışmaların ilk aşamasında grimsi-yeşil renkli artık toprakların mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, kıvam limitleri analizi, standart Proktor ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda

zeminlerin doygun olmayan zemin mekaniği kavramlarından olan toplam emme basıncı ve matrik emme basıncı değerlerini belirlemek amacıyla ikinci aşamaya geçilmiştir. İkinci şamada ilk olarak artık toprak numunelerinin toplam ve matrik emme basıncı değerlerinin hesaplanması için filtre kağıdı tekniği kullanılmıştır. Standart Proktor deneyi sonucunda elde edilen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği verileri göz önünde bulundurularak Numune 3 grimsi-yeşil renkli artık toprak numuneleri sırasıyla kuru yoğunluk değerleri 1.2, 1.3, 1.5, 1.7 g/cm<sup>3</sup> ve su içeriği değerleri de sırasıyla %10, %15, %20, %25 olarak belirlenmiş ve numuneler bu değerler doğrultusunda filtre kağıdı deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Önceki bölümlerde filtre kağıdı deney aşamalarına ayrıntılı olarak değinilmiştir. Filtre kağıdı deney aşamaları sırasıyla takip edilerek deneyler sonucunda grimsi-yeşil zemine ait matrik emme ve toplam emme değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.15’ de matrik emme ve toplam emme değerleri tablo halinde sunulmaktadır. Elde edilen veriler ve sonuçlar EK 3 de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

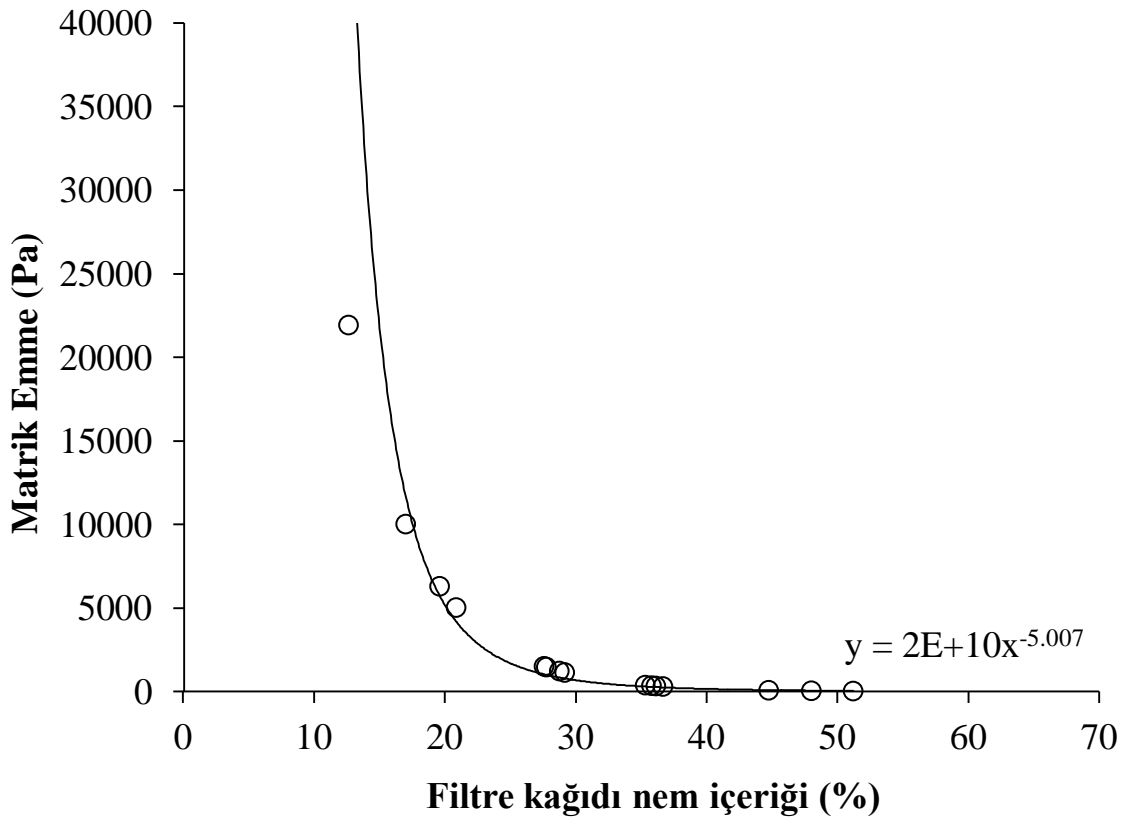
Çizelge 5.15 Numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğin filtre kağıdı deneyi sonuçları.

<b>Deney No</b>	<b>Kuru Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Su İçeriği, w (%)</b>	<b>Filtre Kağıdı Nem İçeriği, (%)</b>	<b>Toplam Emme Log kPa</b>	<b>Matrik Emme Log kPa</b>
1	1.2	10	17.03	4.14	4.00
2	1.2	15	27.78	3.38	3.16
3	1.2	20	36.14	3.02	2.51
4	1.2	25	44.76	2.96	1.84
1	1.3	10	12.66	4.35	4.34
2	1.3	15	28.76	3.26	3.09
3	1.3	20	36.68	3.36	2.47
4	1.3	25	51.22	3.17	1.34
1	1.5	10	20.88	3.59	3.70
2	1.5	15	29.18	3.39	3.05
3	1.5	20	35.33	3.22	2.57

4	1.5	25	48.02	2.56	1.59
1	1.7	10	19.62	3.84	3.80
2	1.7	15	27.60	3.15	3.18
3	1.7	20	35.81	2.96	2.54
4	1.7	25	50.03	2.46	1.55

### 5.3.6. Numune 3 Filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen SWCC

Filtre kağıdı deneyi sonucunda elde edilen tüm veriler doğrultusunda Şekil 5.58'de grimsi–yeşil renkli artık toprak numunesinin filtre kağıdı nem içeriğine (%) karşılık matrik emme basınç (Pa) grafiği yani zemin su karakteristik eğrisi gösterilmektedir



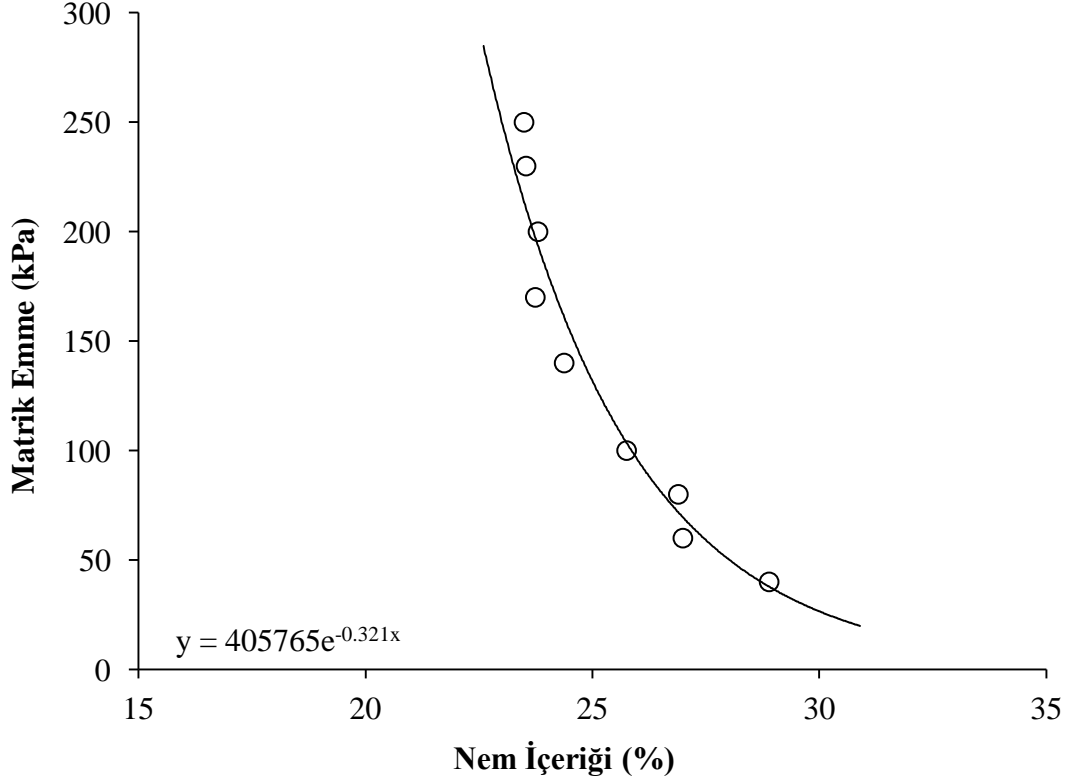
Şekil 5.58 Numune 3 grimsi–yeşil renkli örneğin filtre kağıdı deneyi sonucu elde edilen zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

## 5.4. Basınç Plakası Deneyi Sonucu Elde Edilen SWCC

### 5.4.1. Numune 1

Filtre kağıdı deneyinde elde edilen sonuçların doğruluğunu test etmek ve artık toprakların zemin su karakteristik eğrilerini belirleyebilmek için doygun olmayan zeminlerde matrik emme basıncı-doygunluk derecesi ve matrik emme basıncı-nem içeriği ilişkisini gözlemlemeye yarayan tasarımını gerçekleştirdiğimiz basınç plakası deney düzeneği ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda farklı kuru yoğunluk değerlerinde artık toprak numuneleri hazırlanmıştır. Standart Proktor deneyi sonucunda elde edilen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği sonuçları göz önünde bulundurularak Numune 1, kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numuneleri basınç plakasındaki seramik disk üzerine yerleştirilecek olan 5 cm çap ve 2 cm yüksekliğe sahip O ring boyutları da hesaba katılarak kuru yoğunluk değerleri sırasıyla 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 g/cm<sup>3</sup> ve optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Daha sonra seramik disk üzerine yerleştirilen numuneler üzerine seramik diskin maksimum dayanabileceği 300 kPa basınç sınırı aşılmayacak şekilde her bir yoğunluk için sırasıyla 40, 60, 80, 100, 140, 170, 200, 230, 250 kPa değerinde matrik emme basıncı uygulanmıştır. Deney yapım aşamalarına daha önceki bölümlerde ayrıntılı olarak değinilmiştir. Bu aşamalar takip edilerek basınç plakası deneyleri tamamlanmıştır. Deneyler sonucunda zeminlerin nem içeriği değerleri hesaplanmıştır. Tüm basınç kademelerinde elde edilen veriler sonucunda Şekil 5.59' da gösterilen nem içeriği (%) değerlerine karşılık matrik emme basıncı (kPa) grafiği çizilmiştir.

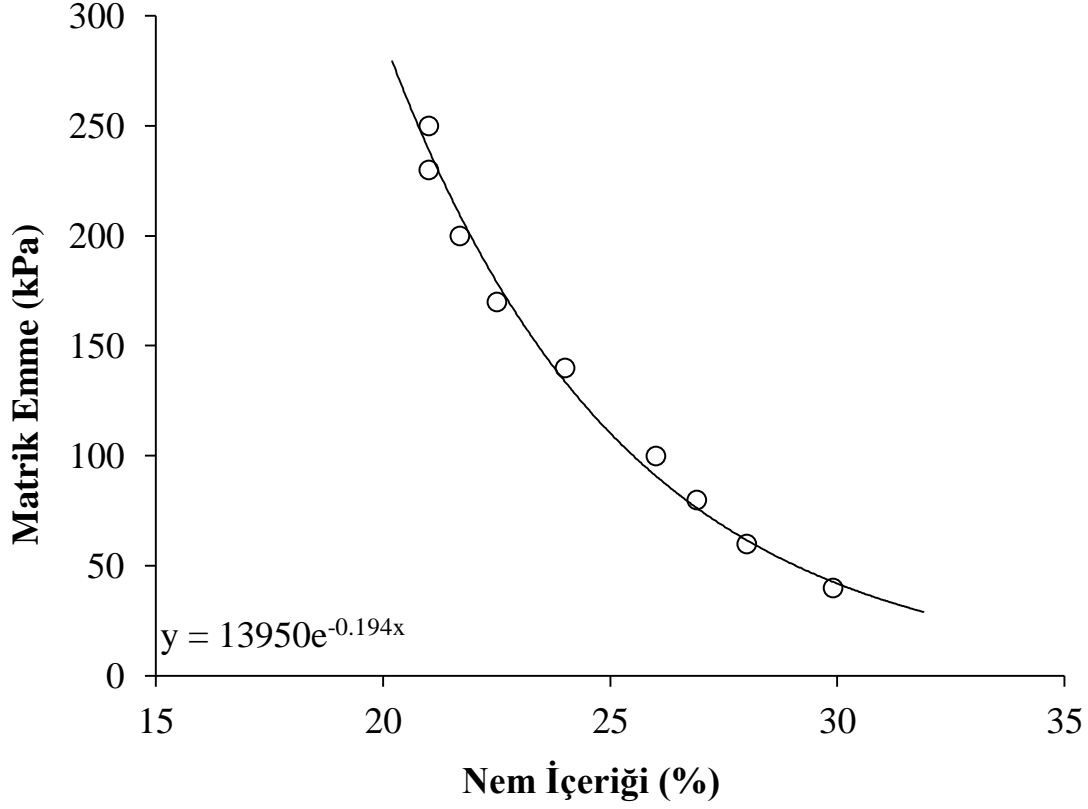




Şekil 5.59 Basınç plakası deneyi sonucunda numune 1 kırmızımsı-pembe renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

#### 5.4.2. Numune 2

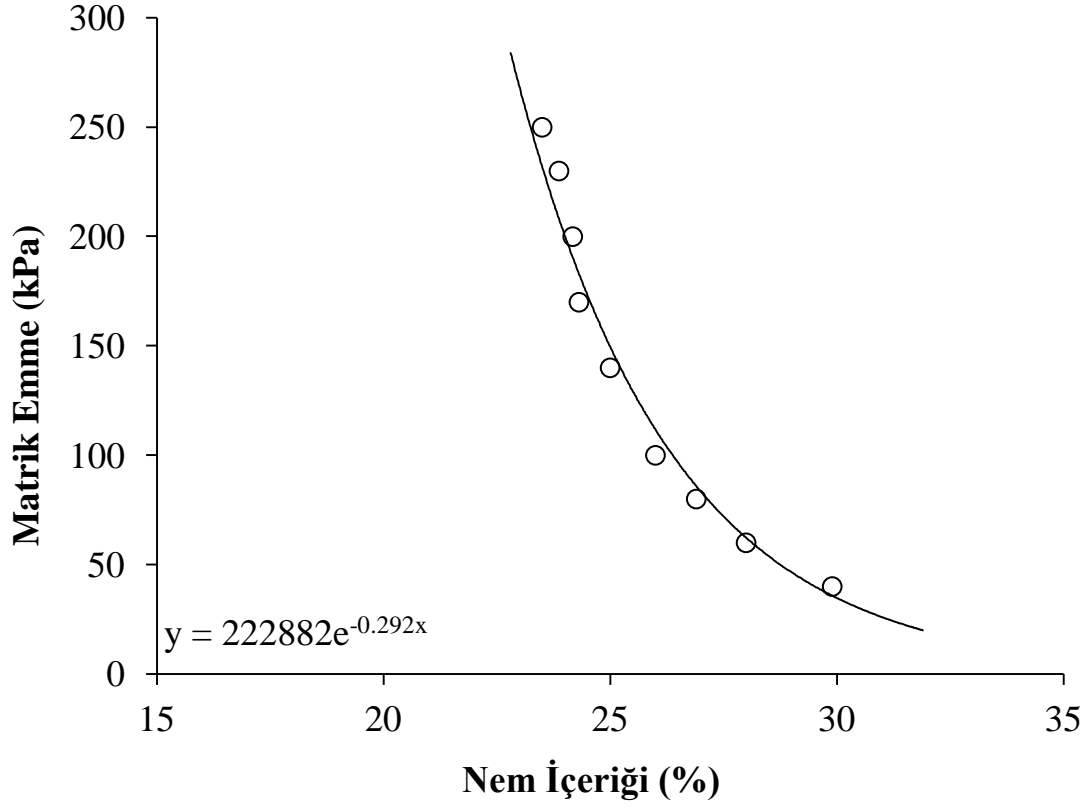
Numune 2 örnekleri de 5 cm çapında ve 2 cm yükseklikte olacak şekilde 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerlerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler seramik disk üzerine yerleştirilmiştir ve numuneler üzerine, seramik diskin maksimum dayanabileceği 300 kPa basınç sınırı aşılmayacak şekilde, her bir örnek için sırasıyla 40, 60, 80, 100, 140, 170, 200, 230, 250 kPa değerinde matrik emme basınçları uygulanmıştır. Deneyler sonucunda zeminlerin nem içeriği değerleri hesaplanmıştır. Tüm basınç kademelerinde elde edilen veriler sonucunda Şekil 5.60' da gösterilen nem içeriği (%) değerlerine karşılık matrik emme basıncı (kPa) grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.60 Basınç plakası deneyi sonucu numune 2 sarı–boz renkli örneğe ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

### 5.4.3. Numune 3

Basınç plakası deneyleri için grimsi-yeşil renkli artık toprak numuneleri ( numune 3) de aynı diğer örneklerde olduğu gibi 5 cm çap ve 2 cm yükseklikte ve 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerlerinde hazırlanmıştır. Yine diğer örneklerde olduğu gibi aynı matrik emme basıncı (40, 60, 80, 100, 140, 170, 200, 230, 250 kPa) değerleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda zeminlerin nem içeriği değerleri hesaplanmıştır. Tüm basınç kademelerinde elde edilen veriler sonucunda Şekil 5.61’ de gösterilen nem içeriği (%) değerlerine karşılık matrik emme basıncı (kPa) grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 5.61 Basınç plakası deneyi sonucu numune 3 grimsi-yeşil renkli örneğine at zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

## 6. DEĞERLENDİRMELER

Doygun olmayan zeminlerde matrik emme kavramının doğru olarak tespiti ve incelenmesi, emme basıncından dolayı meydana gelebilecek hasarların önlenmesi açısından önemlidir. Zeminlerin emme basınç değişimleri kayma dayanımını, hacimsel deformasyon ve şev duraysızlığını önemli ölçüde etkilemektedir. Doygun olmayan zemin mekaniği kavramlarından olan zemin su karakteristik eğrilerinin belirlenmesi de suya doymun olmayan zeminlerin davranışı hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Bu sebeple tez çalışması kapsamında artık toprak numuneleri üzerinde doğrudan ölçüm yöntemi olan basınç plakası deneyi ve dolaylı ölçüm yöntemlerinden olan filtre kağıdı deney düzeneği kullanılarak zeminlerin zemin su karakteristik eğrilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma Ankara ili Solfasol Mahallesi'den üç farklı lokasyondan alınan farklı renk ve farklı tane boyutundaki artık toprak numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Arazi çalışmaları sonucu alınan artık toprak örnekleri üzerinde Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Zemin Mekaniği laboratuvarlarında mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler; elek analizi, Atterberg limitleri analizi, hidrometre deneyi, piknometre analizi, kesme kutusu ve standart Proktor deneyleridir. Tez çalışmasının amacı doğrultusunda mühendislik özellikleri belirlenen numuneler üzerinde filtre kağıdı ve tasarlanan basınç tenceresi ile basınç plakası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Filtre kağıdı deneyinde kullanılan numuneler farklı kuru yoğunluk ve su içeriği değerlerinde hazırlanmıştır. Üç artık toprak zemin numuneleri içinde filtre kağıdı deneyleri gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları EK 1, EK 2 ve EK 3 de tablolar halinde verilmektedir.

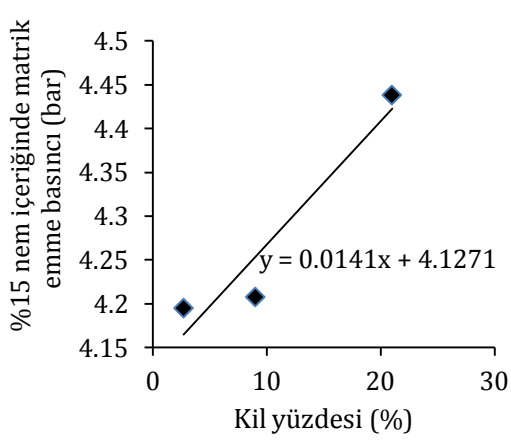
Basınç plakası deneylerinde kullanılan numuneler ise kalıp hacmi göz önünde bulundurularak standart Proktor deneyleri ile belirlenen maksimum kuru yoğunluk değerleri aşılmamak şartıyla farklı yoğunluk değerlerinde ve optimum su içeriği değerlerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler basınç plakası içerisinde doyurularak daha önceki aşamalarda anlatıldığı gibi tüm deneyler tamamlanmıştır. Deneyler

sonucunda doymun olmayan zemin mekaniğinin önemli kavramlarından olan matrik emme basıncı, toplam emme basıncı değerleri belirlenmiş, artık topraklara ait zemin su karakteristik eğrileri (SWCC) çizilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanacak olursa;

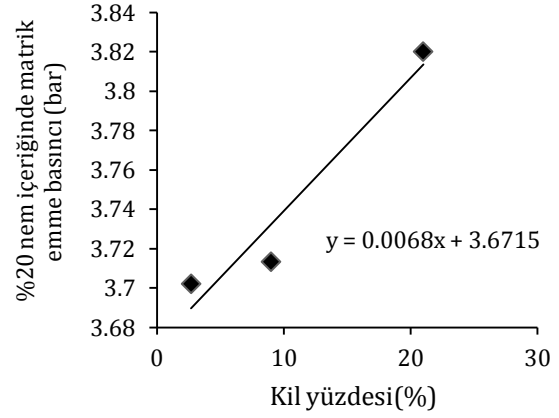
- Birleşik zemin sınıflamasına göre Numune 1 kırmızımsı-pembe renkli artık toprak numunesi SM (siltli kum), Numune 2 sarı-boz renkli artık toprak numunesi CH (yüksek plastisiteli kil) ve Numune 3 grimsi-yeşil renkli artık toprak numunesi CH (yüksek plastisiteli kil) olarak sınıflandırılmıştır.
- Filtre kağıdı deneylerinde artık toprakların başlangıç kuru yoğunluk değerleri ile başlangıç su içeriği değerlerinin emme basıncı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde aynı kuru yoğunluk değerinde hazırlanan numunelerin su içeriği değerleri artarken matrik ve toplam emme basınç değerleri azalmaktadır. Numunelerin su içeriği değerleri azaldığında matrik emme basıncı değerleri artmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar Kumbasar ve Kip 1984, [40] tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmaların sonucunu destekler niteliktedir.
- Filtre kağıdı deneyleri incelendiğinde özellikle ince tane oranı yüksek olan Numune 2 ve Numune 3 için farklı kuru yoğunluk değerlerinde ve aynı su içeriğinde hazırlanan numunelerin emme basıncı değerleri arasında çok büyük farklar olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar Göksan 2007 [38] yapmış olduğu çalışmanın sonuçlarını destekler niteliktedir.
- Nem içeriğine karşılık matrik emme basıncı grafikleri yani zemin su karakteristik eğrileri sonuçlarına göre ince tane oranı yüksek ve geçirimsizliği Numune 1 e kıyasla daha düşük olan Numune 2 ve Numune 3, su tutma özelliklerini daha yüksek matrik emme basınçlarında kaybetmektedirler. Numune 1 kaba tane oranının daha yüksek olması sebebiyle diğer numunelere

kıyasla daha düşük matrik emme basınç değerlerinde su tutma özelliğini yitirmektedir.

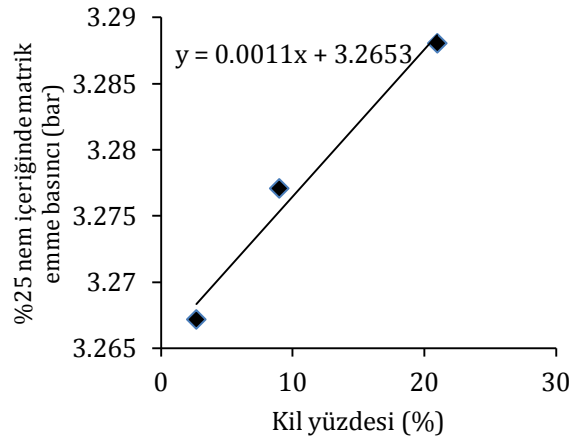
- Filtre kağıdı deneyi sonucunda elde edilen zemin su karakteristik eğrilerinin yorumlanması sonucunda %15, %20 ve % 25 nem içeriğinde numunelerin tane boyu içeriği değerlerine karşılık matrik emme basıncı grafikleri çizilmiştir. Numunelerin tane boyu dağılımına karşılık matrik emme basıncı değişimi incelenmiştir. Grafiklerin sonuçlarına göre %15 nem içeriğinde; en yüksek kil oranına sahip (%21) grimsi-yeşil renkli numune 3'ün matrik emme değeri 4.44 bar'dır. İnce tane oranı arttıkça matrik emme basıncı değeri artmaktadır. En yüksek kil içeriğine sahip grimsi-yeşil renkli numune 3, numune 2 ve numune 1 kıyasla daha yüksek matrik emme basıncı değerlerine sahiptir (Şekil 6.1-2). %20 ve %25 nem içeriği değerlerinde numunelerin kil yüzdeleri ve matrik emme basıncı değişimleri Şekil 6.1b-c'de gösterilmektedir.



(a)

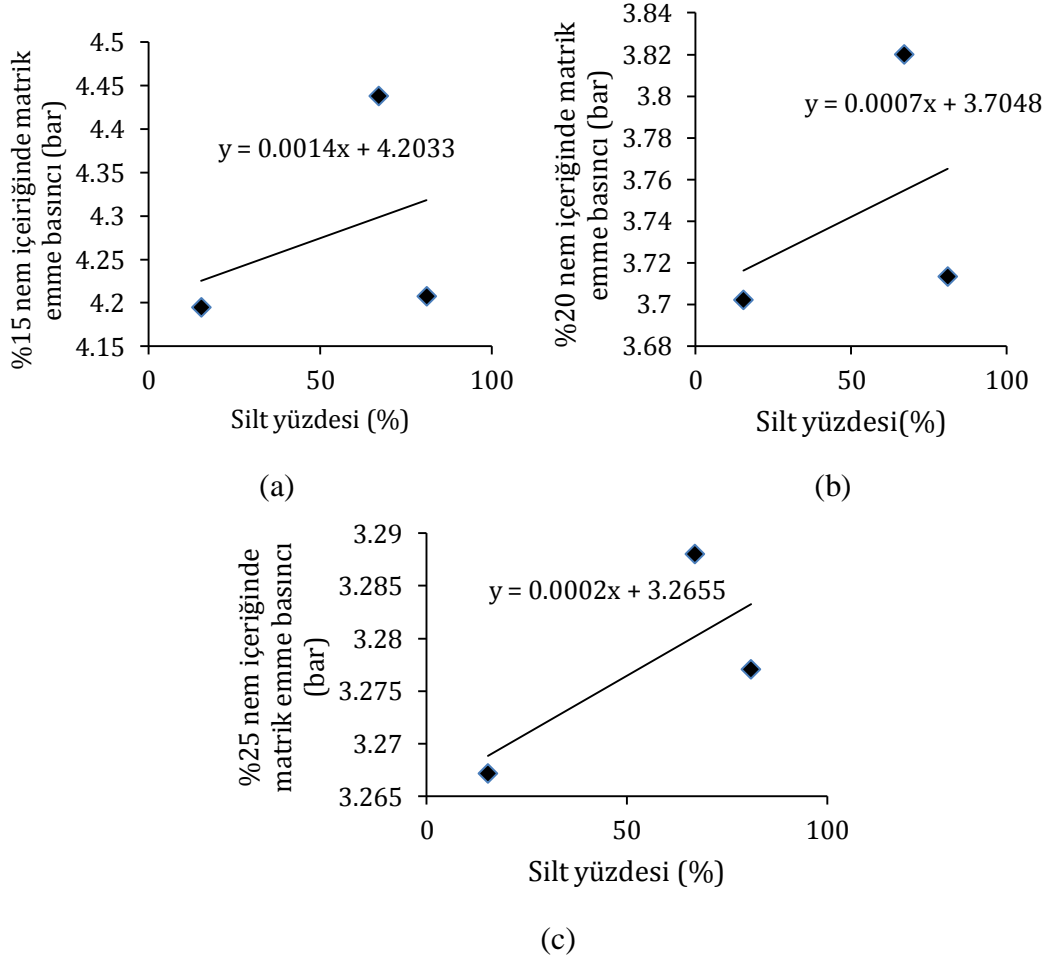


(b)



(c)

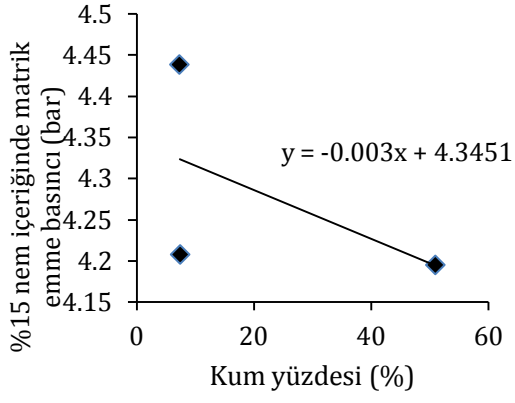
Şekil 6.1 Kil yüzdelere karşılık matrik emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.



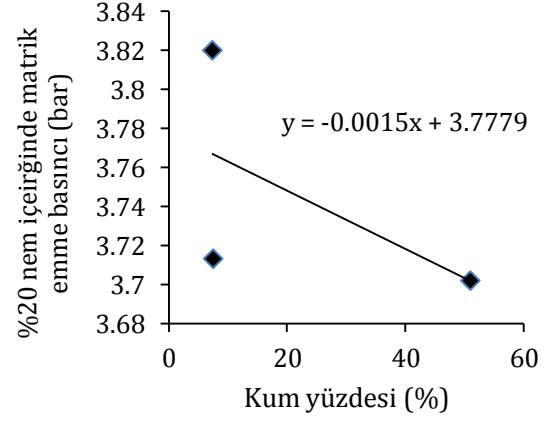
Şekil 6.2 Silt yüzdelerine karşılık matrik emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.

- Numunelerin kum, çakıl yüzdeleri ve matrik emme basıncı değişimi grafikleri çizilmiştir. %15 nem içeriğinde, %31.04 çakıl tane boyuna sahip numune 1'in matrik emme basıncı değeri 4.19 bardır. İri tane oranı artıkça ise matrik emme basıncı değerleri düşmektedir (Şekil 6.3-4).

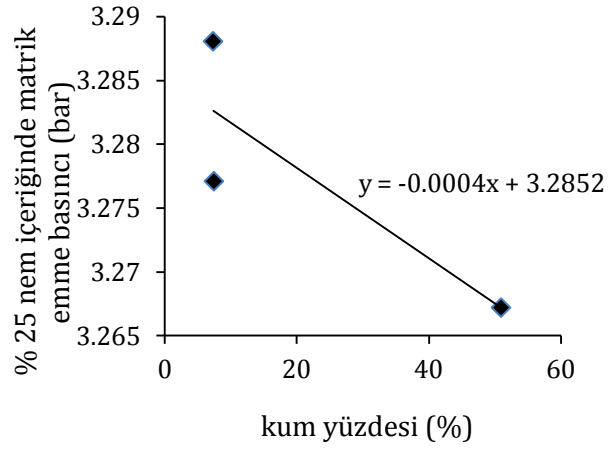




(a)

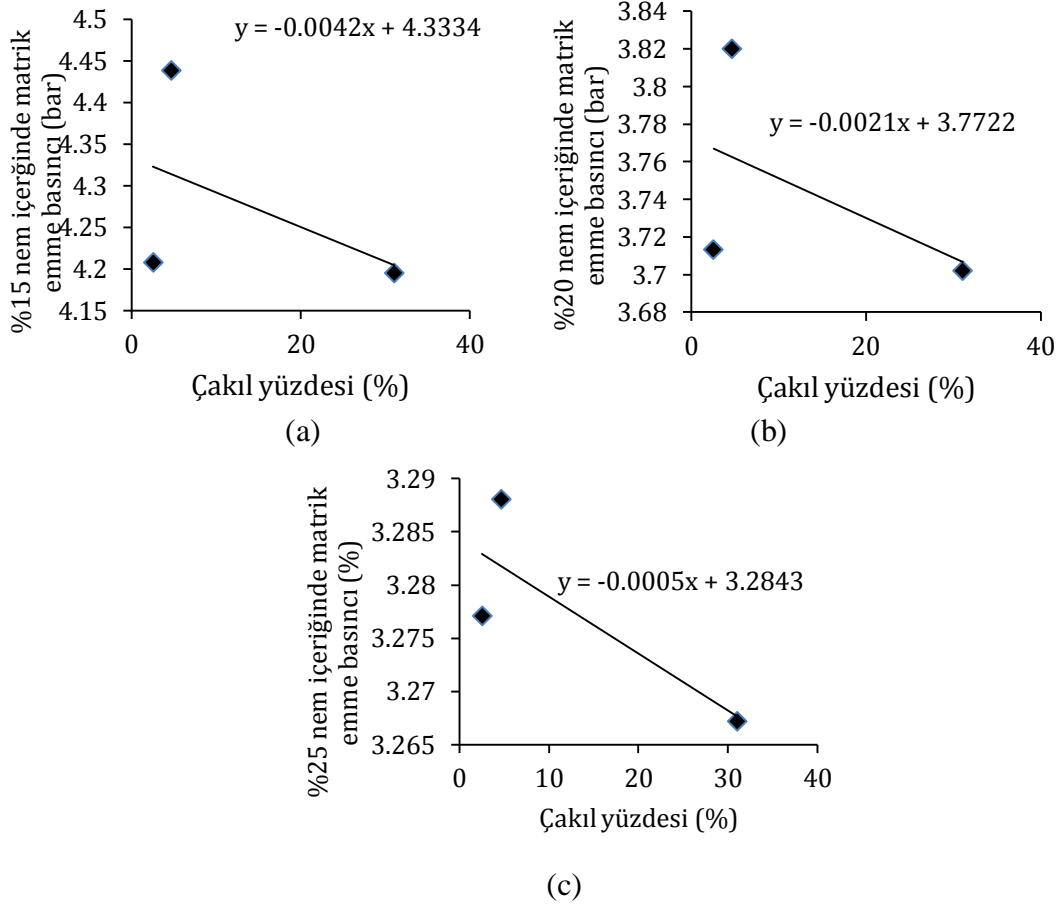


(b)



(c)

Şekil 6.3 Kum yüzdelere karşılık matris emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.



Şekil 6.4 Çakıl yüzdelere karşılık matrik emme grafikleri a) %15 nem içeriği, b) %20 nem içeriği ve c) %25 nem içeriği.

- Basınç plakası deneyleri sırasında killi zeminlerde numune üzerine sık aralıklarla matrik emme basıncı değerleri uygulanarak daha düzgün zemin su karakteristik eğrileri elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.
- Hem basınç plakası hem de filtre kağıdı deneyleri sonucunda elde edilen zemin su karakteristik eğrileri incelendiğinde numunelerdeki kil oranı artışına bağlı olarak eğrilerin yukarı yönde ötelendiği görülmüştür. Bu durum EK 4 de verilen grafiklerde daha net gözlemlenmektedir.
- Basınç plakası deney sonuçlarına göre elde edilen zemin su karakteristik eğrisi analizi yapıldığında; tane boyu dağılımları ve matrik emme basıncı arasındaki

ilişki incelenecek olursa, kil yüzdesi en fazla olan (%21) grimsi-yeşil renkli numune 3'ün matrik emme basıncı değeri en fazladır (1.51 bar). Çakıl yüzdesi en fazla olan (%31.04) kırmızımsı pembe renkli numune 1'in matrik emme basıncı (1.33 bar) olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.1). Elde edilen veriler sonucuna göre tane boyu küçüldükçe matrik emme basıncı değerinin artmış olduğu ve tane boyu arttıkça matrik emme basıncı değerinin azaldığı yorumu yapılmaktadır. Varılan sonuç, filtre kağıdı deney sonuçlarını destekler niteliktedir.

Çizelge 6.1 Basınç plakası deney sonuçlarına göre 3 numune için tane boyu- matrik emme ilişkisi.

<b>%25 nem içeriği</b>	<b>Matrik emme (bar)</b>	<b>Çakıl yüzdesi (%)</b>	<b>Kil yüzdesi (%)</b>
<b>Kırmızımsı-pembe</b>	1.33	31.04	2.7
<b>Sarı-boz</b>	1.09	2.53	9
<b>Grimsi-yeşil</b>	1.51	4.66	21

- Filtre kağıdı deneylerinde numuneler deney başlangıcı ve sonrasında tartılmış su ağırlıkları kaydedilmiştir. Daha sonra 105 °C etüvde bekletilerek fırın kurusu ağırlık ölçümleri de alınmıştır. Böylece numunelere ait doyumluk derecesi değerleri belirlenebilmiştir. EK 5'de sonuçlar çizelge halinde verilmiş olup kil oranı yüksek olan numune 3 ve numune 2'in doyumluk derecelerinin kil oranı düşük olan numune 1' e kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca matrik emme basıncı artışına bağlı olarak doyumluk derecesi azalmaktadır.
- Basınç plakası deney düzeneği doğrudan ölçüm methodu olduğu ve filtre kağıdı deneylerinde amprik eşitlikler kullanıldığı için ince taneli artık topraklarda, matrik emme basıncını belirlemede, basınç plakası deney düzeneğinin tercih edilmesinin daha doğru bir seçenek olabileceği sonucuna varılmıştır.

- Toplam emme basıncını belirlerken basınç plakası deney düzeneği kullanılamayacağı, bu sebeple filtre kağıdı yöntemi tercih edilmesinin uygun olduğu düşünölmektedir.
- Filtre kağıdı deney düzeneği basınç plakasına kıyasla daha geniş emme basıncı aralığında sonuçlar vermektedir.

## 7. ÖNERİLER

İleriki çalışmalarda farklı tane boyuna sahip numuneler üzerinde filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleri gerçekleştirilebilir.

Elde edilen sonuçlar andezitik artık topraklarda görülen şev duraysızlıkları analizlerinde girdi parametreleri olarak kullanılabilir.

Basınç plakasında kullanılan seramik disk 300 kPa değerinde basınca dayanıklı olduğu için deneyler gerçekleştirilirken güvenli tarafta kalmak için 250 kPa en yüksek matrik emme basıncı olarak belirlenmiştir. İlerleyen çalışmalarda daha yüksek dayanıma sahip diskler kullanılarak daha fazla veri elde edilebilir.

Bu çalışmada filtre kağıdı ve basınç plakası deney düzeneği kullanılmıştır. Artık topraklar üzerinde bu deneyler kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma olması anlamında ilk olma özelliğine sahiptir. İlerleyen çalışmalarda, farklı tane boyu ve tane içeriğine sahip artık topraklar üzerine daha fazla deney çalışmaları gerçekleştirilerek farklı sonuçların değerlendirilmesi ve kıyaslanması yapılabilir.

İnce taneli zeminlerde zemin su karakteristik eğrilerini belirlenmesinde basınç plakası deney düzeneği kullanılması filtre kağıdı deneylerine göre kullanışlı ve temsil edici olması açısından daha tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Filtre kağıdı deneyleri ortam koşullarındaki değişikliklerden (sıcaklık gibi) etkilendiği için deneyler sıcaklık kontrollü odalarda gerçekleştirilmelidir. Koşulların sağlanmasındaki güçlüklerden dolayı ve basınç plakası düzeneğinin filtre kağıdı deneylerine göre daha kesin sonuçlar vermesinden dolayı, basınç plakası deney düzeneği matrik emme basıncı belirlenmesinde daha avantajlı bir yöntemdir ve kullanılması önerilmektedir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Willey and Sons, New York, **1993**, p. 517.
- [2] Y. Guan, The Measurement of Soil Suction, Ph. D. Dissertation Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, **1996**, p. 331.
- [3] R. Bulut, E. C. Leong, State of the Art Report on Indirect Measurement of Soil Suction, International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Trento, Italy, **2005**.
- [4] A. D. Tarantino, D. Toll, A. M. Ridley, Field Measurement of Suction, Water Content and Water Permeability, International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, , Trento, Italy, **2005**.
- [5] Hilf, J.W.,. An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph.D. Dissertation, Technical memo. No.654, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, Design and construction Div. Denver, CO, 654 pp, **1956**.
- [6] M. Ç. Bayrak, Zemin Suyu Özelliklerinin Emme Basıncı Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, **2008**.
- [7] F. Gülşen, Doygun ve Doygun Olmayan Zemin Mekaniği Kavramları ile Sığ Temellerin Taşıma Gücü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, **2013**.
- [8] Tempe Pressure Cell 1400-1405 Operating Instructions, Soil moisture equipment publication, CA USA, 12 sayfa, **1995**.
- [9] Ö. Gökoğlu, Doygun Olmayan Zeminlerde Şev Stabilite Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, **2015**.
- [10] Z. Angın, Plak Temellerin Altındaki Zeminlerin Su Emme Basınçlarının Analizi, Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi, 1-3 Ekim 1997, İzmir, 777-789, **1997**.
- [11] E. Türker, Zeminlerin Su Tutma Eğrilerinin Granülometri Eğrilerinden Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, **2006**.

- [12] M. Y. Fattah, A. Y. Yahya, and B. A. Ahmed, Total and Matric Suction Measurement of Unsaturated Soils in Baghdad Region by Filter Paper Method, Journal of Engineering, Vol. 18, pp. 611-620, **2018**.
- [13] E. Buckingham, Studies of the Movement of Soil Moisture, U.S. Department of Agriculture, Bureau of Soils, No. 38, Washington, **1907**
- [14] N. E. Edlefsen, A.B.C. Anderson, Thermodynamics of Soil Moisture, Vol. 15, Hilgardia, pp. 31-298, **1943**.
- [15] B.G. Richards, Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors, Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, A symposium in Print, Butterworths, Sydney, pp. 39-46, **1965**.
- [16] L. A. Richards, The Usefulness of Capillary Potential to Soil Moisture and Plant Investigation, Journal of Agriculture Research, Vol. 37, pp. 719, **1928**.
- [17] U. Metten, Desalination by Reverse Osmosis, MIT Press, Cambridge M.A, **1966**.
- [18] ASTM D5298-16, Standard Test Methods for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.
- [19] ASTM D6836-16, Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge. American Society for Testing Materials, Philadelphia, **2003**.
- [20] M. T. Van Genuchten, A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society Of America Journal 44, 892-989, **1980**.
- [21] L. Ning, L. William. J, Unsaturated Soils Mechanics, John Willey and Sons, New Jersey, USA, **2004**.
- [22] ArGIS **2019**.
- [23] B. A. Uzuner, Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi Mühendislik Mimarlık Yayınları, s.376, Ankara, **1998**.
- [24] C. By Frank C. Townsend, M. ASCE, Geotechnical Characteristics of Residual Soils, Journal Geotechnical Engineering, 111(1), 77-94, **1985**.

- [25] E. Ertürk, Ankara Kenti kuzeyindeki (Solfasol Mahallesi) Artık Toprakların Mühendislik Özellikleri ve Şev Duraylılığı Sorunları, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **1997**.
- [26] Jeoloji Etüt Dairesi, 1: 100000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları, No. 55, Ankara F15 Paftası, MTA, **1997**
- [27]. K. E. Kasapoğlu, Ankara Kenti Zeminlerin Jeoteknik Özellikleri ve Depremselliği, s. 180, **2000**
- [28] I. Yılmaz, M. Yıldırım, İ. Keskin, Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleve Problemler, Teknik Yayınevi Mühendislik Mimarlık Yayınları, 5-146, **2009**
- [29] ASTM-D422(1994b) Standart Test Method for Particle Size Analysis of Soils, American Society of Testing Material, Philadelphia, USA, **1994**
- [30] K. Özaydın, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, **2001**
- [31] ASTM-D4318, Standart Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index, American Society of Testing Material, Philadelphia, USA, **2000**
- [32] ASTM-D854, Standart Test Method for Specific Gravity Of Soil Solids by Water pycnometer American Society of Testing Material, Philadelphia, USA, **2000**
- [33] J. P. Bardet, Experimental Soil Mechanics, New Jersey, Prentice Hall, Inc., **1997**
- [34] ASTM-D698 Standart Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standart Effort, American Society of Testing Material, Philadelphia, USA, **2000**
- [35] ASTM-D3080, Standart Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, American Society of Testing Material, Philadelphia, USA, **1999**
- [36] R. Gardner, A Method for Measuring the Capillary Tension of Soil Moisture Over a Wider Moisture Range, Soil Science, 43, 227-293, **1937**
- [37] R. Bulut, R. L. Lytton, W. K. Wray, Soil Suction Measurements by Filter Paper, İn Expansive Clay Soils and Vegetative İnfluence on Shallow Foundations, Geotechnical Special, Publication No. 115, ASCE, 243-261, **2001**
- [38] T. S. Göksan, Zeminlerin Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bir Yaklaşım, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, **2007**



[39] Pressure Plate Extractor,[https://www.youtube.com/watch?v=KzJNoeST\\_cs](https://www.youtube.com/watch?v=KzJNoeST_cs) (Erişim tarihi: **6 Mayıs 2018**).

[40] V. Kumbasar, F. Kip, İnaşat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 350 s, **1984**.

## **9. EKLER**

## 9.1. EK 1 Kırmızımsı-pembe numuneye ait filtre kağıdı deneyi sonuçları

	Deney No	Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Su içeriği W (%)	Soğuk KapBoş Ağırlığı Tc (gr)	Soğuk Kap + Islak Filtre Kağıdı Ağırlığı M1 (gr)	Sıcak Kap+ Kuru Filtre Kağıdı Ağırlığı M2 (gr)	Sıcak Kap Ağırlığı th (gr)	Filtre Kağıdının Kuru Ağırlığı Mf (gr)	Filtre Kağıdının Emdiği Suyun Ağırlığı Mw (gr)	Filtre Kağıdının Su İçeriği Wf (%)	Toplam emme (log Kpa)	Toplam Emme (kPa)	Matrik Emme (log kPa)	Matrik Emme (kPa)
Kırmızımsı - Pembe	1	1.2	10	27.8591 33.6219 40.2884	28.0244 33.7925 40.5571	28.0011 33.7628 40.5232	27.8563 33.6139 40.2868	0.1448 0.1489 0.2364	0.0205 0.0217 0.0323	14.1575 14.5735 13.6633	4.21	16140.90	4.26	18307.55
	2	1.2	15	27.8587 33.6223 40.2879	28.0353 33.8159 40.5736	27.998 33.7674 40.5141	27.8535 33.6107 40.2875	0.1445 0.1567 0.2266	0.0321 0.0369 0.0591	22.2145 23.5482 26.0812	3.54	3503.82	3.30	1973.67
	3	1.2	20	29.5133 31.4104 32.71	29.7008 31.6027 33.036	29.6549 31.5013 32.9466	29.5082 31.4021 32.707	0.1467 0.0992 0.2396	0.0408 0.0931 0.0864	27.8119 93.8508 36.0601	3.16	1445.44	2.52	329.55
	4	1.2	25	27.6067 28.743 24.0422	27.8086 28.9344 24.3734	27.7509 28.8853 24.2689	27.6006 28.7389 24.0394	0.1503 0.1464 0.2295	0.0516 0.045 0.1017	34.3313 30.7377 44.3137	2.79	620.24	1.87	74.98
	1	1.3	10	27.608 28.1688 25.9278	27.7835 28.3453 26.1979	27.7569 28.321 26.1748	27.6005 28.1648 25.9285	0.1564 0.1562 0.2463	0.0191 0.0203 0.0238	12.2123 12.9962 9.6630	4.35	22137.65	4.57	37519.01
	2	1.3	15	28.7459 30.0513 33.2201	28.9333 30.2377 33.5105	28.8832 30.1948 33.4556	28.7384 30.0448 33.2203	0.1448 0.15 0.2353	0.0426 0.0364 0.0551	29.4199 24.2667 23.4169	3.24	1721.51	3.50	3182.90
	3	1.3	20	27.8602 33.6432 24.0475	28.0589 33.8573 24.3697	27.9988 33.7895 24.2844	27.8531 33.6328 24.0465	0.1457 0.1567 0.2379	0.053 0.0574 0.0843	36.3761 36.6305 35.4351	2.48	304.36	2.57	368.65
	4	1.30	25	28.7455 30.052 33.2201	28.9659 30.2671 33.5515	28.8923 30.1973 33.4501	28.7388 30.048 33.2193	0.1535 0.1493 0.2308	0.0669 0.0658 0.1006	43.5831 44.0723 43.5875	1.91	81.81	1.93	85.41
	1	1.5	10	27.8735 27.6545 32.7107	28.0421 27.8314 32.9703	28.0312 27.8053 32.939	27.8834 27.6492 32.7115	0.1478 0.1561 0.2275	0.0208 0.0208 0.0321	14.0731 13.3248 14.1099	4.26	18190.86	4.23	16898.17
	2	1.5	15	27.0873 30.9982 25.939	27.2625 31.1739 26.232	27.2641 31.1445 26.1956	27.1168 30.9964 25.9447	0.1473 0.1481 0.2509	0.0279 0.0276 0.0421	18.9409 18.6361 16.7796	3.86	7300.89	4.02	10468.14
	3	1.5	20	33.6448 29.9272 33.2188	33.8412 30.1302 33.5232	33.8145 30.1015 33.5109	33.6634 29.9542 33.2766	0.1511 0.1473 0.2343	0.0453 0.0557 0.0701	29.9801 37.8140 29.9189	2.69	485.76	3.00	991.56
	4	1.5	25	27.6082 27.8608 33.2208	27.7948 28.0696 33.5332	27.7453 28.0153 33.4475	27.6051 27.8586 33.2203	0.1402 0.1567 0.2272	0.0464 0.0521 0.0852	33.0956 33.2482 37.5000	2.74	553.23	2.41	254.54
	1	1.7	10	28.1675 33.6495 24.0437	28.3396 33.8061 24.318	28.3105 33.7808 24.2893	28.1598 33.6339 24.0405	0.1507 0.1469 0.2488	0.0214 0.0097 0.0255	14.2004 6.6031 10.2492	4.52	32862.65	4.53	33774.40
	2	1.7	15	28.7445 27.6074 25.927	28.923 27.7916 26.228	28.8862 27.755 26.172	28.74 27.6026 25.9263	0.1462 0.1524 0.2457	0.0323 0.0318 0.0553	22.0930 20.8661 22.5071	3.65	4505.47	3.57	3747.10
	3	1.7	20	33.6398 27.8604 24.0446	33.8469 28.0626 24.4385	33.7938 28.0097 24.2837	33.635 27.8526 24.0396	0.1588 0.1571 0.2441	0.0483 0.0451 0.1498	30.4156 28.7078 61.3683	3.02	1057.16	3.00	1000.00
	4	1.7	25	27.6078 28.7449 25.9281	27.8062 28.9522 26.2492	27.7576 28.897 26.1525	27.603 28.7382 25.9263	0.1546 0.1588 0.2262	0.0438 0.0485 0.0949	28.3312 30.5416 41.9540	3.03	1081.20	2.06	114.49

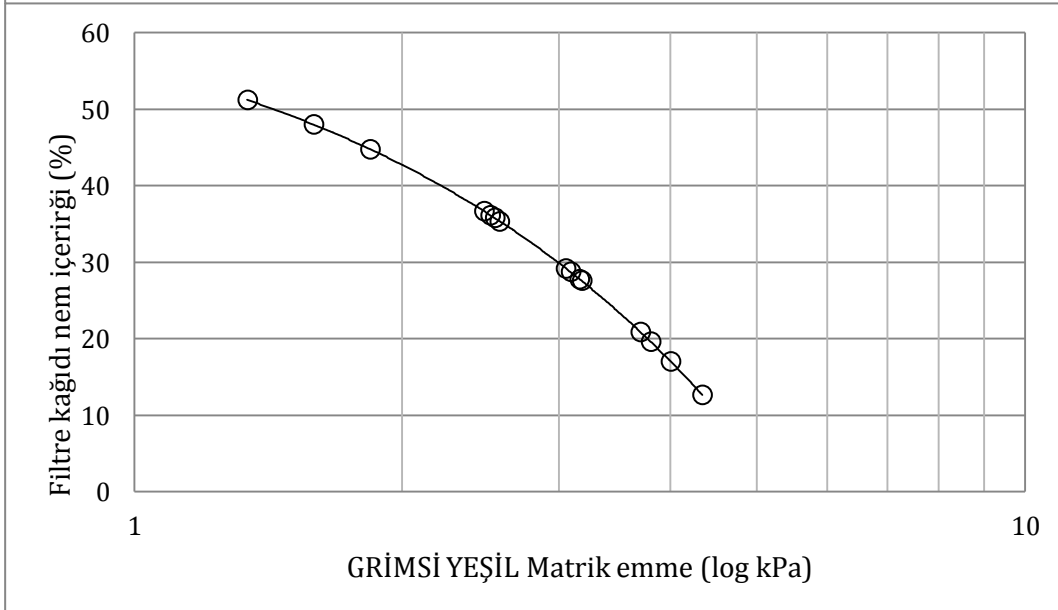
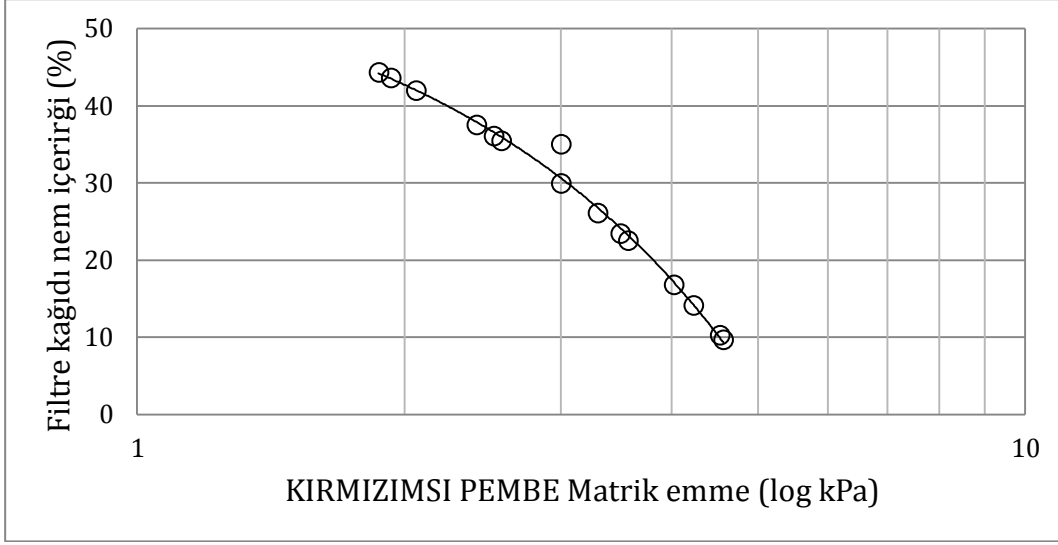
9.2. EK 2 Sarı-boz numuneye ait filtre kağıdı deney sonuçları

	Deney No	Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Su İçeriği W (%)	Soğuk KapBoş Ağırlığı Tc (gr)	Soğuk Kap + Islak Filtre Kağıdı Ağırlığı M1 (gr)	Sıcak Kap+ Kuru Filtre Kağıdı Ağırlığı M2 (gr)	Sıcak Kap Ağırlığı th (gr)	Filtre Kağıdının Kuru Ağırlığı Mf (gr)	Filtre Kağıdının Emdiği Suyun Ağırlığı Mw (gr)	Filtre Kağıdının Su İçeriği Wf (%)	Toplam emme (log Kpa)	Toplam Emme (kPa)	Matrik Emme (log kPa)	Matrik Emme (kPa)
Sarı- Boz	1	1.2	5	27.6155	27.7826	27.7585	27.6139	0.1446	0.0225	15.5602	4.16	14418.42	4.20	15823.14
				31.4157	31.5981	31.5727	31.4133	0.1594	0.023	14.4291				
				32.6132	32.8963	32.8595	32.6122	0.2473	0.0358	14.4763				
	2	1.2	10	27.8591	28.0244	28.0011	27.8563	0.1448	0.0205	14.1575	4.21	16140.90	4.26	18307.55
				33.6219	33.7925	33.7628	33.6139	0.1489	0.0217	14.5735				
				40.2884	40.5571	40.5232	40.2868	0.2364	0.0323	13.6633				
	3	1.2	15	28.7436	28.9382	28.8915	28.7368	0.1547	0.0399	25.7919	3.28	1919.63	3.18	1522.70
				27.6066	27.7951	27.7476	27.5988	0.1488	0.0397	26.6801				
				25.9271	26.2412	26.171	25.9247	0.2463	0.0678	27.5274				
	4	1.2	20	26.3511	27.5496	27.4995	27.3375	0.162	1.0365	639.8148	3.27	1860.12	2.54	343.05
				33.6398	33.8413	33.7988	33.6394	0.1594	0.0421	26.4115				
				24.6221	24.9405	24.8552	24.6208	0.2344	0.084	35.8362				
	1	1.3	5	30.7088	30.898	30.8739	30.7066	0.1673	0.0219	13.0903	4.30	19851.86	4.33	21594.85
				27.325	27.5052	27.4799	27.3209	0.159	0.0212	13.3333				
				32.614	32.8812	32.8493	32.6123	0.237	0.0302	12.7426				
	2	1.3	10	27.3392	27.5204	27.4731	27.3275	0.1456	0.0356	24.4505	3.44	2757.76	2.88	763.64
				33.6402	33.832	33.7899	33.6352	0.1547	0.0371	23.9819				
				32.7661	33.0814	33.005	32.765	0.24	0.0753	31.3750				
	3	1.3	15	27.8587	28.0503	28.0054	27.8545	0.1509	0.0407	26.9715	3.22	1648.56	2.60	394.80
				27.608	27.7932	27.7493	27.6037	0.1456	0.0396	27.1978				
				40.289	40.5953	40.5144	40.2876	0.2268	0.0795	35.0529				
	4	1.3	20	28.1671	28.3655	28.3151	28.1598	0.1553	0.0431	27.7527	3.17	1494.57	1.74	55.19
				29.5087	29.6992	29.6528	29.5034	0.1494	0.0411	27.5100				
				24.0425	24.4023	24.2876	24.0412	0.2464	0.1134	46.0227				
	1	1.5	5	31.4173	31.5856	31.5652	31.415	0.1502	0.0181	12.0506	4.40	25280.97	4.44	27489.64
				28.1758	28.3489	28.3291	28.1741	0.155	0.0181	11.6774				
				24.0478	24.3205	24.292	24.0472	0.2448	0.0279	11.3971				
	2	1.5	10	33.6412	33.822	33.7771	33.6354	0.1417	0.0391	27.5935	3.14	1370.95	3.13	1352.78
				28.7446	28.927	28.8794	28.7376	0.1418	0.0406	28.6319				
				32.7659	33.0756	33.0066	32.765	0.2416	0.0681	28.1871				
	3	1.5	15	31.407	31.6147	31.5584	31.4029	0.1555	0.0522	33.5691	2.88	756.56	2.56	365.24
				27.3325	27.5241	27.471	27.3228	0.1482	0.0434	29.2848				
				25.9284	26.2346	26.1514	25.9254	0.226	0.0802	35.4867				
	4	1.5	20	27.6073	27.8184	27.758	27.6016	0.1564	0.0547	34.9744	2.63	423.66	1.95	89.62
				33.6199	33.8147	33.7604	33.6154	0.145	0.0498	34.3448				
				24.0407	24.3904	24.282	24.038	0.244	0.1057	43.3197				
	1	1.7	5	28.7529	28.9261	28.9051	28.7518	0.1533	0.0199	12.9811	4.37	23236.04	4.33	21617.93
				27.6152	27.7767	27.7598	27.6152	0.1446	0.0169	11.6874				
				25.9354	26.1974	26.1679	25.9355	0.2324	0.0296	12.7367				
	2	1.7	10	33.6183	33.7987	33.7551	33.6132	0.1419	0.0385	27.1318	3.26	1808.26	3.31	2047.92
27.327				27.5179	27.4668	27.3153	0.1515	0.0394	26.0066					
25.9285				26.2233	26.1596	25.9254	0.2342	0.0606	25.8753					
3	1.7	15	27.8582	28.0575	28.008	27.8541	0.1539	0.0454	29.4997	3.06	1149.10	2.69	491.70	
			29.5086	29.7037	29.6569	29.5053	0.1516	0.0435	28.6939					
			40.2886	40.5944	40.5143	40.2858	0.2285	0.0773	33.8293					
4	1.7	20	31.4064	31.614	31.5572	31.4036	0.1536	0.054	35.1562	2.70	504.54	2.33	215.79	
			27.6063	27.8033	27.7538	27.6048	0.149	0.048	32.2148					
			24.0403	24.3523	24.2651	24.0397	0.2254	0.0866	38.4206					

### 9.3. EK 3 Grimsi-yeşil renkli filtre kağıdı deney sonuçları

	Denetim No	Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Su İçeriği W (%)	Soğuk Kap Boş Ağırlığı Tc (gr)	Soğuk Kap + Islak Filtre Kağıdı Ağırlığı M1 (gr)	Sıcak Kap + Kuru Filtre Kağıdı Ağırlığı M2 (gr)	Sıcak Kap Ağırlığı th (gr)	Filtre Kağıdının Kuru Ağırlığı Mf (gr)	Filtre Kağıdının Emdiği Suyun Ağırlığı Mw (gr)	Filtre Kağıdının Su İçeriği Wf (%)	Toplam emme (log Kpa)	Toplam Emme (kPa)	Matrik Emme (log kPa)	Matrik Emme (kPa)
Grimsi - Yeşil	1	1.2	10	32.6409	33.8186	33.7897	33.6385	0.1512	1.0265	678.9021	4.14	13662.56	4.00	10010.18
				30.7031	30.8908	30.8604	30.6976	0.1628	0.0249	15.2948				
				32.9793	33.27	33.2271	32.9787	0.2484	0.0423	17.0290				
	2	1.2	15	34.9674	35.1511	35.1107	34.9627	0.148	0.0357	24.1216	3.38	2422.17	3.16	1456.44
				29.5074	29.7066	29.6645	29.5061	0.1584	0.0408	25.7576				
				25.9256	26.2283	26.1639	25.927	0.2369	0.0658	27.7754				
	3	1.2	20	27.8576	28.0492	28.0029	27.8556	0.1473	0.0443	30.0747	3.02	1035.40	2.51	324.72
				28.7429	28.946	28.8958	28.7387	0.1571	0.046	29.2807				
				32.7672	33.0693	32.9867	32.7648	0.2219	0.0802	36.1424				
	4	1.2	25	33.6189	33.8246	33.7706	33.6146	0.156	0.0497	31.8590	2.96	910.21	1.84	69.19
				31.4079	31.6013	31.5504	31.4004	0.15	0.0434	28.9333				
				32.604	32.9232	32.8205	32.6	0.2205	0.0987	44.7619				
	1	1.3	10	27.3188	27.4935	27.4686	27.3119	0.1567	0.018	11.4869	4.35	22162.28	4.34	21915.70
				27.6066	27.77	27.7475	27.6038	0.1437	0.0197	13.7091				
				40.2866	40.55	40.5193	40.2855	0.2338	0.0296	12.6604				
	2	1.3	15	30.3428	30.5303	30.4843	30.3358	0.1485	0.039	26.2626	3.26	1825.87	3.09	1219.88
				28.1671	28.3679	28.319	28.1606	0.1584	0.0424	26.7677				
				24.0422	24.339	24.269	24.0385	0.2305	0.0663	28.7636				
	3	1.3	20	27.8579	28.0512	28.0096	27.8551	0.1545	0.0388	25.1133	3.36	2268.42	2.47	294.74
				28.7434	28.9201	28.8818	28.741	0.1408	0.0359	25.4972				
				25.9256	26.2453	26.1594	25.9255	0.2339	0.0858	36.6823				
	4	1.3	25	33.64	33.8373	33.7911	33.6354	0.1557	0.0416	26.7180	3.17	1496.05	1.34	21.74
				33.6183	33.8129	33.7644	33.613	0.1514	0.0432	28.5337				
				24.0394	24.381	24.2663	24.0404	0.2259	0.1157	51.2174				
	1	1.5	10	33.6235	33.795	33.7567	33.6169	0.1398	0.0317	22.6753	3.59	3898.81	3.70	5016.95
				28.7476	28.943	28.9029	28.7426	0.1603	0.0351	21.8964				
				24.0419	24.3111	24.2651	24.0424	0.2227	0.0465	20.8801				
	2	1.5	15	29.5125	29.6981	29.6571	29.5095	0.1476	0.038	25.7453	3.39	2444.75	3.05	1132.42
				31.4114	31.6065	31.565	31.4077	0.1573	0.0378	24.0305				
				25.9312	26.2535	26.1791	25.9296	0.2495	0.0728	29.1784				
3	1.5	20	28.1708	28.377	28.3293	28.1666	0.1627	0.0435	26.7363	3.22	1652.50	2.57	375.64	
			27.6109	27.8015	27.7565	27.6069	0.1496	0.041	27.4064					
			32.608	32.9378	32.8494	32.6057	0.2437	0.0861	35.3303					
4	1.5	25	33.6294	33.8296	33.771	33.6246	0.1464	0.0538	36.7486	2.56	363.50	1.59	38.55	
			28.1749	28.3833	28.3272	28.172	0.1552	0.0532	34.2784					
			25.9341	26.271	26.1605	25.9329	0.2276	0.1093	48.0228					
1	1.7	10	28.7527	28.943	28.9094	28.7503	0.1591	0.0312	19.6103	3.84	6968.48	3.80	6288.72	
			29.5176	29.6945	29.6647	29.5154	0.1493	0.0276	18.4863					
			24.0464	24.3427	24.2941	24.0464	0.2477	0.0486	19.6205					
2	1.7	15	33.6278	33.8229	33.7769	33.6252	0.1517	0.0434	28.6091	3.15	1425.01	3.18	1503.39	
			29.5154	29.7264	29.6807	29.5148	0.1659	0.0451	27.1851					
			40.3013	40.6217	40.5512	40.3001	0.2511	0.0693	27.5986					
3	1.7	20	27.8676	28.0779	28.0248	27.8646	0.1602	0.0501	31.2734	2.96	915.41	2.54	344.76	
			33.6496	33.8421	33.7992	33.6505	0.1487	0.0438	29.4553					
			32.9894	33.2985	33.2163	32.9887	0.2276	0.0815	35.8084					

#### 9.4. EK 4 Numune 1, 2 ve 3' e ait filtre kağıdı sonucu elde edilen SWCC



9.5. EK 5 Numune 1, 2 ve 3' e ait doygunluk derecesi sonuçları

	Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Su İçeriği W (%)	Matrik emme basıncı (bar)	Doygunluk derecesi (Sr)(%)		Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Su İçeriği W (%)	Matrik emme basıncı (bar)	Doygunluk derecesi (Sr)(%)		Kuru Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Su İçeriği W (%)	Matrik emme basıncı (bar)	Doygunluk derecesi (Sr)(%)	
<b>Kırmızısı - pembe örnek</b>	1.2	10%			<b>Sarı-boz örnek</b>	1.2	5%	4.26		<b>Grimsi-yeşil örnek</b>	1.2	10%	4	25.09	
		15%	3.3	37.67			10%	4.2	33.04			15%	3.16	37.87	
		20%	2.52	47.90			15%	3.18	41.82			20%	2.51	47.16	
		25%	1.87	58.28			20%	2.54	48.13			25%	1.84	57.73	
	1.3	10%	4.57	25.75			1.3	5%	4.33			1.3	10%	4.34	32.67
		15%	3.5	37.22				10%	2.88		32.75		15%	3.09	41.07
		20%	2.57	57.06				15%	2.6		47.67		20%	2.47	54.67
		25%	1.93	70.26				20%	1.74		62.12		25%	1.34	66.76
	1.5	10%	4.23	48.52			1.5	5%	4.44			1.5	10%	3.7	47.75
		15%	4.02	37.56				10%	3.13		46.22		15%	3.05	60.11
		20%	3	72.78				15%	2.56		62.21		20%	2.57	75.82
		25%	2.41	86.93				20%	1.95		80.49		25%	1.59	88.06
	1.7	10%	4.53	51.73			1.7	5%	4.33			1.7	10%	3.8	58.39
		15%	3.57	88.64				10%	3.31		58.45		15%	3.18	54.18
		20%	3	89.48				15%	2.69		79.17		20%	2.54	91.38
		25%	2.06	100.00				20%	2.33		100.00		25%		



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 01/07/2019

Tez Başlığı / Konusu: ARTIK TOPRAK ZEMİNLERİN ZEMİN-SU KARAKTERİSTİK EĞRİLERİNİN BELİRLENMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 105 sayfalık kısmına ilişkin, 28/06/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6 'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Ecenur ÖZEL  
Öğrenci No: N14321002  
Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği  
Programı: Jeoloji Mühendisliği - Yüksek Lisans  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

01.07.2019

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Adil Binal

(Unvan, Ad Soyad, İmza)



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ecenur Özel  
Doğum yeri : Van  
Doğum tarihi : 20.06.1992  
Medeni hali : Bekar  
Yazışma adresi : ecenurozel@gmail.com  
Telefon :  
Elektronik posta adresi :  
Yabancı dili : İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lisans : Muratpaşa Lisesi, Antalya (2006-2010)  
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Ankara (2010-2014)  
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Ankara (2015-...)

### İş Tecrübesi

2014- ----- Özkan Mühendislik İnşaat Sanayi Limited  
(07.2014-05.2015)

### Diğer

XXXX