

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

**FİLTRE KÂĞIDI YÖNTEMİNİN KİLLİ KARIŞIMLARDA  
GÜVENİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Gül AKINCI**

**Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Seda DURUKAN**



**MANİSA-2017**

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

**FİLTRE KÂĞIDI YÖNTEMİNİN KİLLİ KARIŞIMLARDA  
GÜVENİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Gül AKINCI**

**Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Seda DURUKAN**



**MANİSA-2017**

## TEZ ONAYI

Gül AKINCI tarafından hazırlanan “**Filtre Kâğıdı Yönteminin Killi Karışımlarda Güvenilirliğinin Araştırılması**” adlı tez çalışması 24/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS** olarak savunulmuş ve **oybirliği** ile başarılı olarak kabul edilmiştir.

**Danışman**

**Yrd. Doç. Dr. Seda DURUKAN**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

...

**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Yusuf Erzin**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Yrd. Doç. Dr. Hasan Fırat Pulat**  
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

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

**Gül AKINCI**



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇİNDEKİLER .....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLolar DİZİNİ .....	VII
TEŞEKKÜR .....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	11
2.1. Zeminlerde Emme Olgusu.....	11
2.1.1. Toplam Emme .....	11
2.1.2. Matris Emme .....	13
2.1.3. Ozmotik Emme .....	13
2.2. Zeminlerde Emmenin Ölçülmesi.....	15
2.2.1. Doğrudan Yöntemler .....	15
2.2.1.1. Eksen Dönüştürme Metodu.....	15
2.2.1.2. Tensiyometre.....	17
2.2.1.3. Emme Plakası.....	19
2.2.2. Dolaylı Yöntemler .....	20
2.2.2.1. TDR (Time Domain Reflectometry- Zaman Etkili Yansıma Ölçer) ..	21
2.2.2.2. Elektriksel İletkenlik Sensörleri.....	21
2.2.2.3. Saykrometreler .....	22
2.2.2.4. Chilled-Mirror Higrometreleri .....	25
2.2.2.5. Filtre Kâğıdı Metodu.....	26
2.3. Literatür Çalışmaları.....	28

3. MATERYAL ve METOT .....	38
3.1. Çalışmada Kullanılan Zemin Numunelerinin Tanımlanması.....	38
3.2. Filtre Kâğıdı Tekniği İle Matris Ve Toplam Emme Basıncının Belirlenmesi ...	39
3.3. Filtre Kâğıdı Tekniği İle Emme Basıncının Belirlenmesinde Takip Edilen Adımlar.....	41
3.4 Emme Değerlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi .....	48
3.4.1. Ortalamalar İçin Güven Aralığı .....	50
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	54
4.1 Emme Basıncı Deney Sonuçları.....	54
4.2. Deney Verilerinin Güvenirliliğinin İstatistiksel Olarak Araştırılması .....	56
4.3. Su İçeriği Ve Kuru Özkütlelerinin Emme Basınçlarına Etkisi.....	58
5.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	78
ÖZGEÇMİŞ .....	84

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

%	: Yüzde
°C	: Santigrat derece
C	: Konsantrasyon
M	: Ağırlık
N	: Molekül sayısı
NaCl	: Sodyum klorür
R	: Evrensel gaz sabiti
T	: Mutlak sıcaklık
U	: Boşluk basıncı
$u_v$	: Gözenek-su buharının kısmi basıncı
$w_v$	: Su buharının molekül ağırlığı
$u_{v0}$	: Aynı basınçta düz bir su yüzeyindeki su buharının doymuşluk basıncı
$v_{w0}$	: Suyun özgül hacmi
V	: Hacim
w	: Molekül ağırlığı
$\bar{x}$	: Ortalama
$\psi$	: Toplam emme
$\sigma$	: Standart sapma
$\sigma^2$	: Varyans
$(\sigma/n)^{1/2}$	: Standart hata
$\sigma'$	: Efektif gerilme
$\chi$	: Suyu doymuşluğa bağlı parametre
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$c'$	: Efektif kohezyon
$\theta'$	: Efektif iç sürtünme açısı
$u_w$	: Boşluk suyu basıncı
$u_a$	: Hava basıncı

$u_a - u_w$  : Matris emme

$\sigma_n$  : Normal gerilme

$\theta_b$  : Matris emmedeki değişime kıyasla kayma gerilmesindeki artış oranını belirleyen açı.

$M_1$  : Filtre kâğıdının kuru ağırlığı

$M_2$  : Numune kutusu ve filtre kâğıdının birlikte kuru ağırlığı

$T_h$  : Numune kutusunun sıcak ağırlığı

$M_w$  : Filtre kâğıdının emdiği suyun ağırlığı

$M_1$  : Etüve konulmadan önceki, ıslak filtre kâğıdı ve numune kutusunun toplam ağırlığı

$T_e$  : Numune kutusunun ağırlığı

## Kısaltmalar

**ASTM**: American Standarts for Testing and Materials

**Cm** : Santimetre

**G** : Gram

**KBK** : Kum Bentonit Karışımı

**kPa** : Kilopaskal

**log** : Logaritma

**mm** : Milimetre

**Mpa** : Megapaskal

**No** : Numara

**SEM** : Taramalı Elektron Mikroskopu

**TDR** : Time Domain Reflectometry (Zaman Etkili Yansıma Ölçer)

**ZBK** : Zeolit Bentonit Karışımı



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Normal gerilme altındaki kayma gerilmesinde değişim .....	2
Şekil 1.2. Doygun bir zeminde tipik bir zemin su karakteristik eğrisi .....	5
Şekil 1.3. Değişik kil minerallerinin yapısı .....	8
Şekil 2.1. Killi zeminde toplam, matris ve ozmotik emme değerleri .....	12
Şekil 2.2. Eksen dönüştürme metodu .....	16
Şekil 2.3. Null tipi basınç plakasında kullanılan hücre .....	17
Şekil 2.4. Şematik açıdan bir tensiyometre .....	18
Şekil 2.5. Zemin örneklerinin 1 kPa ve 10 kPa'lık emme basıncı değerlerinde dengelenmesi .....	19
Şekil 2.6. Haines ölçüm aleti (1) pvc kapak, (2) Buchner hunisi, (3) vanalar, (4) hacim bölümlü cam silindir ve (5) plastik boru .....	20
Şekil 2.7. Tipik bir TDR sistemi .....	21
Şekil 2.8. Elektriksel iletkenlik sensörü .....	22
Şekil 2.9. Bir saykrometrenin dıştan görünümü .....	23
Şekil 2.10. Termokupl saykrometre .....	24
Şekil 2.11. Transistör saykrometrenin şematik görünümü .....	25
Şekil 2.12. Chilled-Mirror Higrometresi ve Şematik Görünümü .....	26
Şekil 2.13. Toplam zemin emme basıncının ölçülmesi .....	27
Şekil 2.14. Farklı zeminler için geçerli olan tipik zemin-su karakteristik eğrileri .....	30
Şekil 2.15. Whatman No. 42 ve Schleicher and Schuell No. 589 filtre kâğıtlarına ilişkin kalibrasyon eğrileri .....	32
Şekil 2.16. Farklı bentonit oranlarına ve sıkışma enerjilerine göre hazırlanmış örneklerin bentonit su içeriği – total emme ilişkisi .....	35
Şekil 2.17. Zeolit bentonit karışımlarının total ve matris emme değerleri .....	37
Şekil 2.18. Kum bentonit karışımlarının total ve matris emme değerleri .....	38
Şekil 3.1. O-ring üzerine filtre kâğıtlarının yerleştirilmesi .....	42
Şekil 3.2. Kavanozun kapağının bantlanması .....	42
Şekil 3.3. Kavanozun inkibatör'e yerleştirilmesi .....	43
Şekil 3.4. Toplam ve matris emme basıncının ölçülmesi .....	43
Şekil 3.5. Hassas terazi .....	44
Şekil 3.6. Filtre kâğıdının alüminyum kutuya yerleştirilmesi .....	44
Şekil 3.7 Filtre kağıdının alüminyum kutuya yerleştirilerek hassas tartı ile tartılması ..	45
Şekil 3.8 Filtre kağıdının alüminyum kutuya yerleştirilerek etüvde bekletilmesi .....	45
Şekil 3.9. Islanan filtre kağıdı için emme basıncı-su içeriği ilişkisi (ASTM D 5298, 1992). .....	47
Şekil 3.10. Güven aralığı tahmininin elemanları .....	50
Şekil 3.11. Ortalamalar için güven aralığı .....	51
Şekil 4.1. A grubu için su içeriği ve zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	59
Şekil 4.2. A grubu suya doymunluk-zemin emme ilişkisi .....	60
Şekil 4.3. B grubu için kuru özkütle ve zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	61
Şekil 4.4. B grubu ıslak özkütle ve zemin emme ilişkisi .....	61
Şekil 4.5. B grubu suya doymunluk oranı ve zemin emme ilişkisi .....	62

Şekil 4.6. C grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	63
Şekil 4.7. C grubu için ıslak özkütle - zemin emme kapasitesi ilişkisi.....	63
Şekil 4.8. C grubu için boşluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	64
Şekil 4.9. D grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	65
Şekil 4.10. D grubu için kuru özkütle - zemin emme kapasitesi ilişkisi.....	65
Şekil 4.11. D grubu için boşluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	66
Şekil 4.12. D grubu için suya doygunluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	66
Şekil 4.13. E grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi.....	67
Şekil 4.14. E grubu suya doygunluk–zemin emme ilişkisi .....	68
Şekil 4.15. F grubu kuru özkütle ve zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	69
Şekil 4.16. F grubu ıslak özkütle ve zemin emme ilişkisi.....	69
Şekil 4.17. G grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	70
Şekil 4.18. G grubu farklı ıslak özkütlerine göre zemin emme değerleri .....	71
Şekil 4.19. G grubu için boşluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	71
Şekil 4.20. H grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	72
Şekil 4.21. H grubu için kuru özkütle - zemin emme kapasitesi ilişkisi.....	73
Şekil 4.22. H grubu için boranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi.....	73
Şekil 4.23. H grubu için suya doygunluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi .....	74

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Üç farklı metodun toplam emme bulgularının karşılaştırılması .....	34
Tablo 3.1. Zemin örneklerinin fiziksel özelliklerine göre gruplandırması (a) %10 ZBK (b) %20 ZBK.....	38
Tablo 3.2. Test edilen zemin örneklerinin özellikleri .....	39
Tablo 3.3. Normal eğri alanları tablosu.....	52
Tablo 3.4. Deneyin tekrarlanması halinde elde edilen $\Delta p/s$ değerleri.....	53
Tablo 4.1. %10 ZBK'in toplam emme basınçlarının değişimi .....	54
Tablo 4.2. %10 ZBK'in matris emme basınçlarının değişimi .....	55
Tablo 4.3. %20 ZBK'in toplam emme basınçlarının değişimi .....	55
Tablo 4.4. %20 ZBK'in matris emme basınçlarının değişimi .....	55
Tablo 4.5. A ve E grubu total emme %10 hata bandı ile tekrar sayısı.....	56
Tablo 4.6. A ve E grubu matris emme %10 hata bandı ile tekrar sayısı .....	57
Tablo 4.7. A Grubu %10 ZBK'in total emme basıncı değerleri .....	59
Tablo 4.8. A Grubu %10 ZBK'in matris emme basıncı değerleri .....	59
Tablo 4.9. B grubunun toplam ve matris emme değerleri.....	61
Tablo 4.10. C grubunun toplam ve matris emme değerleri.....	62
Tablo 4.11. D grubunun toplam ve matris emme değerleri .....	64
Tablo 4.12. E grubunun toplam emme değerleri.....	67
Tablo 4.13. E grubunun matris emme değerleri.....	67
Tablo 4.14. F Grubunun toplam ve matris Emme Değerleri.....	68
Tablo 4.15. G grubunun toplam ve matris emme değerleri .....	70
Tablo 4.16. H grubunun toplam ve matris emme değerleri .....	72

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince çok büyük emeği olan, her zaman bana destek veren ve yanımda olan danışmanım, değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Seda DURUKAN'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında değerli görüşlerinden yararlandığım hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ender BAŞARI ve Yrd. Doç. Dr. Hasan Fırat PULAT hocalarıma, deneysel çalışmalarımda bana vakit ayırmaktan hiçbir zaman kaçınmayan Öğretmen H.Çağkan KELEŞ'e ve İnşaat Mühendisi Ayşe AKINCI'ya teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup beni destekleyen annem Gülsün AKINCI ve ailemin diğer fertlerine teşekkür ederim.

İnşaat Mühendisi

Gül AKINCI

İzmir-2017

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

#### Filtre Kâğıdı Yönteminin Killi Karışımlarda Güvenilirliğinin Araştırılması

Gül AKINCI

Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Seda DURUKAN

Doygun olmayan zeminlerde gerilme durumunun değişmesine neden olan önemli faktörlerin biri de zeminlerin emme basıncının değişmesidir. Zemin gerilmelerindeki değişim zeminlerin taşıma gücünü, kayma mukavemetini, hacimsel deformasyonu, yanıl toprak basınçlarını ve şev duraylılığını önemli derecede etkiler. Bu yüzden, zeminlerin emme davranışlarının araştırılması ve doğru olarak tayin edilmesi olası zararlara karşı önemli derecede önlem sağlayacaktır. Bu çalışmada da emme basıncını tayin etmede kullanılan bir laboratuvar deneyi olan filtre kağıdı metodunun, sıkıştırılmış zeolit bentonit karışımlarında emme basıncı ölçümündeki güvenilirliği ve farklı özelliklerde hazırlanmış karışımların emme basıncı değerleri araştırılmıştır. Zemin numuneleri, karışımın toplam ağırlığına göre %10 ve %20 bentonit içermek üzere iki ana grupta incelenmiştir ve zemin indeks özelliklerindeki farklılıklara göre tekrar kendi içlerinde 4'er alt gruba ayrılmıştır. Zeminlerin emme basıncı değerleri ile su içeriği, özkütle, suya doygunluk oranı gibi indeks özellikleri arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur. Aynı zamanda filtre kağıdı tekniğinin %10 ve %20 zeolit bentonit karışımlarında güvenilirliği istatistiksel olarak araştırılmıştır ve literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneyin %95 güven aralığında  $\pm\%10$  hata payı için gerekli olan minimum deney tekrar sayısı hesaplanmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Filtre Kâğıdı Yöntemi, Emme Basıncı, Killi Karışımlar

2017, 99 sayfa

## **ABSTRACT**

**Master's Thesis**

**Investigation of the Reliability of Filter Paper Method on Clay Mixtures**

**Gül AKINCI**

**Celal Bayar University  
Civil Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Seda DURUKAN**

One of the important factors that changes the tension in unsaturated soils is the change in suction pressure of the soils. The change in soil stresses significantly influences the bearing capacity, shear strength, volumetric deformation, lateral soil pressures and slope stability. Therefore, it became so important to investigate the suction behavior and to measure suction accurately and reliably in order to prevent such related damages. In this study, the suction values of the zeolite bentonite mixtures having different properties were investigated and the reliability of the filter paper method, which is a laboratory test used for determination of the suction pressure, on zeolite bentonite mixtures was also studied. Soil samples containing 10% and 20% bentonite were investigated in two main groups based on total weight of the mixture. These two main group mixtures are divided into 4 sub-groups according to their varying soil index properties. The relation between the suction pressure values and the index properties such as water content, density and degree of saturation values of the soil were determined. Also, the reliability of filter paper technique for 10% and 20% zeolite bentonite mixtures was statistically explored and compared with the literature findings. The minimum number of experiments for  $\pm 10\%$  accuracy band in 95% confidence level were determined.

**Keywords:** Filter Paper Method, Suction , Clay Mixtures

**2017, 99 pages**

## 1. GİRİŞ

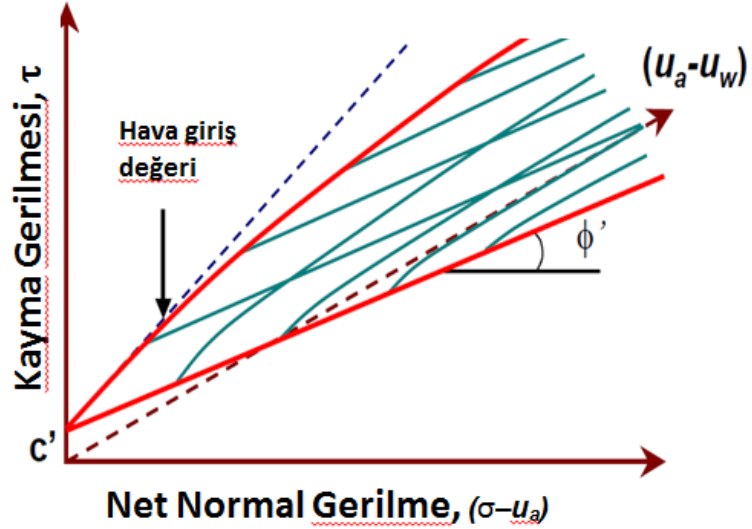
Zeminler üç fazlı yapıda; su, hava ve danelerden oluşur. Zemin bünyesinin boşluklarında su ve hava bulunur. Bu boşluklar, tamamen suyla dolu ise zemin, suya doymuş zemin; eğer bir kısmında hava bulunuyorsa da doymamış ya da suya doymuş olmayan zemin olarak isimlendirilir.

Doymuş olmayan zeminlere ilişkin birçok mühendislik problemi genellikle ortam koşullarındaki değişimlerin sonucu olarak belirtilmektedir. Bir yapı tabanında suyun birikmesi ve bunun sonucunda temel zemininin kabarması, emme basıncındaki bir azalma ile ilişkilendirilebilir. Benzer olarak doymuş olmayan bir zemin seviyesinin duraylılığı, aşırı yağışlar nedeniyle zemindeki emme gerilmelerinin azalması sonucu tehlikeye girebilmektedir [1,2].

Zeminlerde emme, zeminlerin hacim ve mukavemet özellikleri üzerinde nemin etkisini karakterize etmede kullanılabilen bir özellik olup zemin kütlelerinin fiziksel davranışının belirlenmesinde su ve zemin taneleri arasındaki etkileşimi nicel olarak tanımlamaktadır. Toplam emme, zeminin su tutma kapasitesini belirlemenin yanında, alternatif olarak aynı derinlikteki zeminin dışındaki serbest suya göre zemin suyunda bulunan serbest enerji olarak da tanımlanabilir [3,4]. Zeminlerde toplam emme kavramı, matris ve ozmotik bileşenlerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Matris emme; zemindeki suyun yüzeysel gerilme etkilerinden, su ve katyonların yüzeysel çekim kuvvetlerinden oluşmakta ve bu sebeple zeminin hacim değişimine neden olan mikro mekanizmayı oluşturmaktadır. Matris emmenin su içeriği ve sürşarj basıncına bağlı olduğu belirtilmektedir. Ozmotik emme ise zemin suyundaki çözünmüş tuzların mevcut olması nedeniyle artmaktadır. Serbest su dışında zemindeki tuzun konsantrasyonu ve türüne göre ozmotik emme serbest su ile temas geçtiğinde zeminde fiziksel değişimler meydana gelmektedir. Ozmotik emme, sürşarj basıncı ve zemin suyundaki iyon konsantrasyonu sabit olduğu sürece su içeriğine bağlı olmamaktadır [4,5,6,7,8,9].

Zemin emmesi, havaalanı, karayolu v.s. kaplamaları altında dolgu olarak kullanılan, doymuş olmayan zeminlerin çeşitli mühendislik özelliklerini de

doğrudan etkilemektedir. Özellikle doymun olmayan zeminlerin mekanik davranışlarını belirlemek için bu zeminlerin emme özellikleri doğru şekilde belirlenmelidir. [4,5,9,10,]. Doymun olmayan zeminlerde gerilme durumunun değişimi direkt olarak matris emme ile ilişkilendirilebilir [1,6,7,11,12,]. Doymun olmayan zeminlerde kayma mukavemetine karşı emme doğrusal değildir ve matris emmesi ne kadar doğru ölçülebilirse efektif gerilmeleri de o kadar doğru ölçülebilmektedir. Aşağıda Şekil 1.1’de matris emme basıncındaki değişime göre kayma mukavemeti parametreleri ve kayma davranışındaki değişim görülmektedir.



Şekil 1.1. Normal Gerilme Altındaki Kayma gerilmesinde Değişim [5].

Eşitlik 1.1 ve Eşitlik 1.2’de ise suya doymun olmayan zeminlerin mukavemet parametreleri, su boşluk basınçları arasındaki ilişki görülmektedir.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1.1)$$

$\sigma'$  = Efektif gerilme

$\chi$  = Suya doymunluğa bağlı parametre

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (1.2)$$

$\tau$  = kayma gerilmesi



$c'$  = efektif kohezyon

$\phi'$  = efektif iç sürtünme açısı

$u_w$  = boşluk suyu basıncı

$u_a$  = hava basıncı

$u_a - u_w$  = matris emme

$\sigma_n$  = normal gerilme

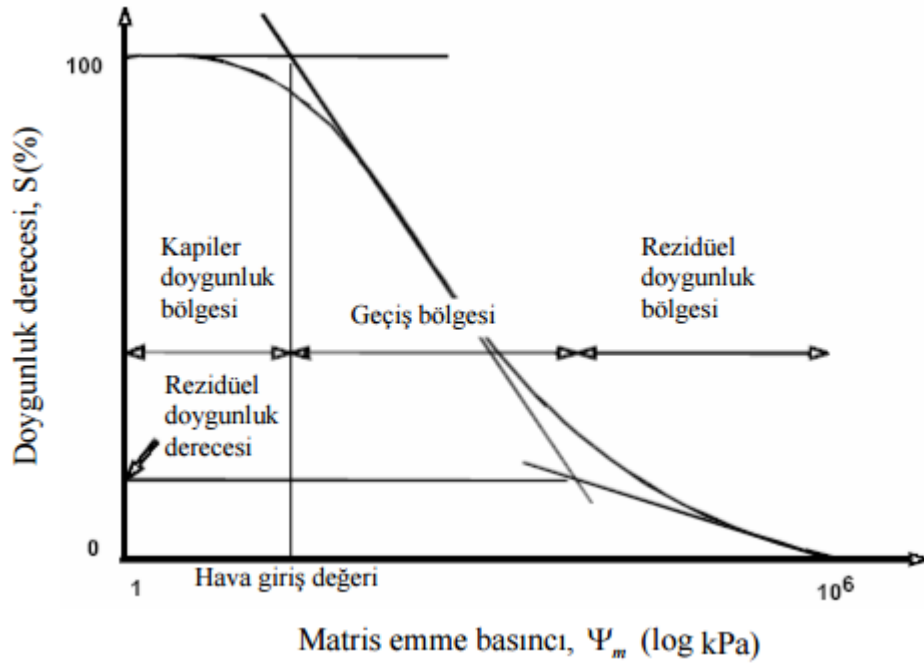
$\phi_b$  = matris emmedeki değişime kıyasla kayma gerilmesindeki artış oranını belirleyen açı.

Vanapalli ve ark. (1996) doymamış zeminin kayma mukavemeti ile zemin-su karakteristik eğrisi arasındaki ilişkiyi matris emme açısından değerlendirmişlerdir. Kayma mukavemetinin zemin emme cinsinden öngörülmesi amacıyla deneysel, analitik bir model geliştirilmiştir. Bu model doğrultusunda belirlenen kayma mukavemeti, buzul zemine ilişkin verilerle karşılaştırılmıştır. Kompaksiyon optimum su içeriğinin kuru tarafı, kendisi ve yağ tarafı olmak üzere üç farklı su içeriği ve yoğunluk başlangıç değerlerine sahip sıkıştırılmış örnekler hazırlanmış ve örneklerle çeşitli net normal gerilemeler ve matris emme uygulanmıştır. Araştırma sonucunda doymamış zeminlerde öngörülen ve ölçümlenen kayma mukavemetleri arasında anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir [13].

Pan ve ark. (2010) zemin emmesinin su yüzeyi üzerinde bulunan tüm zeminlerde olabileceğini ve doymamış zeminlerin nem-gerilme durumunu açıklayan en önemli parametrelerden biri emme gerilmesi olduğunu ifade etmişlerdir. Doymamış zemin mekaniği uygulamalarının efektif ve gerçek gerilme değerlerini öngörebilmek ve örneklerin kalitesini değerlendirmek amacıyla emmenin laboratuvar ölçümlerinin faydalı olacağını savunmuşlardır. Çalışmalarında zemin emmesi ölçümleri için direkt veya dolaylı yollardan ölçüm metodlarını araştırmışlardır. Doğrudan emme ölçümleri tekniklerinin başlıcalarının eksen kaydırma tekniği ve tansiyometre olduğunu, dolaylı ölçüm teknikleri ise saykometri, chilled-mirror hidrometrisi ve filtre kağıdı metodudur. Zemin emme ölçümü tekniklerinin kendilerine ait avantajları olduğu ifade etmişlerdir [14].

Bai ve Liu (2012) doymamış zeminlerde kayma mukavemeti ölçümünü elde etmek amacıyla filtre kâğıdı metodu ile geleneksel direkt kesme testinin bir kombinasyonunu önermektedirler. Bu yaklaşımın fizibilitesi geniş zeminler aracılığıyla gösterilmiştir. Öncelikle zemin-su karakteristik eğrisinin belirlenmesi amacıyla filtre kâğıdı metodu kullanılmış ve ardından zeminin kesme mukavemetinin ölçülmesi amacıyla birkaç geleneksel direkt kesme testi yürütülmüştür. Zeminin matris emmesi zeminin su içeriği baz alınan zemin-su karakteristik eğrisinden öngörülmüştür. Zeminin doygun hale yaklaşması durumunda doymamış kesme mukavemeti parametresinin etkin sürtünme açısına eşit olduğu ve zemin kuru hale geldikçe kesme mukavemeti parametresinin azaldığı tespit edilmiştir[15].

Doygun olmayan zeminlerin herhangi bir doygunluk derecesindeki permeabilite katsayısı, kayma mukavemeti, hacimsel deformasyonu, boşluk boyutu dağılımı, herhangi bir emme değerinde boşluklarda tutulan su miktarı gibi birçok özellik zemin su karakteristik eğrisi yardımı ile elde edilebilmektedir. Doygun bir zeminin kuruma aşamalarını gösteren tipik bir zemin su karakteristik eğrisinin tamamının deneysel olarak çizilebilmesi için kapasitelerine göre birkaç farklı emme ölçüm metodunun birlikte kullanılması gerekmektedir. Eğride kapiler doygunluk bölgesi, kuruma (geçiş) bölgesi ve rezidüel doygunluk bölgeleri olmak üzere üç kısım bulunmaktadır (Şekil 1.2) [16].



**Şekil 1.2.** Doygun bir zeminde tipik bir zemin su karakteristik eğrisi [16].

Zemin gerilmelerindeki değişim zeminlerin taşıma gücünü, permeabilitesini, kayma mukavemetini, hacimsel deformasyonu, yanıl toprak basınçlarını ve şev duraylılığını önemli derecede etkiler. Bu yüzden zeminlerin emme davranışlarının araştırılması ve doğru olarak tayin edilmesi mukavemet parametrelerinin de doğru olarak tayininde önemli ölçüde rol oynar. Bu çalışmada da, sıkıştırılmış geçirimsiz tabaka olarak kullanılacak zeminlerin emme basınçları incelenmiştir. Sıkıştırılmış zeminler doğaları gereği suya doygun değildirler ve mukavemet parametreleri, permeabilite özellikleri gibi karakteristikleri de emme değerlerine doğrudan bağlıdır.

Günümüzde sıkıştırılmış tabakalar genellikle dolgu malzemesi olarak ya da çöp alanlarının altında geçirimsiz tabaka oluşturacak şekilde kullanılmaktadır. Bu geçirimsiz tabakalar ise ya sadece killi karışımlardan oluşmakta ya da sentetik geçirimsiz malzemelerle (geosentetik kil tabakalar, geomembranlar gibi) desteklenmektedir. Killi karışımlar genellikle kum-kil karışımlarından oluşmakta, bununla beraber, son yıllarda özellikle Türk araştırmacıların önderliğinde zeolit-kil karışımları da önerilmektedir. Karışımlarda kil olarak genellikle bentonit

seçilmekte ve karışımın kuru ağırlığının %10-20'si aralığında bentonit kullanılmaktadır [17,18,19,20,21,22,23]. Kum bentonit karışımlarının (KBK) emme özellikleri hakkında literatürde oldukça fazla araştırma bulunmasına [10,16,24,25,26,27] rağmen; zeolit bentonit karışımlarının (ZBK) emme özellikleri ile ilgili çalışma oldukça seyrek [28,29].

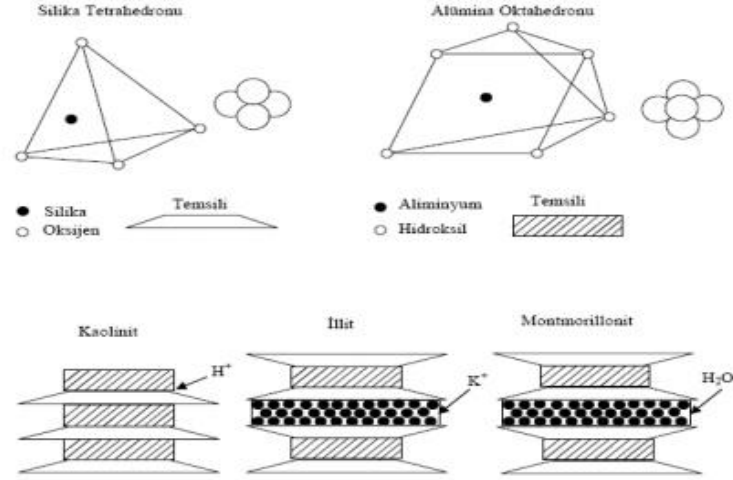
Bu çalışmada da, literatürde önerilen ZBK'ların emme karakteristiklerinin araştırılması ve güvenli bir ölçüm için en az kaç deney yapılması gerektiğinin ortaya koyulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, ZBK'ların emme davranışı araştırılmış ve yöntem olarak da filtre kağıdı yöntemi uygulanmıştır. Toplam kuru ağırlığın %10'u ve %20'si bentonit olacak şekilde sıkıştırılmış ZBK'ların 4 farklı grupta (farklı su içeriğine ve farklı boşluk oranlarına, farklı suya doygunluk oranlarına ve farklı özkütlelerine sahip hallerinin) zemin numunesinin emme sonuçları değerlendirilmiştir.

Zeminler, poroz ortamlar olduğu ifade edilmektedir ve cismin yapısı ve davranışı ile bağlantılıdır. Poroz bir cisimde, yüzey ile ilişkisi olan açık gözenek çok fazla iken, yüzeyle ilişkisi olmayan kapalı gözeneklerin de olduğu belirtilmiştir. Poroz bir cisimde mikro, mezo ve makro gözenekler bir arada bulunmaktadır. Bazı zeminlerde mikro, bazı zeminlerde mezo ve bazılarında ise makro gözenekler çoğunlukta bulunabilmektedir. Zeolitlerin kafes şeklindeki mikro boşluklu yapısı, iyon değişim ve kimyasal reaksiyonlar için geniş iç ve dış yüzey alanı olması zemin emme açısından uygun bir malzeme olmasına olanak sunmaktadır [30].

Zeolitler kafes yapılarında silis ve oksijen içermektedir. Gözeneklerinde kation ve su içeren mikro gözenekli kristal katılardır. Silis ve alüminyum atomları ortak oksijen atomu sayesinde birbirine tetrahedral olarak bağlanmıştır [31]. Zeolit mineralleri iyon değişimi ve adsorbsiyon özellikleri sayesinde kirlilik kontrolünde daha çok kullanılmaktadır. Sudaki radyoaktif atıkların tutulması, atık sularındaki metal iyonların ve azot bileşiklerin tutulmasında, baca gazlarının absorplanmasında, petrol sızıntılarının temizlenmesinde, çöp depolamada ve oksijen üretiminde zeolitler kullanılmaktadır.

Zeolitler, sulu alümina-silikat minerallerinin temel bir grubu olarak ifade edilmektedir. Zeolitler, genellikle 100°C altındaki sıcaklıklarda değişime uğramayan katyon ve su molekülleri ile dolu kanalları içeren açık bir alüminosilikat yapısındadırlar. Bilinen 34 doğal zeolitin aynı tür içinde bile geniş bir kompozisyonel değişim gösterdiği ifade edilmektedir. Bu değişkenlik farklı basınç-sıcaklık koşulları, orijinal malzemenin kimyası ve gözenek suyu gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır. Doğal zeolitlerin açık yapısı moleküler eleme, katyon değişimi ve katalitik davranışları da dahil olmak üzere çok çeşitli teknolojik ve ilgi çekici özelliklerin oluşmasını sağlamaktadır [18]. Ticari olarak kullanıldığı bilinen beş çeşit zeolit belirlenmiştir. Bu zeolitler klinoptilolit, kabazit, mordenit, erionit ve filipsit olarak sıralanmaktadır. Doğal zeolitler dünyanın birçok yerinde kaya formunda mineraller şeklinde bulunmaktadır ve Türkiye de Bigadiç rezervleri başta olmak üzere geniş rezervlere sahiptir [32,33,34].

Kil, doğal olarak kayaların kimyasal ayrışmasından oluşan ve doğada fazla miktarda bulunan minerallerden birisi olarak tanımlanmaktadır. Kil mineralleri kaya formundaki minerallerin kimyasal ayrışmasından meydana gelen çok ince ( $\leq 0,002$  mm) kristalimsi elementler olup yalnızca taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görülebilirler. Kilin yapısında bulunan bileşenler silisyum oksit ve alüminyum oksit bileşikleridir [35]. Kil mineralleri; silikatlar, metal oksitler, hidroksitler ve oksisoksitler, amorf ve alofanlar, kristalli zincir silikatlar olmak üzere dört ana grupta toplanmaktadır. Birçok kil minerali vardır. Bunlardan başlıcaları; kaolinit, halloysit, montmorillonit, illit ve vermikülittir. (Şekil 1.3)



**Şekil 1.3.** Değişik kil minerallerinin yapısı

Killi zemin bileşenleri kil mineralleriyle bazı diğer minerallerden oluşmaktadır. Bu zeminler kohezyonlu ve plastisitesi olan bir zeminlerdir. Killer elektrokimyasal olarak çok aktiftirler. Bir zemin kütlesi içinde az miktar bile olsa kil minerallerinin barındırması o kütlenin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Zeminin davranışı kil miktarı arttıkça kilin özellikleri tarafından kontrol edilmektedir [23].

Killer geoteknik mühendisleri tarafından birçok uygulamada kullanılmaktadır. Dolgu barajlarda geçirimsizliğin sağlanması, göletlerin su tutması ve kazıldığında kendini tutamayan zeminlere destek sağlamak amacıyla kullanılmaktadır [23]. Kil sadece inşaat mühendisinin ve jeologların ilgilendiği bir ortam değil, tarım, ormancılık, seramik endüstrisi ve tıpta da önemli bir endüstriyel gereçtir.

Kilin fiziksel özellikleri zeminlerle ilişkili disiplinlerde oldukça önemlidir. Zeminlerdeki aktif kil materyali, özellikle küçük organik materyallerle kombine edildiğinde zemin yapısında büyük etkiler oluşturabilmektedir. Kil içeriğinin az olduğu zeminlerde kum ve siltin dominant olduğu, birçok gözenğin geniş ve sürekli halde bulunarak su ve havanın rahatça hareket edebileceği belirtilmiştir. Geoteknik açıdan killerin oturma, şişme gibi özellikleri nedeniyle sorunlu zeminler arasında yer aldığı belirtilmektedir. Ancak, killer bu olumsuz yönlerinin

yanında düşük geçirimsizlik katsayıları ve adsorpsiyon özelliklerinden dolayı da geçirimsizlik elemanı olarak birçok inşaat mühendisliği uygulamasında (dolgu barajlarda kil çekirdek, katı atık depolarında kil şilte, vb.) yaygın olarak kullanılmaktadırlar [35].

Bentonit ise, montmorillonit grubunun bir parçasıdır ve oldukça yüksek likit limite (%400 ve daha büyük) sahip bir kil mineralidir. Alüminyum ve magnezyum içeriği zengin olan volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışmasıyla veya bozulması oluşurlar. Ticari anlamda ise kolloidal özelliği olan ve gelişmiş sıvı emici özelliği olan her kile bentonit denmektedir [36,37,38].

Bentonitler su ile temasa geçtiklerinde göreceli olarak az yada çok şişerler. Bentonitler şişme yeteneklerine göre üç gruba ayrılmaktadır, fazla, orta ve az şişen bentonitler ve içerdikleri değişebilir sodyum, kalsiyum gibi iyonlarına göre de sınıflandırılabilirler. Bentonitlerin oluşumları bakımından jeolojik özellikleri farklılık göstermektedir ve ticari olarak önemi bulunan bentonitte sodyum bentonittir. Fakat sodyum bentonitin (Na-bentonit) doğada rezervi az bulunmaktadır. Bu sebeple göreceli olarak daha az şişme özelliği gösteren kalsiyum ve sodyum-kalsiyum bentonitler çeşitli kimyasal yöntemlerle Na-bentonite dönüştürülmektedir [36]. Son yıllarda Na-bentonitler zeolitlerle birlikte bir karışım oluşturacak biçimde geçirimsiz tabaka kullanımı için önerilmiştir [18,19,20,21,22]. Zeolit ve bentonitin karışım içinde olduğunda emme konusunda bir yarış halinde olduğu düşünülebilir. Bu durum, karışımdaki her zemin için su içeriği dağılımını da değiştirilebilir.

Bu çalışmada, literatürde geçirimsiz tabaka olarak olarak önerilmiş ZBK'ların emme karakteristikleri araştırılmış olup, filtre kâğıdı yöntemi ile belirlenmiş olan bu değerlerin güvenilirliği sorgulanmıştır. Bununla beraber, deneyin %95 güven aralığında  $\pm\%10$  hata payı için gerekli olan minimum deney tekrar sayısı belirlenmiştir. Deneyler, kuru bentonit ağırlığının karışımın toplam kuru ağırlığına göre oranı %10 ve %20 olacak numunelerle yürütülmüştür. Deney numuneleri farklı indeks özelliklerinde (su içeriği, özkütleleri, suya doygunluk oranları ve boşluk oranları) hazırlanıp sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada

literatür özeti sunulduktan sonra kullanılan malzeme ve metodlarla ilgili ayrıntılı bilgi verilmiş ve ardından bulgular sunulmuştur. Bulgular ışığında ulaşılan sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.





## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Zeminlerde Emme Olgusu

Boşluk suyunun, zemindeki önemi ile ilişkili araştırmaların çoğu 1800'lerin sonunda zemin fizikçileri ve ziraatçiler tarafından çalışılmaya başlanmış ve daha sonra mühendisliğe geçmiştir. İnşaat mühendisliğinde boşluk suyunun zemin davranışı üzerindeki önemini ortaya koyan ilk çalışmalar, İngilterede karayolu araştırma laboratuvarında Croney ve ark. (1948, 1950) tarafından yapılmıştır [39,40,41] .

Zemin emmesini belirlemeden önce bunun tanımı hakkında farklı araştırmacılar çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Ridley (1993) çalışmasında toplam emmeyi, buharlaşma yoluyla zemin matrisinden bir su molekülünü çıkarmak için gerekli enerjinin ölçümü olarak tanımlamıştır [42].

#### 2.1.1. Toplam Emme

Toplam zemin emmesi, serbest suyun referans potansiyeline göre zemin gözenek suyunun termodinamik enerjisi olarak ifade edilmektedir. Bu enerji, suyun kısmi buhar basıncı açısından şu şekilde formüle edilmiştir:

$$\psi = -\frac{RT}{v_{w0} w_v} \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad (2.1)$$

Bu formülde;

$\psi$ : toplam emme (kPa)

R: evrensel gaz sabiti (8.310432 J/mol K)

T: mutlak sıcaklık (K)

$v_{w0}$ : suyun özgül hacmi ( $m^3/kg$ )

$w_v$ : su buharının molekül ağırlığı (18.016 kg/mol)

$u_v$ : gözenek-su buharının kısmi basıncı (kPa)

$u_{v0}$ : aynı basınçta düz bir su yüzeyindeki su buharının doymuluk basıncı (kPa) olarak ifade edilmiştir. Bu nedenle eşitlik şu hale gelmektedir:

$$\psi = -135.022 \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad (2.2)$$

Zemin emmesi matris emme ( $u_a - u_w$ ) ve ozmotik emme ( $\pi$ ) olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir (s.4-5) [12].

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

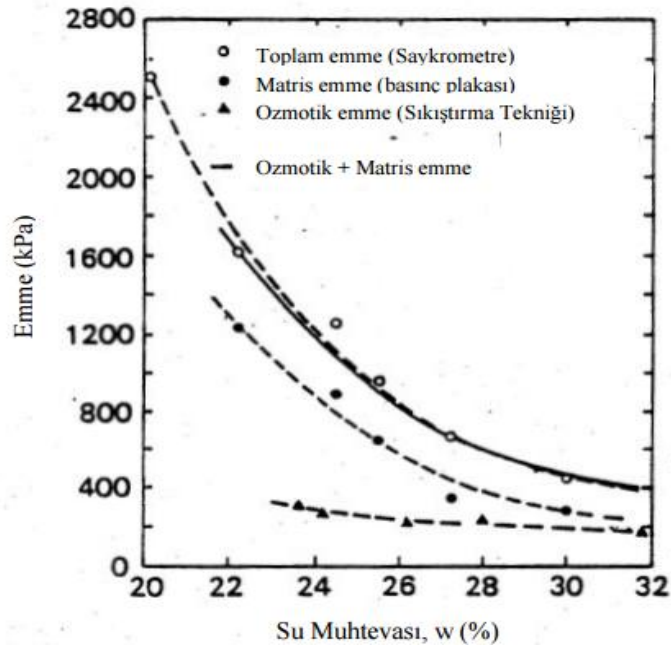
$\Psi_m = (u_a - u_w)$  olarak gösterilen matris emme formülünde;

$\Psi_m$ : Matris emme,

$u_a$ : Boşluk hava basıncı,

$u_w$ : Boşluk su basıncı olarak belirtilmektedir.

Krahn ve Fredlund (1972) killi zemin üzerinde yürüttükleri çalışmada toplam, matris ve ozmotik emme değerlerini ölçerek bunların zemin su içeriği ile ilişkisini ortaya koymuşlardır(Şekil 2.1) [41].



Şekil 2.1. Killi zeminde toplam, matris ve ozmotik emme değerleri [41]

### **2.1.2. Matris Emme**

Matris emme kavramı, boşluk hava basıncı ile boşluk su basıncı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Toplam emmenin bir bileşeni olan matris emmenin relatif nemde bir azalmaya sebep olduğu ifade edilmektedir[43].

Emmedeki değişim, zemin kütlelerinin tüm dengesini etkilemektedir. Emmedeki değişimler, zemin emmesinin matris ve ozmotik bileşenlerinin biri ya da her ikisinin değişimlerinin bir sonucu olabilir. Çevresel değişimlere bağlı olarak matris emme zamanla değişiklik gösterebilmektedir. Doygun olmayan zeminler ile ilgili birçok mühendislik problemi genellikle çevre koşullarındaki değişimlerin sonucudur. Bir yapı tabanında suyun birikmesi ve bunun sonucunda temel zemininin kabarması, matris emmedeki bir azalmanın sonucu olabilir. Benzer olarak doygun olmayan bir zemin şevinin duraylılığı, aşırı yağışlar nedeniyle zemindeki emme gerilmelerinin azalması sonucu tehlikeye girebilmektedir. Bu değişimler öncelikle matris emme bileşenini etkilemektedir [5].

### **2.1.3. Ozmotik Emme**

Ozmotik emme hem doygun hem de doygun olmayan zeminlerde bulunan boşluk suyundaki tuz konsantrasyonu ile ilişkilidir. Bu nedenle, ozmotik emme değişimleri bir zeminin mekanik davranışlarını etkilemektedir. Eğer bir zemindeki tuz konsantrasyonları değişirse, o zeminin kayma gerilmeleri ve tüm hacminde bir değişim meydana geleceği ifade edilmiştir [5].

Gerçekte, çözünmüş tuzlar doygun ve doygun olmayan zeminlerin her ikisinde de mevcuttur. Bu nedenle, ozmotik emme doygun ve doygun olmayan zeminlerde eşit olarak önemlidir. Tuz konsantrasyonundaki değişimlere bağlı olarak ozmotik emmedeki değişimler zeminin mekanik davranışını etkileyecektir [43].

Zeminlerin ozmotik emmesinin belirlenmesinde şu formül kullanılmaktadır (s.9) [8].

$$\Psi_{II} = n.R.T.C \quad (2.4)$$

Formülde;

$\Psi_{II}$ : Ozmotik Emme,

n: Bir mol tuz için molekül sayısı,

R: Evrensel gaz sabiti (8.31432J/(mol K)),

T: Mutlak sıcaklık (K),

C: Çözünenlerin konsantrasyonunu temsil etmektedir.

Ozmotik emme doymuş ve doymuş olmayan zeminlerin ikisinde de mevcuttur. Bununla birlikte, ozmotik emme doymuş olmayan zeminlerde değişebilir iken doymuş zeminlerde neredeyse (zemin kimyasal kirlenmeye maruz kalmadığı sürece) sabit kalmaktadır. Zemin buharlaşma ile su kaybettiği zaman çözülmüş iyonların konsantrasyonu artmakta ve emmenin ozmotik bileşeni de artmaktadır. Boşluk suyu konsantrasyonundaki değişim kil taneleri arasındaki etkileşimi ve dolayısıyla doymamış ince taneli zeminlerin mekanik davranışını etkilemektedir. Sonuç olarak, ozmotik emme doymamış killi zeminlerde değişken potansiyel gerilme olarak dikkate alınabilmektedir[44].

Toplam emmenin bileşeni olan ozmotik emmenin değerlendirilmesi, matris ve toplam emme ölçümlerinin karşılaştırılabilmesi için önemlidir. Killi zeminlerin su tutma eğrileri belirlendiğinde, bütün emme aralığını gözlemlemek için birden fazla teknik gerekmektedir. Düşük emme aralığında ölçüm teknikleri genellikle serbest suyun çıkışına dayandırılır ve matris emme ölçülmektedir. Yüksek emme aralığında, ölçme teknikleri buharın uzaklaşmasına dayandırılmakta ve emmenin toplam bileşenleri ölçülmektedir. Emmenin tüm aralıkları üzerinde su tutma eğrisi takip edildiğinde, ozmotik emmenin değerlendirilmesinde matris ve toplam emme ölçümlerini karşılaştırmak için gereklidir [44].

## **2.2. Zeminlerde Emmenin Ölçülmesi**

Zemin emmesi tansiyometreler, basınç plakası vb. gibi doğrudan ölçüm yöntemleri veya filtre kâğıdı metodu, saykrometre tekniği, elektriksel ve termal iletkenlik ölçerler gibi dolaylı ölçüm yöntemleri olmak üzere pek çok yöntemle belirlenebilmektedir. Ancak her yöntemin kendine özel kısıtlamaları bulunduğu ve hiçbir yöntemin tüm şartlar altında yeterli sonuç vermeyebileceği ifade edilmiştir [45].

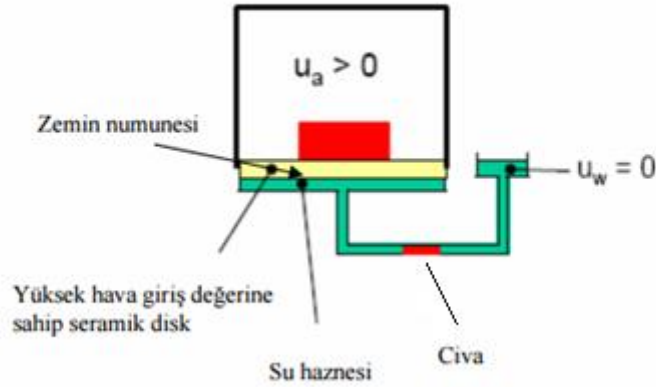
Dolaylı ölçüm aletleri çoğunlukla yüksek matris emme değerlerinin ölçülmesinde kullanılmakta ve küçük negatif basınçların ölçülmesinde daha az güvenilir olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan doğrudan ölçüm aletleri genellikle zemin su içeriğinin yüksek olduğu durumdaki daha düşük emme değerlerini ölçebilmektedir. Bu nedenle bir zeminin ıslak durumdan, çok kuru duruma kadar değişen koşullardaki tüm emme basıncı değerlerinin ölçülebilmesi için doğrudan ve dolaylı ölçüm yöntemlerinin birlikte kullanılması gerekebilmektedir. Örneğin, mevsimsel su içeriği değişimlerine bağlı olarak, bir zeminin kuru olduğu dönemde emme basınçları yüksek olacağından, doğrudan ölçüm aletleri fonksiyonlarını yerine getiremeyeceklerdir. Ancak, zeminin düşük matris emme değerlerine sahip olduğu yüksek su içeriği koşullarına dönmesi ile doğrudan ölçüm teknikleri tekrardan kullanılabilir [7].

### **2.2.1. Doğrudan Yöntemler**

#### **2.2.1.1. Eksen Dönüştürme Metodu**

Eksen dönüştürme tekniğinde Null tipi basınç plakası ölçüm aleti kullanılmaktadır. Deney süresince akışın olmaması (zemine su girişi veya zeminden su çıkışı olmaması) koşuluna dayanan eksen dönüştürme tekniği Hilf (1956) tarafından geliştirilmiştir (Şekil 2.2). Bu teknikte hava fazını su fazından ayıran, yüksek hava giriş değerine sahip bir disk kullanılmaktadır. Bu disk sayesinde zemin numunesine atmosferik basınçtan daha büyük bir basınç uygulanırken, su basıncı genellikle atmosferik basınca eşit kalmaktadır. Hava basıncı ile su basıncı arasındaki fark ise matris emme basıncını vermektedir. Böylece zemin numunesinin değişik matris emme basınçlarına karşılık gelen su

içerikleri belirlenebilir ve zemin-su karakteristik eğrileri tanımlanabilmektedir [46].

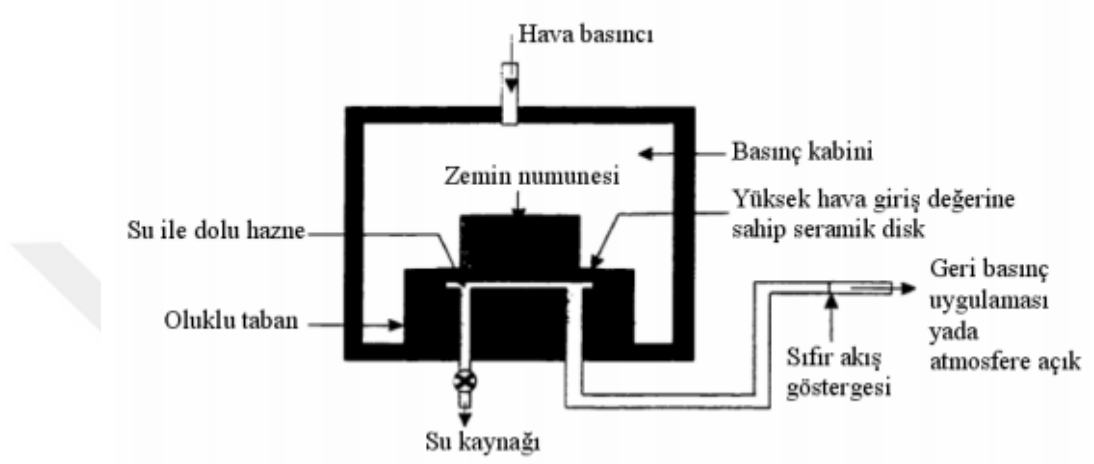


**Şekil 2.2.** Eksen dönüştürme metodu

Doygun olmayan zemin numunesi yüksek hava giriş değerine sahip olan ve önceden doygun hale getirilmiş seramik diskin üzerine yerleştirilir. Seramik diskin altındaki su ile dolu olan hazne null akış göstergesine ve basınç kontrol aletine bağlanmaktadır. Null-akış (sıfır akış) göstergesi deney süresince zeminin su içeriklerinin sabit kaldığından emin olmak için kullanılır. Hilf (1956) basınç kabindeki hava basıncı artışına eşit bir miktarda zeminin boşluk suyu basıncının da arttığını göstermiştir. Ancak sıfır akış şartları altında (akışın olmadığı durumda) değişik hava basıncı kademelerinde matris emme sabit kalmaktadır. Denge durumunda, uygulanan hava basıncı ile su haznesindeki basınç arasındaki fark matris emme basıncını vermektedir [7].

Zeminin matris emme basıncının güvenilir olarak ölçülebilmesi için sıfır - akış şartlarının sağlanması (herhangi bir akışın olmaması) önemlidir. Sıfır akış şartlarının sağlanması konusunda iki yaklaşım bulunmaktadır Bunlardan ilkinde; sıfır akış göstergesinin sabit olarak tutulmasını sağlamak için basınç kontrol ünitesini kullanarak gerektiği kadar bir geri basınç uygulamaktır (Şekil 2.3). Diğer yaklaşım ise; seramik diskin altındaki su haznesi atmosfere açıkken sıfır akış

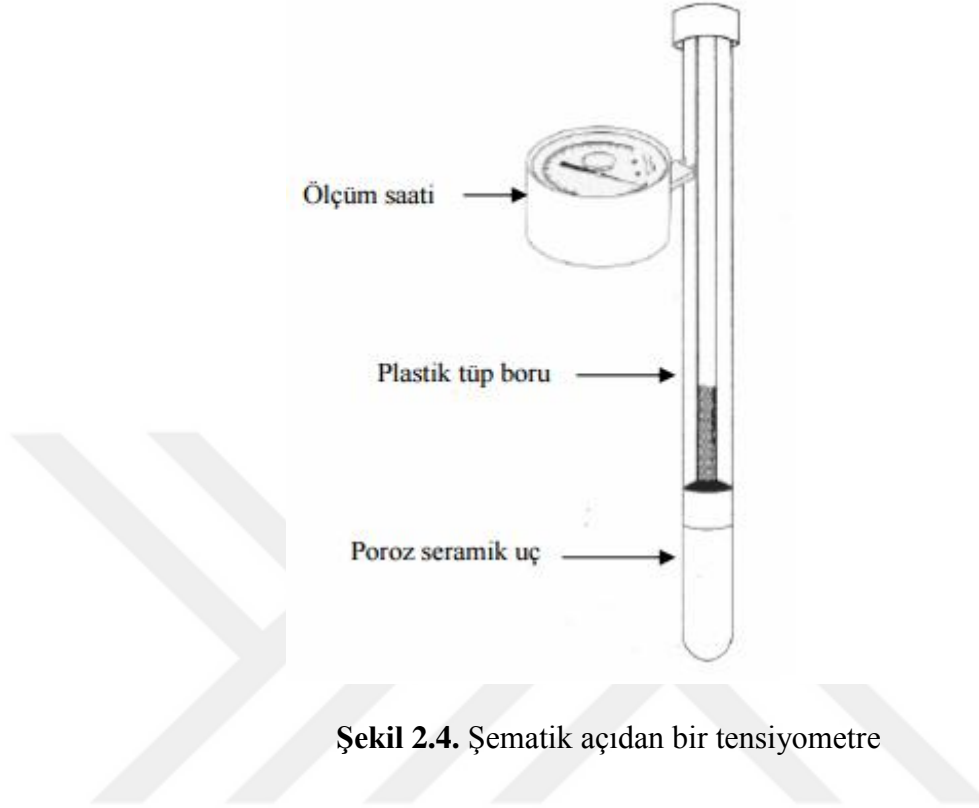
şartını sağlamak için basınç kabine uygulanan hava basıncını ayarlamaktır. Diğer önemli bir husus ise, içinde su bulunan tüm kısımlarda hiçbir şekilde hava kabarcığının kalmamasını sağlamaktır [47].



Şekil 2.3. Null tipi basınç plakasında kullanılan hücre [7].

#### 2.2.1.2. Tensiyometre

Tensiyometreler zeminlerin matris emme basıncını doğrudan ölçmek amacıyla kullanılan aletler olarak bilinmektedir. Bu aletler, içine su doldurulan ve üst kısmında sızdırmaz contalı kapağı olan plastik bir tüp boru, poroz seramik bir uç ve bir ölçüm saatinden oluşmaktadırlar (Şekil 2.4). Tüp borular zeminlerin değişik derinliklerdeki matris emme basınçlarını ölçebilmek amacıyla çeşitli uzunluklarda üretilmektedirler [7].



**Şekil 2.4.** Şematik açıdan bir tensiyometre

Tensiyometreler ölçüm almak için kurulmadan önce tüp boru havası alınmış su ile tamamen doldurulur ve poroz seramik ucun doygun hale gelmesi sağlanır. Hiç havanın kalmadığından emin olmak için bir vakum pompası kullanılarak çözülmüş durumda olan hava sistemden tahliye edilir. Daha sonra hiçbir şekilde havanın sisteme girmesine müsaade edilmeden tüp borunun üst kısmı bir contalı kapak ile vidalanarak kapatılır ve alet kullanıma hazır hale getirilir [7].

Günümüzde zeminlerin matris emme basıncını belirlemek amacıyla birçok değişik tip tensiyometre kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan başlıcaları; jet-fill tensiyometreler, small tip tensiyometreler, quick draw tensiyometreler, MIT tensiyometreler ve ozmotik tensiyometrelerdir. Bu tensiyometrelerin temel bileşenleri aynı kalmak üzere, arasındaki fark çoğunlukla zeminin emme basıncını okuma düzeneklerindeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır.



### 2.2.1.3. Emme Plakası

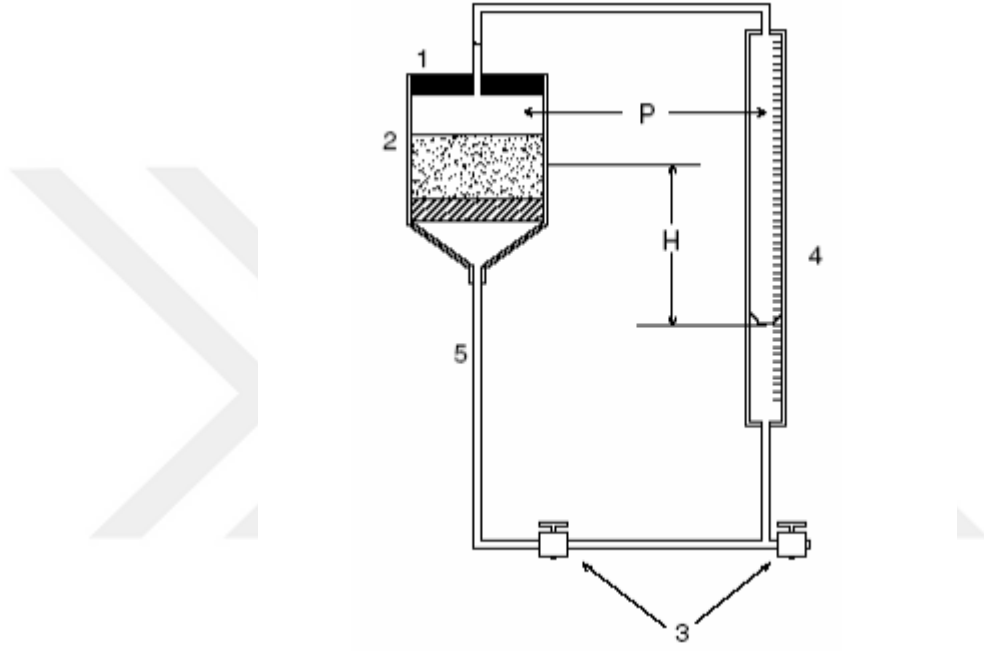
Emme plakası su haznesine açılan bir su borusuna bağlı olan suya doymun yüksek geçirgenliğe sahip poroz seramik plakadan oluşmaktadır (Şekil 2.5). Üzerinde zemin numuneleri bulunan bu seramik plakayı yükseltmek ya da alçaltmak suretiyle farklı emme basıncı değerleri oluşturulmaktadır. Bu sırada seramik plakanın bir su borusu vasıtasıyla bağlı olduğu su haznesi atmosfere açıktır. Su haznesinin içindeki su seviyesi, plakanın üst seviyesi ile aynı olduğunda sisteme uygulanan emme basıncı değeri sıfırdır. Herhangi bir emme basıncı uygulayabilmek için seramik plaka yeni bir seviyeye yükseltilmektedir. Eğer emme basıncı başlangıçta doymun olan zemin numunelerine uygulanırsa su zemin numunelerinden çıkar ve seramik plakadan geçerek hazneye doğru hareket etmektedir. Diğer taraftan emme basıncı uygulanan zemin numuneleri başlangıçta kuru ise su haznedeki numunelere doğru hareket etmektedir. Örnekler, belirli bir emme basıncı değerinde, dengeye ulaşıncaya kadar bekletilmekte ve daha sonra su içeriklerinin belirlenmesi için tartılmaktadır[48].



**Şekil 2.5.** Zemin örneklerinin 1 kPa ve 10 kPa'lık emme basıncı değerlerinde dengelenmesi

Emme plakasının bir diğer şekli seramik plaka yerine Buchner hunisinin ve su haznesi yerine de bir büretin kullanıldığı Haines aletidir (Şekil 2.6). Bu

metoda göre belirli bir emme basıncı değerinde zeminden çıkan veya zemine giren su hacmi lmelmektedir. Ancak, gerek emme plakası ve gerekse Haines aleti yüksek emme basıncılarının ölümlerinde yetersiz kalmaktadırlar. Her iki sistemin de su haznesinin ya da büretin yükseltilmesi ya da alaltılmasının uygulanabilirliği ile sınırlı olduğu belirtilmektedir [48].



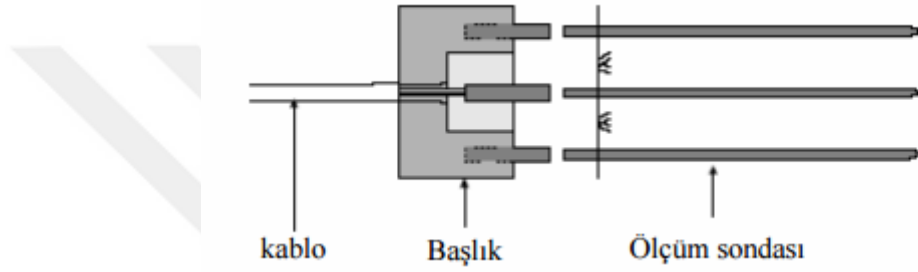
**Şekil 2.6.** Haines lm aleti (1) pvc kapak, (2) Buchner hunisi, (3) vanalar, (4) hacim bölümlü cam silindir ve (5) plastik boru

### 2.2.2. Dolaylı Yöntemler

Dolaylı lm teknikleri zeminlerin toplam, matris ve ozmotik emme basıncılarını belirlemede kullanılmaktadırlar. Bu yöntemlerle, zeminin su içeriği, yoğunlaşma noktası, bağıl nem ve ortamın sıcaklığı gibi parametrelerden faydalanarak zeminlerin emme basıncıları dolaylı olarak tespit edilmektedir [7].

### 2.2.2.1. TDR (Time Domain Reflectometry-Zaman Etkili Yansıma Ölçer)

Time domain reflectometry (TDR) metodunun yüksek hızlı iletim kablolarının test edilmesi için geliştirilmiş karmaşık bir elektronik bir yöntem olduğu ifade edilmektedir. 1970'li yıllardan itibaren zeminlerin su içeriğinin ölçülmesinde kullanılmaya başlandığı belirtilmiştir. Tipik bir TDR sisteminin; TDR aygıtı, ölçüm sondası, eş eksenli kablo ve eş eksenli kablo ile ölçüm sondasını birleştiren bir eş eksenli başlıktan oluştuğu belirtilmiştir (Şekil 2.7) [7].



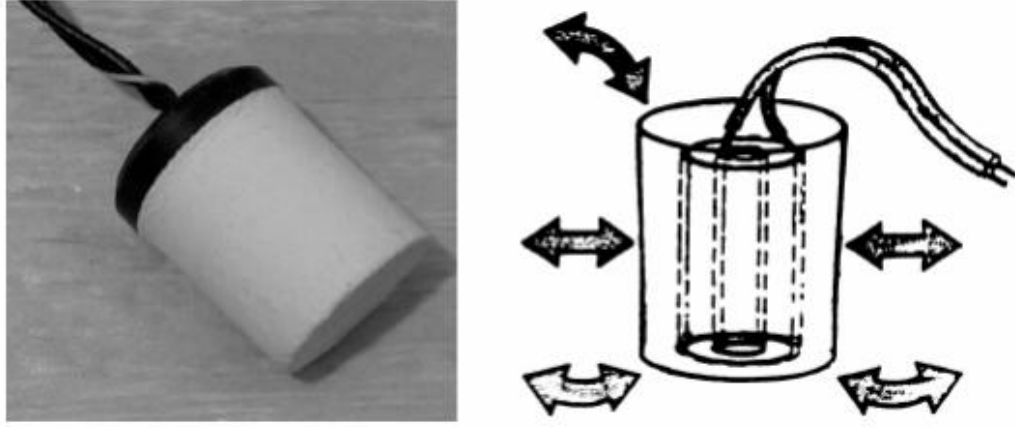
Şekil 2.7. Tipik bir TDR sistemi

TDR cihazı zeminin içinden geçen bir nakil hattı (zemin nakil hattı) boyunca bir elektromanyetik sinyal yaymaktadır. Zemin nakil hattının başından ve sonundan sinyalin yansımaları arasındaki zaman farkı zeminden geçen elektromanyetik dalga hızlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

### 2.2.2.2. Elektriksel İletkenlik Sensörleri

Poroz blok sensörlerinden biri olan elektriksel iletkenlik sensörleri, matris emme basıncının arazide ve laboratuarda dolaylı olarak ölçülmesinde kullanılan cihazlardır. Bu cihazlar 50-1500 kPa arasında doğru ölçüm yapabilmektedirler. Çalışma prensipleri ısı iletkenlik sensörlerine benzer, farkı ise ısı iletkenlik yerine elektriksel iletkenliğin ölçülmesidir. Bu tip sensörlerin içinde aynı eksenle birleştirilmiş iki adet elektrot bulunmaktadır. Cihaz, zemine yerleştirilerek zemin ile sensör arasındaki basınç dengelendikten sonra elektrotlardan birine bir elektrik akımı gönderilmekte ve iki elektrot arasındaki direnç ölçülmektedir (Şekil 2.8). Matris emme basıncının değeri, genellikle cihazın üreticisi tarafından verilen elektriksel direnç ile matris emme basıncı arasındaki ilişkiyi tanımlayan

kalibrasyon eğrilerinden bulunabilmektedir. Kalibrasyon kartına göre, elektriksel iletkenlik sensörleri 2000 kPa'ın üzerindeki emme basıncı değerleri için de kullanılabilir ve bu durumda, bu cihazların hem arazide hem de laboratuarda birçok uygulama için kullanılması mümkün olmaktadır [45].



Şekil 2.8. Elektriksel iletkenlik sensörü

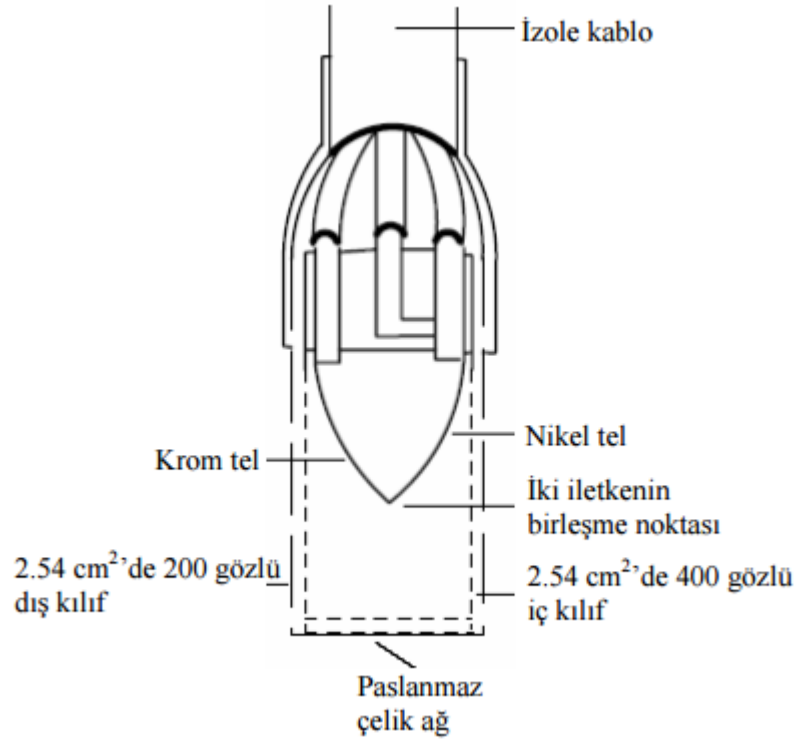
### 2.2.2.3. Saykrometreler

Saykrometreler, zemin daneleri arasındaki hava fazının bağıl nemini ölçmek suretiyle bir zeminin toplam emme basıncını bulmak için kullanılmaktadırlar (Şekil 2.9). Saykrometrelerin iki temel tipi vardır; bunlardan biri Richards ve Ogata (1958) tarafından geliştirilen wet-loop tipi saykrometreler, diğeri ise Spanner (1951) tarafından geliştirilen Peltier tipi saykrometrelerdir. Her iki tip saykrometre de buharlaşmanın olduğu ıslak yüzey ve buharlaşmanın olmadığı kuru yüzey arasındaki değişik sıcaklık ölçümleri prensibiyle çalışmaktadırlar. Bu iki farklı yüzey arasındaki sıcaklık değişimi bağıl nemle ilişkilidir [5].



**Şekil 2.9.** Bir saykrometrenin dıştan görünümü

Zemin numunelerinin emme basınçlarının belirlenmesi için öncelikle, saykrometrelerin kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla; belirli sıcaklıktaki su potansiyelleri bilinen, farklı molalitelere sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltileri kullanılmıştır. NaCl çözeltilerindeki saykrometre ölçümleri, çözeltinin ozmotik ve toplam emme eşdeğerini yansıtmaktadır. Yapılan bir çalışmada +25°C’de -13.68, -22.1, -32.10 ve -41.58 bar su potansiyellerine sahip 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9 molalitelerdeki NaCl çözeltileri kullanılmıştır. Sıcaklık ve nem kontrollü ortamda yapılan deneylerin saykrometre okumalarının stabilize olması amacıyla genellikle 3 saatlik bir sürenin yeterli olduğu belirtilmiştir. Denge sağlandıktan sonra, saykrometre voltaj ve sıcaklık okumaları yapılmış ve her bir saykrometre için, voltaj okuması-su potansiyeli grafiği çizilmiştir. Bu sayede, her bir saykrometre için spesifik kalibrasyon doğrusu elde edilmiş ve doğrunun denklemi belirlenmiştir. Bu doğrunun denklemi kullanılarak, o saykrometre için herhangi bir zeminden alınan voltaj çıktısı, zemin emmesine dönüştürülebilmektedir [49].

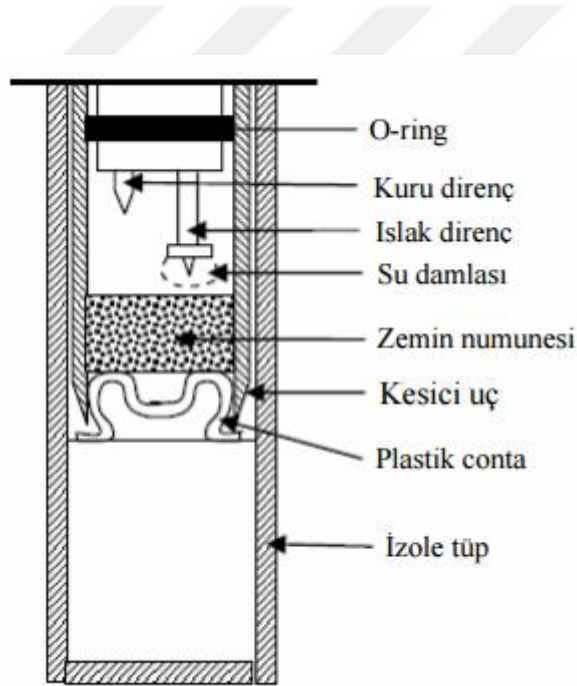


**Şekil 2.10.** Termokupl saykrometre [45]

Armanlıgil (1999) yaptığı çalışmada doymamış zeminlerdeki kesme dayanımı ile matris emme basıncı arasındaki ilişki basit test metodları kullanılarak incelenmiştir. Kesme dayanımı ölçümü için, direkt kesme deneyi; emme basıncı için ise saykrometre (thermocouple psychrometer) tekniği kullanılmıştır (Şekil 2.10). Sıkıştırılmış killerde emme basıncının, kohezyonun ve kesme dayanımı açısının optimum su içeriğinin altında ve üstündeki değişimleri incelenmiştir. Zemindeki su içeriği ve normal basınç arttırıldıkça emme basıncı azalmış, aynı zamanda kesme dayanımı artmıştır. Sıkıştırılmış kil optimum su içeriğinden kuru olan su içeriğinde granüler zemin davranışı göstermiş ve sıkıştırılmış su içeriği optimum değere yaklaştıkça kesme dayanımı açısında düşüş ve kohezyonda artış gözlenmiştir.

Transistör saykrometreler ise, Richards (1965) tarafından geliştirilmiştir. Transistör Saykrometrelerde iki eş ısı direnç kullanılır. Isıl dirençlerden biri (kuru uç) kuru kalırken, diğer ısı direnç (ıslak uç) üzerinde bir damla su olması gerekmektedir (Şekil 2.11). Su, manuel olarak dışarıdan bir damlalık vasıtasıyla

direnç üzerine damlatılır. Her iki ısıl direnç zemindeki buhar boşluğuna maruz kaldığında buharlaşma meydana gelir ve bu da elektromotor kuvvetin oluşmasına neden olur. 1 saat gibi bir zaman içinde zemin numunesi ile dengelenen boşluk hava fazının bağıl nemi ölçülür. Standart ölçüdeki bir su damlasının damlatılmasıyla, ıslak dirençteki ısının düşmesi, ölçüm ucu (prob) içinde ölçülmektedir. Ölçülen bağıl nem, zemin emme basıncını belirlemede kullanılır. Transistör saykrometreler ölçüm için kuru direnç ile ıslak direnç arasındaki ısı değişimlerini kullanırlar. Bağıl nem ise bu iki direnç arasındaki ısı değişimi ile ilişkilidir [45].

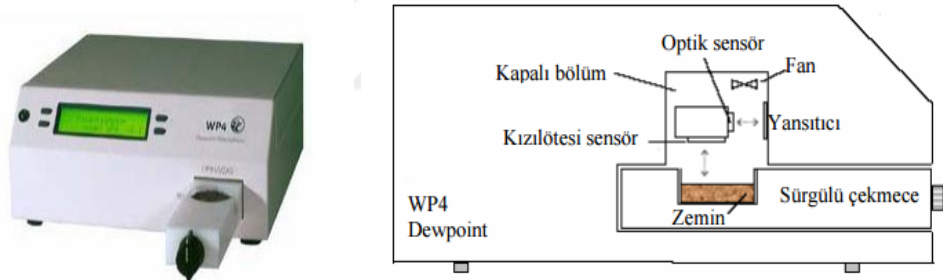


Şekil 2.11. Transistör saykrometrenin şematik görünümü [7]

#### 2.2.2.4. Chilled-Mirror Higrometreleri

Chilled-mirror higrometreler zeminlerin toplam emme basıncını belirlemede kullanılırlar. 500-30000 kPa arasında sağlıklı olarak ölçüm yapabilirler. Bu cihazlar, izole edilmiş bir tüp içinde izotermal şartlar altında bağıl nemi ölçmek için chilled mirror dew point tekniğinden faydalanırlar (Şekil 2.12) [50].

Chilled-mirror higrometreler, örnek üzerinde kalan boşluğun yoğunlaşma noktasını (dew point) ve ısını ölçmektedirler. Numune özel bir ringin içine yerleştirilmektedir. Yoğunlaşma, su buharı yoğruşmasını ilk ortaya çıktığı an tespit edebilen bir yansıtıcı kullanılarak ölçülmektedir. Yansıtıcının ısı bir termoelektrik soğutucu ile kontrol altında tutulmaktadır. Su buharı yoğruşmasının ilk ortaya çıktığı anı tespit edebilmek için yansıtıcının üzerine yöneltilmiş bir ışık kirişi kullanılmaktadır. Bir fotosel sistem, su buharı yoğunlaşmasının neden olduğu yansıtıcının yansıtma yeteneğindeki değişimi belirlemektedir. Numunenin ısının, bir kızılötesi sıcaklık sensörü vasıtasıyla ölçülen buhar boşluğunun ısıyla aynı olduğu kabul edilmektedir. Numunenin bağıl nemi yoğunlaşma ve ısı ölçümlerinden hesaplanmaktadır. Dengelenme süresini hızlandırmak için, numunenin üzerindeki buhar boşluğunda bulunan su buharının dolaşımını sağlayan bir iç fan kullanılmaktadır.



Şekil 2.12. Chilled-Mirror Higrometresi ve Şematik Görünümü [7]

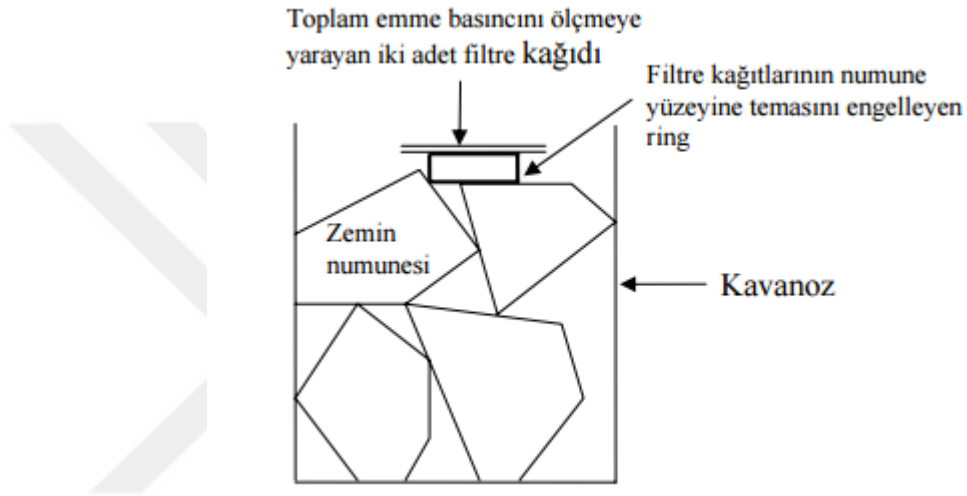
#### 2.2.2.5. Filtre Kâğıdı Metodu

Zemin emme ölçüm tekniklerinden biri olan filtre kâğıdı metodu 1920’li yıllarda Avrupa’da ortaya çıkmış ve 1937’de Gardner ile Birleşik Devletlerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu zamandan beri filtre kâğıdı metodu kullanılmakta ve pek çok araştırmaya konu olmaktadır. Farklı tür materyaller filtre kâğıdı, emme ölçüm cihazı ve farklı deneysel teknikler olarak kullanılmış, bunlarla filtre kâğıdının kalibrasyonu ve zemin örneğinin emme ölçümü yapılmıştır [4].

Filtre kâğıdı metodu, hem toplam hem de matris emme basıncının ölçülmesinde kullanılabilen ucuz ve oldukça basit bir laboratuvar deney yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Filtre kâğıdı metodu ile sağlıklı olarak 0.01–100 MPa



arasındaki emme basınçları ölçülebilmektedir [4]. Toplam emme basıncı, zemin numunesinin üst yüzeyine yerleştirilen ince bir ring üzerine üst üste konan iki adet filtre kâğıdı yardımıyla ölçülür (Şekil 2.13). Burada esas olan filtre kâğıtlarının zemin numunesine temas etmemesidir. Eğer toplam emme basıncı ile birlikte matris emme basıncı da ölçülecekse belirli formdaki zemin numuneleri kullanılmaktadır.



**Şekil 2.13.** Toplam zemin emme basıncının ölçülmesi

Matris zemin emme basıncı, zemin numunelerinin arasına yerleştirilen üç adet filtre kâğıdı kullanılarak ölçülmektedir. Burada esas olan ise filtre kâğıtlarının zemin numunelerine temas etmesidir. Bu üç filtre kâğıdından ortada olan, matris emme basıncının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Dış taraftaki diğer iki filtre kâğıdı ise, ortadaki asıl ölçüm için kullanılan filtre kâğıdına zemin danelerinin bulaşmasını önlemek için kullanılmaktadır. Koruma amaçlı kullanılan bu filtre kâğıtlarının çapı, ortadaki ölçüm amaçlı kullanılan filtre kâğıdının çapından biraz daha büyük olmalıdır [4].

### 2.3. Literatür Çalışmaları

Literatürde günümüze kadar zeminlerin belirli karışımlarına ilişkin emme basıncı ve kapasiteleri, boşluklar, su içeriği gibi konularda çalışmalar yürütülmüştür. Doygun olmayan zeminlere ait emme davranışları su içeriği ile ilişkilendirilmekte ve şişme ya da diğer yapısal sorunlar su içeriğinin değişmesinden meydana geldiği savunulmaktadır. Killi zeminlerde su içeriğine bağlı olarak hacmin artış göstermesi ve deformasyonun oluşması bu zeminlerin üzerine inşaa edilen yapılarda ekonomik kayıplara ve hatta can kayıplarına yol açabilmektedir. Sıkıştırılmış zeminlerin kullanıldığı çöp alanların altındaki geçirimsiz tabaka ya da bariyerler de doygun olmayan zeminlere bir örnektir. Bu tabakaların gerek hidrolik iletkenlik davranışları gerekse mukavemet parametreleri emme karakteristikleri ile doğrudan ilintilidir.

Çöp alanlarının altında kirleticilerin yeraltı suyuna karışmasını önlemede ihtiyaç duyulan geçirimsiz tabakalar, uzun yıllarca doğal kil zeminlerin düşük hidrolik iletkenlik özelliğinden faydalanarak çözümlenmişlerdir. Oysaki düşük hidrolik iletkenlik sağlayan killi zeminler genellikle büyük şişme-büzülme problemleri de barındırmaktadırlar. Alternatif olarak, [17] geçirimsiz doğal zeminlerin yokluğunda ya da yaşanan şişme büzülme etkilerinin azaltılması amacı ile sıkıştırılmış bentonit ve kum karışımlarının akışkanlara bariyer oluşturması için kullanılabileceğini belirtmişler ve bu karışımların hidrolik iletkenlik davranışları üzerinde çalışmışlardır. Araştırmada bentonit-kum içeriğinin etkileri, su içeriği, sistem kimyası ve değişimleri ele alınmıştır. Çalışma sonucunda; düşük hidrolik iletkenlik elde etmek için karışımdaki bentonit matrisinin sürekliliğinin gerektiği ve bunun hem yeterli bentonit içeriği hem de dağılımını gerektirdiği belirtilmiştir.

Kuru ağırlığın %20 oranına kadar bentonit içeren iyi sıkıştırılmış karışımlarda kumun destekleyici bir çerçeve oluşturduğu ve karışıma makro düzeyde boyutsal duraylılık verdiği ve şişme büzülme probleminin önüne geçtiği görülmüştür. Bununla beraber, yapılan çalışmalarda kullanılan bazı kimyasal sıvıların bentonitle zenginleştirilmiş kum ve geosentetik killerin hidrolik

iletkenlikleri üzerinde oldukça olumsuz etkileri olduğunu göstermiştir. Bu malzemelere alternatif olarak bentonitle zenginleştirilmiş zeolit karışımlarının kullanılması önerilmiş ve bu konuda bazı çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak bentonitle zenginleştirilmiş zeolitin hidrolik iletkenliğinin, bentonitle zenginleştirilmiş kumdan az da olsa, yeterli düzeyde olduğu belirlenmiş bununla beraber adsorpsiyon kapasitesinin de bentonitle zenginleştirilmiş kumdan daha yüksek olduğu ortaya konmuştur [20,21,22].

Bu çalışmada da literatürde önerilen bentonit zeolit karışımlarının emme karakteristiklerinin araştırılması ve güvenli bir ölçüm için en az kaç deney yapılmasının ortaya koyulması hedeflenmiştir. Bu hedef dorultusunda filtre kağıdı metodu ile ilgili çalışmalar başta olmak üzere literatür taraması yapılmış ve ilgili çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Doğun olmayan zeminlere ilişkin birçok mühendislik problemi genellikle ortam koşullarındaki değişimlerin sonucu olarak belirtilmektedir. Bir yapı tabanında suyun birikmesi ve bunun sonucunda temel zemininin kabarması, matris emmedeki bir azalmanın ile ilişkilendirilebilir; benzer olarak doğun olmayan bir zemin şevinin duraylılığı, aşırı yağışlar nedeniyle zemindeki emme gerilmelerinin azalması sonucu tehlikeye girebilmektedir. Bu değişimler öncelikle matris emme bileşenini tarafından etkilemektedir [5].

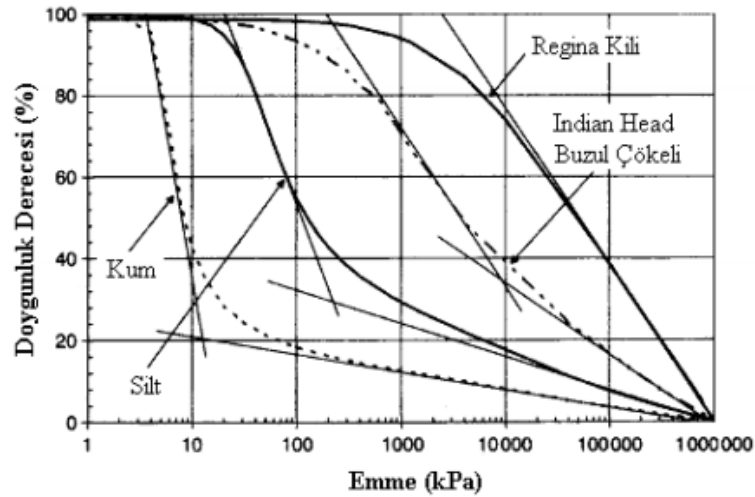
Literatürde zeminlerin emme özelliklerine ilişkin pek çok yurt dışı kaynağının bulunmasına karşın Türkiye’de bu konuda daha az çalışma bulunmaktadır. Literatürde zemin emmesi ve filtre kâğıdı yönteminin konu alındığı bazı çalışmalar şu şekilde sıralanmıştır.

Zemin emmesi kavramı, belirli su içeriğine sahip bir zeminin, boşluk suyunu adsorbe etme ve tutma potansiyelini tanımlayan fiziksel bir özellik olarak tanımlanmaktadır. Emme ile ilgili temel kavramların zemin bilimciler tarafından tarımsal amaçlarla ortaya atıldığı belirtilmektedir. Bunun yanı sıra emmenin, doğun olmayan zeminlerin nem koşullarını tanımlayan ve mühendislik davranışlarını önemli ölçüde etkileyen temel parametrelerden biri olduğunun

anlaşılmasıyla; emme kavramı geoteknik mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [49].

Zemin emmesi, mühendislik açısından doymun olmayan zeminlerin davranışını etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Emme, zeminlerin hacim ve mukavemet özellikleri üzerinde nemin etkisini karakterize etmek amacıyla kullanılan bir kavramdır. Emme, zemin ağırlığının fiziksel davranışının belirlenmesi amacıyla su ve zemin taneleri arasındaki etkileşimi tanımlamaktadır.

Zeminlerin su içeriği ile zemin emmesi arasındaki ilişki, zemin–su karakteristik eğrisi olarak tanımlanmakta ve matris emme veya toplam emme cinsinden ifade edilebilmektedir. Zemin–su karakteristik eğrisi; doymun olmayan zeminlerde sıvı akışı, hidrolik iletkenlik, kayma mukavemeti, hacimsel deformasyon, boşluk boyutu dağılımı gibi pek çok parametrenin belirlenmesinde kullanılmaktadır [51]. Farklı zeminler için örnek gösterilebilecek tipik zemin–su karakteristik eğrileri Şekil 2.14’ te sunulmuştur.



**Şekil 2.14.** Farklı zeminler için geçerli olan tipik zemin–su karakteristik eğrileri [13]

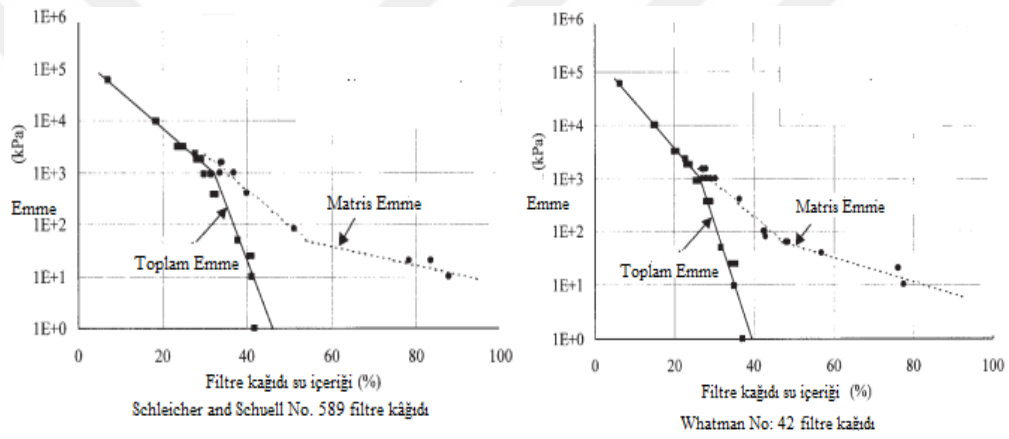
[4] ıslatma ve kurutma filtre kâğıdı emme kalibrasyonu, filtre kâğıdı metodunun matris ve toplam emme ölçümünde kullanımını konu almışlardır.

Metodun kalibrasyonu; ilki filtre kağıtlarının buhar akışı boyunca ıslatma periyodu kullanılarak, diğeri ise akışkan akışı boyunca filtre kağıtlarının kurutma periyodu kullanılarak iki kalibrasyon eğrisinin kurulması ile araştırılmıştır. Islatma eğrisi sodyum klorür tuz çözeltisi ve Schleicher ve Schuell No. 589-WH filtre kâğıdı kullanılarak oluşturulmuştur. Araştırma sonucunda ıslatma emme eğrisindeki değişimin filtre kağıdındaki su içeriğinin yaklaşık 1.5 log kPa emmeden az olan küçük değişimlere çok duyarlı olduğu bulunmuştur. Kuruma eğrisi hem basınç düzlemi ve basınç membran cihazı hem de aynı filtre kâğıdı uygulanarak kurulmuştur. Ayrıca filtre kağıdı kalibrasyon eğrilerinin geliştirilmesinde yöntemin olanakları, güçlükleri ve sınırlamaları da tartışılmıştır.

Yüksek filtre kâğıdı su içeriğinde toplam emmedeki önemli azalmanın Kelvin'in denkliği ve logaritmik ölçek kullanımı ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Filtre kâğıdı metodu belirli bir noktaya kadar güvenilir ıslanma emme sonuçları verebilmektedir. Diğer bir deyişle, Schleicher & Schuell No. 589 Whatman filtre kağıtlarıyla 1.5 log kPA ve üzerinde güvenilir ıslanma emme sonuçları elde edilebilmekte, 1.5 log kPA altındaki değerlerde ise su içeriği ölçümünde küçük bir hatanın elde edilen emme değerlerinde yüksek bir hata ile sonuçlanabileceği ifade edilmektedir. Kuruma filtre kağıdı kalibrasyon testinde, filtre kağıtlarının başlangıç olarak tamamen doygun olduğu ve hava basıncı uygulaması ile filtre kağıdındaki suyun sürüklendiği belirtilmektedir. Bununla birlikte zemin matris ve toplam emme ölçümleri filtre kâğıdı metoduyla bir ıslanma (nemlenme) periyodu izlemektedir. Histerezis nedeniyle ıslanma emme kalibrasyon eğrisinin daima kuruma kalibrasyon eğrisi altında olacağı belirtilmiştir. Son olarak hem matris hem toplam emme ölçümlerinin ıslanma periyotları olması nedeniyle her ikisinin de ıslanma kalibrasyon eğrisinden belirlenebileceği öne sürülmüştür [4].

[50] filtre kağıdı tekniğinin doğruluğunu etkileyen faktörleri derleyen bir literatür çalışması yapmışlardır. Ayrıca emme ölçümleri için sıkça kullanılan Whatman No. 42 ve Schleicher and Schuell No. 589 filtre kâğıtlarının tepkilerini etkileyen bazı faktörlerin açıklanması amacıyla bir deney gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda filtre kağıtlarının kalibrasyon eğrileri toplam ve matris emme

için su içeriği-emme ilişkisinin farklı olduğunu göstermiştir. Toplam emme kalibrasyon eğrisinin 1000 kPa'dan az uygulanan emmelere karşı çok hassas olmadığı belirlenmiştir. Toplam emme için elde edilen kalibrasyon eğrilerinin ASTM D 5298-94'te önerilenlerden farklı olduğu, yani ASTM D 5298-94 denkliklerinin toplam emme için kullanılmaması gerektiği tespit edilmiştir. Toplam ve matris emme kalibrasyon eğrilerinin tanımlanması amacıyla mevcut bilinear denklikler yerine yeni denkliklerin sunulması gerektiği ifade edilmiştir. Kullanılan filtre kağıtlarının kalibrasyon eğrileri Şekil 2.15' te sunulmuştur.



**Şekil 2.15.** Whatman No. 42 ve Schleicher and Schuell No. 589 filtre kağıtlarına ilişkin kalibrasyon eğrileri [50].

Emme ölçümleri için filtre kağıdı kalibrasyon eğrileri arasındaki değişiklikler filtre kağıdı kalitesi, kalibrasyonda kullanılan emme kaynağı, histerezis ve dengeleme süresi açısından incelenmiştir. Filtre kağıtları üzerindeki incelemeler sonucunda filtre kağıdı kalitesinin göreceli olarak tekdüze olduğu bulunmuş ancak Whatman No. 42 filtre kağıdının performansı S&S 589 filtre kağıdına göre daha tutarlı bulunmuştur. Filtre kağıdı kalibrasyon eğrileri arasındaki farklılıklar kalibrasyonda farklı kaynak kullanımı ve dengeleme sürelerine bağlanmıştır.

Sıkıştırılmış zeminlerin mekanik tepkisi matris emmeden etkilenir. Filtre kağıdı tekniği kullanılarak sıkıştırılmış zeminlerin matris emme ile ilgili, hataların ölçümü hakkında çalışmalar yapılmıştır. Filtre kağıdı yöntemi ile yapılan emme

ölçümlerinin doğruluğu test yöntemi ve emme aralığına bağlıdır. Zeminlerde emme ölçümü doğruluğuyla ilgili olarak Chandler ve ark. (1992) %25 doğruluk bandı rapor ederken, Ridley ve ark. matris emme için %10 doğruluk bandı ölçülebileceğini bildirmiştir[42].

Göksan T.S. beş farklı zemin örneğinin farklı başlangıç koşullarındaki emme basınçlarını belirlemeyi amaçlamış ve bu doğrultuda dolaylı yöntemlerden filtre kâğıdı ve saykrometre tekniklerini kullanmıştır. Araştırma sonucunda eşit kuru özkütlesindeki zemin örneklerinin su içeriklerinin artması ile emme basıncı ve emme kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Killi zeminler için emme basıncının su içeriği ile logaritmik ilişkisi olduğu belirtilirken, emme kapasitesi ile su içeriği ilişkisinin doğrusal olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada ayrıca killi zeminlerin plastisite indisi değerleri arttıkça emme basıncı ve emme kapasitesi değerlerinin de arttığı belirlenmiştir [7].

Bulut ve Leong dolaylı zemin emme ölçüm yöntemlerini konu almışlar ve dolaylı emme ölçüm tekniklerinin emme yerine zeminin nem denge koşulunu ölçtüğünü belirtmişlerdir. Zeminin nem denge koşulunun öncelikle buhar basıncı açısından, ikinci olarak diğer bir gözenekli ortam içerisinden ya da üçüncü olarak nem denge koşullarını gösteren gözenekli ortamın diğer fiziksel özelliklerinin ölçülerek belirlenebildiği ifade edilmiştir [45].

Mabirizi ve Bulut doymamış zeminlerde termokupl saykrometresi, filtre kâğıdı metodu ve chilled-mirror higrometresi zemin emme ölçüm tekniklerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada bu teknikler çok katı sıcaklık koşulları altında yüksek plasititeli killi zeminlerin toplam emme düzeylerini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Araştırma sonucunda filtre kâğıdı metodunun düşük maliyetli ve neredeyse tüm toplam emme aralığını ölçebildiği tespit edilmiş, termokupl saykrometre ve chilled-mirror higrometre ile yapılan toplam emme ölçümlerine göre daha güvenilir sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu sonuç, doymamış zeminin difüzyon katsayısı ölçümü yoluyla elde edilen emme bulgularına göre değerlendirilmiştir. Sonuçların karşılaştırılması Tablo 2.1'de sunulmuştur [52].

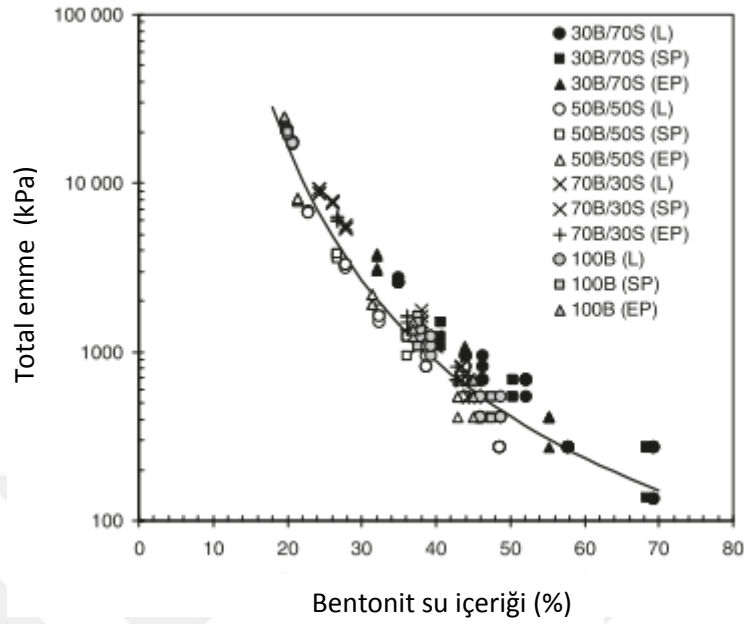
**Tablo 2.1.** Üç farklı metodun toplam emme bulgularının karşılaştırılması [52]

Örnek	Derinlik (ft)	*WP4 Toplam*FP Toplam		*TP	
		Emme (pF)	Emme (pF)	Toplam Emme (pF)	Kuruma Süresi ( dk.)
1	2-4	4.06	3.56	3.97	1370
	6-8	4.26	4.09	4.23	990
2	2-4	4.15	4.02	4.37	2300
	8-10	4.23	4.15	4.08	790
3	0-2	3.71	2.84	4.18	2560
	10-12	4.08	3.52	3.81	620
4	6-7	4.38	4.22	4.55	3450
	9-11	4.22	3.97	4.09	1150

\*WP4: Chilled-mirror; \*FP: Filtre kâğıdı; TP: Termokupl saykrometre.

Agus ve ark. sıkıştırılmış kum-bentonit karışımlarının emme değerlerini farklı yöntemler kullanarak belirlemiş ve karşılaştırmışlardır. Total emme değerlerini ölçmede kullandıkları yöntemler filtre kağıdı, saykrometre, dew-point sensor, chiller-mirror higrometre yöntemleridir. Matris emme değerlerini ölçmede kullandıkları yöntem ise filtre kağıdı yöntemidir. Sıkıştırdıkları örnekleri gevşek (L), standart proktor enerjisinde (SP) ve çok sıkışmış (EP) olarak tanımlamışlardır. Bentonit su içeriğine göre total emme değerleri aşağıda Şekil 2.16'da sunulmuştur. Yazarlar, total emmenin sıkışma enerjisinden ve karışımın su içeriğinden bağımsız olarak sadece bentonit oranına ve bentonit su içeriğine göre değiştiğini öne sürmüşlerdir [25].





**Şekil 2.16.** Farklı bentonit oranlarına ve sıkıştırma enerjilerine göre hazırlanmış örneklerin bentonit su içeriği – total emme ilişkisi [25]

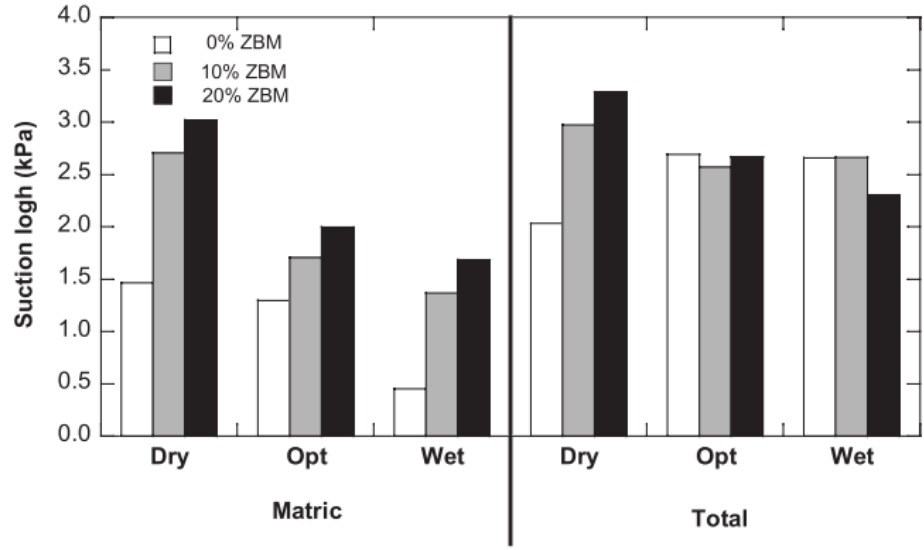
Nam ve ark. doymun olmayan zeminlerin kayma direncinin belirlenmesi doymun zeminlerinkine kıyasla daha karışık, ve daha pahalı olduğunu ifade etmişlerdir. Doymun olmayan zeminlerin kayma direncini belirlemek için pratik test metotlarına ihtiyaç olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında hızlı olarak çok kademeli direkt kesme testinin geçerliliğini değerlendirmiş ve doymun olmayan zeminlerin kayma direncini belirlemek için pratik metotları kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Yeni tasarlanan bir direkt kesme testi aparatları kullanılmış, bağımsız emme kontrolü laboratuvar ortamında yapılmış ve emme-kontrollü çok kademeli direkt kesme testi olarak adlandırılmıştır.. Kayma direnci değerini birden fazla zemin numunesi kullanarak uygulanış ve geleneksel direk kesme testleri ile çok kademeli testlerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Güvenli doymamış kayma direnci ölçümlerini sağlamak için çok kademeli direkt kesme testlerinin uygulanması konusunda öneriler sunulmuştur [53].

Fredlund ve Houston yüksek hacim değişimli materyalin karakteristiklerini tanımlamayı ve zemin-su karakteristik eğrisinin büzüşme eğrisi yardımıyla nasıl yorumlanacağını konu almışlardır. Deneyleerde hem toplam hacim değişimi hem

de su içeriği değişimi göz önünde bulundurulmuştur. Araştırmada kum, alüvyon ve killi zeminler arasındaki farklılıkların belirli bir net normal gerilimde zemin emme uygulaması süresince hacim değişimi miktarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Zemin emmesi arttika bu materyallerin önemli hacim değişikliklerine uğradıkları ifade edilmiştir. Araştırmada zemin emmesine ilişkin hacim artışının gerçek hava giriş değerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca bir zemin için gerçek hava giriş değerinin tespit edilmesinde büzüşme eğrisinin hesaplanmasının gravimetrik su içeriği-zemin karakteristik eğrisi ile birlikte kullanılabileceği ifade edilmiştir [54].

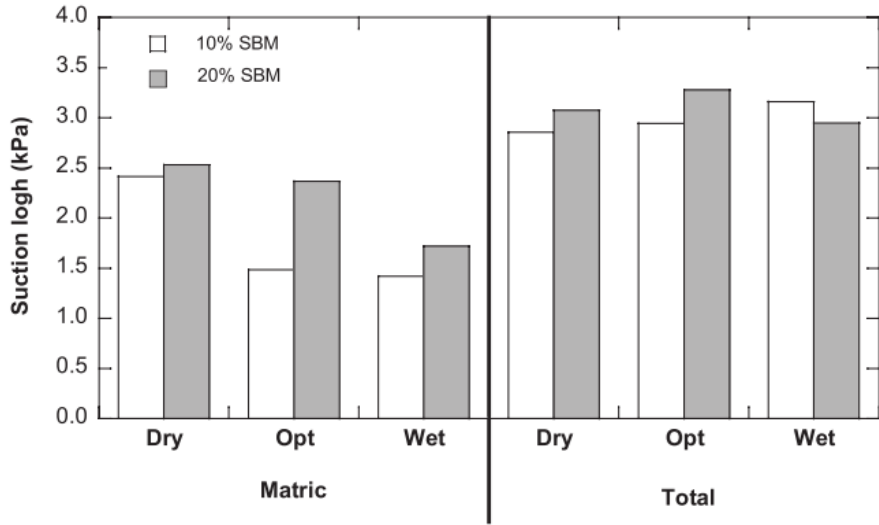
Bicalho ve ark. Fransa'da iki farklı kil ile yapılandırılmış bir setin deneysel alan görüntülemesini tartışmışlardır. Çalışmada, zaman içerisinde set sistemindeki zemin-atmosfer akışına bir yaklaşım sağlamak amacıyla hava değişimlerinin zemin tepkisi üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Saha alışması, meteorolojik veri ölçümleri yanı sıra hacimsel su içeriği, matris emme ve sıcaklık profilini de içerecek şekilde yrtlmştur. Araştırma sonucunda iki ince taneli toprak zeminde günlük emme varyasyonları arasında benzerlikler grlmştur. İki zeminde kuru dönem boyunca genel olarak yağmura karşı önemli bir tepki gözlemlenmemiştir. 30 dakika aralıklarla kaydedilen yağmurlar, uzun süren kuru dönem sonrasındaki yaş dönem başlangıcında emme üzerinde önemli değişiklikler göstermiştir [2].

Durukan ve ark. sıkıştırılmış zeolit, sıkıştırılmış zeolit-bentonit ve kum-bentonit karışımlarının kompaksiyon eğrilerini belirlemiş ve bu eğrilerin kuru, optimum ve yaş bölgelerinde filtre kağıdı yöntem kullanarak total ve matris emme değerlerini ölçmüşlerdir. Bununla beraber bir çöp alanında elde edilmiş kirletici sıvı ile de zeolit-bentonit karışımları üzerinde emme deneylerini yürütüp kirletici tesiri altında emme değerlerini ölçmüşler ve karşılaştırmışlardır. Çalışmaya ait zeolit bentonit karışımlarının total ve matris emme değerleri şekil 2.17'de; kum bentonit karışımlarının total ve matris emme değerleri de şekil 2.18'de sunulmuştur [28].



Şekil 2.17. Zeolit bentonit karışımlarının total ve matris emme değerleri

[28]



Şekil 2.18. Kum bentonit karışımlarının total ve matris emme değerleri

[28]

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1. Çalışmada Kullanılan Zemin Numunelerinin Tanımlanması

Bu çalışmada, sıkıştırılmış zeolit ve bentonit karışımları (ZBK) kullanılmıştır. Bu karışımların bentonit miktarlarına ve farklı fiziksel özelliklerine göre grupları Tablo 3.1 de verilmiştir. Zemin numuneleri, karışımın kuru ağırlığının %10'u ve %20'si kadar bentonit içeren ZBKlar olmak üzere iki ana grupta incelenmiştir. %10 bentonit içeren ZBK grubu kendi içerisinde dört kategoriye (A, B, C, D), %20 bentonit içeren ZBK grubu da dört kategoride incelenmiştir (E, F, G, H). Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin dane boyu dağılımı ve kıvam limitleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Zemin örneklerinin fiziksel özelliklerine göre gruplandırması (a) %10 ZBK (b) %20 ZBK

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								
% 10 BENTONİT	A	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=1$	$\gamma=1,40$		S=0,70	w=% 40	
		FARKLI SU İÇERİĞİ		$\gamma=1,30$	e=1,35	S=0,52	w=% 30	
	B	FARKLI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=0,9$	$\gamma=1,17$	e=1,61	S=0,44		
		AYNI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,1$	$\gamma=1,43$	e=1,14	S=0,62		
	C	AYNI SUYA DOYGUNLUK YÜZDESİ	$\gamma_d=0,9$	$\gamma=1,17$	e=1,61	S=0,44	w=% 30	
		FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,14$	$\gamma=1,36$	e=1,07		w=% 20	
	D	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=0,93$		e=1,53	S=0,61	w=% 40	
		FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1$	$\gamma=1,30$	e=1,35	S=0,52	w=% 30	
			FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,08$		e=1,17	S=0,44	w=% 20

(a)

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								
% 20 BENTONİT	E	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=1$	$\gamma=1,40$		S=0,69	w=% 40	
		FARKLI SU İÇERİĞİ		$\gamma=1,30$	e=1,39	S=0,52	w=% 30	
	F	FARKLI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=0,9$	$\gamma=1,17$	e=1,66	S=0,43		
		AYNI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,1$	$\gamma=1,43$	e=1,17	S=0,61		
	G	AYNI SUYA DOYGUNLUK YÜZDESİ	$\gamma_d=0,9$	$\gamma=1,17$	e=1,66	S=0,44	w=% 30	
		FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,15$	$\gamma=1,37$	e=1,09		w=% 20	
	H	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=0,93$		e=1,7	S=0,61	w=% 40	
		FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1$	$\gamma=1,30$	e=1,39	S=0,52	w=% 30	
			FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,08$		e=1,21	S=0,40	w=% 20

(b)

**Tablo 3.2.** Test edilen zemin örneklerinin özellikleri

Özellikleri	Bentonit	Zeolit
<b>Dane Çapı Dağılımı</b>		
Çakıl	0%	0%
Kum	0%	%98 (-no. 16 elek)
Silt	8%	2%
Kil	92%	
<b>Kıvam limitleri(%)</b>		
Likit limit	405%	NP
Plastik limit	57%	NP
Plastisite indeksi	348%	NP
<b>Özgül Ağırlık</b>		
	2,71	2,31

### **3.2. Filtre Kâğıdı Tekniği ile Matris ve Toplam Emme Basıncının Belirlenmesi**

Filtre kâğıdı tekniği zeminlerin hem matris hem de toplam emme basınçlarını ölçtüğü için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [4,42,50,55,56]. Filtre kâğıdı tekniği oldukça ucuz ve basit bir laboratuvar yöntemidir. Hem toplam hem de matris emme basıncını ölçmektedir [4,7,25,28]. Filtre kâğıdı metodu ile sağlıklı olarak 0.01–100 MPa arasındaki emme basınçları ölçülebilmektedir (ASTM D 5298-92).

Filtre kâğıdı tekniğinin çalışma ilkesinde toplam emme basınçlarının ölçülmesi için zemin suyunun buharı ile matris emme basınçlarının ölçülmesi için filtre kâğıdı zemin suyu ile sabit bir sıcaklıkta dengeye gelmesi beklenir. Bir haftalık dengeleme durumu sağlandıktan sonra zemin numunesi ile filtre kâğıdının emme basıncının değerinin aynı olduğu kabul edilir. Filtre kâğıdının su içeriği 0,0001 gr. hassasiyetli bir tartı kullanılarak ölçülür. Daha sonra zemin numunesinin emme basıncı değeri, filtre kâğıdının emme basıncı ve su içeriği arasındaki ilişkiyi veren kalibrasyon eğriler kullanılarak belirlenir. Matris emme

basıncını belirlemek için filtre kâğıdının kalibre edilmesinde basınç plakası yöntemi kullanılabilir gibi ; toplam emme basıncı için kullanılan kalibrasyon eğrileri de kullanılabilir. Bu çalışmada ASTM D 5298-92' de önerilen kalibrasyon eğrileri kullanılmıştır.

Filtre kâğıdı metodu toplam ve matris emmenin ölçümü için kullanılmaktadır. Filtre kağıdı su içeriğinin spesifik emmeye sahip zemin ile dengeye gelebildiği varsayımına dayanır. Zemin ve filtre kâğıdı arasındaki su değişimi ile sıvı veya buhar hallerinde dengeye ulaşır. Kuru olan filtre kâğıdı zemin numunesi ile temas edecek şekilde yerleştirildiğinde, dengeye gelene kadar nem akışı olur. Kuru olan filtre kâğıdı zemin ile temas olmadan yerleştirildiğinde, denge olana kadar suyun buhar akışı zeminden filtre kâğıdına doğru olur. Doğru denge şartları sağlandığında filtre kâğıdının su içeriği ölçülebilir. Filtre kâğıdı zemin ile temas halinde yerleştirildiğinde ve sıvı akışı olduğunda filtre kâğıdındaki denge su içeriği zeminin matris emmesine tekabül eder. Filtre kâğıdı zeminle temas etmemesi dolayısıyla buhar akışının meydana gelmesi durumunda filtre kâğıdının denge su içeriği zeminin toplam emmesine tekabül eder. Filtre kâğıdı metodu emmenin hemen hemen tüm aralıklarının ölçümü için kullanılabilir [43]. Toplam emme basıncı, zemin numunesinin üst yüzeyine yerleştirilen ince bir ring üzerine üst üste konan iki adet filtre kâğıdı yardımı ile ölçülür. Burada önemli olan filtre kâğıtlarının zemin numunesine temas etmemesidir. Matris emme basıncını ölçmek için iki koruyucu filtre kâğıdı arasına matris basıncını ölçmeye yarayan filtre kâğıdı kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan örnekler 4 cm çapında ve 2+2 cm yüksekliğinde, istenilen su içeriği-özkütle ikilisine sahip olacak şekilde kontrollü sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Literatürde deney numunesi bir bütün silindir örnek olarak hazırlanıp sonradan ikiye bölünmek sureti ile kullanılmaktadır. Fakat kesme işlemi sırasında örnekler hasar görmekte ve filtre kâğıdı ile temas ettikleri yüzey düzgünlüğünü ve sürekliliğini yitirebilmektedir. Bu çalışmada düzgün bir temas yüzeyi elde etmek amacı ile 4 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde hazır 2'şer parça olarak hazırlanmış ve kesme işlemine alternatif geliştirilmiştir.

### 3.3. Filtre Kâğıdı Tekniği ile Emme Basıncının Belirlenmesinde Takip Edilen Adımlar

Deney örnekleri aynı su içeriği, farklı su içeriği, farklı kuru özkütle, aynı kuru özkütlesi, aynı suya doygunluk oranı, farklı suya doygunluk oranı, aynı boşluk oranı, farklı boşluk oranına sahip hallerinin farklı kombinasyonlarında gruplara ayrılmıştır. Gruplar yukarıda Tablo 3.1 (a) ve (b)'de sunulmuştur.

Filtre Kâğıdı tekniği ile emme basıncı belirlenirken şu adımlar izlenmiştir:

1. Alt ve üst zemin örnekleri ayrı ayrı sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Normal prosedürde alt ve üst zemin tabakaları bir bütün zemin örneğinin kıl testere ile ikiye ayrılması ile oluşturulmaktadır. Ayrı ayrı sıkıştırma işlemi ile kesme sırasında oluşabilecek deformasyonların önüne geçilmiştir.

2. Matris emme basıncı ölçmek için kullanılan filtre kâğıdı, iki adet koruyucu filtre kağıdı arasına Şekil 3.1'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu işlemler sırasında kuru olan filtre kâğıdının nemden etkilenmemesi için eldiven ve cımbız kullanılmıştır. Ortaya yerleştirilen filtre kâğıdının, zemin numunesine deymesini engellemek için altına ve üstüne iki adet filtre kâğıdı koyulur.

3. Arasına filtre kâğıdı konan zemin numunesi cam bir kavanozun içerisine yerleştirilir. Bu cam kavanoz mümkün olduğunca küçük olmalıdır ki boşluk az olsun (Zemin numunesinin hacmi kavanozunun %75'ini dolduracak şekilde olmalıdır).



Şekil 3.1. O-ring üzerine filtre kâğıtlarının yerleştirilmesi

4. Toplam emme basıncı ölçmek için ise kavanoz içindeki zemin numunesi üzerine filtre kâğıtlarıyla temasını önlemek için 3 cm. çapında 1,5 cm. yüksekliğinde plastik o-ring Şekil 3.1'deki gibi yerleştirilmiştir.

5. Biri büyük diğeri küçük çapta iki adet filtre kâğıdı o-ring üzerine Şekil 3.1'deki gibi yerleştirilir. Buradaki amaç filtre kâğıdının zemin numunesine kavanozun yan duvarlarına temas etmesini engellemektir.

6. Daha sonra kavanozun kapağı kapatılır ve kapak bant ile Şekil 3.2'deki gibi sıkıca bantlanır.



Şekil 3.2. Kavanozun kapağının bantlanması

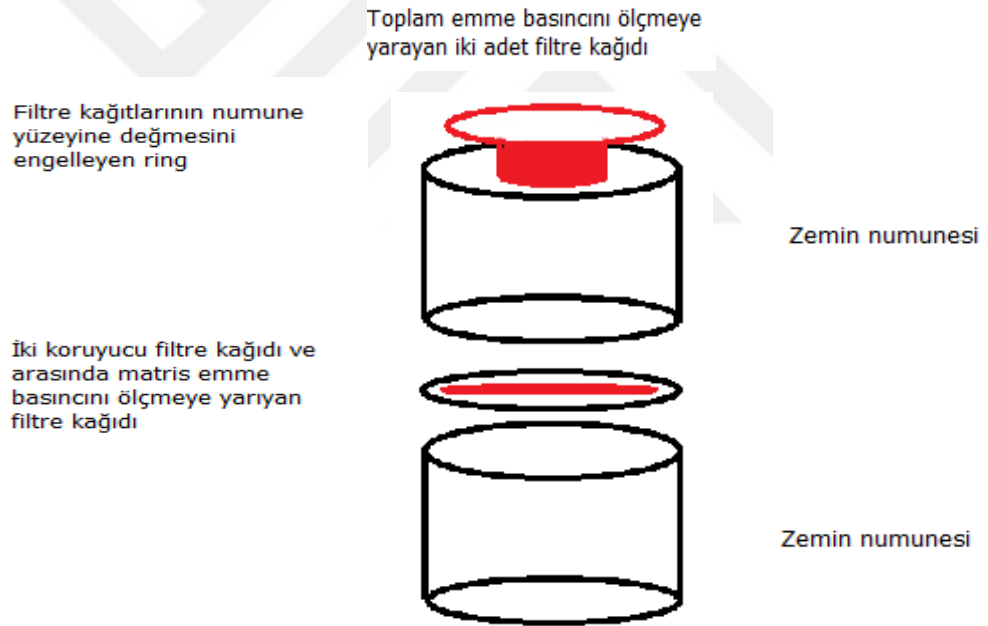
7. Cam kavanozlar dengelenme sürelerini tamamlamak için Şekil 3.3'teki deki gibi inkübatöre yerleştirilir.

Deney boyunca sıcaklığın  $20^{\circ}\text{C}$ 'de sabit olarak tutulmasına özen gösterilmiştir. Dengeleme için bir hafta beklenmiştir (ASTM D 5298-92) [7].





**Şekil 3.3.** Kavanozun inkibator'e yerleştirilmesi



**Şekil 3.4.** Toplam ve matris emme basıncının ölçülmesi [7]

Emme basınçlarının belirlenmesi için bir haftalık dengelenmesi süresi tamamlandıktan sonra aşağıdaki adımlar izlenilerek ölçümler yapılmıştır.

1. Öncelikle her bir deney için iki adet alüminyum, kapaklı numune kutusu hassasiyeti ( $T_c$ ) 0,0001 g. olan terazi ile daraları belirlenmiştir (Şekil 3.5).

Bu kaplardan bir tanesi toplam emme basıncı ölçmek için diğeri matris emme basıncını ölçmek için kullanılmıştır. Numune üzerine yerleştirilen filtre kâğıdı toplam emme basıncını, zemin numunesi arasındaki filtre kâğıdı ise matris emme basıncını vermektedir.



**Şekil 3.5.** Hassas terazi

2. Sırayla inkübatörden çıkarılan cam kavanozlar hızlı bir şekilde açılıp üstteki filtre kağıdı alüminyum kutuya Şekil 3.6'daki gibi yerleştirilir. Nem kaybının önlenmesi için derhal kutunun kapağı kapatılır ve hassas tartı ile tartılır. Yaş filtre kâğıtları olan kutuların ağırlıkları ( $M_1$ ) belirlenmiştir. Tüm bu işlemler 3-4 saniye içinde tamamlanmıştır.



**Şekil 3.6.** Filtre kâğıdının alüminyum kutuya yerleştirilmesi

3. Daha sonra zemin numunelerinin arasındaki filtre kâğıtlarından ortadaki filtre kâğıdı Şekil 3.7'deki gibi alüminyum numune kutusuna alınarak hassas tartı ile tartılır.



**Şekil 3.7.** Filtre kâğıdının alüminyum kutuya yerleştirilerek hassas tartı ile tartılması

4. Hazırlanan alüminyum kaplar yarı kapaklı Şekil 3.8.'deki gibi 110°C'de etüvde bir gün bekletilmiştir. Kutular daha sonra tartılmak üzere kapakları tam kapatılarak 15 dakika beklenilmiştir, bunun nedeni kutularda ısı dengesinin sağlanmasıdır. Filtre kâğıtları hemen tartılarak  $M_2$  ağırlıkları belirlenmiştir.



**Şekil 3.8.** Filtre kâğıdının alüminyum kutuya yerleştirilerek etüvde bekletilmesi

5. Bu işlemin devamında kuru filtre kâğıdı kutudan çıkarılmış, boş kutu birkaç saniye içinde tekrar tartılmıştır. Bu ağırlık, sıcak ağırlık ( $T_h$ ) olarak kaydedilmiştir.

6. Toplam ve matris emme basınçlarının belirlenmesi için filtre kâğıtlarının su içerikleri aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır (ASTM D 5298-92).

Bu çalışmada kullanılan zemin numunelerinin toplam emme basınçları, numunenin üst kısmına temassız olarak yerleştirilen filtre kâğıdının su içerikleri Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen değer ASTM D 5298 -92) standartlarında verilen ve Şekil 3.9’da gösterilen kalibrasyon eğrisi ve Eşitlik 3.4, Eşitlik 3.5 kullanılarak zemin numunelerinin toplam emme basınçları belirlenmiştir.

Eşitlik 3.1 kullanılarak, kuru filtre kâğıdının ağırlığı belirlenmiştir.

$$M_1 = M_2 - T_h \quad (3.1)$$

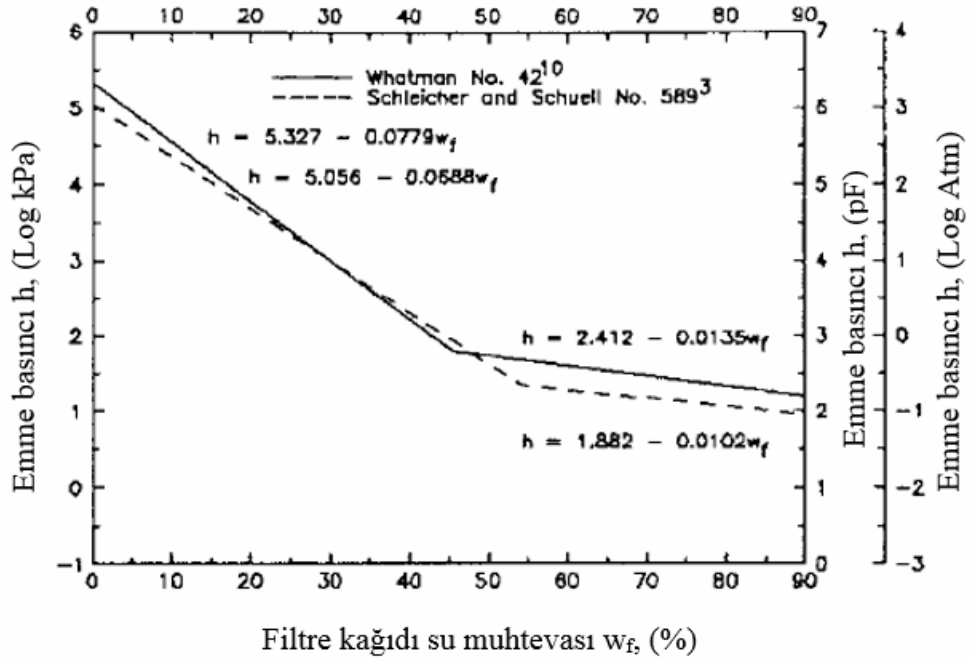
Burada,

$M_1$ - Filtre kâğıdının kuru ağırlığı

$M_2$ - Numune kutusu ve filtre kâğıdının birlikte kuru ağırlığı

$T_h$ - Numune kutusunun sıcak ağırlığı

Zemin numunelerinin matris emme basınçlarının belirlenmesi için, numunelere teması olan üç filtre kâğıdından ortadakinin su içeriği Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler ASTM D 5298, (1992) standartlarında verilen Şekil 3.9’da gösterilen kalibrasyon eğrisi ve Eşitlik 3.4, Eşitlik 3.5 kullanılarak zemin numunelerinin matris emme basınçları belirlenmiştir.



**Şekil 3.9.** Islanan filtre kâğıdı için emme basıncı-su içeriği ilişkisi (ASTM D 5298, 1992).

Filtre kâğıdı tekniği kullanılarak yapılan toplam emme ve matris emme deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde tablolar halinde sunulmuştur.

Eşitlik 3.2 kullanılarak, filtre kâğıdındaki suyun ağırlığı belirlenmiştir.

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_e \quad (3.2)$$

Burada,

$M_w$  -filtre kâğıdının emdiği suyun ağırlığı

$M_1$ -Etüve konulmadan önceki, ıslak filtre kâğıdı ve numune kutusunun toplam ağırlığı

$T_e$  -Numune kutusunun ağırlığı

Eşitlik 3.3 kullanılarak, filtre kâğıdındaki su içeriği belirlenmiştir.

$$Wf = \frac{M_w}{M_f} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\Psi(\text{Log kPa}) = 5.327 - 0,0779 w_f \quad (w_f < \%45) \quad (3.4)$$

$$\Psi(\text{Log kPa}) = 2.412 - 0,0135 w_f \quad (w_f > \%45) \quad (3.5)$$

Tüm numuneler için yukarıdaki adımları tekrarlanmıştır.

### 3.4 Emme Değerlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Emme basıncının doygun olmayan zeminlerde kayma mukavemeti parametrelerini direkt olarak etkilemesi sebebi ile emmenin doğru olarak tayin edilmesi oldukça büyük önem taşımaktadır. Filtre kâğıdı metodu, oldukça geniş bir ölçüm aralığına ve kolay ölçüm tekniklerine sahip olduğundan dolayı çokça tercih edilmektedir. Bununla beraber, gerek uygulama sırasında gerekse ölçüm sırasında yapılabilecek pek çok hata da içermektedir [2,15,42,50,57,58,59].

Bu çalışmada da deney gruplarından A ve E gruplarında emme değerlerinin ölçümünde güvenilirlik araştırması amacı ile istatistiksel değerlendirme yapılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, zemin örneklerinin A ve E grubunda olan örneklerin emme değerleri istatistiksel açıdan normal dağılım elde etmek amacı ile en az 30 kez tekrarlanmıştır. Normal dağılıma sahip olduğu kabul edilen emme değerlerinin ortalamaları, standart sapmaları ve belirli anlamlılık seviyelerine göre güven aralıkları hesaplanmıştır.

Merkezi limit teoremine göre örnek sayısı 30 dan büyük ve eşit ise örneklerin ortalamasının örnekleme dağılımı normal dağılım olur. Örneklerin sayısı artıka belli bir güven düzeyine karşı gelen güven aralığı daralır. Yani 30 un üstünde yapılan örneklerde parametrelerin belli bir olasılık içinde kalacağı güven aralığı daha küçük olur, bu parametrelerin tahminindeki hatanın azalacağını ifade eder.

İstatistikte tahmin 2 türlü olmaktadır. Nokta tahmini popülasyon parametresinin tek bir tahmin değerini verirken aralık tahmini popülasyon parametresinin tahmin aralığını verir ve bilinmeyen ana kütle parametresinin, tek bir sayı ile tahmin edilmesi yerine parametreyi içermesi muhtemel olan bir sayı aralığı şeklinde tahmin edilmesidir.

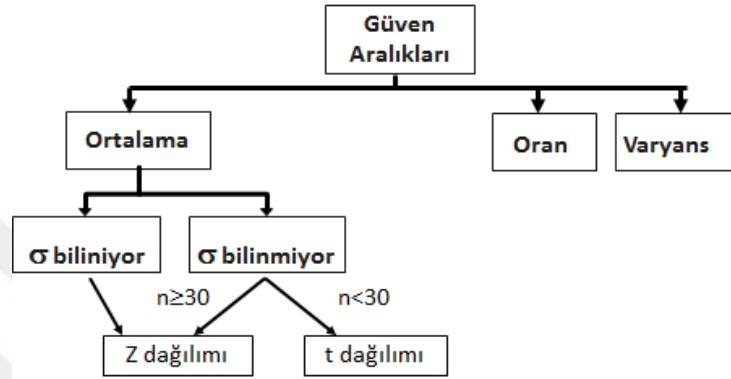
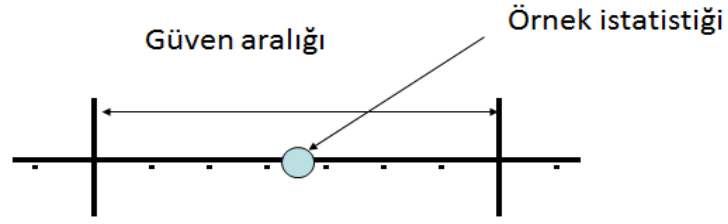
Bir örnekten elde edilen istatistiğin bir başka örnekten sağlanan istatistikle aynı olmayışı sebebiyle veya örneğin yeterince fazla olmaması ile ana kütle parametresini bir noktada tahmin etmek hatalı sonuçlar oluşturabilir. Bu yüzden ana kütle parametresi belirli bir hata seviyesi dikkate alınarak belirli bir aralıkta aranır. Hata terimini  $\alpha$  ile gösterirsek,  $1-\alpha$  güven seviyesinde aralık tahmini yapabiliriz. Hata terimi normal eğrinin her iki ucunda eşit olarak yer alır. Bu  $\alpha/2$ 'lik hata terimine karşılık gelen  $\pm Z$  değerleri belirlenerek örnek dağılımının standart hatası ile çarpıldığında hata payı elde edilir. Buradaki  $\alpha$  değeri ne kadar küçük olursa hata payı o kadar azalır.

Örneklerin standart sapması bilindiğinde ve örnek sayısı  $n \geq 30$  olduğunda güven aralığı merkezi limit teoremi kullanılarak z dağılımı kullanılır.(Şekil 3.10)

Rasgele seçilen bir güven aralığının ana kütle parametresini kapsama olasılığına güven katsayısı, bu olasılığın yüzdelik ifadesine de güven düzeyi denir. Güven düzeyi %90, %95 ve %99 olarak alınır [60]. Bu tez çalışmasında % 95 olarak verilmiştir Normal dağılımda güven aralıkları Şekil 3.11 'de gösterilmiştir.

Hata payının örnek istatistiğine eklenip çıkarılması ile aralık tahmini yapılır. Bu şekilde, ana kütle parametresinin belirli aralıkta yer aldığını,  $1-\alpha$  güven seviyesinde olduğunu söyleyebiliriz. Güven sınırlarından küçük olanına alt güven sınırı, büyük olana ise üst güven sınırı denir.

Hata terimi küçüldükçe güven aralığı genişlemektedir. Güven sınırlarının belirleneceği olasılık seviyesine göre Z değeri değişir. Güven Aralığı Tahmini; bir değer aralığı verir, popülasyon parametresine yakınlık hakkında bilgi verir ve olasılık terimleriyle ifade edilir.



Şekil 3.10. Güven Aralığı Tahmininin Elemanları

### 3.4.1. Ortalamalar İçin Güven Aralığı

Bir örnekten elde edilen  $\bar{x}$  istatistiği ana kütle ortalaması  $\mu_x$ 'in nokta tahminidir. Gerçek ana kütle ortalaması,  $1-\alpha$  güven seviyesinde aşağıdaki aralıkta yer alır (eşitlik 3.6).

$$P(\bar{x} - z_{\alpha/2} (\sigma_x/\sqrt{n}) \leq \mu_x \leq z_{\alpha/2} (\sigma_x/\sqrt{n})) = 1 - \alpha \quad (3.6)$$

$\bar{x}$  = ortalama

n = örnek sayısı

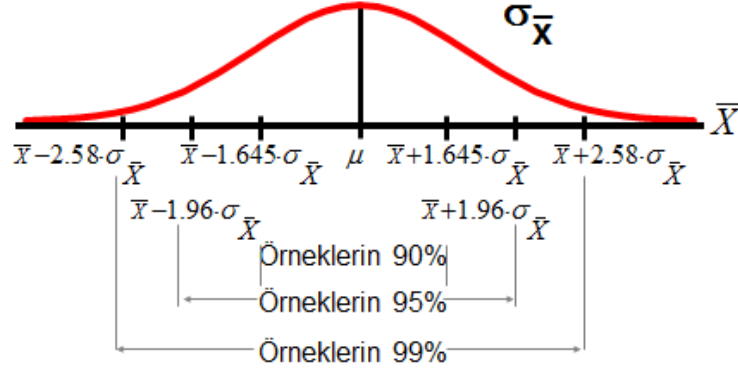
$\sigma$  = standart sapma

$\sigma^2$  = varyans

$(\sigma/n)^{1/2}$  = standart hata



$$\bar{X} \pm Z \cdot \sigma_{\bar{X}} = \bar{X} \pm Z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$



**Şekil 3.11.** Ortalamalar için güven aralığı

%95 güven sınırları belirlenirken  $\alpha$  hatası  $1-0.95=0.05$  dir. Bu hata normal eğrinin sağ ve sol ucuna eşit olarak dağıtıldığında  $\alpha/2 = 0.05/2=0.025$ 'tir.

Bu alanları belirleyen biri negatif, diğeri pozitif iki Z değeri vardır.

Normal eğri alanları tablosunda (Tablo 3.3)  $0.50-0.025=0.4750$  değerini gösteren  $Z= \pm 1.96$  değerleri aradığımız Z değerleridir.

%99 güven sınırları belirlenirken  $\alpha$  hatası  $1-0.99=0.01$  dir.

Bu hata normal eğrinin sağ ve sol ucuna eşit olarak dağıtıldığında;

$\alpha/2=0.01/2=0.005$  bulunur.

Normal eğri alanları tablosunda;

$0.5-0.005=0.4950$  değerini gösteren  $Z= \pm 2.58$  değerleri aradığımız Z değerleridir.

Örnekleme hacmi arttıkça veya standart sapmanın değeri küçüldükçe güven aralığının genişliği azalır. Yani örnek sayısı arttıkça hata azalır.

**Tablo 3.3.** Normal eğri alanları tablosu

<b>z</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>
<b>0.0</b>	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
<b>0.1</b>	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
<b>0.2</b>	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
<b>0.3</b>	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
<b>0.4</b>	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
<b>0.5</b>	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
<b>0.6</b>	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2517	0.2549
<b>0.7</b>	0.2580	0.2611	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
<b>0.8</b>	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
<b>0.9</b>	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
<b>1.0</b>	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
<b>1.1</b>	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
<b>1.2</b>	0.3849	0.3869	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
<b>1.3</b>	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
<b>1.4</b>	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
<b>1.5</b>	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
<b>1.6</b>	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
<b>1.7</b>	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
<b>1.8</b>	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
<b>1.9</b>	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
<b>2.0</b>	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
<b>2.1</b>	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
<b>2.2</b>	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
<b>2.3</b>	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
<b>2.4</b>	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
<b>2.5</b>	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
<b>2.6</b>	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
<b>2.7</b>	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
<b>2.8</b>	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
<b>2.9</b>	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
<b>3.0</b>	0.4987									

Çalışma ışığında güvenilir bir ortalama değere ulaşabilmek için tekrarlaması gereken minimum deney sayısı da hesaplanmıştır. Hesaplamalar, ortalama, standart sapma ve anlamlılık seviyeleri kullanılarak Zlatarev (1965)'den elde edilen Tablo 3.4 yardımı ile elde edilmiştir [61,62].

Herhangi bir deneyin standart sapması, önceki deneylerden biliniyorsa, bilmediğimiz m'nin belli bir p ihtimali ve belli bir  $\pm\Delta p$  hatası ile tahmini mümkündür. Buradan  $\Delta p/s$  değerinden hareket ederek belli bir güvenilirlik derecesi için gerekli minimum deneme sayısını veren bir tablo yapmak mümkündür (Tablo 3.4).

**Tablo 3.4.** Deneyin tekrarlanması halinde elde edilen  $\Delta p/s$  değerleri

n	% 5 anlamlılık seviyesi için $\Delta p/s$	% 1 anlamlılık seviyesi için $\Delta p/s$
1	-	-
2	8,985	45,013
3	2,484	5,730
4	1,591	2,920
5	1,241	2,059
6	1,050	1,646
7	0,925	1,401
8	0,836	1,237
9	0,769	1,118
10	0,715	1,028
11	0,672	0,955
12	0,635	0,897
13	0,604	0,847
14	0,577	0,805
15	0,554	0,769
16	0,533	0,737
17	0,514	0,708
18	0,497	0,683
19	0,482	0,660
20	0,468	0,640
21	0,455	0,621
22	0,443	0,604
23	0,432	0,558
24	0,422	0,573
25	0,413	0,559
26	0,404	0,547
27	0,396	0,535
28	0,388	0,524
29	0,380	0,513
30	0,373	0,503
40	0,315	0,412
60	0,256	0,344
120	0,180	0,239
$\infty$	0	0

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde toplam kuru ağırlığın %10'u ve %20'si bentonit olacak şekilde sıkıştırılmış bentonit-zeolit karışımların 4 farklı grupta zemin numunesinin farklı indeks özelliklerine sahip hallerinin deney sonuçları değerlendirilmiştir. Emme kapasitesinin belirlenmesi için filtre kâğıdı tekniği kullanılarak emme basıncı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak; zeminlerin emme basıncı değerleri ile su içeriği, özkütle gibi özellikleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

##### 4.1 Emme Basıncı Deney Sonuçları

Deneysel, A ve E gruplarında en az 30 kez tekrarlanmış ve ilgili deney gruplarında istatistik değerlendirme de yapılmıştır. Bu deney gruplarından elde edilen sonuçlar ışığında diğer deney gruplarında deneyler 10 kez tekrarlanmış ve verilerin ortalaması alınarak sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Tablo 4.1'de %10 ZBK'ların toplam emme basınçlarının değişimi sunulurken Tablo 4.2'de de %20 ZBK'ların matris emme basınçlarının değişimi sunulmuştur.

**Tablo 4.1.** %10 ZBK'ların total emme basınçlarının değişimi

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA							TOTAL EMME						
							ORTALAMA	STANDART SAPMA					
							$\gamma_d$	$\gamma_n$	e	S	w		
% 10 ZBK	A	AYNI ÖZKÜTLE ( $gr/cm^3$ )	1	1,4	1,35	0,7	40%	2,6078	0,3427				
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,3	0,52		30%	2,6225	0,3038					
			1,2	0,35		20%	3,2292	0,3052					
	B	FARKLI ÖZKÜTLE ( $gr/cm^3$ )	0,9	1,17	1,61	0,44	30%	3,1321					
		AYNI SU İÇERİĞİ	1	1,3	1,35	0,52		3,0359					
			1,1	1,43	1,14	0,62		1,5457					
	C	AYNI SUYA DOYGUNLUK YÜZDESİ	0,9	1,17	1,61	0,44	30%	3,1321					
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,14	1,36	1,07		20%	3,8561					
	D	AYNI ÖZKÜTLE ( $gr/cm^3$ )	0,93	1,3	1,53	0,61	40%	2,8210					
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1		1,35	0,52	30%	3,0359					
			1,08		1,17	0,44	20%	3,2263					

**Tablo 4.2. % 10 ZBK 'ların matris emme basınçlarının değişimi**

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								MATRİS EMME		% SAPMA	
								ORTALAMA	STANDART SAPMA		
% 10 ZBK	A	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub>	γ <sub>n</sub>	e	S	w	1,3802	0,0862	6,2455	
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1	1,4	1,35	0,7	40%	1,4305	0,1723	12,0447	
				1,2		0,35	20%	3,0705	0,3451	11,2392	
	B	FARKLI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	0,9	1,17	1,61	0,44		2,3304			
		AYNI SU İÇERİĞİ	1	1,3	1,35	0,52	30%	1,7080			
			1,1	1,43	1,14	0,62		1,3792			
	C	AYNI SUYA DOYGUNLUK YÜZDESİ	0,9	1,17	1,61		0,44	30%	2,3304		
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,14	1,36	1,07			20%	3,5136		
			0,93		1,53	0,61	40%	1,4103			
	D	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	1	1,3	1,35	0,52	30%	1,7080			
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,08		1,17	0,44	20%	2,2750			

Benzer olarak, Tablo 4.3'te %20 bentonit içeren ZBK'ların total emme basınçlarının değişimi sunulurken Tablo 4.4'te de %20 Bentonit içeren ZBK'ların matris emme basınçlarının değişimi sunulmuştur.

**Tablo 4.3. % 20 ZBK 'ların total emme basınçlarının değişimi**

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								TOTAL EMME		% SAPMA	
								ORTALAMA	STANDART SAPMA		
% 20 ZBK	E	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	1	1,4	1,39	0,69	40%	2,7287	0,4649	17,0374	
		FARKLI SU İÇERİĞİ		1,3		0,52	30%	2,8329	0,3467	12,2383	
				1,2		0,34	20%	3,5523	0,3324	9,3573	
	F	FARKLI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	0,9	1,17	1,66	0,43		3,0689			
		AYNI SU İÇERİĞİ	1	1,3	1,39	0,52	30%	2,9581			
			1,1	1,43	1,17	0,61		2,7110			
	G	AYNI SUYA DOYGUNLUK YÜZDESİ	0,9	1,17	1,66		0,44	30%	3,0689		
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,15	1,37	1,09			20%	3,3659		
			0,93		1,7	0,61	40%	2,8870			
	H	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	1	1,3	1,39	0,52	30%	2,9581			
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,08		1,21	0,4	20%	3,5277			

**Tablo 4.4. % 20 ZBK 'ların matris emme basınçlarının değişimi**

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								MATRİS EMME		% SAPMA	
								ORTALAMA	STANDART SAPMA		
% 20 ZBK	E	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	1	1,4	1,39	0,69	40%	1,6760	0,1554	9,2721	
		FARKLI SU İÇERİĞİ		1,3		0,52	30%	1,7296	0,1576	9,1119	
				1,2		0,34	20%	3,3988	0,1927	5,6696	
	F	FARKLI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	0,9	1,17	1,66	0,43		2,2627			
		AYNI SU İÇERİĞİ	1	1,3	1,39	0,52	30%	1,8274			
			1,1	1,43	1,17	0,61		1,7017			
	G	AYNI SUYA DOYGUNLUK YÜZDESİ	0,9	1,17	1,66		0,44	30%	2,2627		
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,15	1,37	1,09			20%	3,0098		
			0,93		1,7	0,61	40%	0,9541			
	H	AYNI ÖZKÜTLE (gr/cm <sup>3</sup> )	1	1,3	1,39	0,52	30%	1,8274			
		FARKLI SU İÇERİĞİ	1,08		1,21	0,4	20%	3,4417			

## 4.2. DeneY Verilerinin Güvenirliğinin İstatistiksel Olarak Araştırılması

Filtre kâğıdı tekniği kullanılarak sıkıştırılmış zeminlerin matris emme ile ilgili, hataların ölçümü hakkında çalışmalar yapılmıştır. Literatür çalışmalarında daha önceden zeminlerde emme ölçümü doğruluğuyla ilgili olarak Chandler ve ark.[57]  $\pm\%25$  doğruluk bandı rapor ederken, Ridley ve ark. matris emme için doğruluk bandını  $\pm\%10$  doğruluk bandı ölçülebileceğini bildirmiştir [42].

Bu tez çalışmasında deneyler en az 30 kez tekrarlanmış olup, daha az tekrarlar  $\%95$  güven aralığında kalmak üzere  $\%10$  hata bandına en az kaç tekrar ile ulaşabileceğimizin hesabı amaçlanmıştır. Buna göre Zlatarev (1965)'in çalışmasında verilen tablo uyarınca hesaplamalar yapılmıştır [61].

Tablo 4.5'te A ve E grubu total emme değerlerinin ortalamaları, standart sapmaları, standart sapmaların ortalamaya göre yüzdeleri (% Standart sapma),  $\%95$  güven aralığındaki  $\Delta p$  değerleri ( $\Delta p \%$ 95), bunların ortalamaya göre yüzdeleri (%\*) ve bu aralığta kalmak üzere hatanın  $\%10$  hata bandındaki tekrar sayısı sunulmuştur.

**Tablo 4.5.** A ve E grubu total emme  $\%10$  hata bandı ile tekrar sayısı

A GRUBU	TOTAL							
	ORTALAMA	STANDART SAPMA	%STANDART SAPMA	%95 GÜVEN ARALIĞI		ORTALAMANIN $\%10$ U HATA KABUL		
				$\Delta p \%$ 95	%*	$\Delta p^* \text{ort.} \%$ 10	$\Delta p / \Delta s$	Tekrar
%40 ZBK	2,6078	0,3427	13,1425	0,1280	4,9	0,26078	0,76089	9
%30 ZBK	2,6225	0,3039	11,5880	0,1135	4,3	0,26225	0,86296	8
%20 ZBK	3,2223	0,3053	9,4741	0,1139	3,5	0,32223	1,05551	6
E GRUBU	ORTALAMA	STANDART SAPMA	%STANDART SAPMA	%95 GÜVEN ARALIĞI		ORTALAMANIN $\%10$ U HATA KABUL		
				$\Delta p \%$ 95	%	$\Delta p^* \text{ort.} \%$ 10	$\Delta p / \Delta s$	Tekrar
	%40 ZBK	2,7287	0,4649	17,0374	0,1736	6,4	0,27287	0,5869
%30 ZBK	2,8329	0,3467	12,2383	0,1298	4,6	0,28329	0,8171	9
%20 ZBK	3,5523	0,3324	9,3573	0,1242	3,5	0,35523	1,0687	6
30 DENEY İÇİN								

\* $\%95$  güven aralığındaki  $\Delta p$ 'nin ortalamaya göreye yüzdesi

Tablo 4.6'da ise A ve E grubu matris emme değerlerinin ortalamaları, standart sapmaları, standart sapmaların ortalamaya göre yüzdeleri (% Standart

sapma), %95 güven aralığındaki  $\Delta p$  değerleri ( $\Delta p$  %95), bunların ortalamaya göre yüzdeleri (%\*) ve bu aralıkta kalmak üzere hatanın %10 hata bandındaki tekrar sayısı sunulmuştur.

**Tablo 4.6.** A ve E grubu matris emme % 10 hata bandı ile tekrar sayısı

MATRİS								
A GRUBU	ORTALAMA	STANDART SAPMA	%STANDART SAPMA	%95 GÜVEN ARALIĞI		ORTALAMANIN %10'U HATA KABUL		
				$\Delta p$ %95	%*	$\Delta p$ *ort.%10	$\Delta p/\Delta s$	Tekrar
%40 ZBK	1,3802	0,0863	6,2511	0,0322	2,3	0,13802	1,5997	4
%30 ZBK	1,4305	0,1723	12,0447	0,0644	4,5	0,14305	0,8302	8
%20 ZBK	3,0705	0,3451	11,2392	0,1289	4,2	0,30705	0,8897	8
E GRUBU	ORTALAMA	STANDART SAPMA	%STANDART SAPMA	%95 GÜVEN ARALIĞI		ORTALAMANIN %10'U HATA KABUL		
				$\Delta p$ %95	%	$\Delta p$ *ort.%10	$\Delta p/\Delta s$	Tekrar
%40 ZBK	1,676	0,1554	9,2721	0,0581	3,5	0,1676	1,07851	6
%30 ZBK	1,7296	0,1576	9,1119	0,0589	3,4	0,17296	1,09746	6
%20 ZBK	3,3988	0,1927	5,6696	0,0720	2,1	0,33988	1,76378	4
30 DENEY İÇİN								

\*%95 güven aralığındaki  $\Delta p$ 'nin ortalamaya göreye yüzdesi

Güven aralığının % 95 olarak alınarak hesaplanan  $\Delta p$ 'nin ortalamaya göre yüzdesi A grubu için matris emmede %2,3 - %4,2 arası değişirken, total emmede %3,5 - %4,9 arası değişmektedir. E grubu için matris emmede %2,1 - %3,5 arası değişirken, total emmede %3,5 - %6,4 arası değişmektedir. Bu çalışmada, literatürde bulunan %25 [57]ve %10 [42] değerlerinden daha küçük hata yüzdelere ulaşılmıştır. Baz alınan % 95 güven aralığı içinde bu denli olumlu sonuç çıkmasının en büyük nedenlerinden biri filtre kâğıdı yöntemi kullanılırken alt ve üst numunelerin ayrı ayrı sıkıştırılmasıdır bu durum oluşabilecek deformasyonları en aza indirmiş ve sağlıklı bir temas dolayısı ile ölçüm alanı oluşturmuştur.

Matris emme için tekrar edilecek deney sayısı 4 ve 8 arasında; total emme içinde 6 ve 14 arasında değişmektedir. Total emmede daha büyük hataların oluşması ve daha çok deney tekrar sayısı çıkmasının sebebi olarak total emmenin belirlenmesi için daha uzun denge süresine gereksinim olmasını gösterebiliriz. Literatürde de belirtildiği üzere total emmenin belirlenmesi için denge süresi

bazen 2 katına bazen de 3 katına çıkabilmektedir. Bu denge süreleri uygulandığında total emmede de daha tutarlı sonuçlara ulaşılabilmektedir.

### 4.3. İndeks Parametrelerinin Emme Basınçlarına Etkisi

Farklı indeks özellikleri kullanılarak bu gruplar kendi içinde karşılaştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak başlangıç su içeriğinin emme basıncının üzerindeki etkileri ve tüm zemin numuneleri için su içeriği-emme basıncı ilişkisi incelenmiştir. Aşağıda farklı özellikteki zemin numunelerinin zemin emme ve su içeriği grafikleri verilmiştir.

%10 ZBK'dan A grubu %40, %30, %20 su içeriğine sahip aynı kuru özkütle ( $\text{gr/cm}^3$ ) ve boşluk oranında ve farklı ıslak özkütlerde (sırasıyla 1,40, 1,30, 1,20  $\text{g/cm}^3$ ) total emme (Tablo 4.7) ve matris emme (Tablo 4.8) sonuçlarının değişimi gösterilmektedir.

A grubu %20 ve %30 su içeriklerindeki total emme farkı %40 ve %30 su içeriklerinden oldukça fazladır. Su içeriği %30'dan %20'ye indiğinde %33 azalma gerçekleşirken, %40'dan %30'a indiğinde %25 lik bir azalma söz konusudur. Dolayısıyla emmedeki artış su içeriğindeki azalma yüzdeleriyle ilişkilendirilebilir. Bununla beraber suya doygunluk oranı su içeriği %40 olduğunda %70 iken, su içeriği %30 olduğunda %52, su içeriği %20 olduğunda ise %35 tir (Şekil 4.2). Buna göre %40 su içeriğinden %30 su içeriğine düştüğünde suya doygunluk oranında azalma %26 iken %30 su içeriğinden %20 su içeriğine düştüğünde bu azalma %33'e çıkmaktadır. Buna dayanarak su içeriğindeki azalma miktarı arttıkça emme değerindeki artış artarak ilerlemektedir. Benzer davranış matris emmede gözlenmiştir. Şekil 4.1'de aynı kuru özkütle ve boşluk oranında hazırlanmış numunelerin su içeriği ile emme arasındaki ilişki sunulmuştur. Şekil 4.2'de ise aynı örneklere ait suya doygunluk oranı ile emme değerleri ilişkilendirilmiştir.

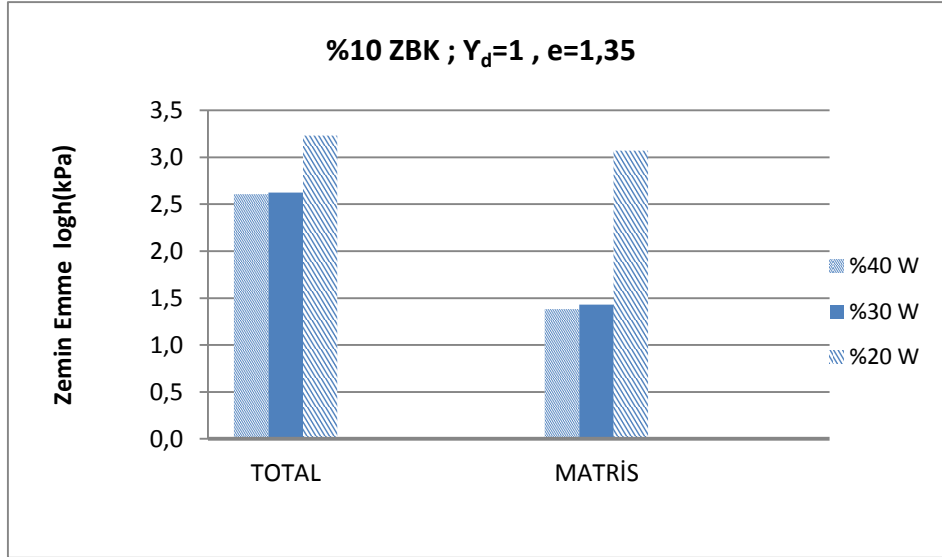


**Tablo 4.7.** A Grubu %10 ZBK'nın total emme basıncı değerleri

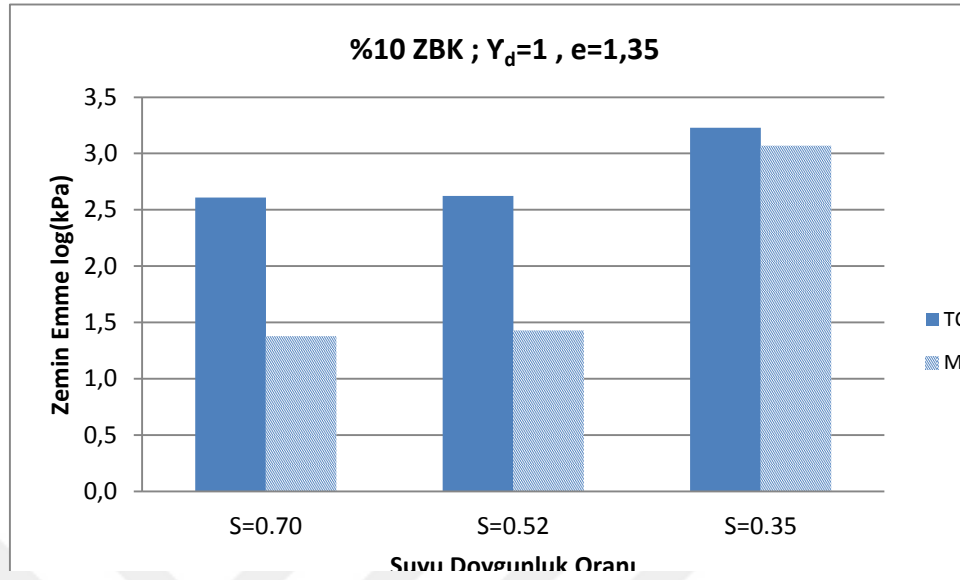
DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								TOTAL EMME
								ORTALAMA
%10 ZBK	A	AYNI ÖZKÜTLE (g/cm <sup>3</sup> )		$\gamma_n=1,40$		$S=0,70$	$w=\% 40$	2,6078
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	$e=1,35$	$S=0,52$	$w=\% 30$	2,6225
		FARKLI SU İÇERİĞİ		$\gamma_n=1,20$		$S=0,35$	$w=\% 20$	3,2292

**Tablo 4.8.** A Grubu %10 ZBK'nın matris emme basıncı değerleri

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								MATRİS EMME
								ORTALAMA
%10 ZBK	A	AYNI ÖZKÜTLE (g/cm <sup>3</sup> )		$\gamma_n=1,40$		$S=0,70$	$w=\% 40$	1,3802
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	$e=1,35$	$S=0,52$	$w=\% 30$	1,4305
		FARKLI SU İÇERİĞİ		$\gamma_n=1,20$		$S=0,35$	$w=\% 20$	3,0705



**Şekil 4.1** A grubu için su içeriği - zemin emme ilişkisi



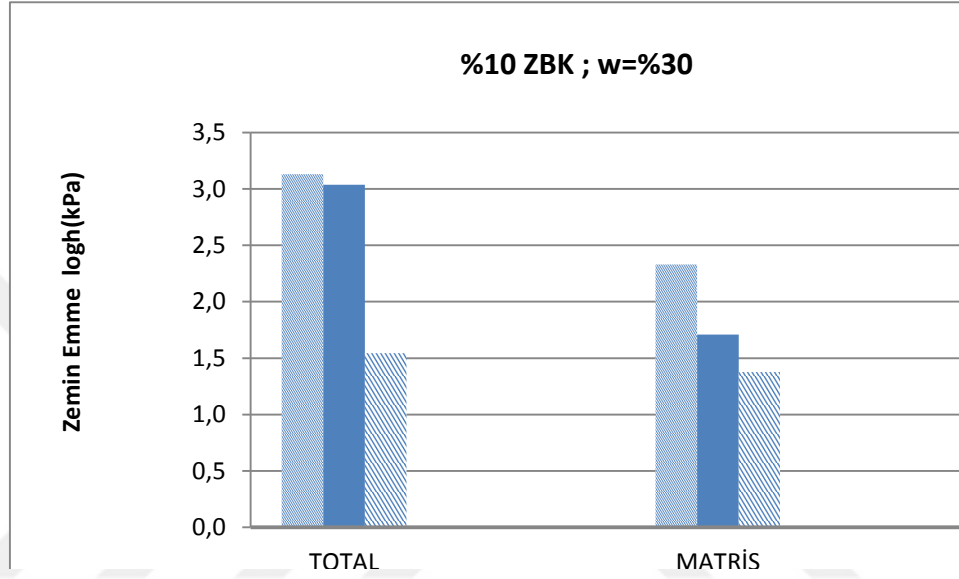
**Şekil 4.2.** A grubu suya doygunluk–zemin emme ilişkisi

%10 ZBK – B grubu örneklerinin %30 su içeriğine sahip, farklı kuru (sırasıyla 0,9, 1,0, 1,1 gr/cm<sup>3</sup>) ve ıslak özkütlerde (sırasıyla 1,17, 1,30, 1,43 gr/cm<sup>3</sup>) hazırlanmış örneklere ait total ve matris emme sonuçları Tablo 4.9’da gösterilmektedir.

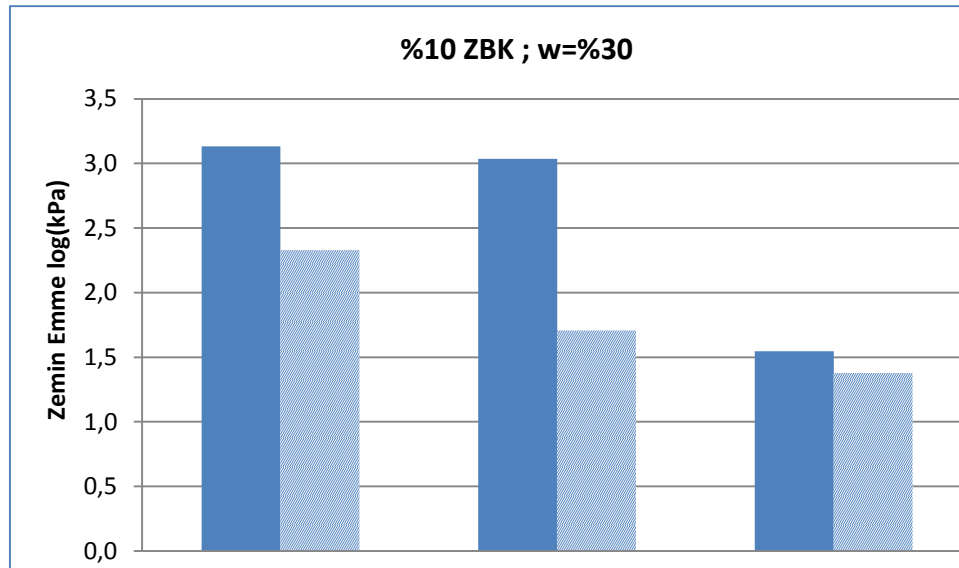
B grubu aynı oranda su içeriğine sahip farklı kuru ve ıslak özkütlerde total emme ve matris emme sonuçlarının özkütle ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Bunu sebebi özkütlenin artması ile zemin içindeki boşluk oranının azalmasından kaynaklanmaktadır. Total ve matris emme değerlerinin kuru özkütleye göre değişimi Şekil 4.3’te verilmiştir. Şekil 4.4’te ise emme değerlerinin ıslak özkütleye göre değişimi sunulmuştur. Buna göre ıslak özkütle arttıkça emmenin azaldığı ve ıslak özkütlesi 1,43 olan örneğin total emme değerindeki azalmanın en çok olduğu görülmüştür. Bununla beraber ıslak özkütleri farklı olan örneklerin suya doygunluk oranları da farklıdır. Şekil 4.5’te total ve matris emme değerlerinin suya doygunluk oranına göre değişimi verilmiştir.

**Tablo 4.9.** B grubunun total ve matris emme değerleri

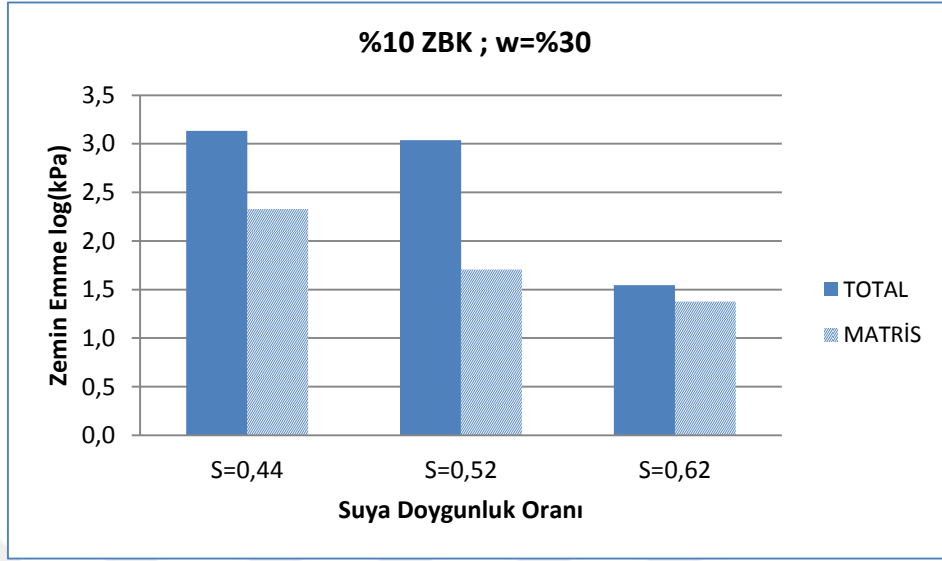
DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								TOTAL EMME	MATRİK EMME
								ORTALAMA	ORTALAMA
%10 ZBK	B	FARKLI ÖZKÜTLE (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=0,9$	$\gamma_n=1,17$	$e=1,61$	$S=0,44$		3,1321	2,3304
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	$e=1,35$	$S=0,52$	$w=\%30$	3,0359	1,7080
		AYNI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,1$	$\gamma_n=1,43$	$e=1,14$	$S=0,62$		1,5457	1,3792



**Şekil 4.3.** B grubu için kuru özkütle - zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.4.** B grubu için ıslak özkütle - zemin emme ilişkisi



**Şekil 4.5.** B grubu için suya doğunluk oranı - zemin emme ilişkisi

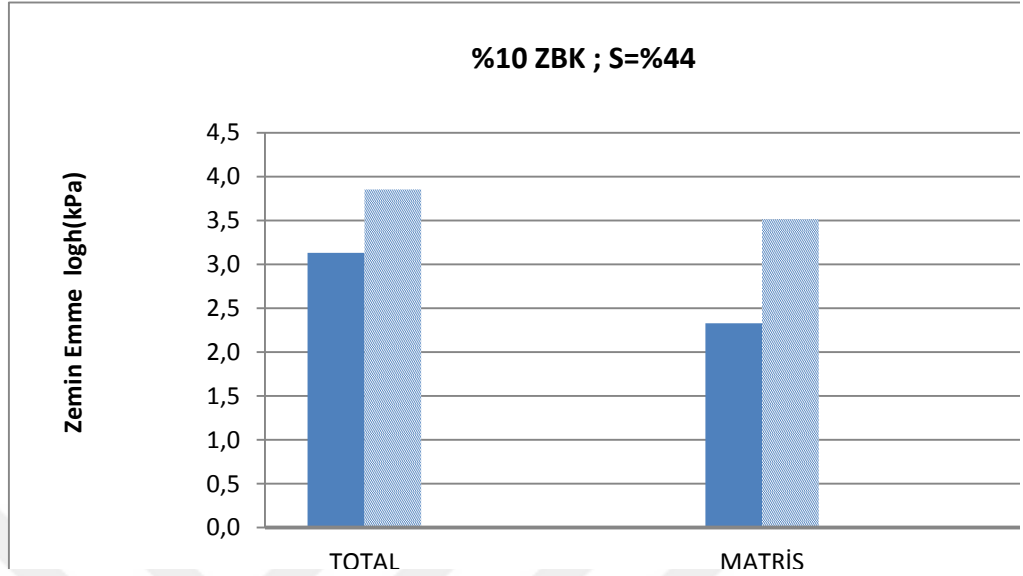
%10 ZBK'dan C grubu %20 ve %30 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlerde (sırasıyla 1,17, 1,36 gr/cm<sup>3</sup>) total emme ve matris emme sonuçları Tablo 4.10'da gösterilmektedir.

C grubu örnekleri aynı suya doğunluk oranına sahip farklı özkütlerle ve su içeriği olan numunelerden oluşmaktadır. Su içerikleri %20 ve %30 olan örneklerin ıslak özkütleri sırasıyla 1,17 ve 1,36 kuru özkütleri ise yine sırasıyla 0,9 ve 1,14'tür. Aynı suya doğunluk oranına sahip numunelerde su içeriği azaldıkça toplam ve matris emmenin arttığı görülmüştür. Bu artış miktarı matris emmede daha fazla görülmektedir.

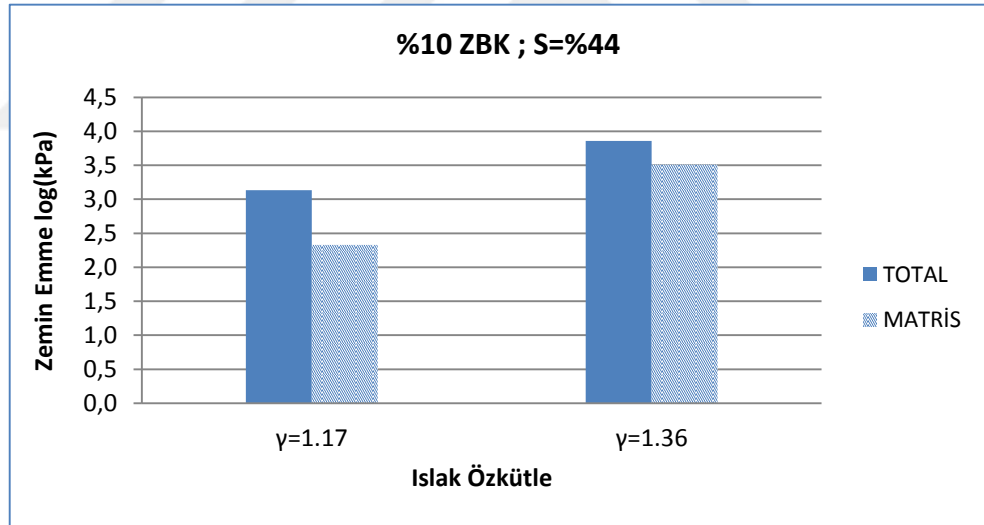
**Tablo 4.10.** C grubunun total ve matris emme değerleri

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								TOTAL EMME	MATRİK EMME
								ORTALAMA	ORTALAMA
%10 ZBK	C	AYNI SUYA DOĞUNLUK YÜZDESİ	$\gamma_d=0,9$	$\gamma_n=1,17$	$e=1,61$	S=0,44	W=% 30	3,1321	2,3304
		FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,14$	$\gamma_n=1,36$	$e=1,07$			3,8561	3,5136

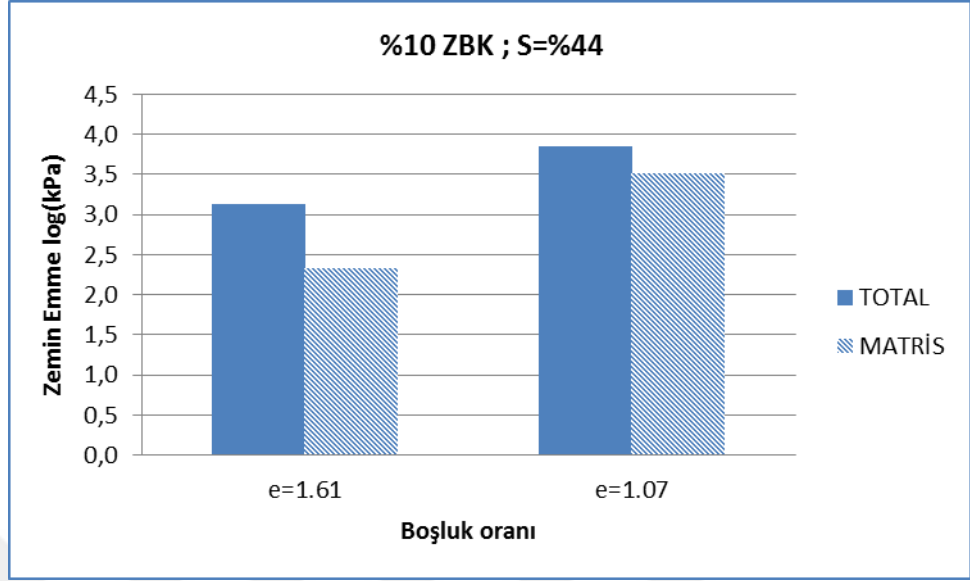
C grubu örneklerinin su içeriği emme ilişkisi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.7'de emme değerlerinin ıslak özküt ile; Şekil 4.8'de ise boşluk oranı ile ilişkisi sunulmuştur.



**Şekil 4.6** C grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.7.** C grubu için ıslak özkütle - zemin emme kapasitesi ilişkisi



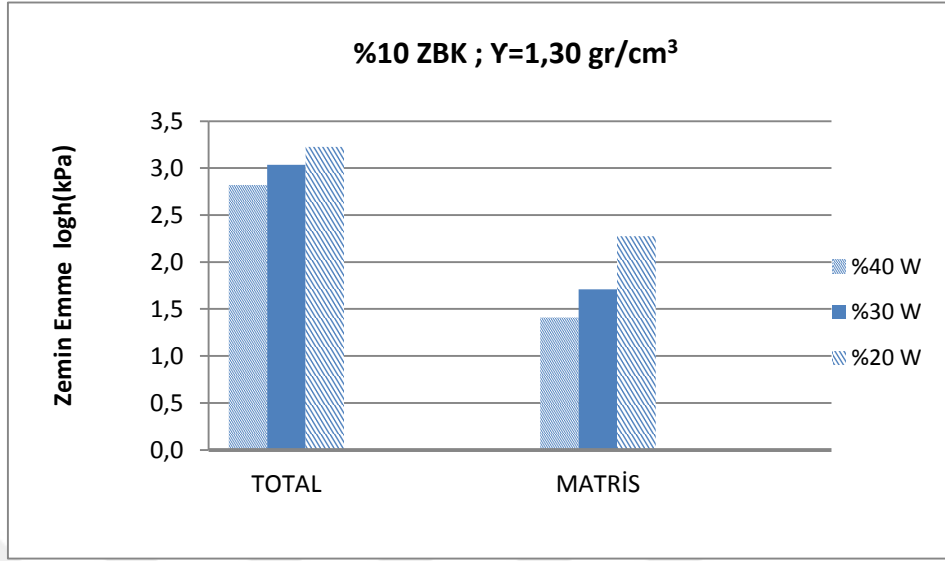
**Şekil 4.8.** C grubu için boşluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi

%10 ZBK'dan D grubu %40, %30 ve %20 su içeriğine sahip aynı ıslak özkütlede ( $1,30 \text{ gr/cm}^3$ ) total emme ve matris emme sonuçlarının değişimi Tablo 4.11'da gösterilmektedir.

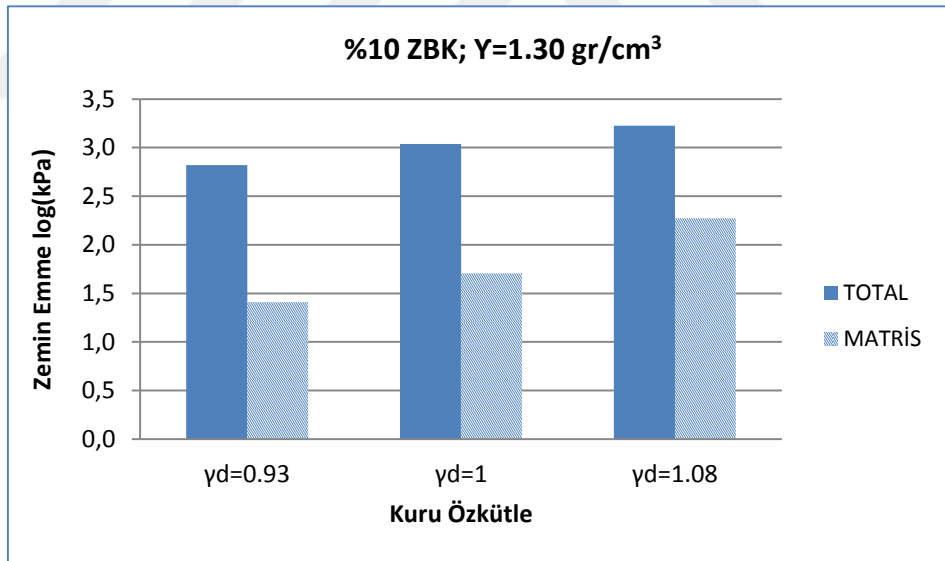
D grubu %40, %30 ve %20 su içeriğine sahip aynı özkütlede zemin numunelerinin su içeriği azaldıkça hem matris hem de total emmenin arttığı görülmüştür. Fakat %20 su içeriğine sahip zemin numunelerinin matris emmesinin değeri diğerlerine göre daha fazla artış göstermiştir (Şekil 4.9). Aynı zamanda ıslak özkütle arttıkça emme (Şekil 4.10), boşluk oranı azaldıkça (Şekil 4.11) ve suya doygunluk oranı azaldıkça (Şekil 4.12) emme artmıştır.

**Tablo 4.11.** D grubunun total ve matris emme değerleri

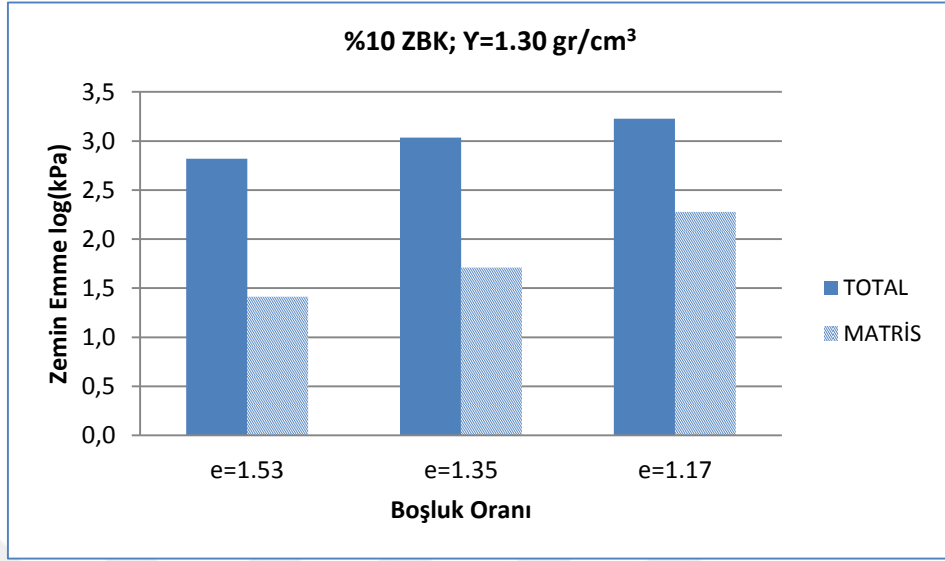
DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								TOTAL EMME	MATRİK EMME
								ORTALAMA	ORTALAMA
%10 ZBK	D	AYNI ÖZKÜTLE ( $\text{g/cm}^3$ )	$\gamma_d=0,93$		$e=1,53$	$S=0,61$	$w=\% 40$	2,8210	1,4103
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	$e=1,35$	$S=0,52$	$w=\% 30$	3,0359	1,7080
		FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,08$		$e=1,17$	$S=0,44$	$w=\% 20$	3,2263	2,2750



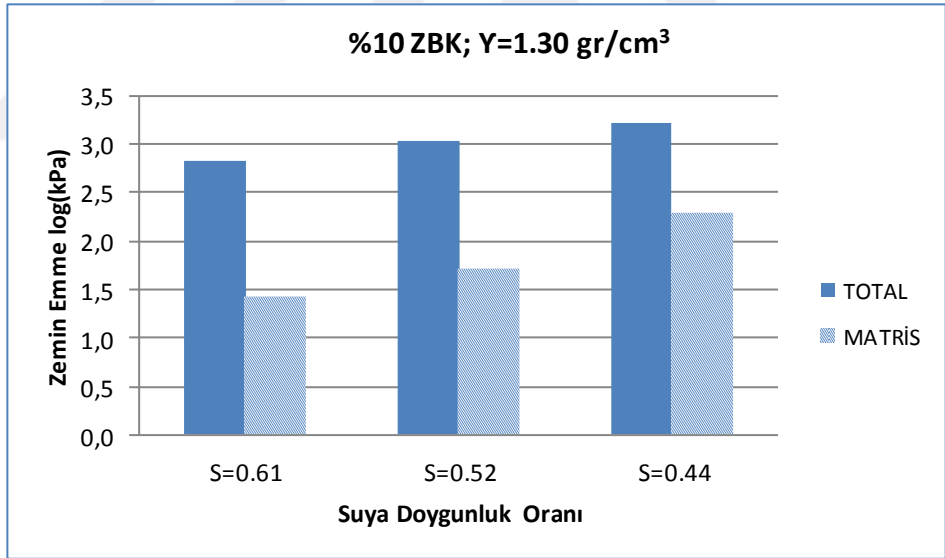
Şekil 4.9. D grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.10. D grubu için kuru özkütle - zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.11.** D grubu için boşluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.12.** D grubu için suya doymuluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi

%20 ZBK'dan E grubu %40, %30 ve %20 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlede (sırasıyla 1,40, 1,30, 1,20  $\text{gr/cm}^3$ ) total emme Tablo 4.12'de ve matris emme sonuçlarının değişimi Tablo 4.13'de gösterilmektedir.



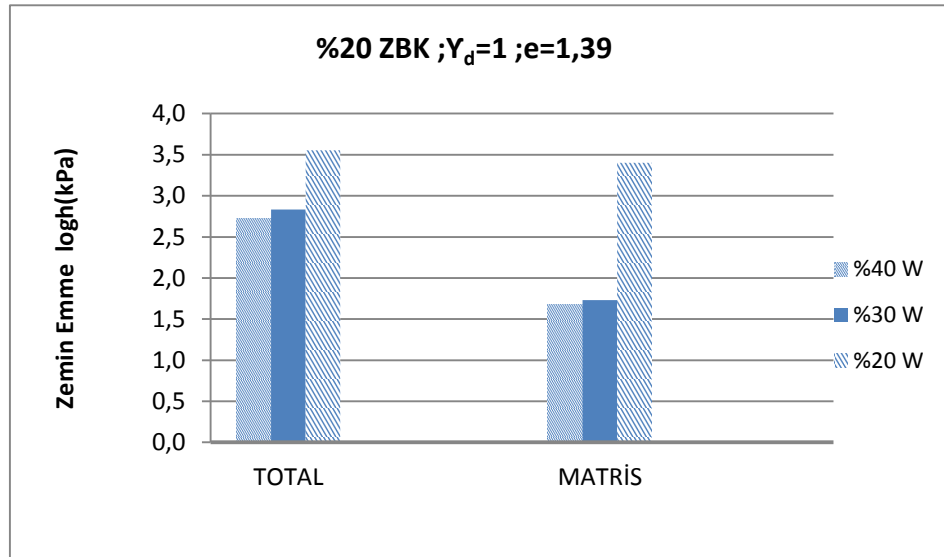
E grubu %40, %30, %20 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütledeki (sırasıyla 1.40, 1.30, 1.20) zemin numunelerinin su içeriğinin azaldıkça total ve matris emmelerinde artış gözlenmektedir (Şekil 4.13). Fakat %20 su içeriğine sahip zemin numunelerinin matris emmedeki artışının ciddi bir farkla fazla olduğu görülmektedir. Aynı zaman da suya doygunluk oranı arttıkça emme artmıştır (Şekil 4.14).

**Tablo 4.12.** E grubunun total emme değerleri

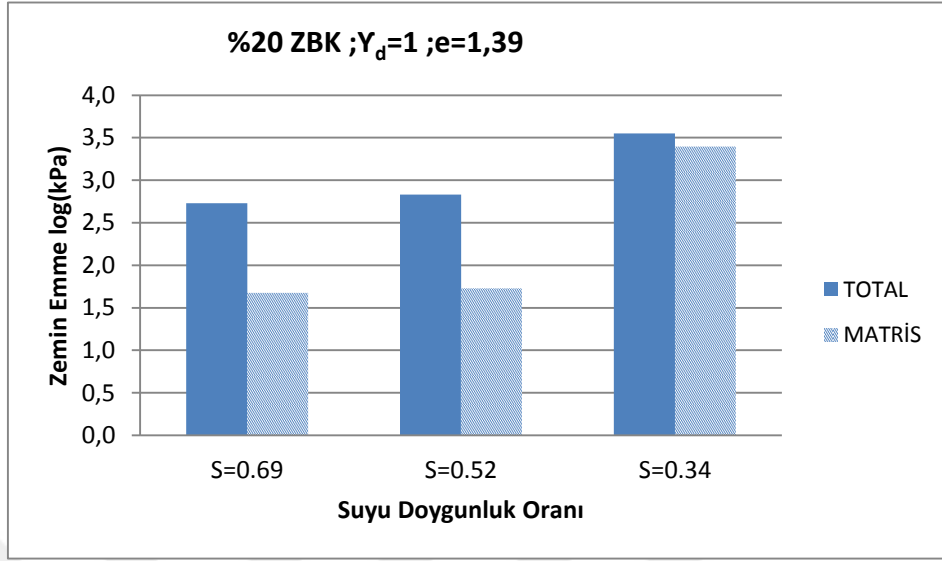
DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA							TOTAL EMME	
							ORTALAMA	
%20 ZBK	E	AYNI ÖZKÜTL E (g/cm <sup>3</sup> )		$\gamma_n=1,40$		S=0,69	W=% 40	2,7287
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	e=1,39	S=0,52	W=% 30	2,8329
		FARKLI SU İÇERİĞİ		$\gamma_n=1,20$		S=0,34	W=% 20	3,5523

**Tablo 4.13.** E grubunun matris emme değerleri

DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA							MATRİK EMME	
							ORTALAMA	
%20 ZBK	E	AYNI ÖZKÜTL E (g/cm <sup>3</sup> )		$\gamma_n=1,40$		S=0,69	W=% 40	1,6760
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	e=1,39	S=0,52	W=% 30	1,7296
		FARKLI SU İÇERİĞİ		$\gamma_n=1,20$		S=0,34	W=% 20	3,3988



**Şekil 4.13.** E grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi



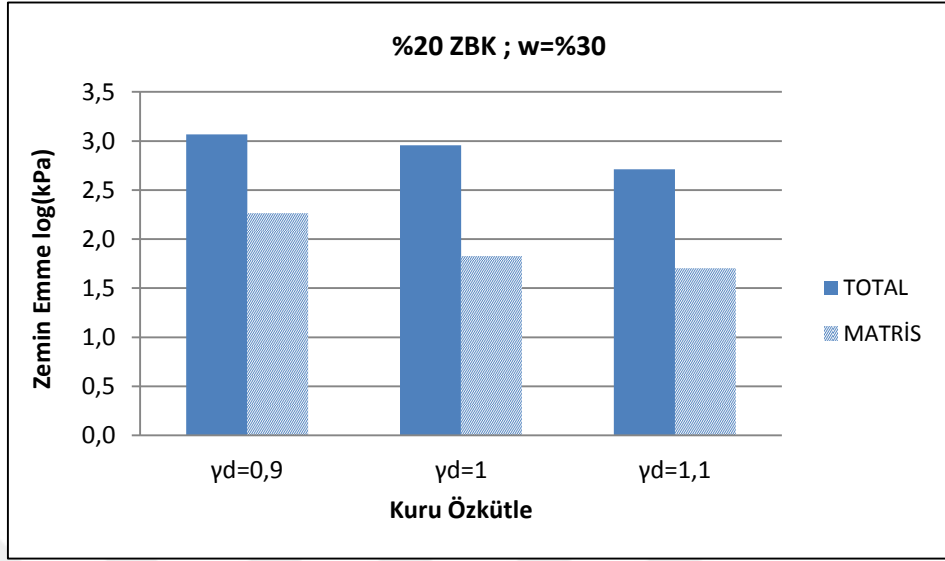
**Şekil 4.14.** E grubu suya doygunluk–zemin emme ilişkisi

%20 ZBK'dan F grubu %30 su içeriğine sahip örneklerin sonuçları Tablo 4.14'de verilmiştir. Farklı kuru özkütlerde (sırasıyla 0,9, 1, 1,1 gr/cm<sup>3</sup>) total emme ve matris emme sonuçlarının değişimi gösterilmektedir(Şekil 4.15).

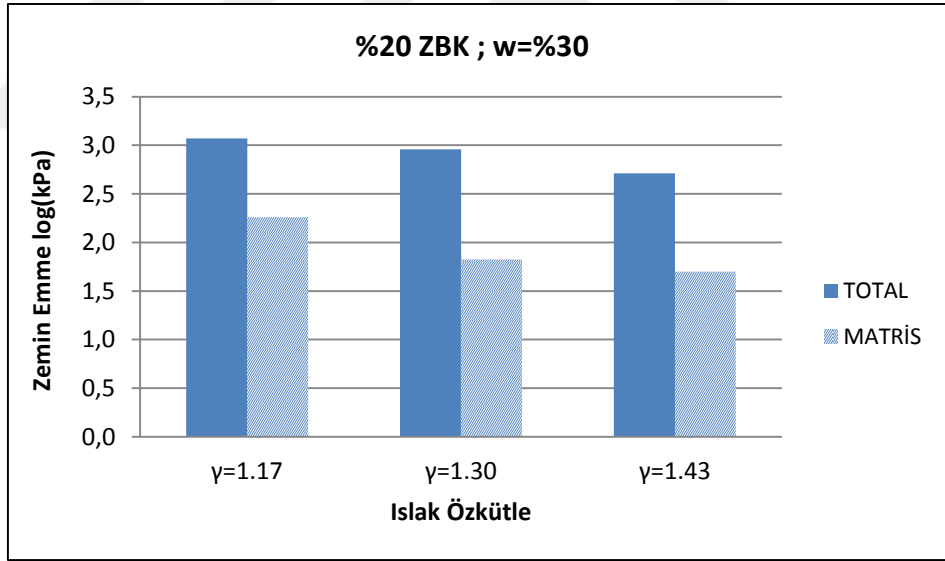
F grubu %30 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlerde (sırasıyla 1,17, 1,30, 1,43 gr/cm<sup>3</sup>) zemin numunelerinin ıslak özkütle arttıkça total ve matris emmelerinin azaldığı görülmüştür (Şekil 4.16).

**Tablo 4.14.** F Grubunun total ve matris emme değerleri

		DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA						TOTAL EMME	MATRİK EMME
								ORTALAMA	ORTALAMA
%20 ZBK	F	FARKLI ÖZKÜTLE (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d=0,9$	$\gamma_n=1,17$	$e=1,66$	$S=0,43$	W=% 30	3,0689	2,2627
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	$e=1,39$	$S=0,52$			
		AYNI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,1$	$\gamma_n=1,43$	$e=1,17$	$S=0,61$	2,7110	1,7017	



**Şekil 4.15.** F grubu kuru özkütle ve zemin emme ilişkisi



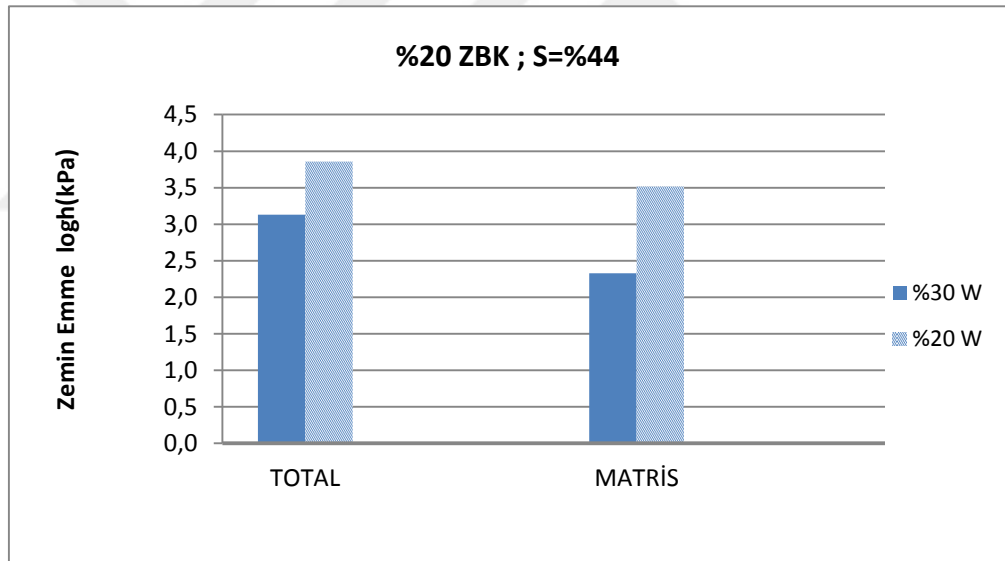
**Şekil 4.16.** F grubu ıslak özkütle ve zemin emme ilişkisi

%20 ZBK'dan G grubu %30 ve %20 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlede (sırasıyla 1,17, 1,37 gr/cm<sup>3</sup>) total emme ve matris emme sonuçlarının değişimi Tablo 4.15'de gösterilmektedir.

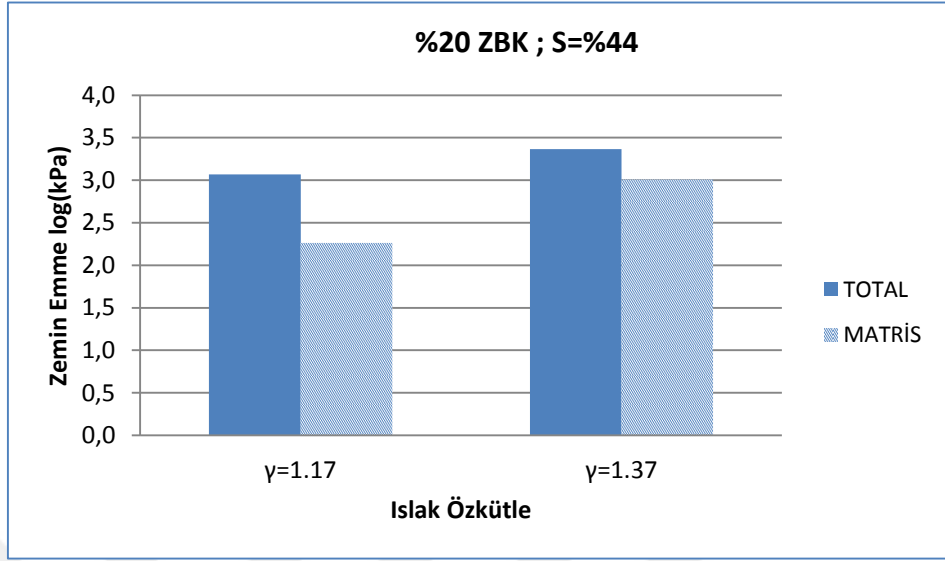
G grubu %30 ve %20 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlede (sırasıyla 1.17, 1.37 gr/cm<sup>3</sup>) ve aynı suya doygunluk oranına sahip zemin numunelerinde ıslak özkütle arttıkça total ve matris emmenin de arttığı görülmüştür. Bu artış miktarı (Şekil 4.17) matris emmede daha fazladır. Bununla beraber ıslak özkütle arttıkça emme artmaktadır (Şekil 4.18) ve boşluk oranı azaldıkça emme artmaktadır (Şekil 4.19) .

**Tablo 4.15.** G grubunun total ve matris emme değerleri

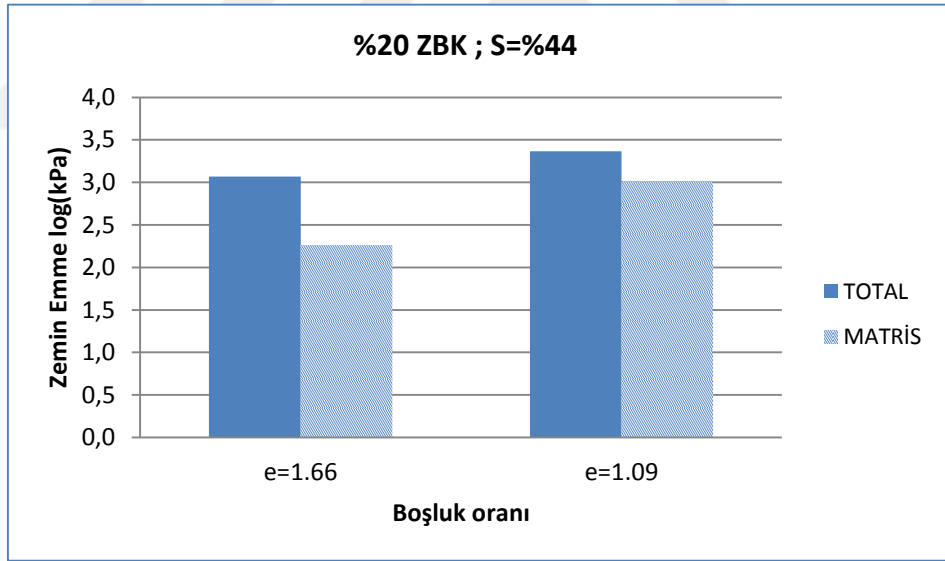
DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								TOTAL EMME	MATRİK EMME
								ORTALAMA	ORTALAMA
%20 ZBK	G	AYNI SUYA DOYGUNLUK YÜZDESİ FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=0,9$	$\gamma_n=1,17$	$e=1,66$	$S=0,44$	W=% 30	3,0689	2,2627
			$\gamma_d=1,15$	$\gamma_n=1,37$	$e=1,09$		W=% 20	3,3659	3,0098



**Şekil 4.17.** G grubu için su içeriği -zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.18.** G grubu farklı ıslak özkütlerine göre zemin emme değerleri



**Şekil 4.19.** G grubu için boşluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi

%20 ZBK'dan H grubu %40, %30 ve %20 su içeriğine sahip sonuçlar Tablo 4.16'da verilmiştir. H grubu farklı su içeriğine sahip aynı ıslak özkütlerde ( $1,30 \text{ gr/cm}^3$ ) total emme ve matris emme sonuçları Şekil 4.20'de görülmektedir.

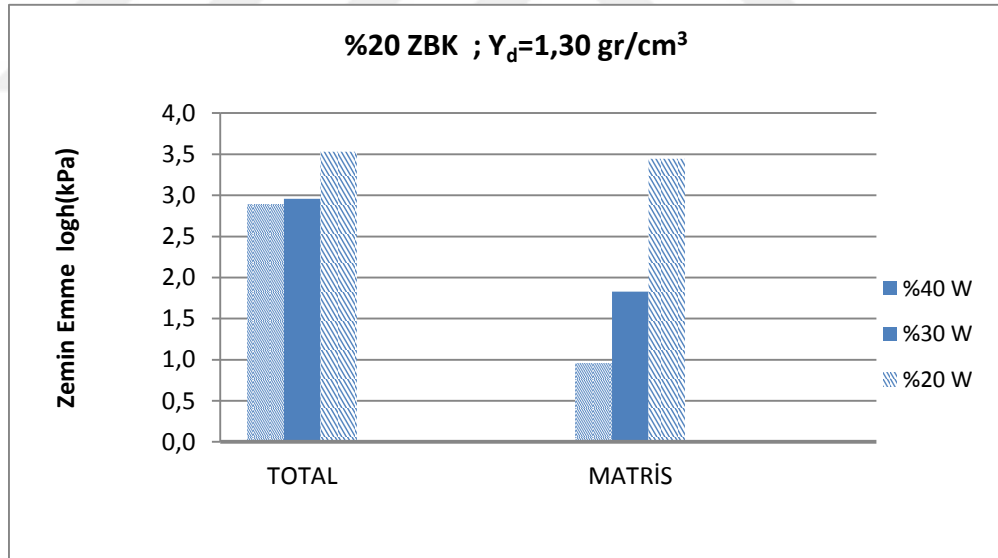
Su içeriği azaldıkça total ve matris emmede artış görülmektedir. Bu artış miktarı %20 su içeriğine sahip örneklerde en fazladır.

Farklı kuru özkütlede zemin numunelerinin su içeriği arttıkça total ve matris emmelerinde artış gözlemlenmiştir. Bu artış %20 su içeriğine sahip zemin numunesinde matris emmede en fazla artış görülmüştür (Şekil 4.21).

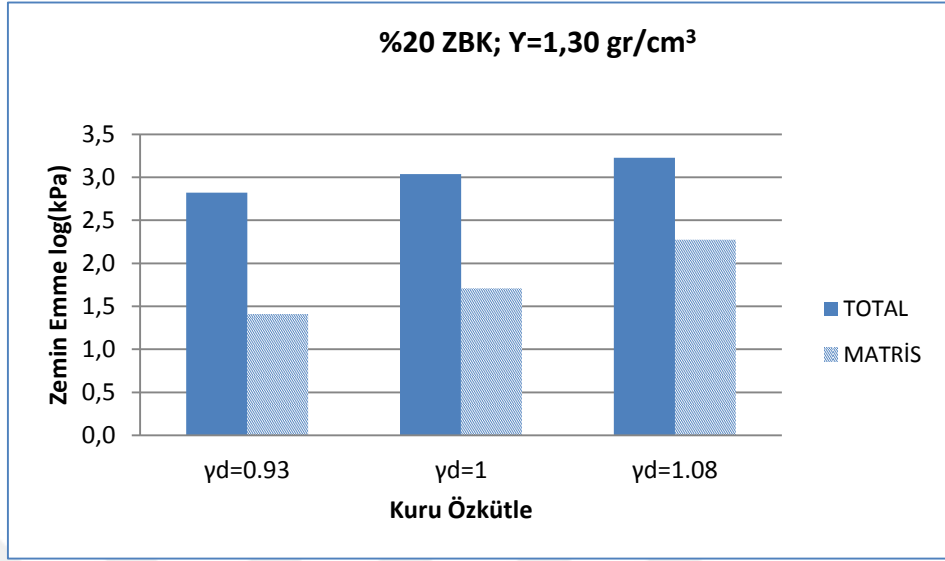
Boşluk oranının azalması (Şekil 4.22) ve suya doygunluk oranlarının azalması (Şekil 4.23) ile matris ve total emmede artış olduğu görülmüştür.

**Tablo 4.16.** H grubunun total ve matris emme değerleri

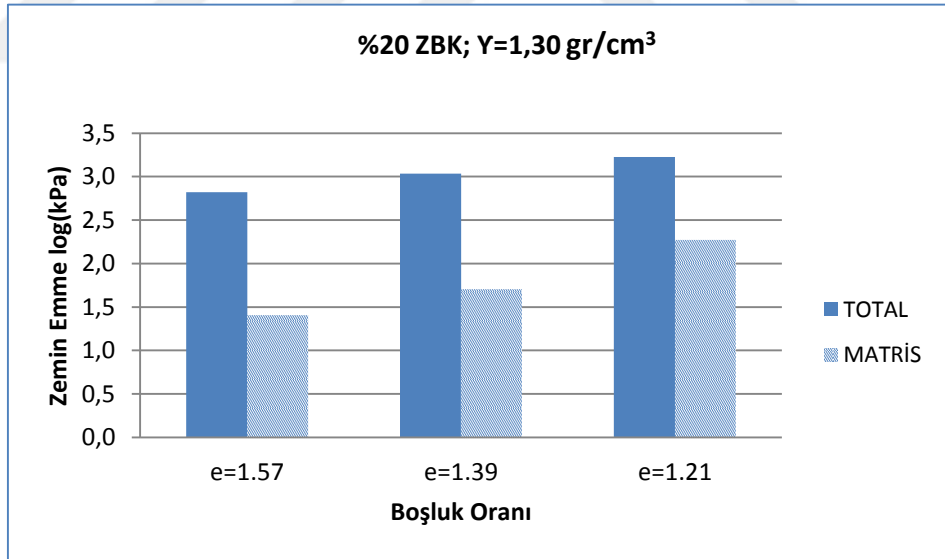
DENGELEME SÜRESİ 1 HAFTA								TOTAL EMME	MATRİK EMME
								ORTALAMA	ORTALAMA
%20 ZBK	H	AYNI ISLAK BİRİM HACİM AĞIRLIK	$\gamma_d=0,93$		$e=1,57$	$S=0,61$	$w=\% 40$	2,8870	0,9541
			$\gamma_d=1$	$\gamma_n=1,30$	$e=1,39$	$S=0,52$	$w=\% 30$	2,9581	1,8274
		FARKLI SU İÇERİĞİ	$\gamma_d=1,08$		$e=1,21$	$S=0,40$	$w=\% 20$	3,5277	3,4417



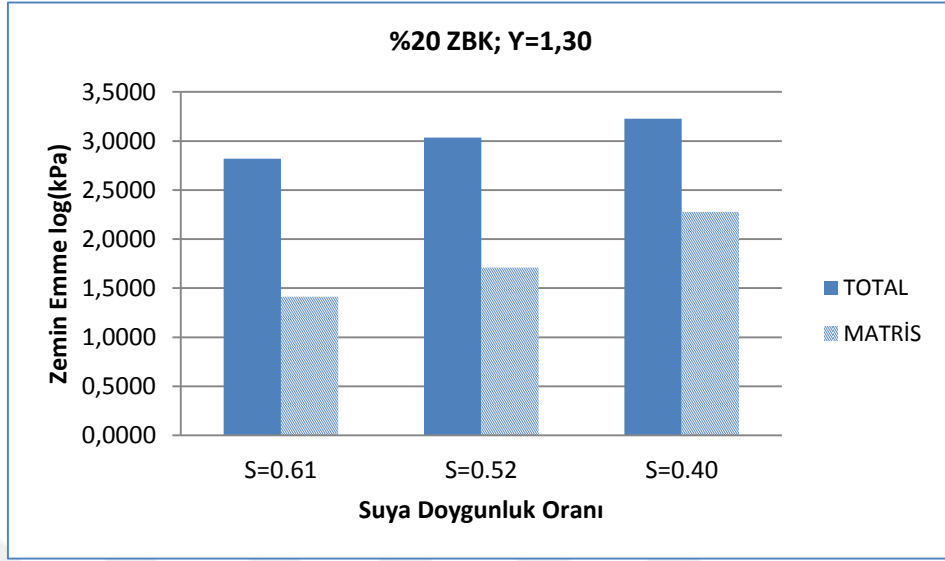
**Şekil 4.20.** H grubu için su içeriği - zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.21.** H grubu için kuru özkütle - zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.22.** H grubu için boşluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi



**Şekil 4.23.** H grubu için suya doymuluk oranı - zemin emme kapasitesi ilişkisi



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında doymun olmayan zeminlerin mühendislik davranışları üzerinde önemli etkileri olan emme basıncını etkileyen faktörlerin araştırılması sunulmuştur.

Emme basıncının belirlenmesi amacıyla kullanılan zemin numuneleri, iki farklı bentonit (%10 ve %20 ZBK) içeriği ve bunların 4 farklı özellikte alt gruba sahip zemin numuneleri sıkıştırılmıştır. Bu gruplar %10 bentonit içeren zemin numuneleri A, B, C, D ve %20 bentonit içeren E, F, G, H'dir. Bu gruplar ıslak özkütle, kuru özkütle, su içeriği, suya doymunluk oranı değiştirilerek emme basınçlarının değişimi gösterilmiştir. Emme basınçlarını belirlemek için filtre kâğıdı tekniği kullanılmıştır.

Elde edilen deney sonuçları ile emme basıncının başlangıç su içeriği ve kuru özkütlesine bağlı olarak tahmini için regresyon analiz yapılmıştır. Deney sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu bölümde maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Bu tez çalışmasında, A ve E grubu örnekleri için deneyler en az 30 kez tekrarlanmış ve daha az tekrarlar %10 hata bandına en az kaç tekrar ile ulaşabileceğimizin hesabı yapılmıştır. % 10 hata bandında 30 dan daha az tekrar yapılarak deneyler sonlandırılabilir. % 95 güven aralığındaki  $\Delta p$ 'nin ortalamaya göre yüzdesi, A grubu için matris emmede % 2,3 - % 4,2 arasında; total emmede de % 3,5-% 4,9 arasında değişmiştir. E grubu için matris emmede % 2,1 - % 3,5 arası değişirken, total emmede % 3,5-% 6,4 arası değişmektedir. % 95 güven aralığı içinde bu denli olumlu sonuç çıkmasının en büyük nedenlerinden biri de filtre kâğıdı yöntemi kullanılırken alt ve üst numunelerin ayrı ayrı sıkıştırılmasıdır bu durum oluşabilecek deformasyonları en aza indirmiştir.

2. %95 güven aralığında  $\pm\%10$  hata bandı hedefi baz alınarak matris emme için tekrar edilecek deney sayısı 4 ve 8 arasında; total emme içinde 6 ve 14

arasında değişmektedir, tekrarlanması gereken minimum deney sayısı %10 ZBK'ların matris emmeleri için daha az tekrar istemektedir. Total emme için daha uzun dengeleme süresi önerilmektedir.

3. Genel olarak deney sonuçları değerlendirilerek, bentonit-zeolit karışımların matris ve total emme miktarlarında su içeriği arttıkça azalma görülmüştür. Ancak su içeriğinin etkisi A grubu % 10 ZBK zemin numunelerinde matris emmede daha belirgindir.

4. A grubu zemin numuneleri aynı kuru özkütle, farklı su içeriği (sırasıyla %40, %30, %20) özelliğine sahiptir. Bu zeminin %20 su içeriğine sahip numunelerinde matris emme artışının daha fazla olduğu görülmüştür (Tablo 4.6).

5. %10 ZBK'dan B grubu aynı oranda ( $W = \%30$ ) su içeriklerine sahip farklı ıslak özkütlerde (sırasıyla 1.17, 1.30, 1.43 gr/cm<sup>3</sup>) total emme ve matris emme sonuçlarının özkütle ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Islak özkütle 1.43 olan zemin numunelerinde total emmenin azalmasının daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.4).

6. %10 ZBK'dan C grubu %20 ve %30 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlerde (sırasıyla 1.7, 1,36) ve aynı suya doygunluk oranına sahip numunelerinde su içeriği azaldıkça toplam ve matris emmenin arttığı görülmüştür (Şekil 4.7). Bu artış miktarı matris emmede daha fazla görülmektedir.

7. %10 ZBK'dan D grubu %40, %30 ve %20 su içeriğine sahip aynı özkütlerde zemin numunelerinin su içeriği azaldıkça hem matris hem de total emmenin arttığı görülmüştür. Fakat %20 su içeriğine sahip zemin numunelerinin matris emmesinin değeri diğerlerine göre daha fazla artış göstermiştir.

8. %10 ZBK'dan E grubu %40, %30, %20 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlerdeki (sırasıyla 1.40, 1.30, 1.20 gr/cm<sup>3</sup>) zemin numunelerinin su içeriğinin azaldıkça total ve matris emmelerinde artış gözlenmektedir. Fakat %20 su içeriğine sahip zemin numunelerinin matris emmedeki artışının ciddi bir farkla fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.11).

9. %20 ZBK'dan F grubu %30 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlede (sırasıyla 1.17, 1.30, 1.43) zemin numunelerinin ıslak özkütle arttıkça total ve matris emmelerinin azaldığı görülmüştür (Şekil 4.13).

10. %20 ZBK'dan G grubu %30 ve %20 su içeriğine sahip farklı ıslak özkütlede (sırasıyla 1.17, 1.37) ve aynı suya doygunluk oranına sahip zemin numunelerinde ıslak özkütle arttıkça total ve matris emmenin de arttığı görülmüştür (Şekil 4.16). Bu artış miktarı matris emmede daha fazladır.

11. %20 ZBK'dan H grubu %40, %30 ve %20 su içeriğine sahip aynı ıslak özkütlede zemin numunelerinin su içeriği arttıkça total ve matris emmelerinde artış gözlemlenmiştir. Bu artış %20 su içeriğine sahip zemin numunesinde matris emmede ciddi bir artış görülmüştür (Şekil 4.19).

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Rao, S.M., Revanasiddappa, K. Role of soil structure and matric suction in collapse of a compacted clay soil. 2003, 26(1), 1-9.
- [2] Bicalho K.V., Gomes Correia A., Ferreira S., Fleureau J-M., Marinho F.A.M. Filter Paper Method of Soil Suction Measurement. In: XIII Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, July 16-20, 2007, Margarita Island, Venezuela (Bildiri Özetleri Kitabı, 976 s.)
- [3] Snethen DR. 1980. Characterization of expansive soils using soil suction data. In: Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, 16–18 June, 1980, New York, (Bildiri Kitabı, 54-75 s.)
- [4] Bulut, R., Lytton, R.L., Wray, W.K. Soil Suction Measurements by Filter Paper. Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations. Eds.: Cumaraswamy Vipulanandan, Marshall B. Addison, Michael Hasen. ASCE Geotechnical Special Publication, No. 115, Houston, Texas, 2001, 243-261.
- [5] Fredlund, D.G., Rahardjo, H. Soil Mechanics For Unsaturated Soils. John Wiley & Sons Inc., New York, 1993.
- [6] Türker, E. Zeminlerin Su Tutma Eğrilerinin Granülometri Eğrilerinden Elde Edilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 2006, 125 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [7] Göksan, T.S. Zeminlerin Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bir Yaklaşım. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2007, 151 s. (Doktora Tezi).
- [8] Bayrak, M.Ç. Zemin Suyu Özelliklerinin Emme Basıncı Üzerindeki Etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 2008, 64 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [9] Baker, R., Frydman, S. Unsaturated soil mechanics critical review of physical foundations. Engineering Geology. 2009, 106(1-2), 26-39.
- [10] Ajdari, M., Habibagahi, G., Masrouri, F. The role of suction and degree of saturation on the hydro-mechanical response of a dual porosity silt–bentonite mixture. Applied Clay Science. 2013, 83-84, 83–90.
- [11] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, A. Shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal. 1978, 15, 313-321

- [12] Köksalan, A.O. A Preliminary Study On Construction of a High Capacity Tensiometer and Its Use in Measurement Of Matric Suction In Unsaturated Soils. Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Civil Engineering, Ankara, 2013, 85 s. (Master of Science)
- [13] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. The relation between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial. *Geotechnical Testing Journal*. 1996, 19(3); 259-268.
- [14] Pan H., Qing Y., Yong L.P. Direct and Indirect Measurement of Soil Suction in the Laboratory. *EJGE*. 2010, 15, 1-14.
- [15] Bai, F.Q., Liu, S.H. Measurement of the shear strength of an expansive soil by combining filter paper method and direct shear tests. *Geotechnical Testing Journal*. 2012, 35(3), 451-459.
- [16] Montanez, J.E.C. Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures. University of London, UK, 2002
- [17] Kenney, T.C., van Veen, W.A., Swallow, M.A., Sungalia, M.A. Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*. 1992, 29(3), 364-374.
- [18] Kayabalı, K. Engineering aspects of a novel landfill liner material: bentonite-amended natural zeolite. *Engineering Geology*. 1997, 46, 105-114.
- [19] Kayabalı, K., Kezer, H. Testing the ability of bentonite amended natural zeolite (clinoptilolite) for removing heavy metals from liquid waste: *Environmental Geology*. 1998, 34(2-3), 95-102.
- [20] Tuncan, A., Tuncan, M., Koyuncu, H., Güney, Y. Use of Natural Zeolites as a Landfill Liner. *Waste Management and Research*. 2003, 21, 54-61.
- [21] Kaya, A., Durukan, Z. Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner. *Applied Clay Science*. 2004, 25, 83-91.
- [22] Hong, C.S., Shackelford, C.D., Malusis, M.A. Adsorptive Behavior of Zeolite-Amended Backfills for Enhanced Metals Containment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2016, 142(7), 1-16.
- [23] Batman, A. Ögütölmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 2015, 70 s. (Yüksek Lisans Tezi).

- [24] Tang, G.X., Graham, J., Blatz, J., Gray, M., Rajapakse, R.K.N. Suctions, stress and strengths in unsaturated sand-bentonite. *Engineering Geology*. 2002, 64(2-3), 147-156.
- [25] Agus, S.S., Schanz, T., Fredlund, D.G. Measurements of suction versus water content for bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*. 2010, 47, 583-594.
- [26] Schanz, T., Arifin, Y.F., Khan, M.I., Agus, S.S. Time effects on total suction of bentonites. *Soils and Foundations*. 2010, 50(2), 195-202.
- [27] Wang, Q., Tang, A.M., Cui, Y.J., Delage, P., Barnichon, J.D., Ye, W.M. The effects of technological voids on the hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite-sand mixture. *Soils and Foundations*. 2013, 53(2), 232-245.
- [28] Durukan, S., Pulat, H.F., Yükselen Aksoy, Y. Suction characteristics of compacted zeolite-bentonite and sand-bentonite mixtures. *Waste Management and Research*. 2014, 32(2), 149-156.
- [29] Akıncı, G., Durukan S. Bentonit Zeolit Karışımların Su Emme Karakteristiklerine Zaman Etkisi. Uluslararası Bilim ve Teknoloji Konferansı, 13-15 Temmuz, 2016, Viyana, Avusturya (Bildiri Özetleri Kitabı 1580s.)
- [30] Tekinsoy, M.A., 2002. Doymamış Zeminlerin İndeks ve Hidrolik Özellikleri. S.D.Ü. Basımevi, Isparta, 797s.
- [31] Gülen J., Zorbay F., Arslan S. Zeolitler ve Kullanım Alanları. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2012, 63-68.
- [32] Ataman, G. Batı Anadolu zeolitleri oluşumları. *Yerbilimleri*. 1997, 3, 85-94.
- [33] Baysal, O., Gündoğdu, N., Temel, A., Öner, F. Bigadiç Zeolit Oluşumlarının Ekonomik, Jeolojik İncelenmesi Projesi. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Proje No. YUVAM/85-2, Ankara, 1986, 155 s.
- [34] Kaya, A., Durukan, Z., Ören, A.H., Yükselen, Y. Bentonit-Zeolit karışımlarının mühendislik özelliklerinin belirlenmesi. *İMO Teknik Dergi*. 2006, 17(3), 3879-3892.
- [35] Hamutçu, U. Laboratuarda Geliştirilen Bir Organokilin Mukavemet Özelliklerinin Deneysel Olarak Araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2010, 77 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [36] Akbulut A. Bentonit. MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996, 78s.

- [37] Önem, Y. Sanayi Madenleri. Kozan Ofset, Ankara, 2000, 19-33s.
- [38] Mitchell, J.K., Soga, K. Fundamentals of Soil Behavior, Third Edition. John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [39] Croney, D., Coleman, J.D. Soil thermodynamics applied to the movement of moisture in road foundations. Proceedings, 7th International Congress Applied Mechanics, 1948, 3, 163-177.
- [40] Croney, D., Coleman, J.D., Lewis, W.A. Calculation of the moisture distribution beneath structure. Civil Engineering. 1950, 45, 524.
- [41] Krahn, J., Fredlund, D.G. On total, matric and osmotic suction, Journal of Soil Science. 1972, 114(5), 339-348.
- [42] Ridley, A.M., Dineen, K., Burland, J.B., Vaughan, P.R. Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering. Géotechnique 2003, 53(2), 241-253.
- [43] Fredlund, D.G., Rahardjo, H. State-of-Development in the Measurement of Soil Suction. Proceedings of the International Conference on Engineering Problems on Regional Soils, August 11-15, 1988, China (Bildiri Kitabı, 582-588 s.)
- [44] Peroni, N., and A. Tarantino 2003."Measurement of Osmotic Suction Using the Squeezing Technique " Proceeding of the International Conference " from Experimental Evidence towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils." Weimar, Germany, Springer Proceedings in Physics 93(2):159-168
- [45] Bulut, R., Leong, E.C., Indirect Measurement of Suction. Geotechnical and Geological Engineering. 2008, 26, 633-644.
- [46] Agus, S.S., Leong, E.C., Rahardjo, H. Soil-water characteristic curves of Singapore residual soils. Geotechnical and Geological Engineering. 2001, 19, 285-309.
- [47] Bocking, K.A., Fredlund, D.G. Limitations of the axis-translation technique, Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, June 16-18, 1980, Denver, (Bildiri Özetleri Kitabı, 917 s.)
- [48] Sivongxay, A. Hydraulic properties of Toowoomba soils for laundry water reuse. Research Project, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, Australia, 2005, 133 s. (Bachelor of Engineering)

- [49] Uzundurukan, S., Göksan, T. S., Korkmaz, A., Bayrak, M.Ç., Keskin, S.N., 2006. Zeminlerin Şişme Davranışının Anfis Analizi ile Tahmin Edilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, 7-8 Eylül 2006, KTÜ, Trabzon.
- [50] Leong, E.C., He, L., Rahardjo, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurement. *Journal of Geotechnical Testing*. 2002, 25(3), 1-12.
- [51] Likos, W.J., Lu, N. Filter paper column for measuring transient suction profiles in expansive clay. *Transportation Research Record* 1821, 2003, 83-89.
- [52] Mabirizi, D. Bulut, R.A. Comparison of total suction measurements with thermocouple psychrometer, filter paper technique and chilled-mirror device. *Geotechnical Special Publications*. 2009, 189, 1-6.
- [53] Nam S., Gutierrez M., Diplas P., Petrie J. Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. *Engineering Geology*. 2011, 122, 272-280.
- [54] Fredlund, D.G., Houston, S.L. Interpretation of soil-water characteristic curves when volume change occurs as soil suction is changed. *Advances in Unsaturated Soils-Proceedings of the 1st Pan-American Conference on Unsaturated Soils, 20-22 February, 2013, Colombia (Bildiri Kitabı, 610 s.)*
- [55] Fredlund, D.G., Gan, J.K.M., Gallen, P. Suction measurements on compacted till specimens and indirect filter paper calibration technique. *Transportation Research Record*. 1995, 1481, 3-9.
- [56] Ridley, A.M., Burland, J.B., Monroe, A.S. Unconfined compressive strength tests with pore pressure measurements. In: *Proc., 11<sup>th</sup> African Regional Conference SMFE, Cairo, 1995, 3, 332-345.*
- [57] Chandler, R.J., Crilly, M.S., Montgomery-Smith, C. A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1992, 92, 82-89.
- [58] Agus, S.S., Schanz, T. Comparison of four methods for monitoring total suction. *Vadoxe Zone Journal*. 2005, 4(4), 1087.
- [59] Marinho, F.A.M., da Silva Gomez, J.E. The effect of contact on the filter paper method for measuring soil suction. *Geotechnical Testing Journal*. 2011, 35(1), 1-10.



[60] Yıldırım. H., Yıldırım. S. On Hypothesis Testing, Confidence Interval, Effect Size and Noncentral Probability Distributions, Elementary Education Online. 2011,1112-1123.

[61] Zlatarev, K. Determination of the necessary minimum number of soil samples. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8-15 September, 1965, Montreal (Bildiri Kitabı, 130-134s.)

[62] Kumbasar, V., Toğrol, E. Minimum Sample Number Necessary For Soil Experiments. Technical Research Council Turkey, Engineering Research Group Project, Report No 169, 1970.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Gül AKINCI  
Doğum Yeri ve Yılı :Ankara, 1985  
Medeni hali :Bekar  
Yabancı Dili :İngilizce  
E-posta :gul\_akinci@hotmail.com

### Eğitim Durumu

Lise :Karşıyaka Lisesi,2005  
Lisans :Manisa Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği  
Bölümü,2013  
Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği  
Bölümü,2017

### Mesleki Deneyim

Eğitim Öğretim yılı Polinas Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi ücretli öğretmenlik ve staj koordinatörlüğü-Manisa-2015-2016

Celal Bayar Üniversitesine bağlı İş Sağlığı ve Güvenliği eğitimci-Manisa-2015-2016

Celal Bayar Üniversitesine Meslek Yüksek Okulu Ücretli Öğretim Görevlisi.-Manisa-2016-2017 (halen)

Ekonomi Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Ücretli Öğretim Görevlisi-2016-2017 (halen)

## Yayınları

Durukan S., Akıncı, G., Techniques for Soil Suction Measurement, International Congress on Natural and Engineering Sciences, 09-13 September. 2015, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

Akıncı, G., Durukan S., Bentonit Zeolit Karışımların Su Emme Karakteristiklerine Zaman Etkisi, Uluslararası Bilim ve Teknoloji Konferansı(ISTEC 2016), 13-15 Temmuz. 2016, Viyana, Avus

