

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİNLERİN EMME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNDE
BİR YAKLAŞIM**

Turan Selçuk GÖKSAN

Danışman : Prof. Dr. S. Nilay KESKİN

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2007**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1. Emme Kavramı.....	4
2.1.1. Toplam Emme Basıncı.....	6
2.2. Kapilerite.....	13
2.3. Zemin Su Karakteristik Eğrisi.....	20
2.4. Emmenin Ölçülmesi.....	24
2.4.1. Doğrudan Ölçüm Teknikleri.....	25
2.4.1.1. Basınç Membranı.....	26
2.4.1.2. Basınç Plakası.....	27
2.4.1.3. Null Tipi Basınç Plakası (Eksen Dönüştürme Tekniği).....	28
2.4.1.4. Tensiyometreler.....	31
2.4.1.5. Emme Plakası.....	33
2.4.2. Dolaylı Ölçüm Teknikleri.....	35
2.4.2.1. Filtre Kağıdı Tekniği.....	35
2.4.2.2. Thermocouple Saykrometreler.....	38
2.4.2.3. Transistör Saykrometreler.....	41
2.4.2.4. Chilled-Mirror Higrometreler.....	43
2.4.2.5. Isıl İletkenlik Sensörleri.....	44
2.4.2.6. Elektriksel İletkenlik Sensörleri.....	46
2.4.2.7. Equitensiyometreler.....	47
2.4.2.8. TDR (Time Domain Reflectometry).....	48
2.4.2.9. Santrifüj Tekniği.....	53
2.4.2.10. Boşluk Sıvısı Sızdırıcısı.....	56
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	59
3.1. Çalışmada Kullanılan Zemin Numunelerinin Tanımlanması.....	59
3.2. Çalışmada Kullanılan Numunelerin Emme Özelliklerinin Belirlenmesi... ..	60
3.3. Emme Kapasitesinin Belirlenmesi.....	60
3.4. Emme Basıncının Belirlenmesi.....	62
3.4.1. Saykrometre Tekniği ile Emme Basıncının Belirlenmesi.....	62
3.4.1.1. Saykrometrelerin Kalibrasyonu.....	64
3.4.1.2. Saykrometre Tekniği ile Yapılan Toplam Emme Basıncı Deneyleri... ..	69
3.4.2. Filtre Kağıdı Tekniği ile Emme Basıncının Belirlenmesi	72
3.4.2.1. Filtre Kağıdı Tekniği ile Emme Basıncının Belirlenmesinde Takip Edilen Adımlar.....	73
3.4.2.2. Filtre Kağıtlarının Su Muhtevalarının Belirlenmesi.....	78
3.4.2.3. Filtre Kağıdı Tekniği ile Toplam ve Matris Emme Basıncının Belirlenmesi.....	82

4. BULGULAR VE TARTIŞMA	84
4.1. Emme Kapasitesi ve Emme Basıncı Deney Sonuçları.....	84
4.2. Emme Kapasitesine Başlangıç Su Muhtevası, Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Plastisite İndisinin Etkisi.....	88
4.2.1. Başlangıç Su Muhtevasının Emme Kapasitesi Üzerindeki Etkisi.....	88
4.2.2. Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlığının Emme Kapasitesi Üzerindeki Etkisi.....	92
4.2.3. Plastisite İndisinin Emme Kapasitesi Üzerindeki Etkisi.....	96
4.2.4. Emme Kapasitesinin Başlangıç Su Muhtevası, Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Plastisite İndisine Bağlı Olarak Tahmin Edilmesi.....	99
4.3. Emme Basıncı Deneyleri.....	101
4.3.1. Filtre Kağıdı ve Saykrometre Teknikleriyle Bulunan Emme Basınçlarının Karşılaştırılması.....	101
4.3.2. Toplam Emme Basıncına Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlık, Başlangıç Su Muhtevası ve Plastisite İndisinin Etkisi.....	105
4.3.2.1. Emme Basıncı – Kuru Birim Hacim Ağırlık İlişkisi.....	105
4.3.2.2. Emme Basıncı – Su Muhtevası İlişkisi.....	106
4.3.2.3. Emme Basıncı –Plastisite İndisi İlişkisi.....	108
4.4. Emme Kapasitesi ve Toplam Emme Basıncı Arasındaki İlişki.....	110
4.5. Emme Basıncının Zemin Özelliklerine Göre Tahmin Edilmesi	114
4.5.1. Emme Basıncının Plastisite İndisi ve Başlangıç Su Muhtevasına Bağlı Olarak Tahmini.....	114
4.5.2. Emme Basıncının Emme Kapasitesi, Plastisite İndisi ve Başlangıç Su Muhtevasına Bağlı Olarak Tahmini.....	115
5.SONUÇLAR.....	117
KAYNAKLAR.....	122
EKLER.....	135
ÖZGEÇMİŞ.....	140

ÖZET

Doktora Tezi

ZEMİNLERİN EMME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİNDE BİR YAKLAŞIM

Turan Selçuk GÖKSAN

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri: Doç. Dr. Hüseyin YILDIRIM
Prof. Dr. S. Nilay KESKİN (Danışman)
Prof. Dr. M. Erol KESKİN
Doç. Dr. M. Hilmi ACAR
Yrd. Doç. Dr. Fuat DEMİR

Zemin emme basıncı, belirli su muhtevasına sahip doymun olmayan bir zeminin, boşluk suyunu adsorbe etme ve tutma potansiyelini ifade eden bir özelliktir. Zemin-su sisteminde, su miktarı veya boşluk suyu kimyasındaki değışikliklerin sonucu olarak emme basınçları değışmektedir. Emme basınçları, doymun olmayan zeminin içsel gerilme durumunu etkilemekte ve bunun sonucunda zeminlerin kayma mukavemeti, taşıma gücü, hacimsel deformasyon, yanal toprak basınçları ve şev stabilitesi gibi bir takım mühendislik özellikleri büyük ölçüde değışebilmektedir. Doymun olmayan zeminlerin mekanik davranışları üzerinde önemli etkisi olan emme basıncı, mühendislikte ölçülmesi en zor olan parametrelerden biridir. Zemin emme basıncının; deneysel olarak belirlenmesindeki zorlukların yanı sıra, diğere zemin özelliklerinden faydalanılarak tahmin edilmesi için kullanılan ilişkiler de çok yeterli değildir. Bu konuda günümüzde halen bir çok çalışma yürütülmektedir.

Bu tez çalışmasında, emme basıncı ve bileşenleri olan matris emme ile ozmotik emme kavramları incelenmiş, emme basıncını belirlemede kullanılan doğrudan ve dolaylı yöntemler verilmiştir. Deneysel çalışmalarda; Afyon, Burdur ve Isparta yörelerinden alınan beş farklı zemin numunesi kullanılmıştır. Öncelikle, zeminlerin bazı indeks ve mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Zemin numunelerin farklı başlangıç koşullarındaki emme basınçlarının belirlenmesinde; dolaylı yöntemlerden olan filtre kağıdı ve saykrometre tekniklerinden yararlanılmıştır. Emme basınçlarıyla aynı başlangıç koşullarında hazırlanan numunelerin emme kapasitelerinin belirlenmesinde ise odometre deney ekipmanı kullanılmıştır.

Elde edilen deneysel verilere bağılı olarak modelleme çalışmaları yürütülmüş ve deneysel sonuçlar regresyon analizleri ile değerlendirilerek, zeminlerin emme davranışları farklı yönlerden incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Emme basıncı, emme kapasitesi, filtre kağıdı, saykrometre, zemin-su karakteristik eğrisi.

2007, 140 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

AN APPROACH FOR DETERMINING THE SUCTION PROPERTIES OF SOILS

Turan Selçuk GÖKSAN

**Suleyman Demirel University Graduate School of Applied and Natural Sciences
Civil Engineering Department**

Thesis Committee: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM
Prof. Dr. S. Nilay KESKİN (Supervisor)
Prof. Dr. M. Erol KESKİN
Assoc. Prof. Dr. M. Hilmi ACAR
Asst. Prof. Dr. Fuat DEMİR

Soil suction is a property that reflects the adsorption potential and pore water holding capacity of unsaturated soil having a certain water content. Suction changes as a function of water content and pore water chemistry in the soil water system. Suction affects internal stresses in the unsaturated soils. Thus, engineering properties of the unsaturated soils such as shear strength, bearing capacity, volumetric deformation characteristics, lateral pressures, and slope stability strongly depend on the suction. Suction that affects mechanical behaviour of unsaturated soils, is one of the most difficult parameter to be determined in geotechnical engineering. In addition to experimental difficulties, relationships for predicting suction from other soil properties are not sufficient enough. Today, many studies have been conducted on this subject.

In this dissertation, suction and its components, namely matric and osmotic suction were investigated. The direct and the indirect methods used in determining suction were given. In experimental studies, five different soils were used. These soils were collected from Afyon, Burdur, and Isparta regions. Initially, some index and engineering properties of these soils were determined. Filter paper and psychrometer methods were used in determining suction of soil specimens at different initial conditions. Suction capacity values were determined with odometer tests on the specimens at identical conditions with the specimens used in determining suctions.

Modeling studies were conducted using the experimental results, which were evaluated with regression analysis and suction behaviour of soils that were investigated in different point of views.

Key Words: Suction, suction capacity, filter paper, psychrometer, soil-water characteristic curve.

2007, 140 pages

TEŞEKKÜR

Beni akademisyen olmaya teşvik eden ve akademik yaşamım boyunca her konuda destek olan, yüksek lisans ve doktora tezlerimi borçlu olduğum, bilimi yanı sıra sabrını da benden hiç bir zaman esirgemeyen, değerli görüşleri ve önerileri için danışmanım, değerli bilim insanı Sayın Prof. Dr. S. Nilay KESKİN' e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında değerli görüşlerinden yararlandığım hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin YILDIRIM' a, bana vaktini ayırmaktan hiçbir zaman kaçınmayan kıymetli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Soner UZUNDURUKAN' ın dostluğuna, deneysel çalışmalar sırasındaki yardımları nedeniyle Okutman M. Çağrı BAYRAK, Harita Teknikeri Erol YILMAZ, Teknik Öğretmen M. Bünyamin KARAKAYA ve Elektronik teknikeri K. Tufan ULUBAY' ya teşekkür ederim.

Bu günlere gelebilmem için maddi manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan sevgili annem Mediha GÖKSAN' a ve babam Engin Vural GÖKSAN' a, bu tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar; verdiği destek, gösterdiği anlayıştan dolayı eşim Feyzan GÖKSAN' a, tezimi tamamlamam ve kendine daha fazla vakit ayırmam için sabırsızlıkla bekleyen oğlum Engin Ögehan GÖKSAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Emme – su muhtevası bağıntısı	5
Şekil 2.2. Bağıl nem - toplam emme ilişkisi	7
Şekil 2.3. Toplam emme ve bileşenleri: Matris ve ozmotik emme	9
Şekil 2.4. Regina kilinde ölçülmüş toplam, matris ve ozmotik emme basınçları	11
Şekil 2.5. Yüzey gerilimi	13
Şekil 2.6. Kapilerite olayı ve fiziksel modeli	14
Şekil 2.7. Doygun olmayan zeminde bir blok diagram	15
Şekil 2.8. Hava-su arayüzündeki gerilim olayı	16
Şekil 2.9. Eğik arayüzdeki yüzey gerilmeleri	17
Şekil 2.10. Bir kapiler tüpteki temsili kuvvetler	19
Şekil 2.11. Tam doygun bir zeminin kuruma aşamalarını gösteren tipik bir zemin su karakteristik eğrisi	21
Şekil 2.12. Kuruma aşamaları: (a) sınır etki aşaması; (b) birincil geçiş aşaması; (c) ikincil geçiş aşaması; (d) rezidüel geçiş aşaması	22
Şekil 2.13. Gravimetrik su muhtevası-zemin emme basıncı ilişkisini gösteren, zemin-su karakteristik eğrisi	22
Şekil 2.14. Basınç membranı hücresi	27
Şekil 2.15. Basınç membranı deney düzeneği	27
Şekil 2.16. Basınç plakası deney düzeneğinde kullanılan bir basınç kabini	28
Şekil 2.17. Eksen dönüştürme tekniği	29
Şekil 2.18. Null tipi basınç plakasında kullanılan hücre	30
Şekil 2.19. Bir tensiyometrenin şematik görünümü	31
Şekil 2.20. Zemin numunelerinin 1 kPa ve 10 kPa 'lık emme basıncı değerlerinde dengelenmesi	33
Şekil 2.21. Haines ölçüm aleti	34
Şekil 2.22. Toplam ve matris zemin emme basıncının ölçülmesi	36
Şekil 2.23. Toplam zemin emme basıncının ölçülmesi	36
Şekil 2.24. Thermocouple saykrometrenin dış görüntüsü	40
Şekil 2.25. Thermocouple saykrometre	41
Şekil 2.26. Transistör saykrometrenin şematik görünümü	42
Şekil 2.27. Chilled-Mirror Higrometre	43
Şekil 2.28. Chilled-Mirror Higrometrenin şematik görünümü	44
Şekil 2.29. Bir ısı iletkenlik sensörü	45
Şekil 2.30. Bir ısı iletkenlik sensörünün kesiti	46
Şekil 2.31. Elektriksel iletkenlik sensörü	47
Şekil 2.32. 200 mm uzunluğunda ve 40 mm çapında bir equitensiyometre	47
Şekil 2.33. Tipik bir TDR sistemi	48
Şekil 2.34. Eşksenli ve üç tıjlı çeşitli TDR ölçüm sondaları	48
Şekil 2.35. TDR cihazı ile arazide su muhtevasının ölçülmesi	49
Şekil 2.36. Laboratuarda kullanılan TDR cihazı	49
Şekil 2.37. Zeminler için tipik bir TDR eğrisi ve zahiri uzunluk l_a 'nın hesaplanması	51
Şekil 2.38. Santrifüj tekniği ile zemin emme basıncı ölçümü	54

Şekil 2.39.	Altı adet hareketli kaptan oluşan küçük tip medikal bir santrifüj düzeneği.....	55
Şekil 2.40.	Bir boşluk sıvısı sıkıştırıcısının şeması.....	57
Şekil 3.1.	Wescor PST-55 model saykrometre.....	63
Şekil 3.2.	Wescor HR33T Microvoltmetre.....	63
Şekil 3.3.	Saykrometre deney sistemi.....	64
Şekil 3.4.	Saykrometrelerin NaCl çözeltisinde kalibrasyonu	65
Şekil 3.5.	46177 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	66
Şekil 3.6.	46258 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	67
Şekil 3.7.	46280 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	67
Şekil 3.8.	46282 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	68
Şekil 3.9.	46284 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi.....	68
Şekil 3.10.	Saykrometre deney numunelerinin hazırlanması.....	69
Şekil 3.11.	Saykrometre deney numunelerinin kavanozlara yerleştirilmesi.....	70
Şekil 3.12.	Saykrometre deney grafiği (Num 1).....	71
Şekil 3.13.	Saykrometre deney grafiği (Num 4).....	72
Şekil 3.14.	Filtre kağıtlarının nem almasının engellemesi için desikatörde korunması.....	74
Şekil 3.15.	Filtre kağıtlarının sandviç şeklinde hazırlanması	74
Şekil 3.16.	Matris emme basıncının ölçülmesi için sandviç şeklinde hazırlanan filtre kağıtlarının zemin numunelerinin arasına yerleştirilmesi.....	75
Şekil 3.17.	Zemin numunelerinin elektrik bantı kullanılarak bantlanması	75
Şekil 3.18.	Zemin numunesinin cam kavanoza yerleştirilmesi	76
Şekil 3.19.	Zemin numunesinin üzerine plastik bir o-ring yerleştirilmesi	76
Şekil 3.20.	O-ringin üzerine filtre kağıtlarının yerleştirilmesi	77
Şekil 3.21.	Kavanozun kapağının bantlanması	77
Şekil 3.22.	Kavanozların termos çantaya yerleştirilmesi	78
Şekil 3.23.	Üstteki filtre kağıtlarının alüminyum kutulara alınması	79
Şekil 3.24.	Ortadaki filtre kağıdının alüminyum kutuya alınması	80
Şekil 3.25.	Alüminyum numune kutusunun hızlı bir şekilde soğuması için bir metal blok üzerine yerleştirilmesi	80
Şekil 3.26.	Kuru ağırlıkların 0.0001 gr hassasiyetindeki terazi ile belirlenmesi.	81
Şekil 3.27.	Islanan filtre kağıdı için emme basıncı-su muhtevası ilişkisini veren kalibrasyon eğrisi.....	83
Şekil 4.1.	Numune 1 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi...	88
Şekil 4.2.	Numune 2 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi...	89
Şekil 4.3.	Numune 3 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi...	89
Şekil 4.4.	Numune 4 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi...	90
Şekil 4.5.	Numune 5 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi...	90
Şekil 4.6.	Numune 1 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi.	92
Şekil 4.7.	Numune 2 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi.	93
Şekil 4.8.	Numune 3 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi.	93
Şekil 4.9.	Numune 4 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi.	94
Şekil 4.10.	Numune 5 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi.	94
Şekil 4.11.	Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığın 1.25 gr/cm^3 olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi.....	96
Şekil 4.12.	Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığın 1.30 gr/cm^3 olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi.....	97

Şekil 4.13.	Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının 1.35 gr/cm ³ olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi.....	97
Şekil 4.14.	Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının 1.40 gr/cm ³ olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi.....	98
Şekil 4.15.	Deneysel emme kapasitesi değerleriyle tahmin edilen emme kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması.....	100
Şekil 4.16.	Numune 1 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.17.	Numune 2 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.18.	Numune 3 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması.....	103
Şekil 4.19.	Numune 4 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması.....	103
Şekil 4.20.	Numune 5 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.21.	Numune 1 için toplam emme basıncı değerleri ile kuru birim hacim ağırlıklar arasındaki ilişki.....	106
Şekil 4.22.	Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının 1.40 gr/cm ³ olması durumunda toplam emme basıncı – başlangıç su muhtevası ilişkisi.	107
Şekil 4.23.	Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının 1.40 gr/cm ³ olması durumunda toplam emme basıncı - plastisite indisi ilişkisi.....	109
Şekil 4.24.	Numune 1 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki	110
Şekil 4.25.	Numune 2 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki.....	111
Şekil 4.26.	Numune 3 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki.....	111
Şekil 4.27.	Numune 4 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki.....	112
Şekil 4.28.	Numune 5 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki.....	112
Şekil 4.29.	Deneysel emme basıncı değerleriyle tahmin edilen emme basıncı değerlerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 4.30.	Filtre kağıdı tekniği ile ölçülen emme basıncı değerleri ile tahmin elden emme basıncı değerlerinin karşılaştırılması.....	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Zemin emmesi	5
Çizelge 2.2. Zemin emmesinin ölçülmesinde kullanılan laboratuvar ve arazi yöntemleri.....	25
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan zeminlerinin bazı özellikleri.....	59
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin hazırlandıkları başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerleri.....	62
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan sayrometrelere ait kalibrasyon denklemleri	71
Çizelge 4.1. Numune 1 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi.....	85
Çizelge 4.2. Numune 2 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi.....	85
Çizelge 4.3. Numune 3 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi.....	86
Çizelge 4.4. Numune 4 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi.....	86
Çizelge 4.5. Numune 5 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi.....	87
Çizelge 4.6. İncelenen zemin numuneleri için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkileri.....	91
Çizelge 4.7. İncelenen zemin numuneleri için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkileri.....	95
Çizelge 4.8. İncelenen zemin numuneleri için Plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkileri.....	99
Çizelge 4.9. Filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçları – başlangıç su muhtevası ilişkileri.....	104
Çizelge 4.10. Toplam emme basıncı – başlangıç su muhtevası ilişkileri.....	107
Çizelge 4.11. Numune 1 için elde edilen ilişkilerin nümerik olarak ifadesi.....	108
Çizelge 4.12. Toplam emme basıncı – plastisite indisi ilişkileri.....	109
Çizelge 4.13. Toplam emme basıncı – Emme kapasitesi ilişkileri.....	113

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Zemine bağlı hava giriş katsayısı
A	Zemine bağlı bir kalibrasyon katsayısı
b	Zeminin karakteristik su muhtevası eğrisinde dönme noktasının eğimine bağlı bir parametre
B	Zemine bağlı bir kalibrasyon katsayısı
c	Elektromanyetik dalganın serbest boşluktaki hızı
C	Çözünenlerin konsantrasyonu
c_r	Rezidüel su muhtevasına bağlı bir parametre
e	Euler sayısı
E_{25}	25 °C için düzeltilmiş saykrometre okuması
E_T	Saykrometre okuması
EC	Elektriksel iletkenlik
g	Yerçekimi ivmesi
h_c	Kapiler yükseklik
l_a	Zamana bağlı olarak bulunan zahiri uzunluk
L	Elektromanyetik dalganın ölçüm ortamında gidip, geri döndüğü uzunluk
K_a	Dielektrik sabiti
M_f	Filtre kağıdının kuru ağırlığı
M_w	Filtre kağıdının emdiği suyun ağırlığı
M_1	Numune kutusu ve ıslak filtre kağıdının birlikte ağırlığı
M_2	Numune kutusu ve kuru filtre kağıdının birlikte ağırlığı
n	Bir mol tuz için molekül sayısı
pF	Log kPa cinsinden emme birimi
PI	Plastisite indisi
r	Kapiler tüpün yarıçapı
r_1	Dönme merkezinden zemin numunesinin orta noktasına kadar olan mesafe
r_2	Dönme merkezinden serbest su yüzeyine kadar olan mesafe
R	Üniversal gaz sabiti
R_1 ve R_2	Su zarının (hava-su ara yüzeyinin) eğrilik yarıçapları
R_s	Arayüzeyin yarıçapı
R^2	Determinasyon katsayısı
S	Doygunluk derecesi
t	Sıcaklık
T	Mutlak sıcaklık
t_a	Ölçüm zaman aralığı
T_c	Numune kutusunun soğuk ağırlığı
T_h	Numune kutusunun sıcak ağırlığı
T_s	Yüzey gerilimi
u_a	Boşluk hava basıncı

\bar{u}_v	Boşluk suyu buharının kısmi basıncı
\bar{u}_{v0}	Aynı sıcaklıktaki saf suyun düzgün yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı
u_w	Boşluk su basıncı
V	Zemin numunesinin toplam hacmi
V_w	Su hacmi
w	Su muhtevası
w_f	Filtre kağıdının su muhtevası
w_0	Başlangıç su muhtevası
W_w	Su ağırlığı
W_{em}	Emme kapasitesi
W_{kuru}	Zemin numunesinin kuru ağırlığı
W_{nihai}	Zemin numunesinin su emerek ulaştığı nihai ağırlık
Δu	Arayüzeydeki basınç farkı
α	Temas açısı
γ_k	Kuru birim hacim ağırlık
γ_w	Suyun birim hacim ağırlığı
v	Dalga hızı
v_{w0}	Suyun özgül hacmi
θ	Hacimsel su muhtevası
θ_s	Doymun hacimsel su muhtevası
ρ	Boşluk sıvısının yoğunluğu
ρ_w	Suyun yoğunluğu
ω	Açısal hız
ω_v	Su buharının moleküler kütlesi
Ψ	Zemin emmesi yada toplam emme
Ψ_a	Pnömatik potansiyel
Ψ_g	Gravitasyonel potansiyel
Ψ_m	Matris emme
Ψ_p	Basınç potansiyeli
Ψ_r	Rezidüel su muhtevasındaki zemin emmesine karşılık gelen zemin cinsine bağlı bir katsayı
Ψ_{Π}	Ozmotik emme

1. GİRİŞ

Zeminler; katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç değişik fazdan oluşurlar. Ayrıca homojen ve izotrop olmayan, özellikleri çevre koşullarına, jeolojik tarihe ve zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösteren malzemelerdir. Bu özellikleri zeminleri diğer mühendislik malzemelerine göre çok daha karmaşık bir hale getirir. Zeminlerin geoteknik özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi ise geoteknik mühendisliğin temel konularındandır. Ölçülmesi en zor olan zemin özelliklerinden biri de zeminlerin emme basıncıdır.

Doygun olmayan zeminlerde, emme davranışının araştırılması ve doğru olarak belirlenmesi, emmeden dolayı meydana gelebilecek zararların büyük oranda önlenmesini sağlamaktadır. Emme davranışı önemli ölçüde zeminlerin su muhtevassından etkilenmektedir. Başlangıç su içeriği azaldıkça zeminlerin emme basıncı ve emme kapasitesi artmaktadır.

Zeminin emme basıncındaki değişim, zemindeki gerilme durumunun değişmesine neden olur. Zemin gerilmelerindeki değişim ise zeminlerin kayma mukavemetini, taşıma gücünü, hacimsel deformasyonunu, yanal toprak basınçlarını ve şev stabilitesini önemli ölçüde etkiler. Ayrıca zeminin su içeriği değişikliğinden etkilenen emme kapasitesi de killi zeminlerde şişme problemiyle yakından ilişkilidir. Zemin hacminde meydana gelen artış ile zemin yapısında ve buna bağlı üst yapıda aşırı deformasyonlar oluşmakta ve dolayısıyla, stabilite bozulmaktadır. Bu tür zeminler üzerine inşa edilen hafif yapılarda, karayollarında, demiryollarında, havaalanı kaplamalarında, sulama kanallarında, boru hatlarında, istinat duvarlarında, barajlarda ve köprülerde, zemindeki hacim değişikliği nedeniyle önemli hasarlar oluşmaktadır.

Bu tür zemin problemleri nedeniyle, dünyada her yıl milyarlarca dolarlık hasarlar meydana gelmektedir ve meydana gelen hasarlar deprem, tayfun ve taşkınlar gibi doğal afetlerden daha büyük boyuttadır. (Jones ve Holtz, 1973; Ruwaih, 1987; Chen, 1988; Nelson ve Miller, 1992).

Doygun olmayan bir zeminin toplam emmesi, matris emme ve ozmotik emme bileşenlerinden oluşmaktadır. Toplam emme; boşluklarda tutulan zemin suyunun enerjisinin ölçümü veya zemin kütlesi tarafından zemin suyuna uygulanan çekme gerilmesinin ölçümüdür (Edlefsen ve Anderson, 1943; Richards, 1965). Matris emme bileşeni; boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Suyun yüzey geriliminden doğan kapilerite olayıyla ilişkilidir. Dolayısıyla matris emme, zeminin kapileritesi, tekstürü ve yüzey adsorbif kuvvetlerinden oluşur. (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Ozmotik emme bileşeni ise; boşluk suyundaki çözünmüş tuzlardan kaynaklanmaktadır ve basınçtan bağımsızdır. Dolayısıyla, ozmotik emmenin rolü, hem doygun hem de doygun olmayan zeminlerde aynı derecede etkilidir. (Edil ve Motan, 1984; Wray, 1984).

Göksan, (1998) ve Keskin vd., (1999), emme kapasitesini, serbest koşullarda su emmeye bırakılan zeminin nihai durumdaki su muhtevası olarak tanımlamışlardır.

Emme basıncından faydalanılarak, şişme miktarının belirlenebilmesi için şişme öncesi ve sonrası emme basıncı değerinin belirlenmesi gerekir. Şişme öncesi emme basıncı değeri tabii su muhtevasındaki numuneler üzerinde yapılacak emme basıncı deneylerinden elde edilir. Şişme sonrası emme basıncı değerinin belirlenebilmesi için ise bazı kabullerin yapılması gerekmektedir (Snethen 1980). Ayrıca emme basıncı ölçümleri arazi gerilme profilinin belirlenmesinde önemli bir parametredir.

Zeminlerin emme basınçlarının belirlenmesinde kullanılan Saykrometre ve filtre kağıdı metodu gibi mevcut yöntemler kullanılması zor ekipmanlar gerektiren deney yöntemleridir. Ayrıca bu deney sonuçları deney yapılan ortamın nemi ve sıcaklığındaki değişimlerden önemli ölçüde etkilenen çok hassas deneyler olduğundan hata yapılma olasılığı yüksek deneylerdir. Bu çalışmada söz konusu yöntemler kullanılmış, hata payını minimuma indirebilmek amacıyla tüm deneyler nem ve sıcaklık kontrollü odada gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çoğu zemin mekaniği laboratuvarlarında kolaylıkla bulunabilen konsolidasyon deney seti kullanılarak belirlenebilecek emme kapasitesi değerleri ile emme basıncının belirlenebilirliği araştırılmıştır.

Bu amaçla, bölüm 2' de emme basıncı ve bileşenleri olan matris emme ile ozmotik emme kavramları incelenmiş ve emme basıncını belirlemede kullanılan doğrudan ve dolaylı yöntemler araştırılmıştır.

Çalışmada, çeşitli yörelere ait kil numuneleri kullanılmıştır. Tüm numuneler üzerinde yapılan, standart zemin mekaniği deneylerinin yanı sıra; farklı başlangıç koşulları altında, emme basıncı ve emme kapasitesi değerleri belirlenmiştir. Emme basıncı deneylerinde filtre kağıdı ve thermocouple (ısı çift) saykrometre tekniği kullanılmıştır. Emme kapasitesinin belirlenmesinde ise ödometre deney ekipmanından yararlanılmış ve yapılan deneysel çalışmalar bölüm 3' te anlatılmıştır.

Bölüm 4' te, zeminlerin plastisite indisinin ve başlangıç koşullarının; emme basıncı ve emme kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, regresyon analizleri ile değerlendirilerek, zeminlerin emme basıncı ve emme kapasitesi ile başlangıç koşulları ve plastisite indisi arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Daha sonra da emme kapasitesi ile emme basıncı arasındaki ilişki belirlenmiştir. Elde edilen eşitlikler kullanılarak yapılan tahminlerle, deneysel verilerin uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Bölüm 5' te ise çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Emme Kavramı

Zemin emmesi teorisi 1900' lü yılların başında, sadece toprak-su-bitki sistemi için geliştirilmiştir. Mühendislik problemleri üzerinde önemli etkisi olan doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışlarını kontrol eden zemin emmesinin önemi İngiltere' de Road Research Laboratory' de ortaya konulmuştur. 1965' te “zemindeki nem dengesi ve nem değişimleri” konulu zemin mekaniği sempozyumu için düzenlenen bir panelde zemin emmesi ve onun bileşenleri tanımlanmış ve bu tanımlar geoteknik mühendisliğinde kabul görmüştür (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

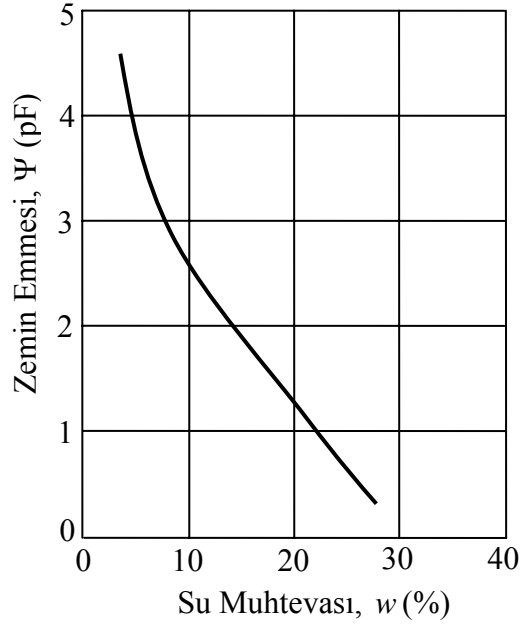
Zemin emmesi, doygun olmayan zeminlerin mühendislik davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Doygun olmayan zeminlerin mukavemet, deformasyon, hidrolik iletkenlik ve kıvam gibi değişik özelliklerini kontrol altında tutar. Bu nedenle, doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışlarını tahmin edebilmek için, zemindeki emme davranışının doğru biçimde belirlenmesi gerekir (Jiang vd., 2000; Bulut vd., 2000; 2001).

Zemin emme basıncı, dış gerilmelerin etkisi altında olmayan bir zeminin boşluklarında suyun tutulmasını sağlayan kuvvettir; yani zeminin suya uyguladığı çekme kuvvetidir ve basınç terimi olarak tanımlanır. Emme basıncı, aynı seviye (elevasyon) ve aynı sıcaklıkta bulunan saf suya karşılık zemin suyunda mevcut olan serbest enerji olarak ta tanımlanabilir. (Snethen, 1980).

Wray (1984) zemin emme basıncını, bir zeminin içindeki suyu çıkarabilmek için uygulanması gereken basınç olarak tanımlamıştır. Başka bir deyişle, zemin emme basıncı, zemin kütleindeki suyun hareketini engelleyen gerilmedir.

Şekil 2.1.' de su muhtevası ile zemin emmesi arasındaki tipik ilişki görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi zemin emmesi, su muhtevasının azalmasıyla hızla artar. Zemin emmesi; basınç (kg/cm^2), hidrolik yük (bir su kolonunun cm olarak

yükseklği) yada Schofield tarafından geliştirilen ve özel bir ölçek olan pF ölçeği ile ölçülebilir. pF ölçeği, hidrolik yük (cm)' ün logaritmik değeridir (Kumbasar ve Kip 1984).



Şekil 2.1. Emme – su muhtevası bağıntısı (Kumbasar ve Kip, 1984).

Çizelge 2.1.' de pF, negatif hidrolik yük ve zemin emmesi arasındaki ilişkiler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Zemin emmesi (Kumbasar ve Kip, 1984).

Zemin Emmesi		
pF	cm	kg/cm²
0	1	1×10^{-3}
1	10	1×10^{-2}
2	10^2	1×10^{-1}
3	10^3	1
4	10^4	1×10^1
5	10^5	1×10^2
6	10^6	1×10^3
7	10^7	1×10^4
8	10^8	1×10^5
9	10^9	1×10^6
10	10^{10}	1×10^7

Aşağıda, zemin emmesi ölçümünde kullanılan bazı birimlerin birbirleriyle ilişkileri yaklaşık olarak verilmiştir.

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 1000 \text{ cm su kolonu yüksekliği} = 3 \text{ pF}$$

Mühendislik uygulamalarında, genellikle pF olarak ölçülen zemin emmesi aynı zamanda günümüzde log(kPa) birim sistemi ile temsil edilmektedir (Fredlund and Rahardjo 1993). Bu iki birim sistemi arasındaki ilişki yaklaşık olarak log(kPa) zemin emmesi = pF zemin emmesi şeklindedir.

2.1.1. Toplam Emme Basıncı

Zemin emmesi, genellikle toplam emme basıncı olarak isimlendirilir. Edlefsen ve Anderson (1943)' e göre zemin emmesi, çoğunlukla zemin suyunun serbest enerji durumu olarak tanımlanır. Richards (1965)' e göre zemin suyunun serbest enerjisi, zemin suyunun kısmi buhar basıncı olarak ölçülebilir. Zemindeki boşluk suyu buharının kısmi basıncı ile zemin emme basıncı (yada zemin suyunun serbest enerjisi) arasındaki termodinamik ilişki Eşitlik 2.1' deki gibi tanımlanabilir.

$$\Psi = -\frac{R \cdot T}{v_{w0} \cdot \omega_v} \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{u_{v0}} \right) \quad (2.1)$$

Burada,

Ψ - Zemin emmesi yada toplam emme (kPa),

R - Üniversal (molar) gaz sabiti [8.31432 J / (mol K)],

T - Mutlak sıcaklık [273.16 + t °(K)],

t ° - Sıcaklık (°C)

v_{w0} - Suyun özgül hacmi yada suyun yoğunluğunun tersi [(m³/kg), (1 / ρ_w)]

ρ_w - Suyun yoğunluğu (20 °C' de 998 kg / m³)

ω_v - Su buharının moleküler kütlesi (18.016 kg/mol),

\bar{u}_v - Boşluk suyu buharının kısmi basıncı (kPa)

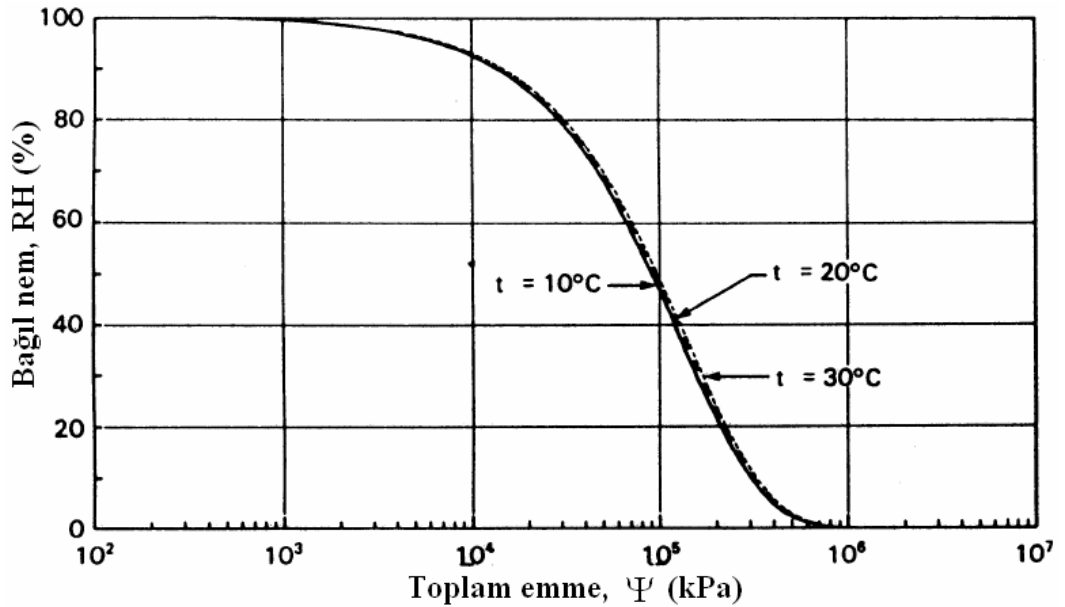
u_{v0} - Aynı sıcaklıktaki saf suyun düzgün yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı (kPa)

Bu ifadedeki $(\bar{u}_v / \bar{u}_{v0})$ terimi, RH (%) bağıl nemdir. Bağıl nem; hava içinde bulunan su buharı miktarının, havanın aynı sıcaklıkta taşıyabileceği maksimum su buharına oranıdır. Başka bir ifadeyle bağıl nem; su buharı içeriği / su buharı kapasitesi yada buhar basıncı / doymuş buhar basıncıdır.

Eğer referans sıcaklık 20 °C olarak seçilirse, Eşitlik 2.1' deki $\frac{R \cdot T}{v_{w0} \cdot \omega_0}$ terimi 135 022 kPa değerini alır. Bu durumda kPa cinsinden toplam emme basıncı Eşitlik 2.2' deki gibi yazılabilir.

$$\Psi = -135\,022 \cdot \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.2)$$

Şekil 2.2.' de üç değişik sıcaklık için bağıl nem ve toplam emme ilişkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi bağıl nem %100 iken zemin emmesi 0'dır. Bir zeminde bağıl nem %100' ün altına düşmeye başlayınca, o zeminde emme ortaya çıkacaktır (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Leong vd., 2003).



Şekil 2.2. Bağıl nem - toplam emme ilişkisi (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Toplam emme (toplam su potansiyeli) terimi, Eşitlik 2.3.' de verilen değişik enerji bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanır (Yong ve Warkentin, 1975; Saiyouri vd., 2000).

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{\Pi} + \Psi_g + \Psi_a + \Psi_p \quad (2.3)$$

Burada,

Ψ_m - Matris potansiyeli,

Ψ_{Π} - Ozmotik potansiyeli,

Ψ_g - Yerçekimi potansiyeli,

Ψ_a - Pnömatik (hava basıncı) potansiyeli,

Ψ_p - Zemin – su sistemine dışarıdan uygulanan basınçtan doğan basınç potansiyelini ifade etmektedir.

İzotermal koşullar altında, atmosfer basıncında ve dış etkilerin olmaması durumunda; zeminlerin su tutma kapasitesi olan toplam emmenin, matris ve ozmotik bileşenlerinin, kısmi doygun su hareketinin tanımlanmasında yeterli olduğu düşünülmektedir (Yong, 1999; Saiyouri vd., 2000).

Bundan dolayı, bir zeminin toplam emmesinin Ψ , Eşitlik 2.4' de verildiği gibi genellikle matris emme ($u_a - u_w$) ve ozmotik emme Ψ_{Π} , olmak üzere iki bileşenden oluştuğu kabul edilmektedir. (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{\Pi} \quad (2.4)$$

Burada,

Ψ - Toplam emme,

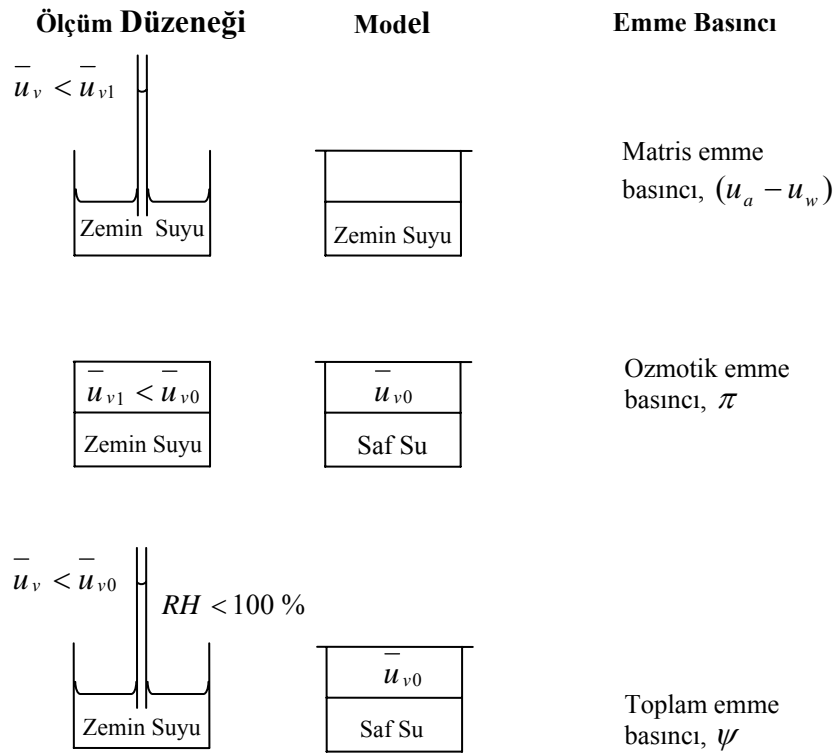
Ψ_m - Matris emme,

Ψ_{Π} - Ozmotik emmedir.

Ozmotik emme, kil danesinin etrafındaki elektriksel çift tabaka ile yakından ilgilidir. Matris emme ise, sadece hava-su arasındaki ara yüzey ile ilişkilidir.(Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Şekil 2.3.' de zemin suyunun serbest enerjisine bağlı olarak toplam emme ve onun bileşenleri tanımlanmaktadır. Matris emme, zeminin kapileritesi, tekstürü ve yüzey adsorbif kuvvetlerinden etkilenir. Bu nedenle kapilerite olayı Bölüm 2.2.' de detaylı olarak açıklanmıştır.

Zeminlerdeki kılcal boşluklar zemin suyunun yeraltı su tablasından yukarı doğru kapiler kuvvetlerin etkisiyle tırmanmasına neden olur. Boşluk hava basıncı arazide genellikle atmosfer basıncına eşit ($u_a = 0$) iken, bu kapiler su negatif basınca sahiptir. Olson ve Langfelder (1965)' e göre, doygunluk derecesinin düşük olduğu durumlarda boşluk suyu basıncı (-7000) kPa gibi oldukça yüksek değerler alabilir Zeminlerdeki yüksek negatif boşluk suyu basınçlarının oluşmasında zemin daneleri arasındaki adsorbsiyon gücünün, önemli rol oynadığı düşünülür.



Şekil 2.3. Toplam emme ve bileşenleri: Matris ve ozmotik emme (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Zemin suyu ile doldurulmuş kapiler bir tüp dikkate alınır, kapiler tüpün içindeki suyun yüzeyi kavislidir ve bu kavisli yüzeye menisküs adı verilir. Diğer taraftan aynı

zemin suyu geniş bir kaba konulduğunda düzgün bir yüzeye sahip olacaktır. Şekil 2.3.' de de görüldüğü gibi zemin suyunun kavisli yüzeyi üzerindeki su buharının kısmi basıncı \bar{u}_v , aynı zemin suyunun düzgün yüzeyi üzerindeki su buharının kısmi basıncından \bar{u}_{v1} daha az olacaktır ($\bar{u}_v < \bar{u}_{v1}$). Diğer bir deyişle, zemindeki bağıl nem kapilerite olayının sebep olduğu su yüzeyindeki kavisliğin oranına bağlı olarak azalacaktır. Suyun buhar basıncı yada bağıl nem su yüzeyi eğriliğinin yarıçapının küçülmesiyle azalacaktır. Aynı zamanda eğriliğin yarıçapı yüzey boyunca hava ve su basınçları arasındaki farkla ($u_a - u_w$) ters orantılı olacaktır ki buna matris emme denir. Bu, toplam emmenin bir bileşeni olan matris emmeyi ifade eder ve bu bağıl nemdeki bir azalmaya neden olur.

Bir zemindeki boşluk suyu genellikle tuz çözeltileri içerir. Zemin suyunun düzgün yüzeyi üzerindeki su buhar basıncı \bar{u}_{v1} , saf suyun düzgün yüzeyi üzerindeki su buharı basıncından \bar{u}_{v0} daha azdır. Diğer taraftan bağıl nem, zeminin boşluk suyundaki tuz çözeltilerinin artmasıyla azalır. Boşluk suyundaki tuz çözeltilerinin varlığına bağlı olan bağıl nemdeki azalma ozmotik emme Ψ_{Π} olarak ifade edilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Matris emme (Eşitlik 2.5), boşluk hava basıncı ile boşluk su basıncı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.

$$\Psi_m = (u_a - u_w) \quad (2.5)$$

Burada,

Ψ_m - Matris emme,

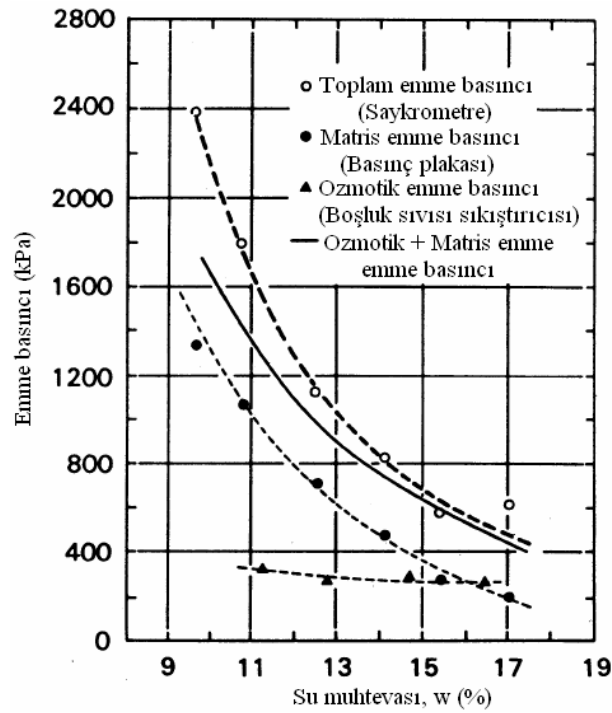
u_a - Boşluk hava basıncı,

u_w - Boşluk su basıncıdır.

Matris emme, çevresel değişimlere bağlı olarak zamanla değişiklik göstermektedir. Emmedeki herhangi bir değişim, zemin kütlelerinin tüm dengesini etkiler. Emmedeki değişimler, zemin emmesinin bir yada her iki bileşenindeki değişimlerin bir sonucu olabilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Doygun olmayan zeminler ile ilgili bir çok mühendislik problemi genellikle çevre koşullarındaki değişimlerin sonucudur. Bir yapı tabanında suyun birikmesi ve bunun sonucunda yapının kabarması, matris emmedeki bir azalmanın sonucu olabilir. Benzer olarak doygun olmayan bir zemin şevinin duraylılığı aşırı yağışlar nedeniyle zemindeki emme gerilmelerinin azalması sonucu tehlikeye girebilir. Bu değişimler öncelikle matris emme bileşenini etkiler. Ozmotik emme değişimlerine olan etkisi önemsizdir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Şekil 2.4.'de Krahn ve Fredlund (1972) tarafından Regina kili üzerinde yapılan bir araştırmanın sonuçları verilmiştir. Araştırmada toplam emmenin bileşenleri ölçülmüştür. Sonuçlar, toplam emme değerlerindeki değişimlere bağlı olarak matris emme değerlerinin değişirken ozmotik emme değerlerinin nispeten kararlı kaldığını göstermektedir.



Şekil 2.4. Regina kilinde ölçülmüş toplam, matris ve ozmotik emme basınçları (Tremblay, 1996)

Ozmotik emme (Eşitlik 2.6), boşluk suyundaki çözünmüş tuzlardan kaynaklanmaktadır ve basınçtan bağımsızdır (Edil ve Motan, 1984; Wray, 1984).

$$\Psi_{\Pi} = n \cdot R \cdot T \cdot C \quad (2.6)$$

Burada,

Ψ_{Π} - Ozmotik emme,

n - Bir mol tuz için molekül sayısı,

R - Üniversal gaz sabiti (8.31432 J/ (mol K)),

T - Mutlak sıcaklık (K),

C - Çözünenlerin konsantrasyonudur.

Ozmotik emme hem doygun hem de doygun olmayan zeminlerde bulunan boşluk suyundaki tuz konsantrasyonuyla 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 gelecektir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Zemin emmesinin ozmotik bileşeni, doygun olmayan zeminlerle ilgilenen mühendisler tarafından genellikle ihmal edilir. Fredlund (1989, 1991) pratikte yapılan bu uygulamayı ve matris emmenin üstünlüğünü incelemiştir. Ozmotik emmeler doygun zeminlerde daha belirgindir fakat klasik zemin mekaniğinin uygulamalarında ihmal edilmektedir. Kısaca, mühendisler öncelikle boşluk hava basıncının atmosfer basıncına eşit olduğu zemindeki matris emmeye eşit olan negatif boşluk suyu basıncının değeriyle ilgilenirler. Böylece zemin matris emmesi basitçe ($-u_w$) olarak ifade edilebilir. Bunun beraber, Fredlund (1991) ozmotik emme bileşeninin, tuz miktarındaki muhtemel bir değişiklik yada herhangi bir sebeple ortaya çıkabilecek değişikliklere karşı çok dikkatli bir şekilde incelenmesi gerektiğini belirtmiştir. (Tremblay, 1996).

Ozmotik emmenin genellikle hesaplarda ihmal edilmesinin diğer nedeni, geoteknik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan yöntemlerle ilgilidir. Genellikle arazide ortaya çıkan ozmotik emmedeki değişimlerin, zemin özelliklerine uygun olarak laboratuvar deneylerine yansıtıldığı düşünülmektedir. Örneğin, yağış nedeniyle bir zeminde meydana gelecek şişmenin ödometre deneyiyle belirlenmesi dikkate alınsın. Arazide, saf su olan yağmur, mevcut olan zemin boşluk suyuna ilave olur ve

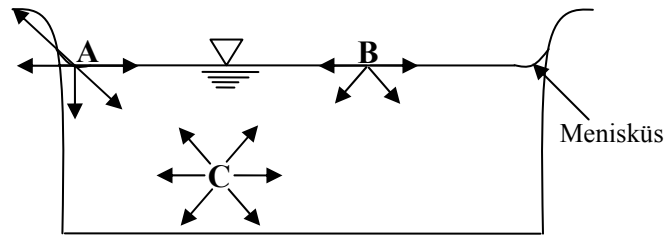
ozmotik emmeyi değiştirir. Laboratuvar deneylerinde de arazideki duruma benzer olarak, zemin numunesi genellikle deney yapılmadan önce saf suya boğulur. Zemin numunesindeki ozmotik emme bu süreçte değişebilecektir. Arazide meydana gelen değişimler birebir laboratuvar deneylerine yansıtıldığından ozmotik emmedeki değişimi ihmal edilebilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Kimyasal kirlenme, zeminin içindeki tuz konsantrasyonunu değiştirir. Ozmotik emme basıcındaki değişiminin etkisi, zemin davranışı üzerindeki önemli olabilir. Bu durumda, gerilme durumunun bir etkeni olarak ozmotik emmeyi dikkate almak gerekir. Bu durum doygun zeminler için de doygun olmayan zeminler için de aynı derecede önemlidir. Bir zeminin mekanik davranışını etkileyen ozmotik emmenin rolü matris emmenin rolü kadar etkili olabilir.

2.2. Kapilerite

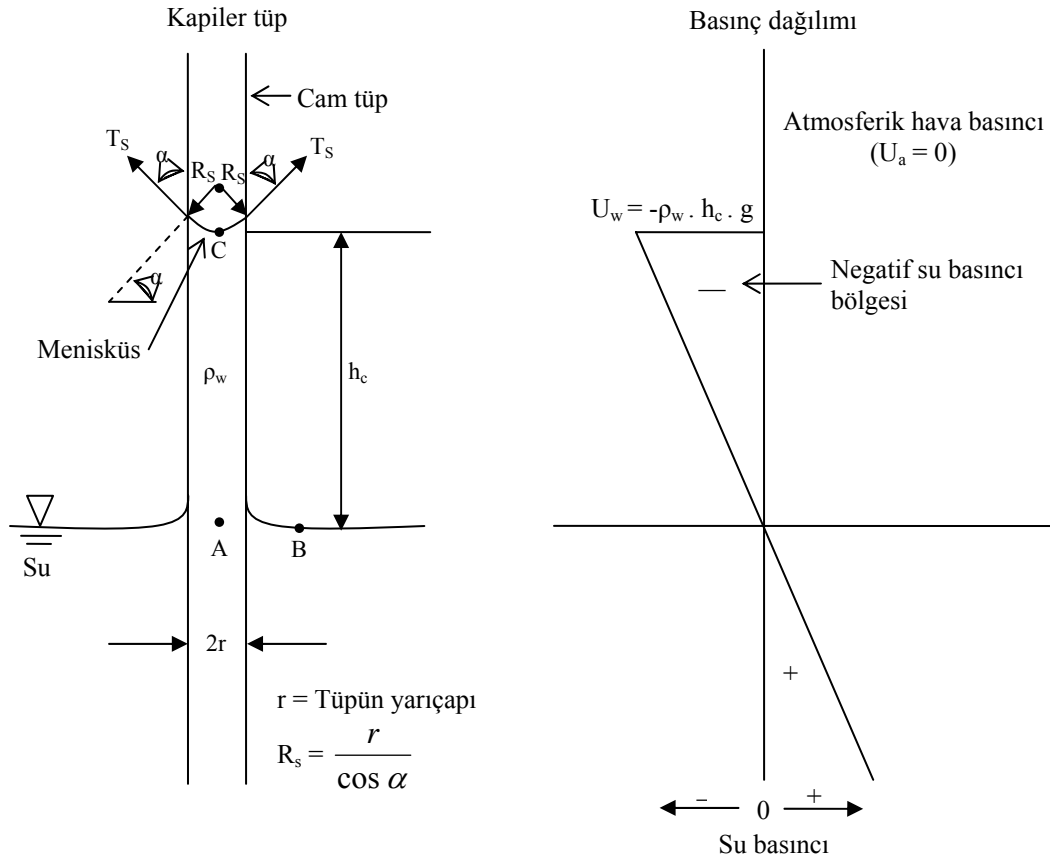
Kapilerite olayı, toplam emmenin matris bileşeni ile ilişkilidir. Kapiler yükseklik ve menisküsün eğrilik yarıçapı zeminlerdeki su muhtevası-matris emme ilişkisi (zemin-su karakteristik eğrisi) üzerinde doğrudan etkilidir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Kapilerite olayı, sıvıların yüzey gerilimi özelliğinden kaynaklanır. Yüzey gerilimi ise farklı sıvılar arasındaki arayüzeylerde ortaya çıkar ve arayüzeydeki farklı moleküller arasında varolan bağ kuvvetlerinin sonucudur.



Şekil 2.5. Yüzey gerilimi (Önalp, 1997)

Şekil 2.5.'de suyun havaya karşı gösterdiği yüzey gerilimi basit bir modelle açıklanmaktadır. Şekildeki suyun içinde **C** noktasındaki molekül, çevresindeki diğer moleküllerle dengede olduğundan kuvvetler bileşkesi sıfırdır. Suyun yüzeyindeki bir **B** noktasındaki molekül ise suyun içindeki moleküllere eşit kuvvetlerle bağlı iken, havada az sayıda bulunan su molekülleriyle bu bağ yeteri kadar sağlanamadığından kuvvetler bileşkesi tüm yüzey molekülleri için aşağıya doğrudur. Bir başka deyişle, su yüzeyi sürekli olarak büzülme isteğindedir. İşte bu özellik suyun havaya karşı olan yüzey gerilimini oluşturmaktadır. Yüzey gerilimi, **A** noktasında ise bir başka olayın gelişmesine neden olur. Yüzey gerilimi etkisi altındaki su kabın kenarına tırmanma eğilimine girer. Kabın çapı büyükse bu olay fark edilemeyecek kadar önemsiz olacaktır. Ancak su kılcal çaplı bir borunun içinde ise suyun yüzey gerilimi onu bu kılcal borunun içinde belirli bir yüksekliğe kadar çekecektir.

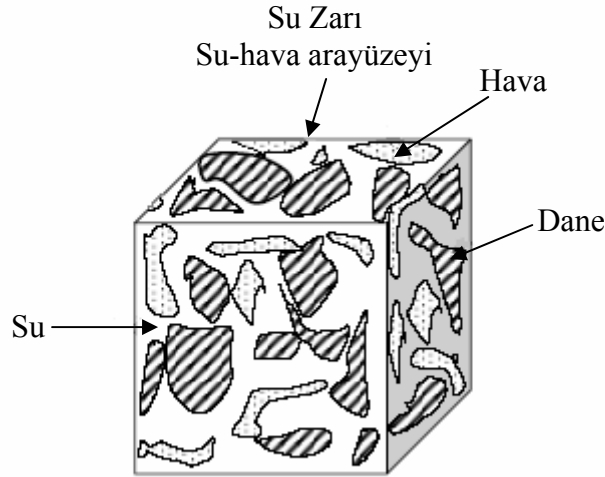


Şekil 2.6. Kapilerite olayı ve fiziksel modeli (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Şekil 2.6.' da bu kapiler yükseklik h_c olarak tanımlanmıştır. Bu kapiler yükseklikte suyun havaya karşı tüp çapında yarı küresel bir yüzeyde gerildiği gözlenir. Bu yarı küresel yüzeye, olayı ilk fark eden Venedikli fizikçinin anısına, menisküs adı verilmiştir.

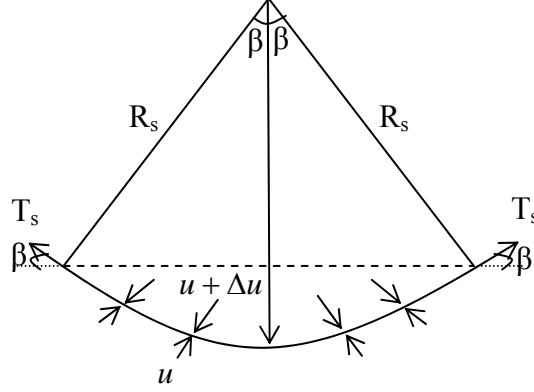
Şekil 2.6.' da atmosferik şartlar altında küçük bir cam tüp suyun içine sokulmuştur. Hava-su kesişme yüzeyi (contractile skin)' ndeki yüzeysel çekme kuvvetlerinin etkisi ve suyun cam tüpün ıslak yüzeyine yönelmesi sonucu su tüpün içinde yükselir. Bu kapiler davranış menisküsün yüzeyinde etkili olan T_s yüzeysel çekim kuvvetiyle açıklanabilir. Yüzey çekim kuvvetiyle T_s , düşey doğrultuyla bir α açısı yapar. Bu açı temas açısı olarak isimlendirilir ve temas açısının büyüklüğü hava-su kesişme yüzeyi ile camın molekülleri arasındaki adhezyon' a bağlıdır.

Farklı viskoziteye sahip olan su ve hava karşılaştıklarında su, havaya karşı gerilmekte ve arayüzeyde Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi bir su zarı oluşmaktadır (Önalp, 1997).



Şekil 2.7. Doymun olmayan zeminde bir blok diagram (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Şekil 2.8.' de gösterilen su-hava arayüzeyindeki basınç farkı Δu , küresel bir yüzeyde kuvvet dengesi denklemleri yazılarak gösterilebilir. Düşey yöndeki kuvvet dengesi yazılarak hava ve su arasındaki basınç farkı Eşitlik 2.7' daki gibi hesaplanabilir.



Şekil 2.8. Hava-su arayüzeyindeki gerilim olayı (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

$$2T_s \sin \beta = 2 \Delta u R_s \sin \beta \quad (2.7)$$

Burada,

T_s - Yüzey gerilimi,

R_s - Arayüzeyin yarıçapı,

Δu - Arayüzeydeki basınç farkı,

$2 R_s \sin \beta$ - Arayüzeyin yatay düzlemdeki uzunluğudur.

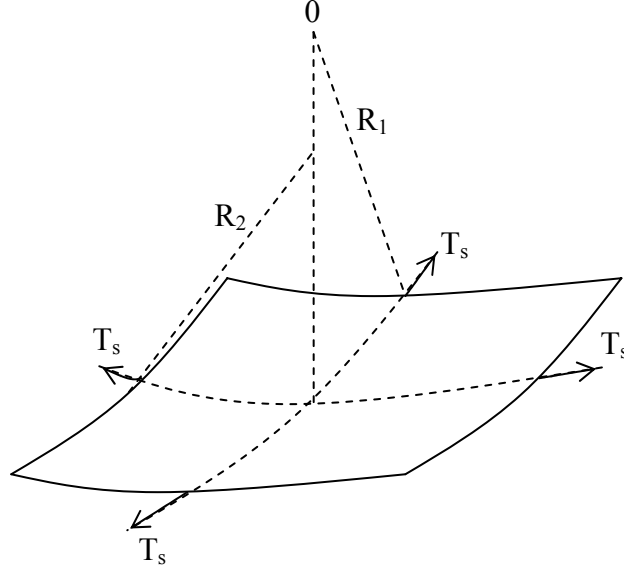
Eşitlik 2.7 yeniden düzenlenirse Eşitlik 2.8 elde edilir.

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8 iki boyut için verilmiştir. Aynı eşitlik üç boyut için yazılacak olursa Eşitlik 2.9 deki gibi olur (Murray, 2002).

$$\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.9)$$

Burada,
 R_1 ve R_2 - Su zarının (hava-su arayüzeyinin) Şekil 2.9.' da gösterilen eğrilik yarıçaplarıdır.



Şekil 2.9. Eğik arayüzdeki yüzey gerilmeleri (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Eğer eğrilik yarıçapları tüm doğrultularda aynı ise, yani R_1 ve R_2 , R_s ' e eşitse Eşitlik 2.9, Eşitlik 2.10' e dönüşür.

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.10)$$

Doygun olmayan bir zeminde, su zarı (contractile skin), su basıncına u_w ve su basıncından daha büyük olan hava basıncına u_a maruz kalacaktır. Bu basınç farkı, su zarının bükülmesine sebep olur (Eşitlik 2.11).

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.11)$$

Burada,
 $(u_a - u_w)$ - Matris emme yada su zarının üzerine etki eden boşluk hava basıncı ile boşluk su basıncı arasındaki farktır.

Zeminin matris emmesi arttığı derecede su zarının eğrilik yarıçapı azalır. Eğik su zarı menisküs olarak adlandırılır. Boşluk hava basıncı ile boşluk su basıncı arasındaki fark sıfıra yaklaşırken, eğrilik yarıçapı R_s , sonsuza doğru gider. Bundan dolayı, matris emme sıfıra yaklaşırken hava-su arayüzeyi bir düzlem olarak kalır (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Sıcaklık, yüzey gerilimini viskozitedeki düşüş nedeniyle azaltır. Suyun havaya karşı yüzey gerilimi değeri 0°C ' de 75.6 MN/m den 20°C ' de 72.75 MN/m ye düşmektedir (Önalp, 1997)

Şekil 2.6.' da görülen kapiler sistemdeki A, B ve C noktaları hidrostatik dengededir. A ve B noktalarında su basıncı u_w , atmosferik basınca sahiptir ve her iki noktada da sıfırdır. Su yüzeyindeki A ve B noktalarının seviyesi sistem için başlangıç noktası kabul edilmiştir. Bunun sonucu olarak, hidrolik yük (yerçekimi yükü + basınç yükü) A ve B noktalarında sıfırdır.

C noktası başlangıç noktasından itibaren h_c yüksekliğindedir (buradaki yerçekimi yükü h_c yüksekliğine eşittir). A, B ve C noktaları arasındaki hidrostatik denge her üç noktadaki hidrolik yükün eşit olmasını gerektirir. Diğer taraftan C noktasındaki hidrolik yük sıfırdır. Bu, C noktasındaki basınç yükünün, C noktasındaki yerçekimi yükünün negatif değerine eşit olduğu anlamına gelir. C noktasındaki su basıncı Eşitlik 2.12' deki gibi hesaplanabilir.

$$u_w = -\rho_w g h_c \quad (2.12)$$

Burada,

- u_w - Su basıncıdır,
- ρ_w - Suyun yoğunluğu,
- g - Yerçekimi ivmesi,
- h_c - Kapiler yüksekliktir.

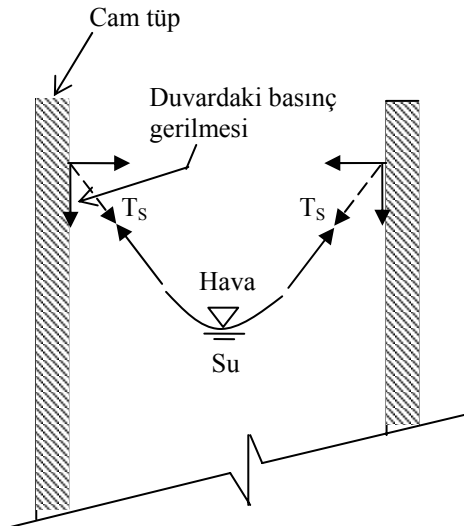
C noktasındaki hava basıncı atmosfer basıncına eşit ($u_a = 0$) ve su basıncı negatiftir ($u_w = -\rho_w g h_c$). Bu durumda C noktasındaki matris emme ($u_a - u_w$) Eşitlik 2.13' deki gibi yazılabilir.

$$(u_a - u_w) = \rho_w g h_c \quad (2.13)$$

Matris emme yüzey gerilimi cinsinden ifade edilebilir.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14, su zarının üzerine etki eden boşluk hava basıncı ile boşluk su basıncı arasındaki fark olarak verilen Eşitlik 2.11 ile aynıdır. Zemindeki temas açısının sıfır olduğu kabul edilerek eğrilik yarıçapı R_s 'nin, boşluk yarıçapı r 'ye eşdeğer olduğu düşünülebilir. Sonuç olarak, bir zeminin boşluk yarıçapı küçüldükçe matris emmesi artmaktadır.



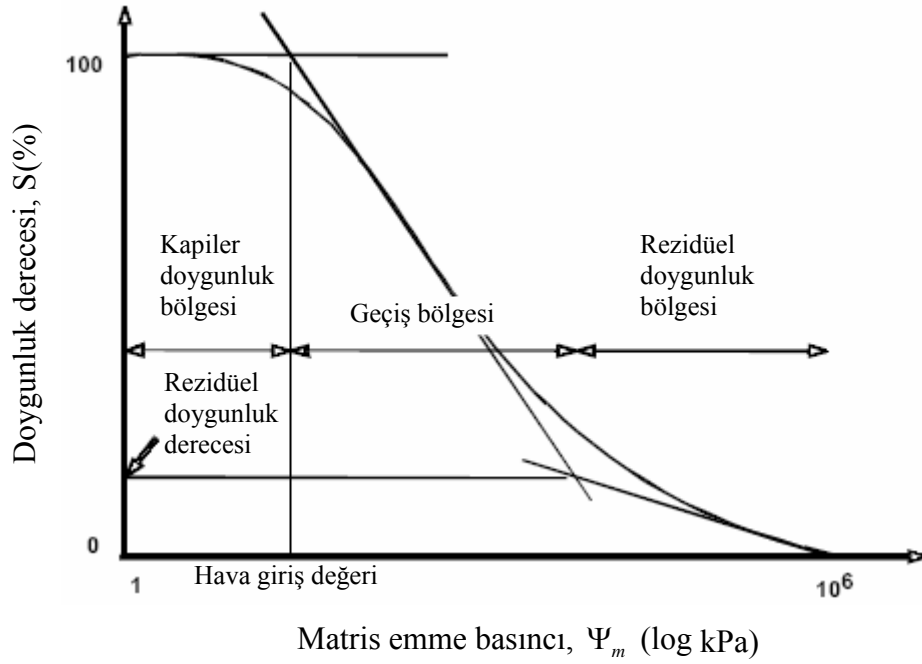
Şekil 2.10. Bir kapiler tüpteki temsili kuvvetler (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Şekil 2.6.' da bir kapiler tüp içindeki su kolonunu h_c yüksekliğinde ayakta tutan yüzey gerilmesi anlatılmıştır. Su zarı (contractile skin) ile ilişkilendirilen yüzey gerilmesi kapiler tüpün cam duvarı üzerindeki tepkime gücünün bir sonucudur (Şekil 2.10.). Bu tepkime gücünün düşey bileşeni tüpün duvarındaki basınç gerilmesidir. Diğer bir deyişle, su kolonunun ağırlığı, tüpe su zarı boyunca aktarılır. Kapiler bölgede bir zemin olması durumunda su zarı, zemin strüktüründe basıncın artmasına sebep olacaktır. Bunun sonucu olarak, doymun olmayan zeminlerdeki matris emmenin varlığı, zeminin kayma mukavemetini artırır.

2.3. Zemin Su Karakteristik Eğrisi

Bir zemindeki su miktarı (gravimetrik, hacimsel su muhtevası yada doymunluk derecesi) ve zemin emmesi (matris yada toplam) arasındaki ilişki zemin su karakteristik eğrisi olarak isimlendirilir. Zemin, değişik emme basınçlarına maruz kaldığında, su muhtevası değişikliklerine bağlı olarak zeminin su tutma kapasitenin bir ölçümü olarak ta açıklanabilir. Kısmi doymun zeminlerin herhangi bir doymunluk derecesindeki permeabilite katsayısı, kayma mukavemeti, hacimsel deformasyonu, boşluk boyutu dağılımı, herhangi bir emme değerinde boşluklarda tutulan su miktarı gibi birçok özellik zemin su karakteristik eğrisinden elde edilebilir. Bu eğri, kısmi doymun bir zeminin temel karakteristiklerini verir. Farklı zemin tiplerinde ve farklı koşullar altında zemin su karakteristik eğrisinin elde edilmesi için çok sayıda deneysel çalışmalar yapılmaktadır (Fredlund vd., 1994; Fredlund vd., 1996; Sillers vd., 2001; Montanez, 2002; Zhou ve Yu, 2005).

Şekil 2.11. tam doymun bir zeminin kuruma aşamalarını gösteren tipik bir zemin su karakteristik eğrisini göstermektedir. Bu eğrinin tamamının (zeminin tam doymun olduğu durumdan, kuru olduğu duruma kadar) deneysel olarak çizilebilmesi için birkaç farklı emme ölçüm metodunun birlikte kullanılması gerekebilir. Bu eğri genellikle üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; kapiler doymunluk bölgesi, kuruma (geçiş) bölgesi ve rezidüel doymunluk bölgeleridir.



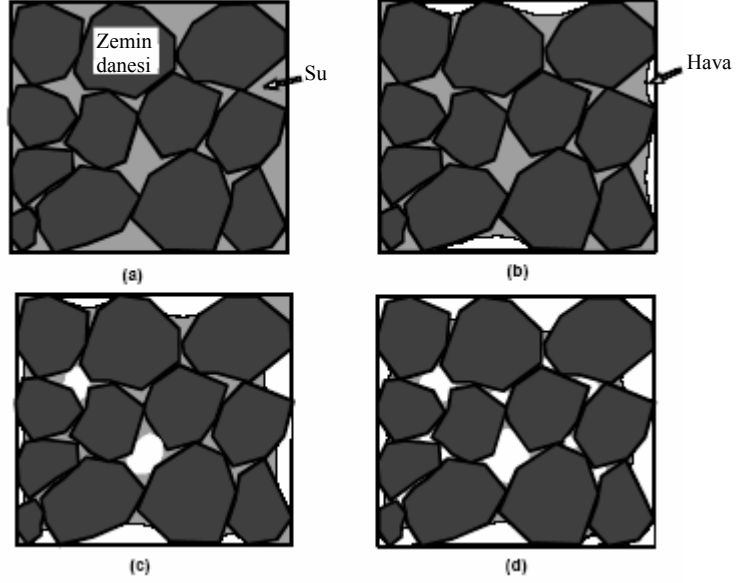
Şekil 2.11. Tam doygun bir zeminin kuruma aşamalarını gösteren tipik bir zemin su karakteristik eğrisi (Montanez, 2002)

Tipik bir zemin su karakteristik eğrisinin en önemli parametreleri hava giriş değeri ve rezidüel doygunluk derecesidir. Bu parametreler kuruma evresindeki birbirini takip eden bölgelerin sınırlarını tanımlar.

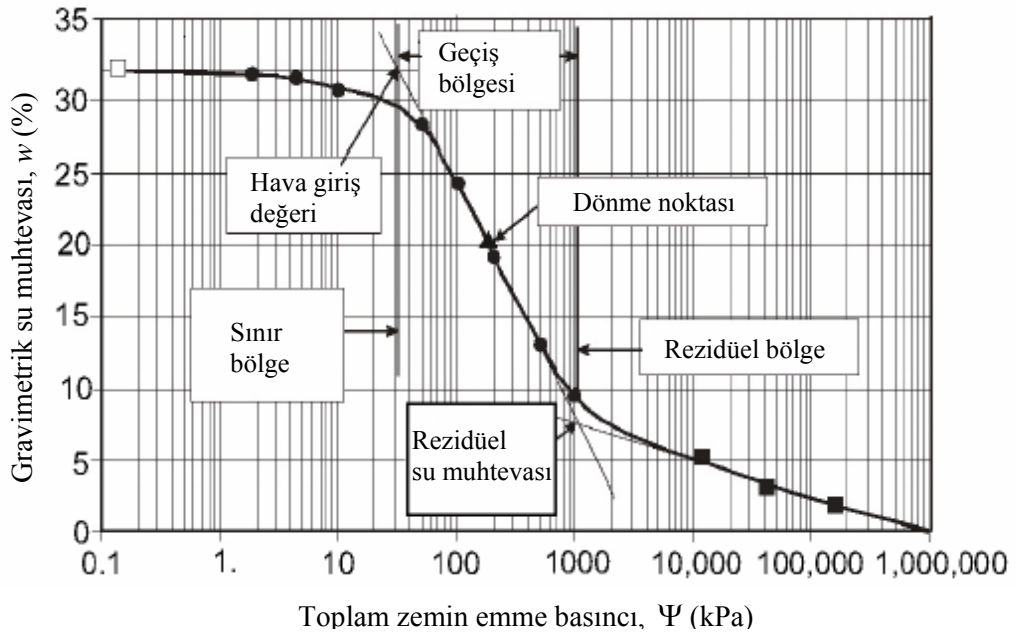
Hava giriş değeri; zeminin en büyük boşluklarına havanın girebilmesi için gerekli olan emme değerlerini ifade eder. zemin su karakteristik eğrisi üzerinde hava giriş değerinin belirlenmesi için; %100 doygunluk derecesinden, X eksenine paralel olan bir doğru çizilir. Eğrinin geçiş bölgesi içinde kalan doğrusal kısmı uzatılarak, çizilen paralel doğru ile kesiştirilmesiyle hava giriş değeri belirlenir (Şekil 2.11.).

Rezidüel doygunluk; zemin boşlukları içindeki suyun süreksiz hale geldiği (Şekil 2.12-d.) doygunluk derecesi olarak kabul edilmektedir. Bu sınır değer tanınması, hidrolik iletkenlik yada kayma mukavemetinin tahmin edilmesi için kullanılacak nümerik model parametrelerinin elde edilmesinde önemlidir. zemin su karakteristik eğrisi üzerinde rezidüel doygunluk derecesinin belirlenmesi için; rezidüel doygunluk bölgesi içinde kalan eğrinin bitiş kısmı, 10^6 kPa lık emme

değerini kesecek şekilde uzatılır. Bu doğru ile eğrinin geçiş bölgesi içinde kalan doğrusal kısmının kesişim noktası rezidüel doygunluk değerini verir (Şekil 2.11.)



Şekil 2.12. Kuruma aşamaları: (a) sınır etki aşaması; (b) birincil geçiş aşaması; (c) ikincil geçiş aşaması; (d) rezidüel geçiş aşaması (Vanapalli vd., 1996)



Şekil 2.13. Gravimetrik su muhtevası-zemin emme basıncı ilişkisini gösteren, zemin-su karakteristik eğrisi (Report on 05-1412-058, 2006)

Şekil 2.13.'de de görüldüğü gibi tam doygun durumdan hava giriş değerine kadar olan kapiler doygunluk bölgesinde emme basıncı çok küçük bir değer almaktadır. Hava giriş değeri aşıldıktan sonra rezidüel su muhtevasına kadar olan bölgede, yani kuruma (geçiş) bölgesinde; doygunluk derecesinde önemli oranda azalma meydana gelirken, emme basıncındaki artış çok daha az olmaktadır. Ancak rezidüel su muhtevası değerinin altındaki su muhtevalarında, doygunluk derecesi daha yavaş azalmasına rağmen, emme basıncı değeri çok büyük bir hızla artmaktadır (Zhou ve Yu, 2005).

Gerilme tarihçesi, zemin strüktürü, başlangıç su muhtevası, boşluk oranı, zemin tipi, mineralojisi ve kompaksiyon metodu zemin su karakteristik eğrisini etkileyen temel faktörler arasında sayılabilir. Zemin su karakteristik eğrisinin teorik olarak belirlenmesi için birçok araştırmacı tarafından çeşitli bağıntılar verilmiştir (Van Genuchten, 1980; McKee ve Bumb, 1987; Kosugi, 1994; Fredlund ve Xing, 1994).

Zemin su karakteristik eğrisinin teorik olarak elde edilmesi için Fredlund ve Xing (1994) tarafından önerilen Eşitlik 2.15. örnek olarak aşağıda verilmiştir.

$$\theta = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{\Psi_r}\right)} \right] \frac{\theta_s}{\ln\left(e + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^b\right)^{c_r}} \quad (2.15)$$

Burada,

Ψ - Toplam zemin emme basıncı

Ψ_r - Rezidüel su muhtevasındaki zemin emmesine karşılık gelen bir katsayı

θ_s - Doygun hacimsel su muhtevası

e - Euler sayısı (2.71828)

a - Zemine bağlı hava giriş katsayısı

b - Zeminin karakteristik su muhtevası eğrisinde dönme noktasının eğimine bağlı bir parametre

c_r - Rezidüel su muhtevasına bağlı bir parametredir.

2.4. Emmenin Ölçülmesi

Zemin emmesi, doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerini ve deformasyon davranışlarını belirlemede kullanılan bir anahtar parametredir. Bu nedenle zemin emmesinin ölçülmesi için güvenilir tekniklere ihtiyaç vardır.

Zemin emmesinin büyüklüğü 0 kPa ile 1 000 000 kPa arasında değişebilir. Ancak henüz günümüzde tüm emme büyüklüklerini ölçebilecek bir teknik yoktur. Genellikle emme ölçüm aletleri en fazla 10 000 kPa civarındaki emme değerlerini doğru olarak ölçebilmektedirler. (Rahardjo and Leong, 2006).

Zemin emmesi ölçüm metodları genellikle doğrudan ve dolaylı ölçüm yöntemleri olarak gruplandırılır. Doğrudan metotlar, basınç plakası, basınç membranı, tensiyometreler vb. yöntemleri içerir. Bu metotlarda zeminin boşluk basıncı ölçülür yada zemine belli bir basınç uygulanır ve uygulanan bu basınçla su içeriğinin dengeye gelmesi takip edilir. Zemin emmesini doğrudan ölçen metotların hem negatif hem de pozitif boşluk suyu basınçlarını ölçebilme avantajları vardır. Dolaylı metotlar ise filtre kağıdı, poroz blok, ısı iletkenlik sensörü vb. yöntemleri içerir. Bu metotlar, su içeriğinin değişiminden etkilenen bir fiziksel özelliği yada su içeriği ölçümlerini kullanır (Zapata vd., 2000; Take ve Bolton, 2002)

Dolaylı ölçüm aletleri çoğunlukla yüksek matris emme değerlerinin ölçülmesinde kullanılır ve küçük negatif basınçların ölçülmesinde daha az güvenilir olduğu düşünülür. Diğer taraftan doğrudan ölçüm aletleri genellikle zemin su muhtevasının 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 gerekebilir. Örneğin, mevsimsel su muhtevası 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 (Tremblay, 1996).

Çizelge 2.2.'de zemin emmesinin ölçümü için kullanılan teknikler verilmiştir

Çizelge 2.2.Zemin emmesinin ölçülmesinde kullanılan laboratuvar ve arazi yöntemleri (Guan, 1996; Bulut ve Leong, 2005; Tarantino vd., 2005).

Ölçüm Tekniği	Yöntem	Ölçülen Emme Türü	Ölçüm Aralığı (kPa)
Doğrudan	Basınç Membranı	Matris Emme	0 - 10000
	Basınç Plakası	Matris Emme	0-1500
	Null Tipi Basınç Plakası (Eksen Dönüştürme Tekniği)	Matris Emme	0-1500
	Jet –Fill Tensiyometre	Matris Emme	0 - 100
	Small Tip Tensiyometre	Matris Emme	0 - 100
	Quick Draw Tensiyometre	Matris Emme	0 - 100
	Ozmotik Tensiyometre	Matris Emme	0 - 2000
	MIT Tensiyometre	Matris Emme	0 - 100
Emme Plakası	Matris Emme	0 - 90	
Dolaylı	Filtre Kağıdı	Toplam/Matris Emme	Tüm değerler
	Thermocouple Saykrometre	Toplam Emme	100 - 8000
	Transistör Saykrometre	Toplam Emme	100 - 10000
	Chilled –Mirror Higrometre	Toplam Emme	500 - 30000
	Isıl İletkenlik Sensörleri	Matris Emme	1 - 1500
	Elektriksel İletkenlik Sensörleri	Matris Emme	50 - 1500
	Equitensiyometre	Matris Emme	0 - 1500
	TDR (Time Domain Reflectometry)	Matris Emme	0 - 500
	Santrifüj Tekniği	Matris Emme	0 - 3000
Boşluk Sıvısı Sızdırıcı	Ozmotik Emme	Tüm değerler	

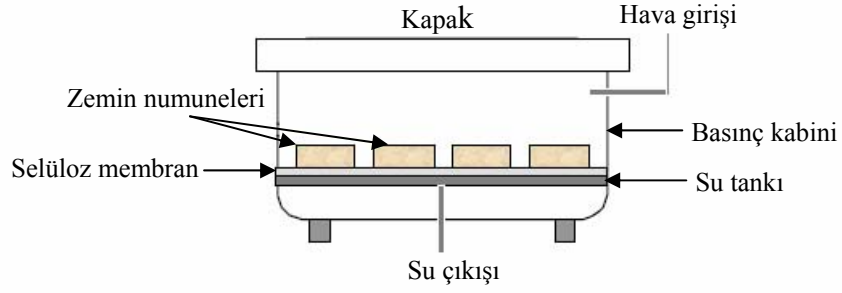
2.4.1. Doğrudan Ölçüm Teknikleri

Doğrudan ölçüm teknikleri zeminlerin matris emme basıncını belirlemede kullanılırlar. Bir zeminin matris emme basıncı, zeminin negatif boşluk suyu basıncının ölçülmesiyle doğrudan belirlenebilir. Bu ölçümlerin sağlıklı olarak yapılabilmesi için seramik bir disk yada seramik bir kap kullanarak zeminin su fazıyla hava fazının ayrılması gerekir. Matris emmenin ölçülebilen maksimum değeri, kullanılan seramik diskin yada kabın hava giriş değeri ile sınırlıdır.

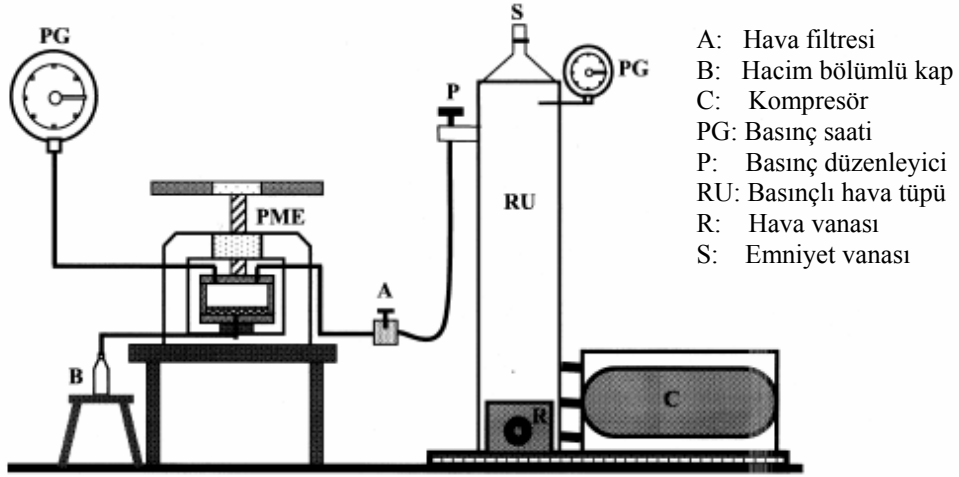
2.4.1.1. Basınç Membranı

Basınç membranı zeminlerin matris emme basıncını doğrudan belirlemek için kullanılan bir cihazdır. 1500 kPa'dan daha büyük emme basınçlarının ölçülebilmesi amacıyla selüloz bir membran kullanılır. Basınç membranı yöntemiyle 10000 kPa değerine kadar olan matris emmeleri ölçmek mümkündür (Bulut, 2001). Selüloz membranlar, seramik disklere oranla daha küçük gözeneklere sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı hava basıncını sızdırmaya karşı daha dayanıklıdırlar. Selüloz membrana bağlanan bir büret vasıtasıyla su seviyesi değişimlerinin gözlemlenmesiyle, emmenin dengelenme zamanı belirlenir (Richards ve Weaver, 1944; Williams, 1964; Thakur, 2005; Long, 2006).

Doygun zemin numuneleri; altında çelik bir ağ bulunan, saf su banyosunda 24 saat süreyle doymuş hale getirilmiş geçirimsiz selüloz membranın üzerine yerleştirilir. Bu çelik ağ, numunelerden süzülen zemin suyunun alt kısımda bulunan su toplama kabına geçmesine izin verir. Daha sonra, Şekil 2.14.' de gösterilen basınç kabınınin kapağı kapatılır. Kabine uygulanan hava basıncının etkisiyle, zemin numunesinin ve selüloz membranın içindeki su dışarı çıkarak hacim bölümlü su toplama kabına birikir. Uygulanan hava basıncı ile zemin numunesinden su çıkışının artık durduğu anda matris emme basıncı dengesine ulaşılmış olur. Denge durumunda zemin numunesinin matris emme basıncı, uygulanan hava basıncına eşittir. Örneğin, zemin numunesi uygulanan 15 atmosferlik hava basıncı altında dengelendiyse, zemin numunesinin matris emme basıncı 15 bardır. Kabin içindeki hava basıncı arttırılırsa, dengelenme oluncaya kadar yeniden su çıkışı olacaktır. Deney düzeneği, Şekil 2.15.' de gösterilmiştir. Deneylerden elde edilen değişik matris emme basıncı değerine karşı gelen zeminin su muhtevaları kullanılarak zemin su karakteristik eğrileri çizilir (Klute vd., 1986; Ren vd., 2003; Bonito, 2005; Thakur, 2005).



Şekil 2.14. Basınç membranı hücresi (Bulut, 2001)

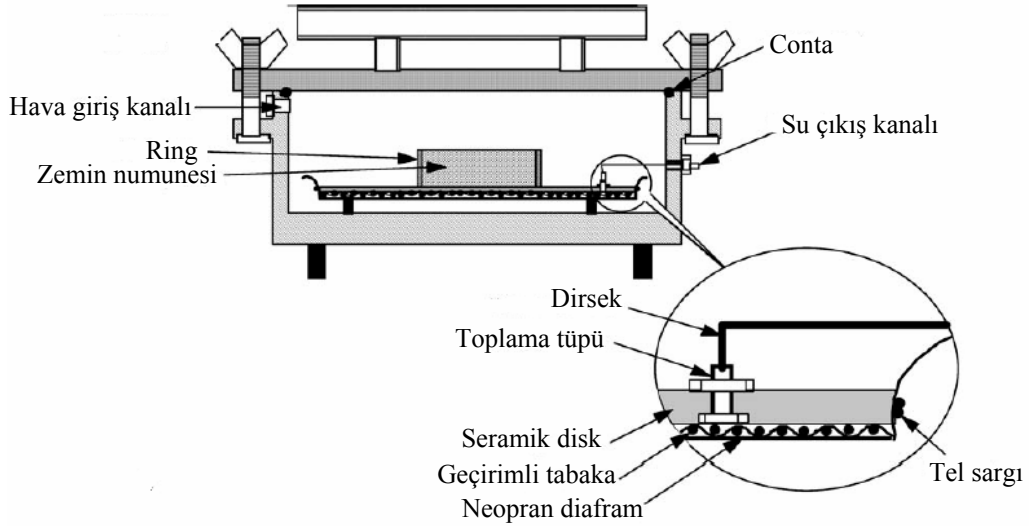


Şekil 2.15. Basınç membranı deney düzeneği (Sreedeeep ve Singh, 2006)

2.4.1.2. Basınç Plakası

Basınç plakası deney düzeneği esas olarak; basınç kabini, kompresör ve yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskten oluşur. Hava giriş değeri gözenek çapıyla alakalıdır. Gözeneklerin çapı küçüldükçe, disklerin hava giriş değeri büyür. Seramik diskler küresel kil daneleri karışımından sinterleme tekniği (ısı ve basınçla presleme) ile üretilir ve hava fazı ile su fazını birbirinden ayırmak için kullanılır. Yüksek hava giriş değerine sahip olan bu seramik diskin alt tarafına ince bir neopran diafram

serililir ve bu neopran diafram seramik diskin kenarlarına sabitlenir. Disk ile diafram arasında suyun düzgün bir akım yolu izleyerek akmasını sağlayan geçirimli bir tabaka bulunur. Bu tabaka su çıkış borusuna bir ara dirsek kullanılarak bağlanır. Şekil 2.16.'da basınç plakası deney düzeneğinde kullanılan bir basınç kabini gösterilmiştir (Thakur, 2005).



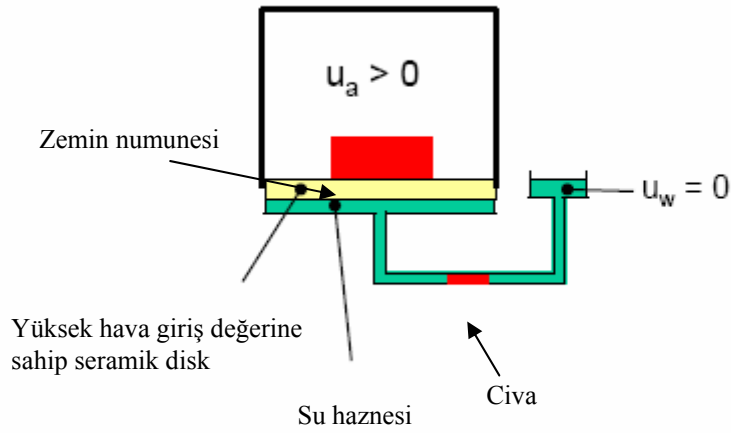
Şekil 2.16. Basınç plakası deney düzeneğinde kullanılan bir basınç kabini (Wang ve Benson, 2004).

Deneyin yapılışı ve değerlendirilmesi aynı basınç membranında olduğu gibidir. Basınç membranı ile basınç plakası arasındaki temel fark; basınç plakasında geçirimli seramik bir disk kullanılması, basınç membranında ise çok daha yüksek matris emme basıncı değerlerini ölçebilen selüloz bir membran kullanılmasıdır (Bulut, 2001).

2.4.1.3. Null Tipi Basınç Plakası (Eksen Dönüştürme Tekniği)

Null tipi basınç plakası ölçüm aleti, eksen dönüştürme tekniğini kullanır. Deney süresince akışın olmaması (zemine su girişi veya zeminden su çıkışı olmaması) koşuluna dayanan eksen dönüştürme tekniği Hilf (1956) tarafından geliştirilmiştir. Bu teknikte hava fazını su fazından ayıran, yüksek hava giriş değerine sahip bir disk kullanılır (Şekil 2.17.). Bu disk sayesinde zemin numunesine atmosferik basınçtan

daha büyük bir basınç uygulanırken, su basıncı genellikle atmosferik basınca eşit kalır. Hava basıncı ile su basıncı arasındaki fark ise matris emme basıncını verir. Böylece zemin numunesinin değişik matris emme basınçlarına karşılık gelen su muhtevaları belirlenebilir ve zemin-su karakteristik eğrileri tanımlanabilir. (Gan ve Fredlund, 1988; Leong ve Rahardjo, 1997; Long, 2006; Agus vd., 2001; Agus vd., 2003; Mitarai ve Nori 2006).



Şekil 2.17. Eksen dönüştürme tekniği (Marinho vd., 2005).

Doymun olmayan zemin numunesi yüksek hava giriş değerine sahip olan ve önceden doymun hale getirilmiş seramik diskin üzerine yerleştirilir. Seramik diskin altındaki su ile dolu olan hazne null akış göstergesine ve basınç kontrol aletine bağlanır (Şekil 2.18.). Null-akış (sıfır akış) göstergesi deney süresince zeminin su muhtevasının 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 verir.

Biscontin (2007) tarafından basınç plakası yöntemiyle bir zeminin matris emme basıncının hesaplanabilmesi için Eşitlik 2.16' daki bağıntı verilmiştir.

$$\Psi_m = -(u_a - u_w) \quad (2.16)$$

Burada,

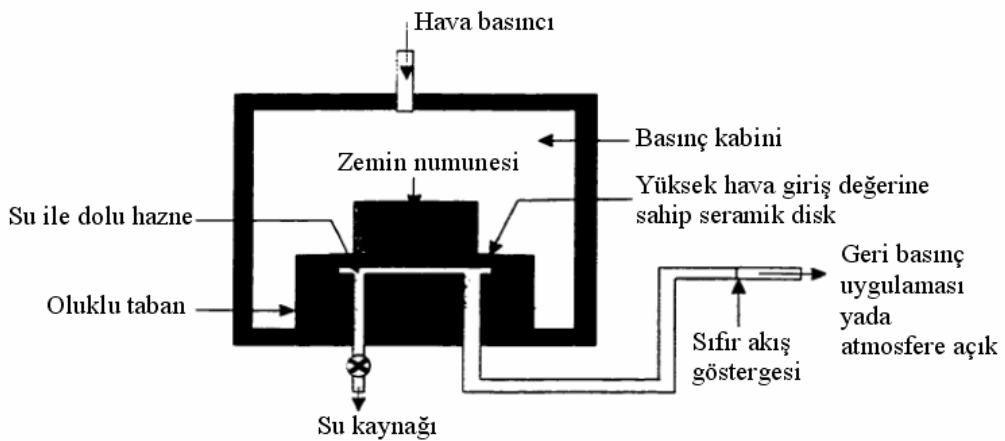
Ψ_m - Matris emme basıncı,

u_a - Uygulanan hava basıncı,

u_w - Atmosferik şartlarda serbest su basıncıdır.

Bu tekniğe genel olarak null tipi eksen dönüştürme tekniği denmesinin nedeni; boşluk suyu basıncının referans noktasını standart atmosferik şartlardan, basınç kabini içindeki nihai hava basıncı şartlarına dönüştürmesidir.

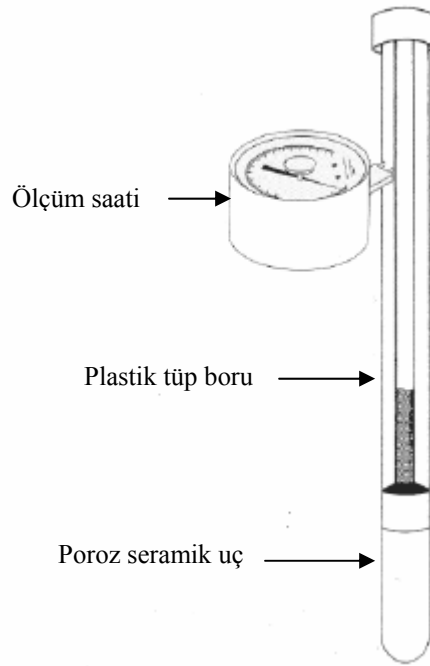
Zeminin matris emme basıncının güvenilir olarak ölçülebilmesi için null-akış şartlarının sağlanması (herhangi bir akışın olmaması) önemlidir. Sıfır akış şartlarının sağlanması konusunda iki yaklaşım vardır. Bunlardan birincisinde; sıfır akış göstergesinin sabit olarak tutulmasını sağlamak için basınç kontrol ünitesini kullanarak gerektiği kadar bir geri basınç uygulamaktır. 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 ta, içinde su bulunan tüm kısımlarda hiçbir şekilde hava kabarcığının kalmamasını sağlamaktır (Bocking ve Fredlund, 1980; Campbell, 1988; Guan, 1996; Mun, 2004; Romero, 2005).



Şekil 2.18. Null tipi basınç plakasında kullanılan hücre (Guan, 1996).

2.4.1.4. Tensiyometreler

Tensiyometreler zeminlerin matris emme basıncını doğrudan ölçmek için kullanılan aletlerdir. Bu aletler, içine su doldurulan ve üst kısmında sızdırmaz contalı kapağı olan plastik bir tüp boru, poroz seramik bir uç ve bir ölçüm saatinden oluşurlar (Şekil 2.19.). Tüp borular zeminlerin değişik derinliklerdeki matris emme basınçlarını ölçebilmek amacıyla çeşitli uzunluklarda imal edilirler (Goodwin, 1995; 2000; Essert ve Hopmans, 1998; Charlesworth, 2000; Whalley vd., 2001; Li vd, 2005).



Şekil 2.19. Bir tensiyometrenin şematik görünümü

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.

Tensiyometre zemine gömülür gömülmez poroz seramik ucun içindeki su, zeminin boşluk suyu ile dengeye ulaşır. Bu nedenle doygun zeminlerde, zeminin boşluk suyu poroz seramik ucun içindeki su ile dengede olduğundan tensiyometrenin ölçüm saati sıfır değerini gösterir. Doygun olmayan zeminler düşük su muhtevasına sahip oldukları için kapiler gerilmeye maruzdurlar. Bu durumda, zeminin boşluk suyunda mevcut olan gerilme ile poroz seramik ucun içinde bulunan sudaki gerilme eşitleninceye yani dengeleninceye kadar poroz seramik ucun içindeki su üzerinde bir gerilme oluşur ve böylece tensiyometrenin ölçüm saatinden zeminin boşluk suyu basıncı okunur. Boşluk hava basıncı atmosferik basınca eşit olduğunda, ölçülen bu boşluk suyu basıncı zeminin matris emme basıncına eşittir. Eğer boşluk hava basıncı atmosferik basınçtan daha büyükse, zeminin matris emme basıncını bulmak için bu fark okunan boşluk suyu basıncına eklenir (Proulx, 2001; Kang vd., 2002).

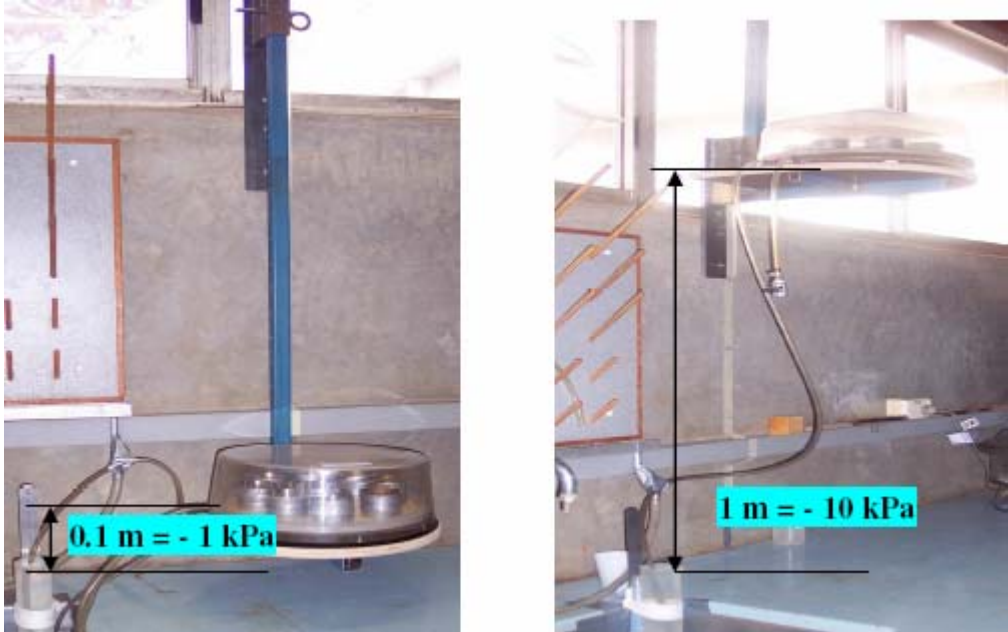
Zemin suyundaki gerilme poroz seramik ucun sahip olduğu hava giriş değerini aşarsa, seramik ucun içine hava girer. Bu noktada tensiyometrenin ölçüm saati sıfır değerini gösterir ve artık herhangi bir ölçüm almak mümkün olmaz. Bu durumda tensiyometre yeniden su ile doldurulur, suyun içindeki çözünmüş hava vakumlanır ve su muhtevası daha yüksek bir zeminde kullanılmak üzere hazırlanır (Proulx, 2001).

Cassel ve Klute (1986) ölçüm (veri okuma) aletlerinin hassaslığının tensiyometrenin tepki süresi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Genellikle ölçüm aletlerinin hassaslığı arttıkça tensiyometrelerin tepki süreleri azalmaktadır. Ayrıca hassaslığın artmasıyla zemin boşluk suyu ile tensiyometre içindeki su arasında daha az bir su hareketiyle daha gerçekçi zemin emme basıncı değerleri alınabilmektedir. Seramik ucun su geçirgenliğinin artmasıyla da tensiyometrenin tepki süresi azalmaktadır (Kang vd., 2002).

Günümüzde zeminlerin matris emme basıncını belirlemek amacıyla bir çok 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.

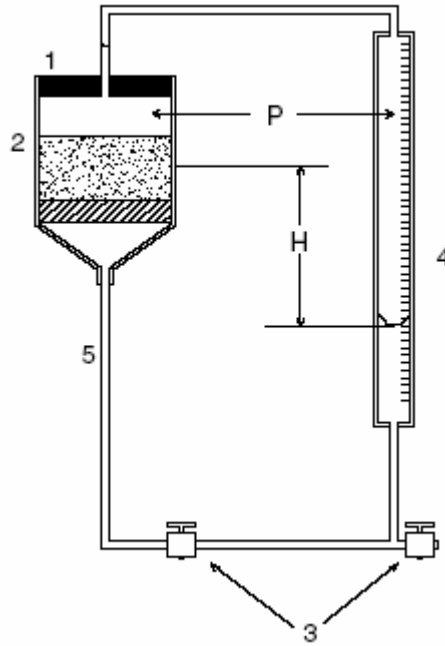
2.4.1.5.Emme Plakası

Emme plakası su haznesine açılan bir su borusuna bağlı olan suya doymun yüksek geçirgenliğe sahip poroz seramik plakadan oluşur. Üzerinde zemin numuneleri bulunan bu seramik plakayı yükseltmek yada alçaltmak suretiyle farklı emme basıncı değerleri oluşturulur. 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 yükseltilir. Eğer emme basıncı başlangıçta doymun olan zemin numunelerine uygulanırsa su zemin numunelerinden çıkar ve seramik plakadan geçerek hazneye doğru hareket eder. Diğer taraftan emme basıncı uygulanmayan zemin numuneleri başlangıçta kuru ise su haznedeki su seviyesine doğru hareket eder. Numuneler, Şekil 2.20.' de gösterildiği gibi, belirli bir emme basıncı değerinde, dengeye ulaşıncaya kadar bekletilir ve daha sonra su muhtevalarının belirlenmesi için tartılır.



Şekil 2.20. Zemin numunelerinin 1 kPa ve 10 kPa 'lık emme basıncı değerlerinde dengelenmesi (0.1 m su kolonu yüksekliği 1 kPa' lık basınca eşittir) (Sivongxay, 2005).

Emme plakasının bir diğerk şekli seramik plaka yerine Buchner hunisinin ve su haznesi yerine de bir bütetin kullanıldığı Haines aletidir. Şekil 2.21.'de şeması verilen bu teknikte, belirli bir emme basıncı değerinde zeminden çıkan veya zemine giren su hacmi ölçülür. Ancak, gerek emme plakası ve gerekse Haines aleti yüksek emme basınçlarının ölçülmesinde yetersiz kalmaktadırlar. Her iki sistem de su haznesinin yada bütetin yükseltilmesi yada alçaltılmasının uygulanabilirliği ile sınırlıdır (Hillel, 1971; Sivongxay, 2005).



Şekil 2.21. Haines ölçüm aleti (1) pvc kapak, (2) Buchner hunisi, (3) vanalar, (4) hacim bölümlü cam silindir ve (5) plastik boru (Kargas ve Kerkides, 2005).

Emme plakası deneyinde; poroz seramik plakanın, serbest su yüzeyinden sırasıyla 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 1m' lik seviyeye yükseltilmesiyle zemin numunesine 1, 3, 5, 7 ve 10 kPa'lık matris emmeler uygulanmış olur (Loveday 1974).

Su haznesi ve emme plakası aynı seviyede iken yani herhangi bir emme basıncının oluşmadığı durumdayken doymun zemin numuneleri emme plakasının üzerine yerleştirilir ve minimum 24 saat süre ile dengelenme için beklenilir. Dengelenme sağlandıktan sonra numuneler buharlaşmanın engellenmesi amacıyla kapaklı bir kutuya alınır. Ayrıca bu işlem sırasında zemin kaybedilmemesine de özen gösterilir. Bu işlemi takiben numuneler tekrar plakanın üzerine yerleştirilir ve iyi bir temas

olması için plaka üzerine birkaç damla su serpilir. Daha sonra yeni emme basıncı değerindeki su muhtevasını belirlemek için emme plakası bir sonraki seviyeye getirilir. Dengeye ulaşılan kadar suyun zemin numunesinin içinden çıkmasına izin verilir ve tekrar tartma işlemi yapılır. Bu işlemlere istenilen en yüksek emme basıncı değerine ulaşılan kadar devam edilir (Sivongxay, 2005).

2.4.2. Dolaylı Ölçüm Teknikleri

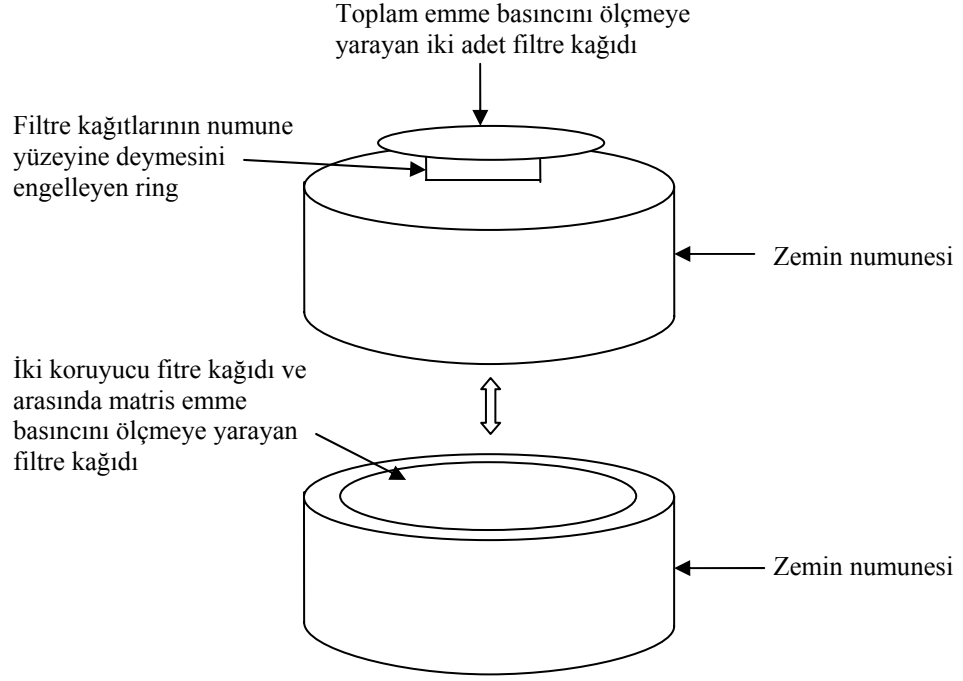
Zemin emme basıncının dolaylı olarak ölçülmesinde kullanılan bir çok yöntem vardır. Bu yöntemler, bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Dolaylı ölçüm teknikleri zeminlerin toplam, matris ve ozmotik emme basınçlarını belirlemede kullanılırlar. Bu yöntemlerle, zeminin su muhtevası, yoğunlaşma noktası, bağıl nem ve ortamın sıcaklığı gibi parametrelerden faydalanarak zeminlerin emme basınçları dolaylı olarak tespit edilir.

2.4.2.1. Filtre Kağıdı Tekniği

Filtre kağıdı tekniği zeminlerin emme basınçlarının ölçülmesi için bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Chandler ve Gutierrez, 1986; Fredlund vd., 1995; Gourley ve Schreiner, 1995; Ridley, 1995; Bulut vd., 2001; Leong vd., 2002; Ridley vd., 2003).

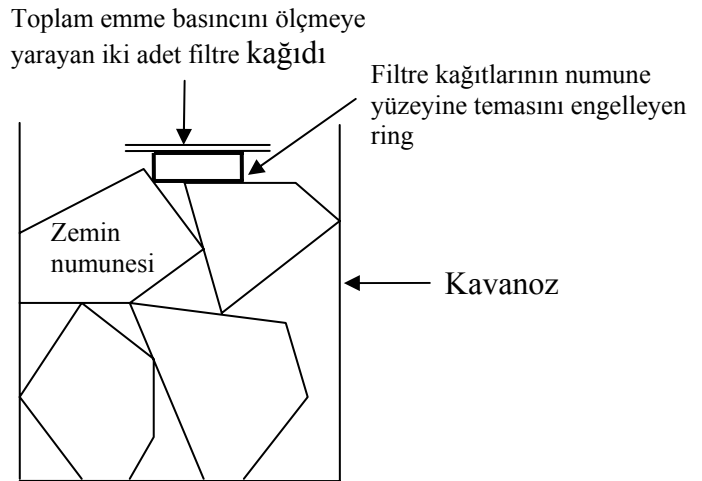
Filtre kağıdı metodu, hem toplam hem de matris emme basıncının ölçülmesinde kullanılabilen ucuz ve oldukça basit bir laboratuvar deney yöntemidir (Bulut vd. 2001). Filtre kağıdı metodu ile, sağlıklı olarak 0.01 – 100 MPa arasındaki emme basınçları ölçülebilmektedir (ASTM D 5298-92).

Toplam emme basıncı, zemin numunesinin üst yüzeyine yerleştirilen ince bir ring üzerine üst üste konan iki adet filtre kağıdı yardımıyla ölçülür. Burada esas olan filtre kağıtlarının zemin numunesine temas etmemesidir. Eğer toplam emme basıncı ile birlikte matris emme basıncı da ölçülecekse belirli formdaki zemin numuneleri kullanılır (Şekil 2.22.).



Şekil 2.22. Toplam ve matris zemin emme basıncının ölçülmesi

Ancak sadece toplam emme basıncı ölçülecekse zemin numunesinin belli bir formda olması şart değildir (Şekil 2.23.).



Şekil 2.23. Toplam zemin emme basıncının ölçülmesi (ASTM D 5298-92).

Temassız filtre kağıdı tekniğinde; kapalı, hava sızdırmaz bir kavanozun içine zemin numunesi ile temas halinde olmayan bir filtre kağıdı yerleştirildiğinde zemin numunesinin üzerindeki buhar boşluğu, zeminin boşluk suyundaki iyonları geçirmeyen, sadece su buharını geçiren yarı geçirgen bir membran gibi davranır. Bu durumda, temassız filtre kağıdı tekniğinde toplam emme basıncı ölçülür. Genellikle bir haftalık dengelenme süresinden sonra filtre kağıdının su muhtevası, bir temassız filtre kağıdı kalibrasyon eğrisi kullanılarak toplam emme basıncına dönüştürülür. Temassız filtre kağıdı tekniği için kullanılan kalibrasyon eğrileri buhar denge tekniği kullanılarak oluşturulur. Temaslı filtre kağıdı metodunun güvenilirliği yüksek matris emme değerlerinde azalırken temassız filtre kağıdı tekniğinin güvenilirliği ise düşük toplam emme değerlerinde azalır (Al-Khafaf ve Hanks, 1974; Leong vd., 2002).

Matris zemin emme basıncı, zemin numunelerinin arasına yerleştirilen üç adet filtre kağıdı kullanılarak ölçülür. Burada esas olan ise filtre kağıtlarının zemin numunelerine temas etmesidir. Bu üç filtre kağıdından ortada olan, matris emme basıncının hesaplanmasında kullanılır. Dış taraftaki diğer iki filtre kağıdı ise, ortadaki asıl ölçüm için kullanılan filtre kağıdına zemin danelerinin bulaşmasını önlemek için kullanılır. Koruma amaçlı kullanılan bu filtre kağıtlarının çapı, ortadaki ölçüm amaçlı kullanılan filtre kağıdının çapından biraz daha büyük olmalıdır. (ASTM D 5298-92 ; Bulut vd, 2001).

Temaslı filtre kağıdı tekniğinde; kapalı, hava sızdırmaz bir kavanozun içinde, başlangıçta kuru olan filtre kağıdının su muhtevası, zeminden sıvı formdaki suyun akışına bağlı olarak zeminin su muhtevası ile dengeye gelinceye kadar (dengelenme süresi genellikle bir haftadır) artar. Filtre kağıdının su muhtevası, bir temaslı filtre kağıdı kalibrasyon eğrisi kullanılarak matris emme basıncına dönüştürülür. Filtre kağıdı yöntemiyle matris emme basıncının bulunması için kullanılan kalibrasyon eğrileri genellikle basınç plakası deney aleti kullanılarak oluşturulur (Al-Khafaf ve Hanks, 1974; Hamblin, 1981; Deka vd., 1995).

Bu tez çalışmasında incelenen zemin numunelerinin; toplam emme basınçlarının belirlenmesinde temassız, matris emme basınçlarının belirlenmesinde ise temaslı

filtre kağıdı yöntemleri kullanılmıştır. Filtre kağıdı yöntemiyle yapılan deneyler Bölüm 3' te anlatılmış, elde edilen sonuçlar ise Bölüm 4' te verilmiştir.

2.4.2.2. Thermocouple Saykrometreler

Thermocouple saykrometreler, zemin daneleri arasındaki hava fazının bağıl nemini ölçmek suretiyle bir zeminin toplam emme basıncını bulmak için kullanılırlar. Ölçülen bağıl nemden, Eşitlik 2.17 kullanılarak toplam emme (Ψ) hesaplanır.

$$\Psi = -\frac{R \cdot T}{v_{w0} \cdot \omega_v} \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{u_{v0}} \right) \quad (2.17)$$

Burada,

$$\left(\frac{\bar{u}_v}{u_{v0}} \right) - \text{Bağıl nemdir (RH)}.$$

Thermocouple 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 çalışırlar. Bu iki farklı yüzey arasındaki sıcaklık değişimi bağıl nemle ilişkilidir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Andraski ve Scanlon, 2002).

Geoteknik mühendisliğinde kullanılan thermocouple saykrometreler, seramik yada çelik ağdan yapılan koruyucu bir kılıf ile sarılmış minyatür thermocouple saykrometrelerdir (Şekil 2.24.). Bu saykrometreler Peltier etkisi (soğutması) denilen bir teknikle zeminin bağıl nemini ölçerler. Yaklaşık 15 sn kadar, iki iletkenin (nikel ve krom tel) bağlantı noktasından uygun doğrultuda geçen 4-8 mA civarındaki küçük bir doğru akım sayesinde bu bağlantı soğuyacak ve yoğunlaşma noktası (dew point) sıcaklığına ulaşıldığında, su bağlantı üzerinde yoğunlaşacaktır (Şekil 2.25.). Suyun yoğunlaşması, bağlantı noktasının daha fazla soğumasını engeller ve thermocouple ile referans bağlantı noktası arasında oluşan voltaj bir mikrovoltmetre

ile ölçülür. Daha sonra mikrovoltmetre okumaları ile emme basıncı arasındaki ilişkiyi veren kalibrasyon eğrileri kullanılarak zeminin emme basıncı belirlenir. (Snethen, 1980; Çokça, 2002).

Thermocouple saykrometre tekniği bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Hamilton vd., (1981) ; Ridley ve Wray, (1996)' e göre saykrometrenin ısı değişimlerine karşı duyarsız olması bu tekniğin güvenilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca voltaj değişiklikleri, yüksek emme değerlerinde sonuçların hatalı çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca oksitlenme problemine bağlı olarak saykrometrenin hassasiyetinin bozulması da söz konusu olmaktadır (Samingan, 2005).

Çokça (2002) çalışmasında, 25°C'den farklı sıcaklıklarda alınan saykrometre okumalarının Eşitlik 2.18 kullanılarak düzeltilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

$$E_{25} = \frac{E_T}{(0.325 + 0.027 \cdot t)} \quad (2.18)$$

Burada,

E_{25} - 25 °C için düzeltilmiş saykrometre okuması

E_T - Saykrometre okuması

t - Sıcaklıktır (°C).

Thermocouple saykrometreler zeminin toplam emme basıncını ölçmek için kullanılır. Bu cihazlar relatif nemi ölçmek suretiyle, toplam emme basıncını dolaylı olarak verirler. Toplam zemin emmesini ölçmek için, saykrometre zemin içine yerleştirilir ve zemin boşluklarındaki hava ile saykrometrenin çevresindeki hava arasında bir denge kuruluncaya kadar beklenir. Bu dengelenme süresi thermocouple saykrometreler için yaklaşık olarak 1 saat kadardır.

Daniel vd (1981) ; Krahn ve Fredlund (1972)' e göre, thermocouple saykrometrelerin %95'inin ölçebildiği güvenilir üst ölçüm aralığı 8000 kPa ile sınırlıdır. Alt ölçüm aralığı ise genellikle 100 kPa olarak kabul edilir. Ortam koşullarının kontrol altında tutulduğu laboratuvarlar için thermocouple saykrometreler güvenilir bir cihazdır.

Ancak arazi şartlarında, ısı değişimlerinin büyük olabileceği durumlarda bu cihazlar güvenilir değildir (Tremblay, 1996).

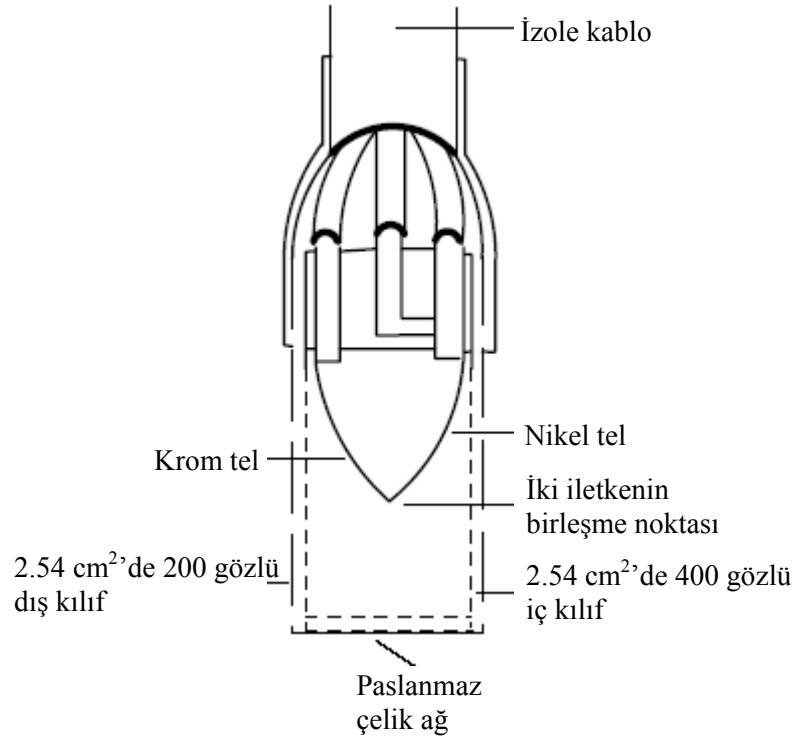
Sayrometre tekniği ile arazide de emme basıncı ölçümleri yapılabilir. Bunun için, zemin yüzeyinden itibaren 10 cm çapında ve 60 cm derinliğinde kuyular açılır ve saykrometreler bu kuyulara yerleştirilir. Açılan kuyudan çıkarılan zemin, sensörlerin etrafına hafifçe bastırılarak yerleştirilir ve okumanın alınmadığı zamanlarda saykrometrelerin kabloları hemen yüzeye yakın olarak gömülmüş olan cam kavanozlara yerleştirilerek kavanozların kapakları kapatılır ve bantlanır.

Gömülen saykrometrelerden belli bir süreç boyunca periyodik okumalar alınır. Daha sonra kalibrasyon verileri kullanılarak elde edilen kalibrasyon eğrilerinden sayrometre okumaları kullanılarak emme basınçları tespit edilir (Harrison ve Blight 2000).

Thermocouple saykrometrelerin arazide kullanılması durumunda, ısı dengesinin sağlanabilmesi için bu cihazlar zemin yüzünden itibaren en az 150 mm derinliğe gömülmelidir. Bununla beraber kuru zeminlerde $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ' lik bir ısı değişimi emme basıncında $\pm 0.5 \text{ MPa}$ ' lik bir sapmaya yol açabilecektir (Tarantino vd. 2005).



Şekil 2.24. Thermocouple saykrometrenin dış görüntüsü (Bulut ve Leong, 2005)



Şekil 2.25. Thermocouple saykrometre (Bulut ve Leong, 2005)

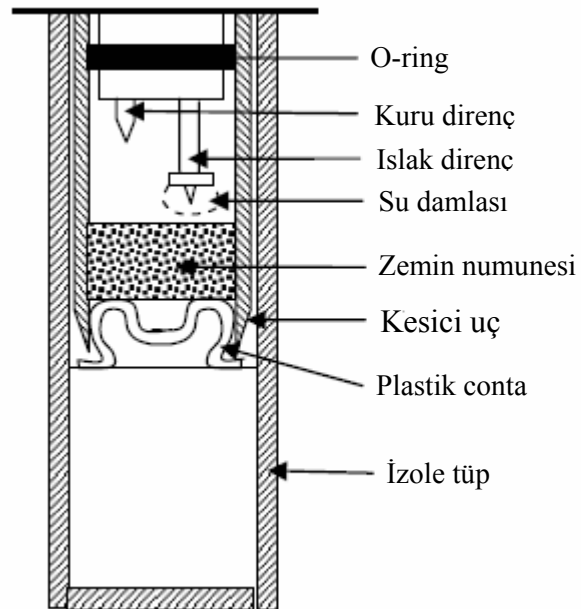
Bu tez çalışmasında incelenen zemin numunelerinin; toplam emme basınçlarının belirlenmesinde filtre kağıdı yönteminin yanında Peltier tipi, thermocouple saykrometre yöntemi de kullanılmıştır. Thermocouple saykrometre yöntemiyle yapılan deneyler Bölüm 3' te anlatılmış, elde edilen sonuçlar ise Bölüm 4' te verilmiştir.

2.4.2.3. Transistör Saykrometreler

Transistör saykrometreler, toplam zemin emme basıncını ölçmede kullanılan cihazlardan biridir. 100-10000 kPa arasında sağlıklı olarak ölçüm yapabilirler. Bu cihazların kullanımı oldukça basit, performansı yüksektir. Zemin emme basıncını kısa zamanda geniş bir aralıkta ölçebilirler. Transistör saykrometrelerden alınan analog veriler standart bir mikrovoltmetre yada herhangi bir milivolt data kaydedici ile okunabilir. Bir bilgisayar kullanılarak okunan datalar saklanabilir ve düzenlenebilir. Dataların grafikleri eş zamanlı olarak depolanabilir ve bir yazıcıdan

çıktıları alınabilir. Ancak transistör saykrometreler, çevresel ısı değişimlerinden büyük oranda etkilenirler ve güvenilirlikleri de bu oranda azalabilir (Woodburn vd., 1993; Rodriguez vd., 2004; Bulut ve Leong, 2005; Long, 2006).

Transistör saykrometreler, Richards (1965) tarafından geliştirilmiştir. Transistör Saykrometrelerde iki eş ısııl direnç kullanılır. Isıl dirençlerden biri (kuru uç) kuru kalırken, diğer ısııl direnç (ıslak uç) üzerinde bir damla su olması gerekir (Şekil 2.26.). Su, manuel olarak dışarıdan bir damlalık vasıtasıyla direnç üzerine damlatılır. Her iki ısııl 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 ölçülür. 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 (Bulut vd., 2000; Brown vd., 2003; Bulut ve Leong, 2005; Samingan, 2005).



Şekil 2.26. Transistör saykrometrenin şematik görünümü (Samingan, 2005)

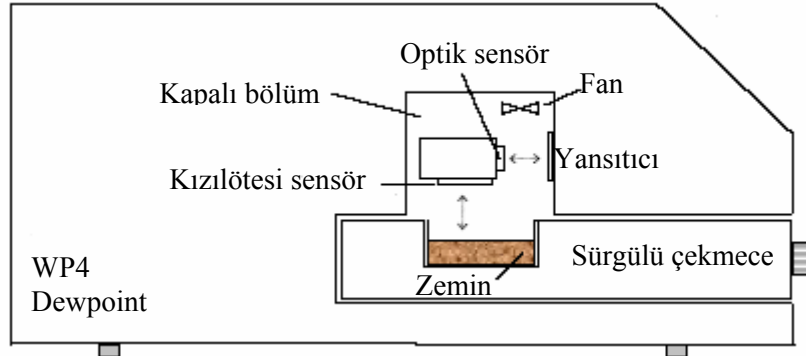
2.4.2.4. Chilled –Mirror Higrometreler

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 (Bulut ve Leong 2005; Rahardjo ve Leong, 2006).

Chilled-mirror higrometreler, Şekil 2.27. ve Şekil 2.28.' de görüldüğü gibi numune üzerinde kalan boşluğun yoğunlaşma noktasını (dew point) ve ısını ölçerler. Numune özel bir ringin içine yerleştirilir. Yoğunlaşma, su buharı yoğunlaşmasını ilk ortaya çıktığı an tespit edebilen bir yansıtıcı kullanılarak ölçülür. Yansıtıcının ısı bir termoelektrik soğutucu ile kontrol altında tutulur. Su buharı yoğunlaşmasının ilk ortaya çıktığı anı tespit edebilmek için yansıtıcının üzerine yöneltilmiş bir ışık kirişi kullanılır. Bir fotosel sistem, su buharı yoğunlaşmasının neden olduğu yansıtıcının yansıtma yeteneğindeki değişimi belirler. Numunenin ısısının, bir kızılötesi sıcaklık sensörü vasıtasıyla ölçülen buhar boşluğunun ısıyla aynı olduğu kabul edilir. Numunenin bağıl nemi yoğunlaşma ve ısı ölçümlerinden hesaplanır. Dengelenme süresini hızlandırmak için, numunenin üzerindeki buhar boşluğunda bulunan su buharının dolaşımını sağlayan bir iç fan kullanılır (Albrecht vd., 2003; Leong vd., 2003; Schanz vd., 2004; Wang ve Benson 2004; Samingan 2005).



Şekil 2.27. Chilled-Mirror Higrometre (Bulut ve Leong, 2005)



Şekil 2.28. Chilled-Mirror Higrimetrenin şematik görünümü (Bulut ve Leong, 2005)

2.4.2.5. Isıl İletkenlik Sensörleri

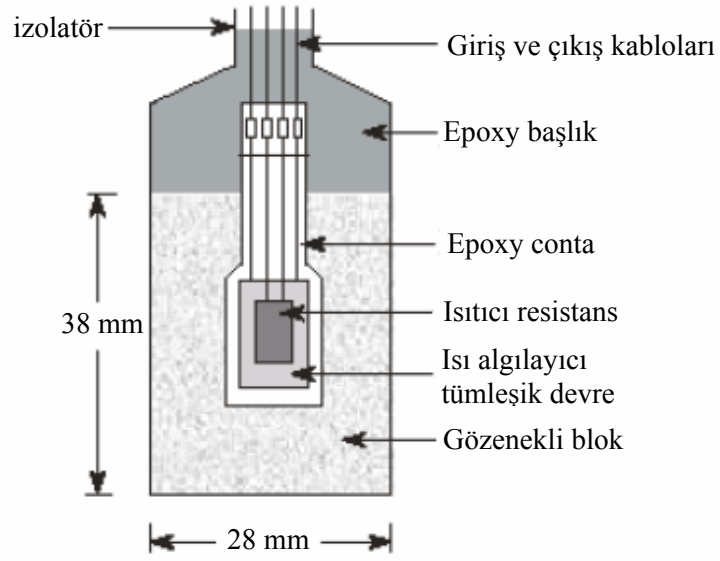
Isıl iletkenlik sensörleri, üç poroz blok (gözenekli blok) sensöründen biridir. Diğer ikisi ise elektriksel iletkenlik sensörleri ve equitensiometerdir. Isıl iletkenlik sensörleri matris emme basıncının arazide ve laboratuarda dolaylı olarak ölçülmesinde kullanılan cihazlardır. Bu cihazlar 1-1500 kPa arasında sağlıklı olarak ölçüm yapabilirler. Isıl iletkenlik ölçümleri bir ısıtıcı elemandan yayılan ısı miktarı ile ilgilidir ve ısı kaynağının etrafındaki zeminin su muhtevassından doğrudan etkilenir (Bloodworth ve Page, 1975; Konukcu vd., 2002; Bulut ve Leong, 2005; Tarantino vd., 2005).

Isıl iletkenlik sensörleri standart seramik (gözenekli) bir sensörün ısıl iletkenliğini ölçerek, zeminin matris emme basıncının bulunmasını sağlarlar. Isıl iletkenlik sensörleri, Şekil 2.29. ve Şekil 2.30.' da görüldüğü gibi minyatür bir ısıtıcı ve bir ısı algılayıcı elemanı içeren silindirik gözenekli bir bloktan oluşur. Gözenekli blok, emmesi ölçülecek zeminle uyumlu, gözenek büyüklükleri yaklaşık olarak aynı olacak şekilde seramikten özel olarak dizayn edilir ve üretilir. Seramik bloğun ortasındaki ısıtıcı elektrik enerjisini, ısı enerjisine dönüştürür. Isı sensörü, zamana bağlı olarak verilen voltajın etkisiyle oluşan ısı artışını ölçer. Zeminle sensörün dengeye gelmesi için beklenirken; su, seramik sensörün içinde ve dışında hareket eder ki bu sırada sensörün doygunluk derecesi ve bunun sonucu olarak ısıl iletkenliği

değişime uğrar. Gözenekli bloğun ısı iletkenliği, zeminle dengedeki poroz bloğun su muhtevasının bir fonksiyonu olarak ölçülür. Sensör geçirimli bir malzemenin yapıldığı için sensörün boşluklarının su ile dolu olma oranı dolayısıyla da ısı iletkenliği, malzemenin özelliklerine bağlıdır. Sensörün ısı iletkenliği su muhtevası ile üssel olarak artar. Sensörün nemliliği arttıkça, ısı iletkenlik o derecede büyür, daha çok ısı yayılır ve sıcaklık artar. Emme basıncı ölçümleri için sensörün güvenilirliği sensörün kuru yada doygun olma durumlarındaki iletkenlik yeteneğine bağlıdır. Bu nedenle sensörün iletkenlik yeteneği mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Sensörün yapımında kullanılacak malzemenin cinsi ve boşluk oranı zemine uygun olarak seçilmelidir. Örneğin düşük zemin emmelerinde sensörün güvenilir sonuçlar verebilmesi için büyük boşluklu malzemenin yapılmalıdır. Isıtma fonksiyonu kullanılarak sensör ısıtılır ve ısı artışı ölçülür. Isıtma fonksiyonu, çevredeki zeminin ısı iletkenliğinden etkilenmemesi için tamamen sensörün içinde olmalıdır. Ayrıca dengelenme süresini kısaltmak için sensörün boyu mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır. Emme dengesi yalnızca poroz bloğun zeminin içinde olması durumunda söz konusu olabilir. Ancak bu durumda, bu teknik kullanılarak matris zemin emmesi ölçülebilir. Belli bir zaman aralığından sonra ısı, ısı algılayıcı eleman tarafından ölçülür. Isının büyüklüğü, poroz bloğun su muhtevası ile ters orantılıdır. Isı artışıyla matris emme basıncı arasında geliştirilen kalibrasyon eğrileri aracılığıyla zeminin matris emme basıncı belirlenir. Kalibrasyon eğrileri, zeminin matris emmesiyle gözenekli sensörün ısı iletkenliği arasındaki ilişkiyi yansıtmalıdır. Bir zeminden diğer zemine su muhtevası ile matris emme ilişkisi arasında farklılıklar olacağından her zemin türü için zeminin matris emmesiyle sensörün ısı iletkenlik ilişkisi ayrı bir kalibrasyon eğrisi gerektirir (Phene vd., 1971; Ridley ve Wray, 1996; Fredlund vd., 2000; Nguyen, 2006).



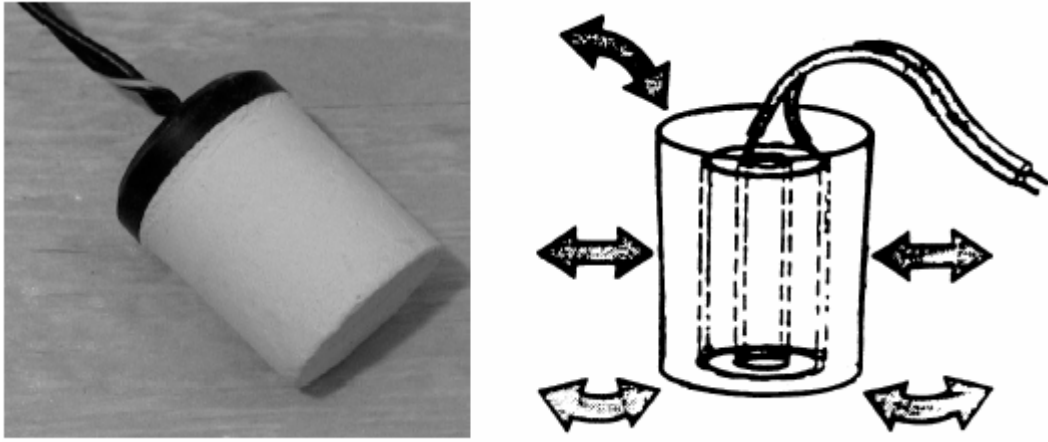
Şekil 2.29. Bir ısı iletkenlik sensörü (Nguyen, 2006)



Şekil 2.30. Bir ısı iletkenlik sensörünün kesiti (Shuai vd., 1998)

2.4.2.6. 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 sağlıklı olarak ölçüm yapabilirler. Çalışma prensipleri ısı iletkenlik sensörlerine benzer, farkı ise ısı iletkenlik yerine elektriksel iletkenliğin ölçülmesidir. Bu tip sensörlerin içinde aynı eksende birleştirilmiş iki adet elektrot bulunur (Şekil 2.31.). Cihaz, zemine yerleştirilir, zemin ile sensör arasındaki basınç dengelendikten sonra elektrotlardan birine bir elektrik akımı gönderilir ve iki elektrot arasındaki direnç ölçülür. Matris emme basıncının değeri, genellikle cihazın üreticisi tarafından verilen elektriksel direnç ile matris emme basıncı arasındaki ilişkiyi tanımlayan kalibrasyon eğrilerinden bulunabilir. 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 bir çok uygulama için kullanılması mümkün olur (Tremblay 1996; Bulut ve Leong, 2005).



Şekil 2.31. Elektriksel iletkenlik sensörü (Tremblay 1996; Dela, 2001)

2.4.2.7. Equitensiyometreler

Poroz blok sensörlerinden biri olan equitensiyometreler, matris emme basıncının daha çok arazide dolaylı olarak ölçülmesinde kullanılan cihazlardır. Bu cihazlar 0-1500 kPa arasında sağlıklı olarak ölçüm yapabilirler. Equitensiyometreler Şekil 2.32.'de görüldüğü gibi özel olarak dizayn edilmiş poroz bir malzeme içine gömülü özel bir milden (theta-probe) oluşurlar. Bu mil elektriksel direnç teknolojisini kullanarak zeminin matris emme basıncıyla denge halindeki poroz malzemenin su muhtevasını ölçer. Ölçülen su muhtevası, önceden matris emme basıncı ile su muhtevası arasında tanımlanan kalibrasyon eğrileri kullanılarak matris emme basıncına çevrilir (Charlesworth, 2000; Scanlon vd., 2002; Bulut ve Leong, 2005).

Equitensiyometrelerin 10 kPa' dan daha düşük zemin emme basınçlarının ölçülmesi için kullanılmaları uygun değildir. Bu cihazlar yüksek zemin emme basıncı ölçen tensiyometreler ile daha uyumlu sonuçlar vermektedir (Ireson vd., 2005; Tarantino vd. 2005).

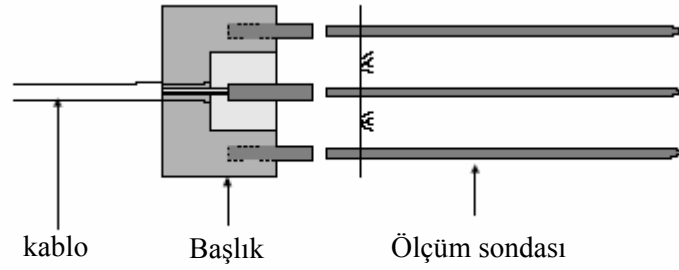


Şekil 2.32. 200 mm uzunluğunda ve 40 mm çapında bir equitensiyometre (Charlesworth, 2000)

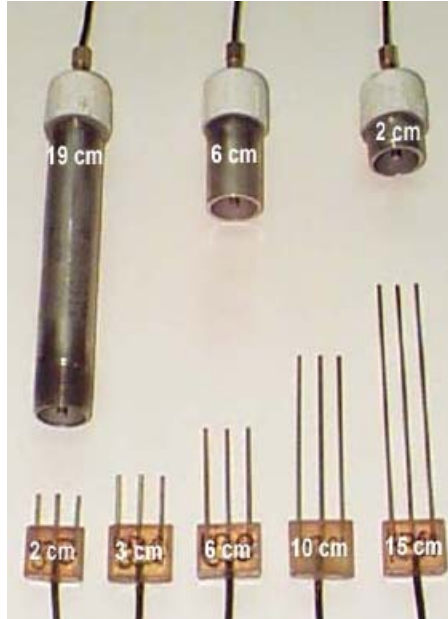
2.4.2.8. TDR (Time Domain Reflectometry)

Time domain reflectometry (TDR) tekniği esasen yüksek hızlı iletim kablolarının test edilmesi için geliştirilmiş kompleks elektronik bir tekniktir. 1970' li yıllardan itibaren zeminlerin su muhtevalarının ölçülmesinde kullanılmaya başlanmıştır (Topp vd., 2003).

Tipik bir TDR sistemi; TDR aygıtı, ölçüm sondası, eş eksenli kablo ve eş eksenli kablo ile ölçüm sondasını birleştiren bir eş eksenli başlıktan oluşur (Yu ve Yu 2006). Şekil 2.33. de tipik bir TDR sistemi, Şekil 2.34.' de ise TDR lm sondaları görülmektedir.



Şekil 2.33. Tipik bir TDR sistemi (Lin, 2001)

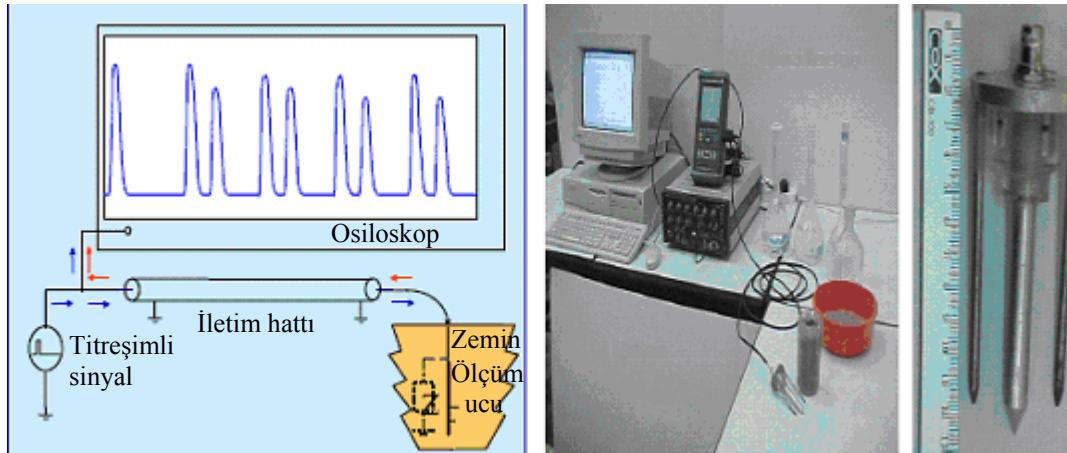


Şekil 2.34. Eşeksenli ve  tijli çeşitli TDR lm sondaları (Jones ve Or, 2001)

Arazi ölçümlerinde kullanılan TDR ölçüm sondaları 3-4 tijden oluşur. Laboratuarda kullanılan TDR ölçüm sondası ise içine zemin numunesi yerleştirilen kalıbın merkezine sokulur (Şekil 2.35. ve Şekil 2.36.).



Şekil 2.35. TDR cihazı ile arazide su muhtevasının ölçülmesi (Jones ve Or, 2001)



Şekil 2.36. Laboratuarda kullanılan TDR cihazı (Jones ve Or, 2001)

TDR cihazı zeminin içinden geçen bir nakil hattı (zemin nakil hattı) boyunca bir elektromanyetik sinyal yayar. Zemin nakil hattının başından ve sonundan sinyalin yansımaları arasındaki zaman farkı zeminden geçen elektromanyetik dalga hızlarının belirlenmesinde kullanılır (Topp ve Fere, 2002; Zupanc vd., 2005).

Yansımalar, sadece sinyal zemine girdiğinde ve sinyal ölçüm ucundan sonuna ulaştığında oluşur. Bu nedenle TDR sinyal analizleri için günümüzde kullanılan birçok metot, zemin özelliklerinin ölçüm ucu boyunca üniform olarak dağıldığı kabul edilir. TDR ölçüm sistemi boyunca elektromanyetik dalganın yayılması çeşitli araştırmacılar tarafından verilen denklemlerle tanımlanmaktadır (Yu ve Yu 2006).

Ölçüm zaman aralığı ve elektromanyetik dalga hızı aşağıda verilen Eşitlik 2.19 ve Eşitlik 2.20' den hesaplanabilir.

$$t_a = \frac{2L}{v} \quad (2.19)$$

Burada,

t_a - Ölçüm zaman aralığı

L - Elektromanyetik dalganın ölçüm ortamında gidip, geri döndüğü uzunluk

v - Dalga hızıdır.

$$v = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \quad (2.20)$$

Burada,

c - Elektromanyetik dalganın serbest boşluktaki hızı ($2,988 \times 10^8$ m/s)

K_a - Dielektrik sabitidir.

Eşitlik 2.19 ve Eşitlik 2.20' den K_a dielektrik sabiti Eşitlik 2.21' deki gibi hesaplanabilir.

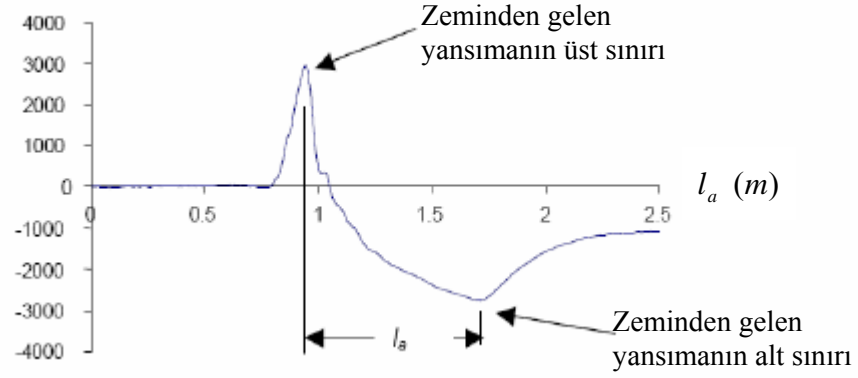
$$K_a = \left(\frac{c \cdot t_a}{2L} \right)^2 \quad (2.21)$$

Zahiri uzunluk Eşitlik 2.22' deki gibi tanımlanırsa,

$$l_a = \frac{c \cdot t_a}{2} \quad (2.22)$$

Burada,

l_a - Şekil 2.37.' de verilen TDR grafiğinden alınan yansımalar arasında geçen zamana bağlı olarak bulunan zahiri uzunluk



Şekil 2.37. Zeminler için tipik bir TDR eğrisi ve zahiri uzunluk l_a 'nın hesaplanması (Drnevich vd., 2003)

Eşitlik 2.21 ve Eşitlik 2.22 yeniden düzenlenirse, dielektrik sabiti K_a Eşitlik 2.23' deki gibi yazılabilir.

$$K_a = \left(\frac{l_a}{L} \right)^2 \quad (2.23)$$

Dielektrik sabiti K_a belirlendikten sonra zeminin hacimsel su muhtevası yada gravimetrik (kütleli) su muhtevası belirlenebilir.

Gravimetrik su muhtevası (w); Eşitlik 2.24' de verildiği gibi su ağırlığının, zemin numunesinin kuru ağırlığına oranıdır.

$$w = \frac{W_w}{W_{kuru}} \quad (2.24)$$

Hacimsel su muhtevası (θ) ise; Eşitlik 2.25' de verildiği gibi suyun hacminin, zemin numunesinin toplam hacmine oranıdır.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2.25)$$

Hacimsel su muhtevası ile gravimetrik su muhtevası arasında Eşitlik 2.26' da verilen ilişki mevcuttur.

$$\theta = w \cdot \frac{\gamma_k}{\gamma_w} \quad (2.26)$$

Burada,

γ_k - Zeminin kuru birim hacim ağırlığı

γ_w - Suyun birim hacim ağırlığıdır.

Eşitlik 2.27 zeminin dielektrik sabiti ile hacimsel su muhtevası arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Topp vd., 1980).

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad (2.27)$$

Eşitlik 2.28 ise zeminin dielektrik sabiti ile gravimetrik su muhtevası arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Siddiqui ve Drnevich 1995).

$$w = \frac{1}{B} \left[\frac{\gamma_w}{\gamma_d} \sqrt{K_a} - A \right] \quad (2.28)$$

Burada,

A - Zemine bağlı bir kalibrasyon katsayısıdır ve genellikle 1 olarak kabul edilir.

B - Zemine bağlı bir kalibrasyon katsayısıdır ve genellikle 8 olarak kabul edilir.

Yukarıda verilen eşitliklerden belirlenen su muhtevası ve zemin su karakteristik eğrileri kullanılarak, zeminin matris emme basıncı hesaplanır.

2.4.2.9. Santrifüj Tekniği

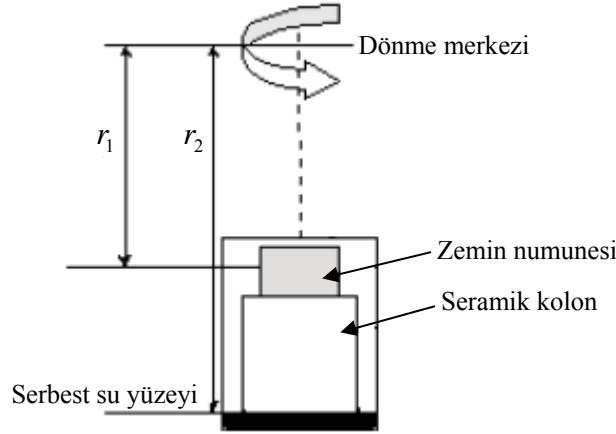
Santrifüj tekniği ile, matris zemin emme basıncı dolaylı olarak belirlenebilir. Santrifüj tekniğinden elde edilen sonuçlar, çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen uygun fonksiyonlar kullanılarak, zemin-su karakteristik eğrisinin oluşturulmasında kullanılır. Bu çalışmaların çoğunda, düşük emme basıncı değerlerindeki verilerin zemin-su karakteristik eğrisinin oluşturulmasında uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolayısıyla yüksek emme basıncı değerleri için bu önerilen fonksiyonların doğruluğu ve güvenilirliği incelenmelidir (Lee ve Wray, 1995; Truong ve Holden, 1995; Aung vd., 2001; Singh vd., 2001; Singh ve Sneha, 2002; Thakur vd., 2006)

Briggs ve McLane (1907) bir zeminin sahip olduğu su muhtevası ile o zeminin emme basıncı arasındaki ilişkiyi belirlemek için santrifüj tekniğini kullanan ilk araştırmacılarıdır. Russell ve Richards (1938) ise bu tekniği, uygulanan değişik emme basıncı değerlerinde bir zeminin tutabildiği suyun miktarını ölçmek amacıyla geliştirmişlerdir. Hassler ve Brunner (1945) santrifüj tekniğini, konsolide edilmiş bir zemin numunesinin doygunluk derecesi ile kapiler basınç arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanmışlardır.

Santrifüj tekniğinde, zemin numunesine santrifüj vasıtasıyla zeminin emme direncini kırarak bir kuvvet uygulanır. Uygulanan bu santrifüj kuvveti altında zemin numunesinden su çıkışı olmadığı, yani dengelenme durumunun ortaya çıktığı anda, uygulanan santrifüj kuvveti, o zeminin denge durumundaki su muhtevasına karşılık gelen zemin emme basıncına eşdeğerdir.

Tipik olarak santrifüj tekniğinde doygun bir zemin numunesi drene edilerek, zemin su karakteristik eğrisi belirlenir. Santrifüjün dönme hızının ve zemin numunesinin dönme merkezine olan uzaklığının değişik değerlerine bağlı olarak, değişik denge su muhtevası değerleri elde edilir. Uygulanan emme basıncındaki bir artış, zemin numunesinin su muhtevasında bir azalmaya neden olur. Böylece zemin su karakteristik eğrisi yani zemin emme basıncı, su muhtevası ilişkisinin belirlenmesi

için gerekli veriler santrifüj tekniği kullanılarak belirlenebilir. Şekil 2.38.' de santrifüj tekniği şematik olarak gösterilmiştir. Eşitlik 2.29' da ise Gardner (1937) tarafından, santrifüj tekniği kullanılarak zemin numunesinin su muhtevasına bağlı olarak matris zemin emme basıncının belirlenmesi için kullanılan bağıntı verilmiştir.



Şekil 2.38. Santrifüj tekniği ile zemin emme basıncı ölçümü (Khanzode vd., 2002).

Santrifüj test yönteminde, zemin numunesinin uzunluğu buyunca su muhtevasında değişimlerin olduğu kabul edilir. Kalınlığı 10-15 mm gibi olan ince zemin numunesi kullanılırsa, zemin numunesinin kalınlığının etkisi, su muhtevastındaki ve zemin emme basıncı değerlerindeki değişimler üzerindeki oldukça küçük olacaktır.

$$\Psi_m = \frac{\rho \omega^2}{2g} (r_1^2 - r_2^2) \quad (2.29)$$

Burada,

Ψ_m - Matris zemin emme basıncı

r_1 - Dönme merkezinden zemin numunesinin orta noktasına kadar olan mesafe

r_2 - Dönme merkezinden serbest su yüzeyine kadar olan mesafe

ω - Açısal hız

ρ - Boşluk sıvısının yoğunluğu

g - Yerçekimi ivmesidir.

Santrifüjde, başlangıçta doymun olan zemin numunesine yüksek bir çekim kuvveti uygulanır. Zemin numunesi doymun bir seramik kolon üzerine yerleştirilir. Seramik kolonun tabanı atmosferik basınç altındaki su tankının içine yerleştirilir.

Eşitlik 2.32 matris zemin emme basıncı ile santrifüj yarıçapı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi tanımlamaktadır. Boşluk sıvısının yoğunluğu ρ , ve açısal hız ω , sabitken, matris zemin emmesi Ψ , santrifüj yarıçaplarının r_1 ve r_2 , karelerinin farkının bir fonksiyonudur. Dönme merkezinden serbest su yüzeyine kadar olan mesafe r_2 , sabittir.

Dönme merkezinden zemin numunesinin orta noktasına kadar olan mesafenin r_1 , dolayısıyla numune yüksekliğinin değişmesiyle zemin numunesine farklı emme basıncı değerleri uygulanabilir. Aynı şekilde, tek bir döndürme hızıyla seramik kolon yüksekliklerinin değiştirilmesiyle de zemin numunesine farklı emme basıncı değerleri uygulanabilir. Açısal hız ω , artırılarak zemin emme basıncının yüksek değerleri elde edilebilir. Şekil 2.39' da 6 adet hareketli kaptan oluşan küçük tip medikal bir santrifüj düzeneği verilmiştir.



Şekil 2.39. Altı adet hareketli kaptan oluşan küçük tip medikal bir santrifüj düzeneği (Khanzode vd., 2002).

Zemin numuneleri deneye belli başlangıç koşullarında hazırlanır ve 24 süreyle tamamen suya doyurulur. Doymuş zemin numunelerinin ağırlığı tartılarak belirlenir. Buharlaştırmanın engellenmesi amacıyla ıslak zemin numuneleri alt tarafları açık kalacak şekilde alüminyum folyo ile kaplanır. Daha sonra bu numuneler suya doyurulmuş olan seramik silindirin üzerine yerleştirilir. Deney sırasında numune kaybının engellenmesi amacıyla, zemin numuneleri ile seramik silindir arasında doymuş bir filtre kağıdı yerleştirilir. Böylece zemin numunesindeki boşluk suyu ve seramik silindirin tabanındaki serbest su yüzeyi arasında bir drenaj kanalı meydana gelir. Santrifüj kuvvetinin etkisiyle doymuş zemin numunesinden çıkan su seramik silindirin içinden geçerek alttaki su tankına gider. Zemin numunesine belli bir emme basıncı değerini verecek santrifüj hızı uygulandıktan ve dengelenme sağlandıktan sonra (artık su çıkışının olmadığı görüldükten sonra), o durumdaki zemin numunesinin su muhtevasını tespit etmek amacıyla zemin numunesi tartılır. Böylece zeminin o su muhtevasına karşılık gelen matris emme basıncı değeri belirlenmiş olur.

Aynı zemin numunesine farklı dönme hızları uygulanarak deneyler tekrarlanır. Her bir deney sonunda elde edilen su muhtevaları ve bunlara karşılık gelen matris zemin emme basıncı değerleri kullanılarak zemin su karakteristik eğrisi çizilir. Çizilen bu eğri yardımıyla, o zemin için herhangi bir su muhtevasına karşılık gelen matris emme basıncı değeri belirlenir.

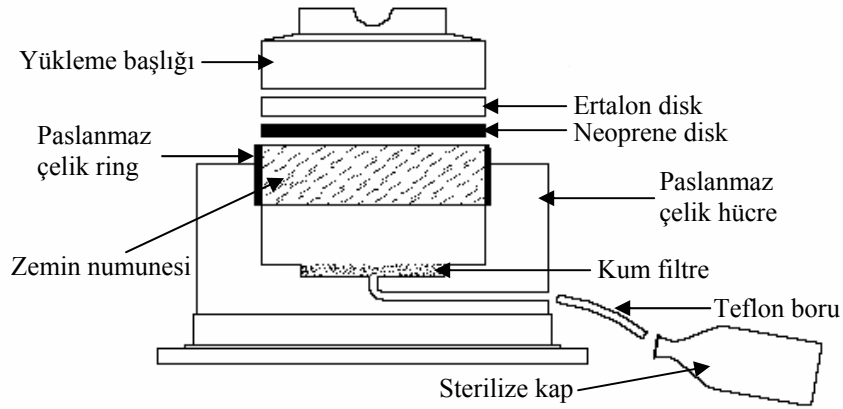
2.4.2.10. Boşluk Sıvısı Sızdırıcısı

Bu teknikte zemin boşluk suyu, bir boşluk sıvısı sıkıştırıcısı kullanılarak süzülür. Boşluk sıvısı sızdırma tekniği zeminin ozmotik emme basıncının belirlenmesi amacıyla bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Krahn ve Fredlund 1972; Iyer 1990; Romero, 1999; Peroni ve Tarantino, 2003; Rao ve Shivananda, 2005).

Boşluk sıvısı sızdırıcı deney ekipmanı, Şekil 2.40.' da görüldüğü gibi, paslanmaz çelikten bir silindir ve bir sıkıştırma pistonundan oluşur. Düşey yükün merkezden uygulanabilmesi amacıyla yüksek dayanımlı küresel bir çelik kolu yerleştirmek üzere sıkıştırıcı pistonun üst kısmında, içbükey bir yatak açılmıştır. Düşey yük hidrolik yük

halkası vasıtasıyla pistonu uygulanır. Piston ile zemin numunesinin üst kısmı arasında rijit bir ertalon disk ve neoprene (sentetik) disk yerleştirilir. Böylece önce zemin numunesi üzerine uygulanan düşey yükün üniform olarak dağılması ve sonra da silindirin iç duvarı ile piston arasındaki dairesel boşluktan suyun dışarı kaçması engellenmiş olur.

56 mm çapında ve 15 mm yükseklikteki zemin numunesi kum bir filtrenin üzerine yerleştirilir. Kum geçirimli, kimyasal reaksiyona girmeyen ve yüksek düşey yükler altında önemli ölçüde parçalanmayan bir malzeme olduğu için, filtre olarak tercih edilir. 24 saat saf suyun içinde bekletilen kumun elektriksel iletkenliği, ölçülerek belirlenir. Kimyasal reaksiyon açısından etkisiz olduğu belirlenen kumdan teşkil edilen kum filtre paslanmaz çelik hücrenin tabanına yerleştirilir ve deney düzeneğine 3 mm çapında teflon bir boru parçası kullanılarak sterilize bir kap bağlanır (Peroni ve Tarantino, 2003).



Şekil 2.40. Bir boşluk sıvısı sıkıştırıcısının şeması (Peroni, 2002)

Deney şu şekilde yapılır; Kimyasal reaksiyona girmemesi için klorin solüsyonu ile yıkanmış, 3 kez saf su ile durulanmış ve 24 saat 105 °C' lik etüvde kurutulmuş kum cihazın altına yerleştirilir. Zemin numunesi boşluk sıvısı sızdırıcısının içine yerleştirilir. Daha sonra numunenin üzerine neopran disk ve ertalon disk yerleştirilir.

Son olarak bu disklerin üzerine yükleme başlığı ve piston yerleştirilir ve sızdırıcıya teflon ara hortum parçası kullanılarak steril bir kap bağlanır. Boşluk suyunun buharlaşmasını engellemek amacıyla hortumun bağlantıları bantlanır. Düşey yük önceden belirlenen nihai sızdırma basıncına kadar kademeli olarak uygulanır ve su çıkışı durana kadar, en az 24 saat olmak üzere, numune bu basınç altında tutulur. Başlangıç gravimetrik su muhtevası zeminin plastik limit değerinden daha düşük olduğunda, özellikle düşük sızdırma basınçlarında, boşluk suyunun ölçümde kullanılacak kadar yeterli miktarının toplanabilmesi için deneyin aynı koşullar altında 2 yada 3 kez tekrarlanması gerekir.

Elektriksel iletkenlik ölçülmeden önce, zemin numunesinden çıkarılan boşluk suyu bir vakum pompa sistemi ve gözenek çapı 1 μm 'den daha küçük olan ultra-fine white HAWP cam elyaf filtre kağıdı kullanılarak süzülür. Bu süzme işlemi, elektriksel iletkenlik okumalarını etkileyebilecek boşluk suyundaki koloidal kil danelerinin arındırılması için önemlidir (Romero, 1999).

Zeminin boşluk suyunun iletkenliğinin ölçümü için bir elektriksel iletkenlik ölçer kullanılır. Bu cihaz otomatik olarak ısı düzeltmesi yapabilir. Ozmotik emme basıncı, Eşitlik 2.30 ve Eşitlik 2.31 kullanılarak zemin numunesinden çıkarılan boşluk suyunun elektriksel iletkenliğinden belirlenir. Ozmotik emme basıncı ve elektriksel iletkenlik arasında üssel bir ilişki vardır (U.S.D.A., 1950; Romero, 1999; Peroni ve Tarantino, 2003).

$$\Psi_{\Pi} = 0.0191 EC^{1.074} \quad (2.30)$$

$$\Psi_{\Pi} = 0.0240 EC^{1.065} \quad (2.31)$$

Burada,

Ψ_{Π} - Ozmotik emme basıncı

EC - Elektriksel iletkenliktir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışmada Kullanılan Zemin Numunelerinin Tanımlanması

Bu tez çalışmasında, Afyon, Burdur ve Isparta yörelerinden alınmış beş farklı zemin numunesi kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan bütün örselenmiş zemin numunelerinin indeks ve bazı mühendislik özellikleri belirlenmiş ve bu bölümde verilmiştir.

İndeks ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; numuneler üzerinde elek ve hidrometre analizleri, kıvam limitleri, standart proktor ve piknometre deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda belirlenen özellikler toplu olarak Çizelge 3.1’ de, granülometri eğrileri ise Ek 1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan zeminlerinin bazı özellikleri

Zemin Özellikleri		Num 1	Num 2	Num 3	Num 4	Num 5
Dane Boyutu Dağılımı	Çakıl (%)	-	-	-	-	-
	Kum (%)	3.9	1.1	3.2	3.3	1.4
	Silt + Kil (%)	96.1	98.9	96.8	96.7	98.6
Kıvam Limitleri	Likit Limit (%)	85	56	79	68	68
	Plastik Limit (%)	31	21	30	25	26
	Rötre Limiti (%)	25	17	26	22	16
	Plastisite İndisi (%)	54	35	49	43	42
Kompaksiyon	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (gr/cm^3)	1.27	1.51	1.30	1.46	1.47
	Optimum Su Muhtevası (%)	33	26	33	28	27
Dane Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm^3)		2.53	2.73	2.57	2.61	2.67
Zemin Sınıfı		CH	CH	CH	CH	CH

CH: Yüksek Plastisiteli Kil

3.2. Çalışmada Kullanılan Numunelerin Emme Özelliklerinin Belirlenmesi

İncelenen zemin numunelerin emme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla emme kapasitesi ve emme basıncı deneyleri yapılmıştır.

Emme kapasitesi deneyleri için ödometre tekniği, emme basıncı deneyleri için ise saykrometre ve filtre kağıdı yöntemleri kullanılmıştır. Zeminlerin emme özelliklerinin belirlenmesi için bu çalışmada kullanılan yöntemlerin tümü bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.3. Emme Kapasitesinin Belirlenmesi

Zemin numunelerinin su emme davranışlarının incelenebilmesi için ödometre deney aleti kullanılmıştır. No.40 eleğinin altına geçen zemin numuneleri üzerinde emme kapasitesi deneyleri yapılmıştır.

Bu amaçla numuneler, 20.0 mm. yüksekliğinde ve 75.0 mm. çapındaki ödometre ringi içerisine dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında zemin numunelerinin su muhtevalarının ve kuru birim hacim ağırlıklarının sabit tutulmasına özen gösterilmiştir. Sıkıştırma işlemi ısı ve nem kontrollü ortamda yapılmıştır. Daha sonra ring + yaş numune ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin altına ve üstüne poroz kağıtlar ve poroz taşlar konularak ödometre aletinin hücreğine yerleştirilmiştir. Daha sonra ödometre hücresi su ile doldurularak numunenin serbestçe su emmesine izin verilmiştir.

Deney süresi, zemin numunesinin cinsine, başlangıç su muhtevasına ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Ödometre aletinin saat okumaları takip edilerek, artışların sabitlendiği gözleninceye kadar deneylere devam edilmiştir. Ödometre aletinin saat okumalarından zemin emmesinin tamamlandığı görüldükten sonra deneylere son verilmiştir.

Serbest koşullarda su emmeye bırakılan zeminin nihai durumdaki su muhtevası, emme kapasitesi (W_{em} , %) olarak tanımlanmış ve Eşitlik 3.1' de verilen formül yardımıyla belirlenmiştir.

$$W_{em} (\%) = \frac{W_{nihai} - W_{kuru}}{W_{kuru}} \quad (3.1)$$

Burada,

- W_{em} - Zeminin emme kapasitesi,
 W_{nihai} - Zemin numunesinin su emerek ulaştığı nihai ağırlık,
 W_{kuru} - Zemin numunesinin kuru ağırlığıdır.

Ödometre deney sisteminde yapılan emme kapasitesi deneyleri; Çizelge 3.2'de verildiği gibi 1.25, 1.30, 1.35 ve 1.40 gr/cm³ olmak üzere dört farklı başlangıç kuru birim hacim ağırlığında ve her bir kuru birim hacim ağırlık değeri için; % 15, 20, 25 ve 30 olmak üzere dört farklı başlangıç su muhtevası koşulunda hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Bütün emme kapasitesi deneylerinde damıtık su kullanılmıştır.

Çizelge 3.2.'de çalışmada kullanılan zemin numyelerinin hazırlandıkları başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerleri tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan zemin numulerinin hazırlandıkları başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerleri

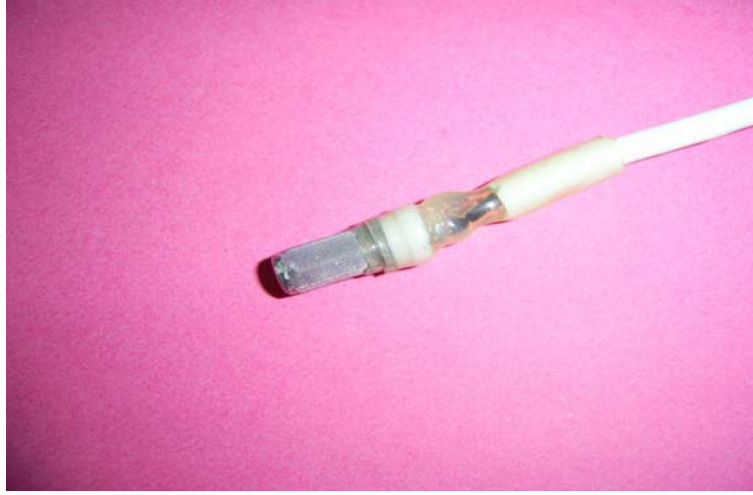
		Kuru Birim Hacim Ağırlıklar, γ_k (gr/cm ³)				
		Num. No.1	Num. No.2	Num. No.3	Num. No.4	Num. No.5
Başlangıç Su Muhtevaları, w_0 (%)	$w_0 = \%15$	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
	$w_0 = \%20$	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
	$w_0 = \%25$	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
	$w_0 = \%30$	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
	$w_0 = \%15$	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	$w_0 = \%20$	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	$w_0 = \%25$	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	$w_0 = \%30$	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
	$w_0 = \%15$	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
	$w_0 = \%20$	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
	$w_0 = \%25$	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
	$w_0 = \%30$	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
	$w_0 = \%15$	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
	$w_0 = \%20$	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
	$w_0 = \%25$	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
	$w_0 = \%30$	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40

İncelenen numuneler için ödometre tekniği ile yapılan emme kapasitesi deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.4. Emme Basıncının Belirlenmesi

3.4.1. Saykrometre Tekniği ile Emme Basıncının Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında kullanılan zemin numunelerinin, toplam emme basınçlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri thermocouple (ısı çifti) saykrometre tekniğidir. Bu amaçla Wescor Inc. tarafından üretilen çelik ağ kaplamalı PST-55 saykrometreleri (Şekil 3.1.) ve HR-33T Dew Point Mikrovoltmetre (Şekil 3.2.) cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Wescor PST-55 model saykrometre



Şekil 3.2. Wescor HR33T Microvoltmetre

Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin emme basınçlarının belirlenmesinde yararlanılan saykrometre deney sistemi Şekil 3.3. te görülmektedir. Bu cihaz ile sağlıklı olarak 0.3 – 7 MPa arasındaki toplam emme ölçümleri yapılabilir. Bu nedenle ekipman, belirtilen aralıktaki emme değerlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Pico Technologies tarafından geliştirilen, Picolog Recorder programı vasıtasıyla saykrometre sıcaklık ve mikrovolt okumaları bilgisayar kontrollü olarak alınmıştır.



Şekil 3.3. Saykrometre deney sistemi

3.4.1.1. Saykrometrelerin Kalibrasyonu

Çalışmada kullanılan PST 55 saykrometreleri zemin numunelerinin emme basınçlarının belirlenmesi için kalibre edilmiştir. Kalibrasyon için; belirli sıcaklıktaki su potansiyelleri bilinen, farklı molalitelere sahip sodyum klorür (NaCl) çözeltileri kullanılmıştır. NaCl çözeltilerinde yapılan saykrometre ölçümleri, çözeltinin ozmotik (ve toplam) emme eşdeğerini yansıtmaktadır. Bu amaçla 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 molalitelere sahip NaCl çözeltileri kullanılmıştır.

Saykrometrelerin kalibrasyonu için; sıcaklığın ve nemin kontrol altında tutulduğu nem odasında, cam kavanozlar sırasıyla 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9 molalitedeki NaCl çözeltisi ile yarıya kadar doldurulmuş ve çalışmada kullanılan 5 adet PST 55 saykrometre bu kavanozların içine yerleştirilmiştir. Bu amaçla, kavanozların kapaklarında, saykrometrenin geçebileceği boyutta delikler açılmış, saykrometreler kavanoz kapaklarından geçirilmiş, hava giriş ve çıkışını engelliyecek şekilde, saykrometre kablolarının geçtiği deliklerdeki küçük boşluklar silikonla doldurularak kapatılmıştır. Kavanozların kapakları kapatıldıktan sonra da kapaklar bantlanarak NaCl çözeltisi ve içindeki saykrometreler dış ortamdan tamamen izole edilmiştir.

Daha sonra bu kavanozlar, sıcaklık değişimini minimize etmek için, içinde köpük parçaları olan termos kutuya yerleştirilmiştir. Saykrometrelerin kalibrasyonunda kullanılan içinde NaCl çözeltisi ve saykrometrelerin bulunduğu cam kavanozlardan biri Şekil 3.4. te görülmektedir.



Şekil 3.4. Saykrometrelerin NaCl çözeltisinde kalibrasyonu

Genellikle 3 saatlik bir süre sonunda saykrometre okumaları stabilize olmaktadır. Bu nedenle dengenin sağlanması için her deney için 3 saat beklenmiş, sıcaklık ve saykrometre voltaj okumaları alınmıştır. Her bir deney sonrasında, saykrometreler cihazın orjinal temizleme solüsyonuyla temizlenerek 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra sırasıyla diğer molalitedeki NaCl çözeltisinde deneyler tekrarlanmıştır.

Deneyler sıcaklık ve nem kontrollü ortamda yapılmasına rağmen, zaman zaman ortam sıcaklığında 1°C den daha küçük sıcaklık değişimleri gözlenmiştir. Bu nedenle, 25 °C nin altında ve üstündeki sıcaklıklarda alınan okumalar için düzeltme yapma gereği doğmuştur. Bu amaçla aşağıda verilen Eşitlik 3.2 kullanılmıştır.

$$E_{25} = \frac{E_T}{(0.325 + 0.027 \cdot t)} \quad (3.2)$$

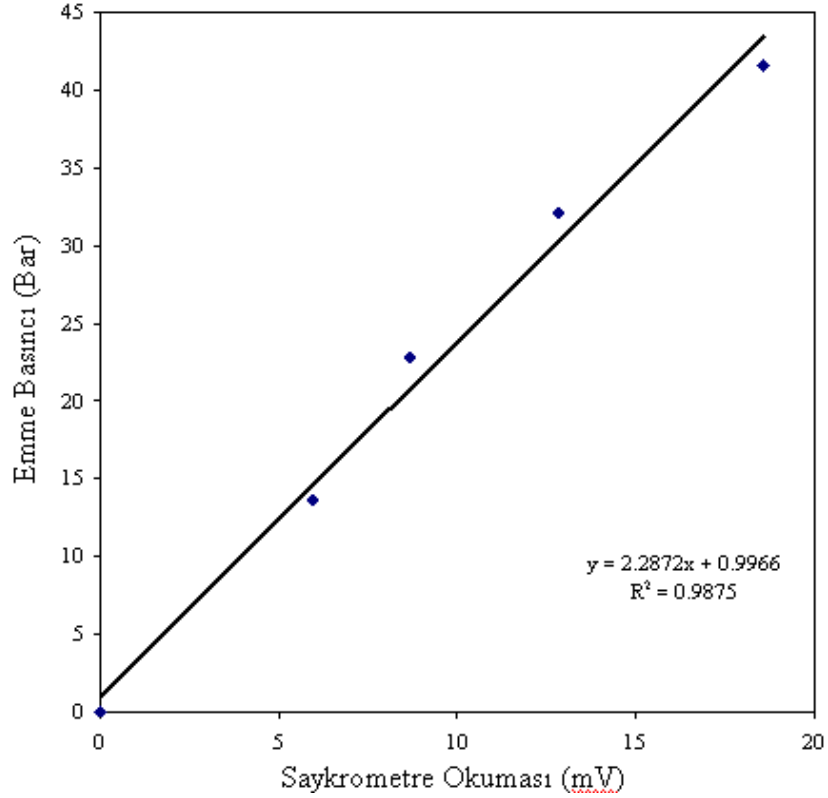
Burada,

E_{25} - 25 °C için düzeltilmiş saykrometre okuması

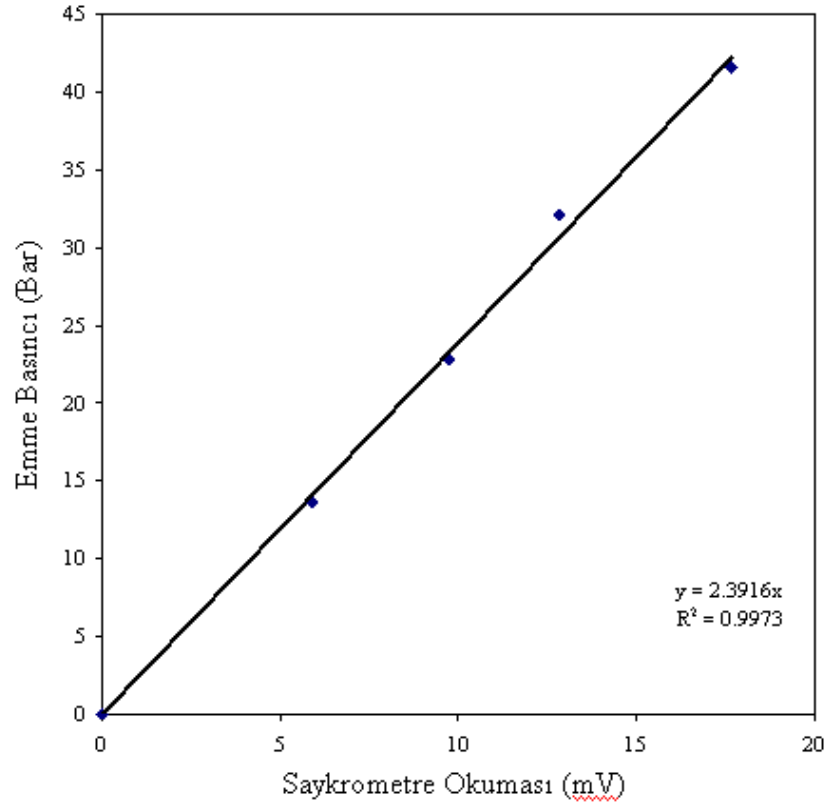
E_T - Saykrometre okuması

t - Sıcaklıktır (°C).

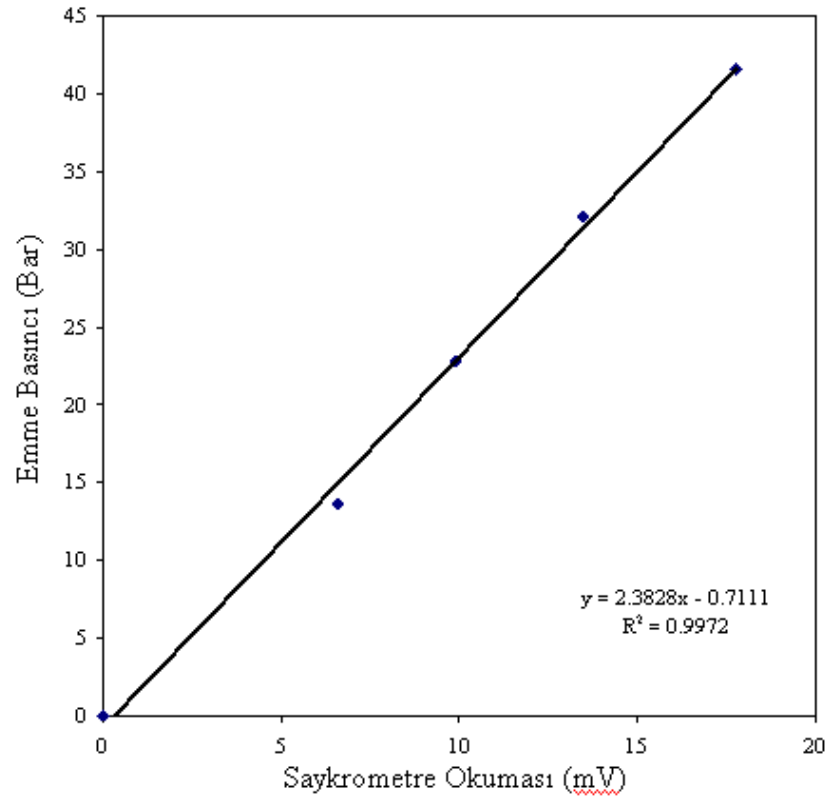
Saykrometrelerin kalibrasyonu için yapılan deneyler, 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9 molalitelerdeki NaCl çözeltilerinde tekrarlanarak; 46177, 46258, 46280, 46282 ve 46284 numaralı saykrometreler için, voltaj okuması – su potansiyeli grafiği çizilmiştir. Böylece, her bir saykrometre için kalibrasyon doğrusu elde edilmiş ve bu doğrunun denklemi belirlenmiştir. Elde edilen doğru denklemi kullanılarak, söz konusu saykrometre için herhangi bir zeminden alınan voltaj çıktısı, zemin emmesine dönüştürülebilmektedir. Çalışmada kullanılan saykrometrelerin, elde edilen kalibrasyon denklemleri ve determinasyon katsayıları, Şekil 3.5., 3.6., 3.7., 3.8. ve 3.9.'da verilmiştir (Uzundurukan, 2006).



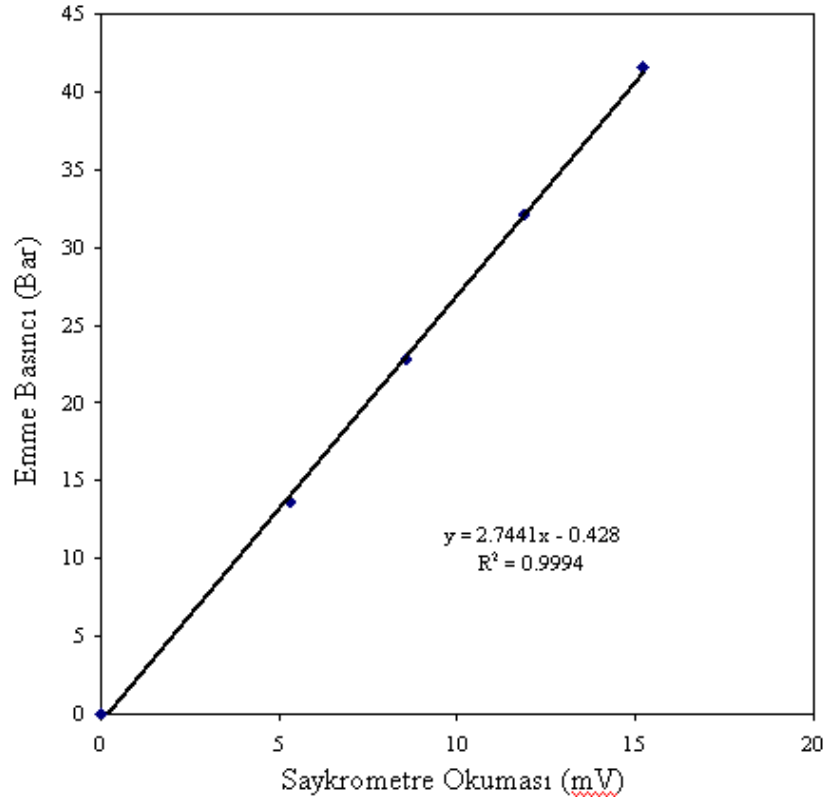
Şekil 3.5. 46177 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi



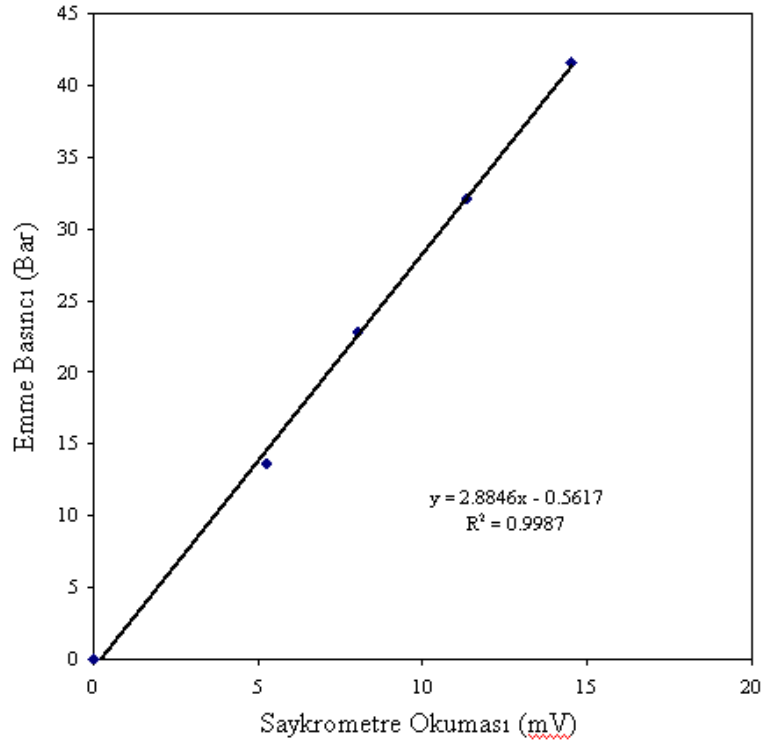
Şekil 3.6. 46258 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.7. 46280 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.8. 46282 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.9. 46284 numaralı saykrometrenin kalibrasyon eğrisi

3.4.1.2. Saykrometre Tekniği ile Yapılan Toplam Emme Basıncı Deneyleri

Çalışmada No.40 eleğinin altına geçen zemin numuneleri üzerinde saykrometre tekniği kullanılarak toplam emme basıncı deneyleri yapılmıştır.

Bu amaçla, her bir zemin numunesi, belirli kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevasına sahip olacak şekilde 36 mm çapında ve 15 mm yukseklideki ring içerisine dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler ringlerden çıkartılarak, parafınle kaplanmıştır. Kalibrasyon için yapılan aynı işlemler aşağıda anlatıldığı gibi deneyler sırasında da tekrarlanmıştır. Kavanozların kapaklarında, saykrometrenin geçebileceği boyutta delikler açılmış, saykrometreler kavanoz kapaklarından geirilmış, hava giriş ve ıkışımı engelliyecek şekilde, saykrometre kablolarının geçtiği deliklerdeki küçük boşluklar silikonla doldurularak kapatılmıştır. Hazırlanan numunelerin st yüzeylerinde, saykrometrenin girebileceği kadar bir delik açılarak; saykrometre, açılan bu deliğin içine yerleştirilmıştir. Saykrometre ile saykrometrenin yerleşeceği delik arasında mümkün olduğunca boşluk kalmamasına azami zen gsterilmıştir. Deney süresince nem ve sıcaklık değişikliklerinin engellenmesi için numune saykrometreyle birlikte, plastik folyo ile kaplanmış ve plastik folyonun üzeri bantlanmıştır (şekil 3.10.).



şekil 3.10. Saykrometre deney numunelerinin hazırlanması

Daha sonra, içinde saykrometrelerin bulunduğu ve plastik folyo ile kaplanıp bantlanarak hazırlanan numuneler kavanozlara konulmuş ve kavanozların ağzı kapatılarak, kapaklar nem ve sıcaklık değişikliklerinin engellenmesi amacıyla bantlanmıştır (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Saykrometre deney numunelerinin kavanozlara yerleştirilmesi

Hazırlanan kavanozlar içi plastik köpük ile dolu olan termos kutuya yerleştirilmiştir. Saykrometre ve zemin numunesi arasındaki nem dengesinin kurulması için 24 saat kadar beklenmiş ve ardından saykrometre sıcaklık ve voltaj okumaları alınmıştır. Deneyler sıcaklık ve nem kontrollü ortamda yürütülmüştür. Ancak zaman zaman ortam sıcaklığında 1°C den daha küçük sıcaklık değişimleri gözlemlendiğinden, 25°C nin altında ve üstündeki sıcaklıklarda alınan okumalar için kalibrasyon aşamasında olduğu gibi burada da Eşitlik 3.2' den yararlanılmış, okumalar 25°C ye göre düzeltilmiştir.

Düzeltilmiş saykrometre okumalarından, her bir saykrometre için Şekil 3.5., 3.6., 3.7., 3.8. ve 3.9.'da verilen kalibrasyon eğrilerinden elde edilen ve Çizelge 3.3. de verilen kalibrasyon denklemleri kullanılarak emme basıncı değerleri elde edilmiştir. Sayrometre tekniği ile yapılan toplam emme basıncı deneyleri için de, emme kapasitesi deneyleri için belirlenen aynı başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri kullanılmıştır.

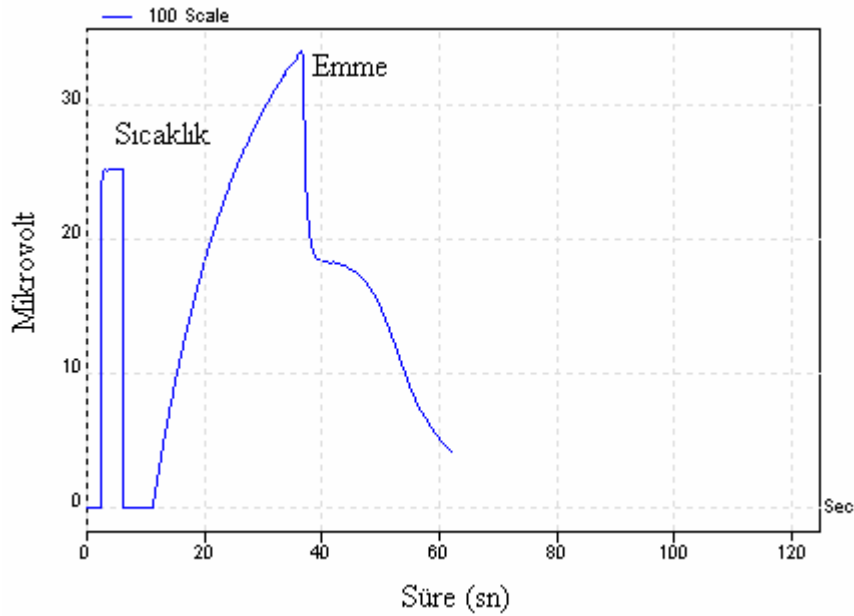
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan saykrometrelere ait kalibrasyon denklemleri

Saykrometre No	Kalibrasyon Denklemi
46177	$y = 2,2872 x + 0,9966$
46258	$y = 2,3916 x$
46280	$y = 2,3828 x - 0,7111$
46282	$y = 2,7441 x - 0,428$
46284	$y = 2,8846 x - 0,5617$

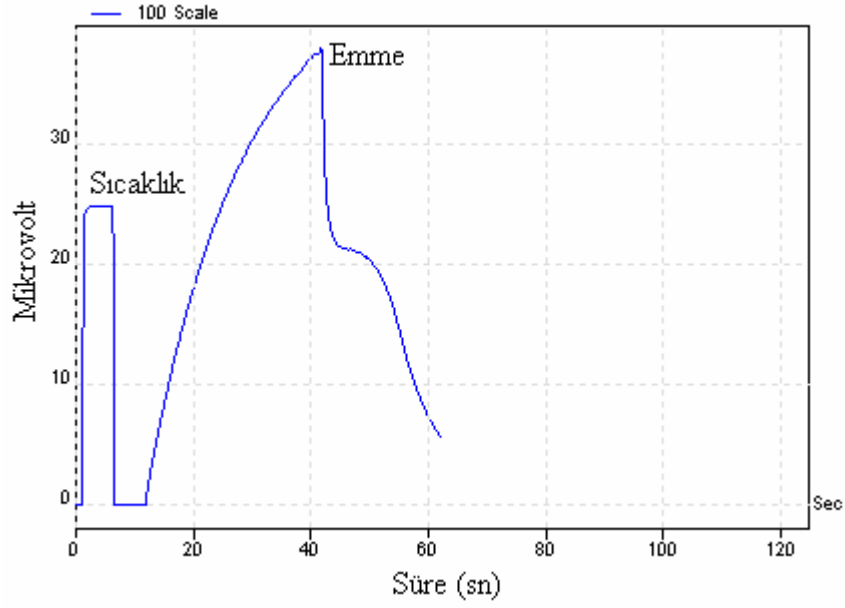
y: Bar Cinsinden Emme Basıncı

x: Mikrovolt cinsinden düzeltilmiş saykrometre okuması

Burada sadece iki adet saykrometre deney grafiği örnek olarak verilmiştir. Şekil 3.12.' de 1 nolu numunenin $\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$ ve $w_0 = \% 20$ başlangıç koşullarında elde edilen saykrometre deney grafiği, Şekil 3.13.' de ise 4 nolu numunenin $\gamma_k = 1.25 \text{ gr/cm}^3$ ve $w_0 = \%15$ başlangıç koşullarında elde edilen saykrometre deney grafiği görülmektedir.



Şekil 3.12. Saykrometre deney grafiği (Num 1 – $\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$, $w_0 = \%20$)



Şekil 3.13. Saykrometre deney grafiği (Num 4 – $\gamma_k = 1.25 \text{ gr/cm}^3$, $w_0 = \%15$)

Şekil 3.12. ve Şekil 3.13'te mikrovolt cinsinden emme basıncının okunduğu dönme noktaları açık olarak görülmektedir. Sayrometre tekniği kullanılarak yapılan toplam emme basıncı deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde tablolar halinde sunulmuştur.

3.4.2. Filtre Kağıdı Tekniği ile Emme Basıncının Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında, zemin numunelerinin emme basınçlarının belirlenmesinde kullanılan diğer yöntem filtre kağıdı tekniğidir.

Filtre kağıdı metodu, hem toplam hem de matris emme basıncının ölçülmesinde kullanılabilen ucuz ve oldukça basit bir laboratuvar deney yöntemidir (Bulut vd. 2001). Filtre kağıdı metodu ile, sağlıklı olarak 0.01 – 100 MPa arasındaki emme basınçları ölçülebilmektedir (ASTM D 5298-92). Bu nedenle filtre kağıdı yöntemiyle hem matris emme basınçları hem de toplam emme basınçları bir arada ölçülebilmektedir. Ayrıca diğer yöntemlere göre en geniş güvenli ölçüm aralığına sahiptir.

Filtre kağıdı tekniğinin çalışma prensibinde, matris emme basınçlarının ölçülmesi için filtre kağıdının zemin suyu ile, toplam emme basınçlarının ölçülmesi için ise zemin suyunun buharı ile sabit bir sıcaklıkta (20 °C) dengeye gelmesi beklenir. Genellikle 1 hafta süren dengelenme durumu sağlandıktan sonra zemin numunesi ile filtre kağıdının emme basıncı değerlerinin aynı olduğu kabul edilir. Dengelenmeyi takiben filtre kağıdının su muhtevası 0.0001 gr. civarında hassasiyeti olan bir tartı kullanılarak ölçülür. Daha sonra filtre kağıdının su muhtevası ile emme basıncı arasındaki ilişkiyi veren kalibrasyon eğrileri kullanılarak, zemin numunesinin emme basıncı değeri belirlenir.

Bu tez çalışmasında No.40 eleğinin altına geçen zemin numuneleri üzerinde filtre kağıdı tekniği kullanılarak toplam ve matris emme basıncı deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla Whatman GmbH tarafından üretilen Schleicher & Schuell No.589 White Ribbon, külsüz filtre kağıtları kullanılmıştır.

Her bir zemin numunesinden 2 adet olmak üzere, numuneler saykrometre tekniğindeki aynı başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığa sahip olacak şekilde 70 mm çapında ve 30 mm yüksekliğindeki ring içerisine dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler ringlerden çıkartılarak, deneye hazırlanmıştır. Filtre kağıdı tekniği kullanılarak yapılan emme basıncı deneylerinin tamamında ASTM D 5298-92 (Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper) deney standardı kullanılmıştır.

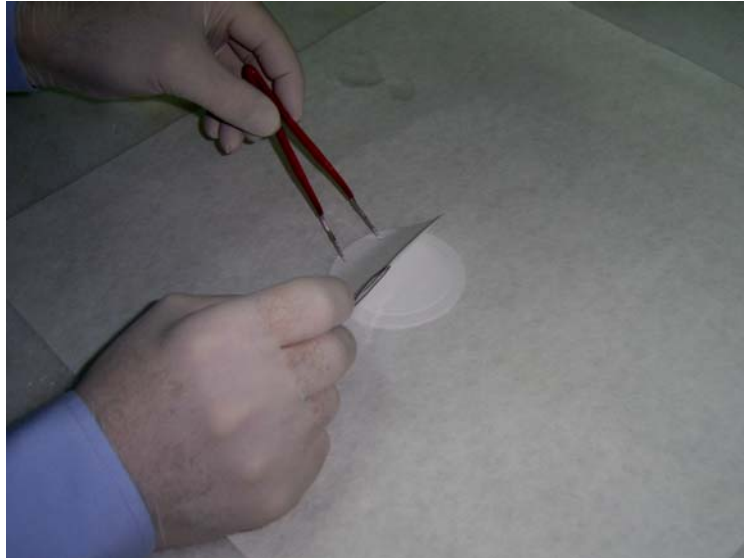
3.4.2.1. Filtre Kağıdı Tekniği ile Emme Basıncının Belirlenmesinde Takip Edilen Adımlar

1- Matris emme basıncının ölçülmesi amacıyla, 110 °C' lik etüvde 24 saat kurutulmuş ve etüvden, Şekil 3.14.' de görüldüğü gibi desikatöre alınarak korunan bir adet 5.5 cm çapındaki filtre kağıdı, iki adet 7 cm çapındaki koruyucu filtre kağıtlarının arasına Şekil 3.15.' de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu işlemler sırasında kuru olan filtre kağıtlarının herhangi bir şekilde nem almasını engellemek için eldiven ve çim� kullanılmıştır. Matris emme basıncını belirlemek için üç adet

filtre kağıdı kullanmanın nedeni, asıl ölçüm için kullanılan ortadaki 5.5 cm çapındaki filtre kağıdına zemin numunesinin bulaşmasını engellemektir.

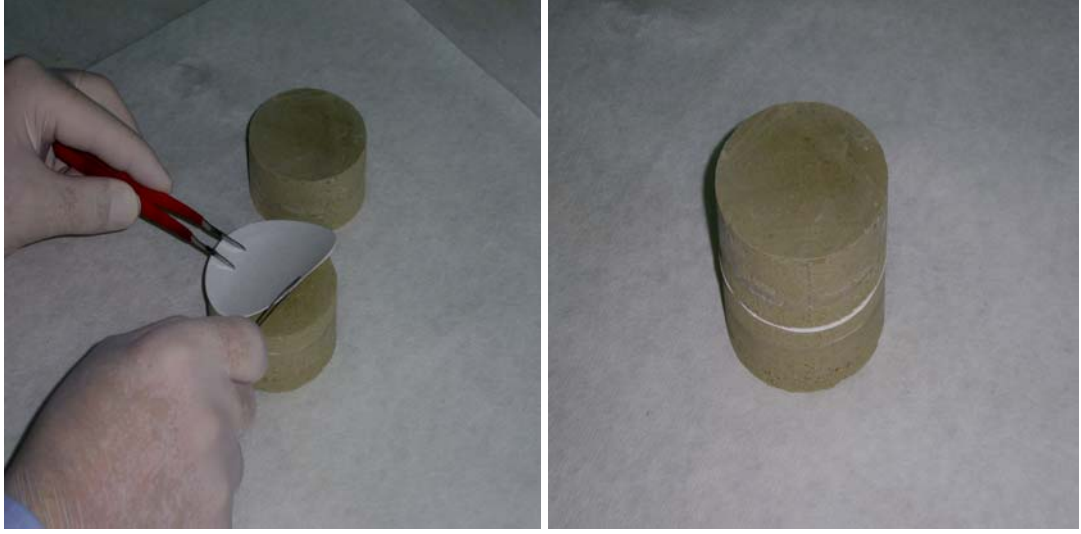


Şekil 3.14. Filtre kağıtlarının nem almasının engellemesi için desikatörde korunması



Şekil 3.15. Filtre kağıtlarının sandviç şeklinde hazırlanması

2- Sandviç şeklinde hazırlanan filtre kağıtları iki parça zemin numunesinin arasına, Şekil 3.16.' de görüldüğü gibi tam bir temas sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.16. Matris emme basıncının ölçülmesi için sandviç şeklinde hazırlanan filtre kağıtlarının zemin numunelerinin arasına yerleştirilmesi

3- Tam bir temasın sağlanması ve kavanozun içinde oluşacak zemin suyunun buharından sandviç şeklinde hazırlanan filtre kağıtlarını korumak amacıyla zemin numunelerinin birleşim yeri Şekil 3.17.'de görüldüğü gibi bir elektrik bantı kullanılarak bantlanmıştır.



Şekil 3.17. Zemin numunelerinin elektrik bantı kullanılarak bantlanması

4- Arasında filtre kağıtları bulunan zemin numunesi Şekil 3.18.'de görüldüğü gibi cam bir kavanozun içine yerleştirilmiştir. Filtre kağıtları ile zemin numunesi arasında en kısa sürede dengenin kurulabilmesi için, deneyde kullanılan cam kavanozlar,

zemin numuneleri konulduktan sonra mümkün olan en küçük boşluğun kalacağı (zemin numunesi kavanoz hacminin yaklaşık %75' ini dolduracak şekilde) şekilde seçilmiştir.



Şekil 3.18. Zemin numunesinin cam kavanoza yerleştirilmesi

5- Toplam emme basıncının ölçülmesi amacıyla, zemin numunesinin üzerine, zemin numunesi ile filtre kağıtlarının temasını önlemesi için 3 cm çapında ve 1.5 cm yüksekliğindeki plastik o-ring Şekil 3.19.' da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.19. Zemin numunesinin üzerine plastik bir o-ring yerleştirilmesi

6- Üst üste konulmuş 2 adet filtre kağıdı toplam zemin emmesini ölçmek üzere o-ringin üzerine Şekil 3.20.' de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Filtre kağıtlarının hiçbir şekilde zemin numunesine, kavanozun yan duvarlarına yada kapağının alt kenarına temas etmemesine dikkat edilmiştir.



Şekil 3.20. O-ringin üzerine filtre kağıtlarının yerleştirilmesi

7- Daha sonra kavanozun kapağı kapatılmış ve kapak elektrik bantı kullanılarak Şekil 3.21.' de görüldüğü gibi sıkıca bantlanmıştır.



Şekil 3.21. Kavanozun kapağının bantlanması

8- Daha sonra, cam kavanozlar dengelenme süresini tamamlamaları için bir Şekil 3.22.' de görüldüğü gibi termos çantaya yerleştirilmiştir.



Şekil 3.22. Kavanozların termos çantaya yerleştirilmesi

Tüm deneyler yukarıda anlatılan toplam 8 adım tekrarlanarak tamamlanmıştır. Deneyler nem ve ısı kontrollü ortamda gerçekleştirilmiştir. Deney boyunca ortamın sıcaklığının $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de sabit olarak tutulmasına özen gösterilmiş ancak yine de ortamın sıcaklığında zaman zaman $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' lik farklar görülmüştür. Ancak bu ısı değişimleri ASTM D 5298-92 standardında verilen sınırların içinde kalmıştır. Dengelenme için 1 hafta beklenilmiştir (ASTM D 5298-92; Houston vd., 1994; Lee 1991).

3.4.2.2. Filtre Kağıtlarının Su Muhtevalarının Belirlenmesi

Bir haftalık dengelenme süresi tamamlandıktan sonra, Emme basınçlarının belirlenmesi için filtre kağıtlarının su muhtevaları aşağıdaki adımlar izlenerek ölçülmüştür.

1- Öncelikle, 3 adet alüminyum, kapaklı numune kutusunun soğuk haldeki daraları (T_c) 0.0001 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılarak belirlenmiştir. Bu kaplardan 2 adedi toplam emme basıncının belirlenmesi için numunenin üzerine yerleştirilen 2

filtre kağıdının su muhtevasının ayrı ayrı ölçülmesinde; kalan 1 adedi ise zemin numuneleri arasına matris emme basıncının belirlenmesi için yerleştirilen üç adet filtre kağıdından ortadakinin su muhtevasının ölçülmesi için kullanılmıştır.

2- Cam kavanozlar termos çantadan çıkarıldıktan sonra; bir kişi cam kavanozun bantlanmış kapağını açar açmaz diğer kişi eldiven ve cımbız kullanarak üstteki filtre kağıtlarından her birini ayrı olmak üzere alüminyum kutulara Şekil 3.23.'de görüldüğü gibi yerleştirmiş ve nem kaybının önlenmesi için derhal kutuların kapakları kapatılmıştır. Hiç vakit kaybedilmeden içinde, yaş filtre kağıtları olan kutuların ağırlıkları (M_1) belirlenmiştir. Tüm bu işlemler 3-5 sn içinde tamamlanmıştır.



Şekil 3.23. Üstteki filtre kağıtlarının alüminyum kutulara alınması

3- Daha sonra numunenin ortasındaki bant açılarak yine aynı şekilde bu sefer sandviç şeklinde hazırlanmış filtre kağıtlarından ortadaki Şekil 3.24.' te görüldüğü gibi alüminyum numune kutusuna alınarak tartılmıştır. İçinde yaş filtre kağıtları bulunan alüminyum numune kutuları 110°C ' lik etüve yerleştirilmiştir.



Şekil 3.24. Ortadaki filtre kağıdının alüminyum kutuya alınması

4- Alüminyum numune kutuları yarı kapalı olarak 110°C ' lik etüvde gece boyunca bekletilmiştir. Kutular tartılmak üzere etüvden çıkarılmadan önce kapakları tam kapatılarak, kutuda ısı dengesinin sağlanması amacıyla 15 dakika daha beklenilmiştir. Daha sonra kutular teker teker etüvden alınarak, tartılmadan önce, 30 sn süreyle soğuması için bir metal blok üzerine Şekil 3.25.' te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.25. Alüminyum numune kutusunun hızlı bir şekilde soğuması için bir metal blok üzerine yerleştirilmesi

Bu 30 sn' lik sürecin sonunda kutular içindeki kuru filtre kağıtlarıyla birlikte Şekil 3.26.' da görüldüğü gibi hemen tartılarak M_2 ağırlıkları belirlenmiştir. Bu işlemi takiben kuru filtre kağıdı kutudan çıkarılmış, boş kutu birkaç saniye içinde tekrar tartılmış ve bu ağırlık, sıcak ağırlık (T_h)olarak kaydedilmiştir. Alüminyum numune kutularının, metal blok üzerine konmasının nedeni; kutuların soğumasını hızlandırmaktır. Böylece tartım sırasında ağırlığın değişmesi engellenmiştir.



Şekil 3.26. Kuru ağırlıkların 0.0001 gr hassasiyetindeki terazi ile belirlenmesi

5- Toplam ve matris emme basınçlarının belirlenmesi için filtre kağıtlarının su muhtevaları aşağıda verilen Eşitlik 2.3., Eşitlik 2.4. ve Eşitlik 2.5. kullanılarak hesaplanmıştır (ASTM D 5298-92).

Eşitlik 3.3. kullanılarak, kuru filtre kağıdının ağırlığı belirlenmiştir.

$$M_f = M_2 - T_h \quad (3.3)$$

Burada,

M_f - Filtre kağıdının kuru ağırlığı

M_2 - Numune kutusu ve filtre kağıdının birlikte kuru ağırlığı

T_h - Numune kutusunun sıcak ağırlığıdır.

Eşitlik 3.4. kullanılarak, filtre kağıdındaki suyun ağırlığı belirlenmiştir.

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad (3.4)$$

Burada,

M_w - filtre kağıdının emdiği suyun ağırlığı

M_1 - Etüve konulmadan önceki, ıslak filtre kağıdı ve numune kutusunun birlikte ağırlığı

T_c - Numune kutusunun soğuk ağırlığıdır.

Eşitlik 3.5. kullanılarak, filtre kağıdındaki su muhtevası belirlenmiştir.

$$w_f = \frac{M_w}{M_f} \times 100 \quad (3.5)$$

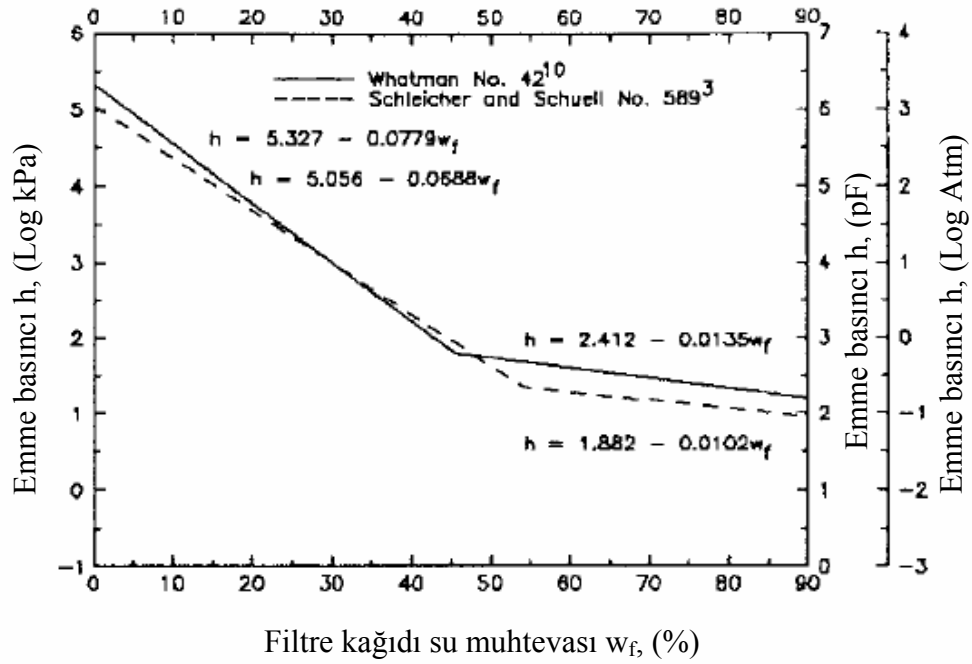
Çalışmada kullanılan filtre kağıtlarının su muhtevalarının belirlenmesinde tüm numuneler için yukarıda anlatılan 5 adım tekrarlanmıştır.

3.4.2.3. Filtre Kağıdı Tekniği ile Toplam ve Matris Emme Basıncının Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin toplam emme basınçlarının belirlenmesinde, numunelerin üst kısımlarına temassız olarak yerleştirilen ikişer adet filtre kağıdının su muhtevaları Eşitlik 3.3., Eşitlik 3.4. ve Eşitlik 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır. İki filtre kağıdı için ayrı ayrı bulunan su muhtevalarının ortalaması alınarak tek bir su muhtevası değeri elde edilmiş ve bu değerden, ASTM D 5298, (1992) standardında verilen ve Şekil 3.27.' de gösterilen kalibrasyon eğrisi ve Eşitlik 3.6., Eşitlik 3.7. kullanılarak zemin numunelerinin toplam emme basınçları belirlenmiştir.

Matris emme basıncını belirlemek için filtre kağıtlarının kalibre edilmesinde basınç plakası yöntemi kullanılabileceği gibi (Houston vd., 1994); toplam emme basıncı için kullanılan kalibrasyon eğrileri de kullanılabilir (Khoury, 2004).

Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin matris emme basınçlarının belirlenmesinde, numunelerin arasına temaslı olarak yerleştirilen üç adet filtre kağıdından ortadakinin su muhtevası Eşitlik 3.3., Eşitlik 3.4. ve Eşitlik 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerden, ASTM D 5298, (1992) standardında verilen ve Şekil 3.27.' de gösterilen kalibrasyon eğrisi ve Eşitlik 3.6., Eşitlik 3.7. kullanılarak zemin numunelerinin matris emme basınçları belirlenmiştir.



Şekil 3.27. Islanan filtre kağıdı için emme basıncı-su muhtevası ilişkisini veren kalibrasyon eğrisi (ASTM D 5298, 1992)

$$\Psi (\text{Log kPa}) = 5.056 - 0.0688 w_f \quad (w_f < \%54) \quad (3.6)$$

$$\Psi (\text{Log kPa}) = 1.882 - 0.0102 w_f \quad (w_f > \%54) \quad (3.7)$$

Filtre kağıdı tekniği ile yapılan toplam ve matris emme basıncı deneyleri için de, saykrometre tekniği kullanılarak yapılan toplam emme basıncı deneyleri ve emme kapasitesi deneyleri için belirlenen başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerleri kullanılmıştır. Filtre kağıdı tekniği kullanılarak yapılan toplam ve matris emme basıncı deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde tablolar halinde sunulmuştur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan 5 farklı zemin numunesi üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Öncelikle, kullanılan zemin numuneleri standart sınıflandırma deneyleri ile tanımlanmış ve bazı indeks özellikleri belirlenmiştir. Belli başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahip olacak şekilde dinamik olarak sıkıştırılarak hazırlanan kil numunelerinin emme kapasitesi değerleri ödometre ekipmanıyla tayin edilmiştir. Emme kapasitesinin belirlenmesi için kullanılan deney numuneleri ile aynı başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahip olacak şekilde hazırlanan numuneler üzerinde saykrometre tekniği ve filtre kağıdı tekniği kullanılarak emme basıncı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak; zeminlerin emme kapasitesi ve emme basıncı değerleri ile zeminlerin plastisite indisi, su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık gibi özellikleri arasındaki ilişkiler ortaya konmuştur. Ayrıca emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

4.1. Emme Kapasitesi ve Emme Basıncı Deney Sonuçları

Farklı başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin emme kapasitesi değerleri ödometre deney ekipmanı kullanılarak belirlenmiştir. Emme basınçlarının belirlenmesinde ise filtre kağıdı ve saykrometre teknikleri kullanılmıştır. İncelenen zemin numunelerinin farklı başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerleri altındaki emme kapasitesi ve emme basıncı değerleri aşağıda çizelgeler halinde verilmiştir. Çizelge 4.1. 'de Numune 1 için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Numune 2, 3, 4, 5 için elde edilen sonuçlar, sırasıyla Çizelge 4.2., 4.3., 4.4. ve 4.5.' te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numune 1 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi

Başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevaları		Emme Kapasitesi	Emme Basıncı		
			Filtre Kağıdı Tekniği		Saykrometre Tekniği
γ_k (gr/cm ³)	w ₀ (%)	W _{em} (%)	Matris Emme	Toplam Emme	
1.25	15	63.61	3.842713	4.122814	-----
	20	60.36	3.447151	3.794818	3.670294
	25	56.97	3.043804	3.460369	3.228425
	30	53.79	2.636067	3.122278	3.033157
1.30	15	61.22	3.845944	4.123834	-----
	20	57.07	3.443338	3.791657	3.713863
	25	54.27	3.045553	3.453526	3.141793
	30	51.48	2.646252	3.130723	2.874351
1.35	15	58.96	3.845590	4.125199	-----
	20	54.01	3.452402	3.788259	3.769342
	25	51.57	3.050506	3.465925	3.712741
	30	49.17	2.632797	3.119566	2.929215
1.40	15	57.25	3.844510	4.124304	-----
	20	52.63	3.446882	3.792937	3.627454
	25	48.88	3.045254	3.461570	3.316563
	30	46.86	2.645625	3.130203	2.719412

Çizelge 4.2. Numune 2 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi

Başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevaları		Emme Kapasitesi	Emme Basıncı		
			Filtre Kağıdı Tekniği		Saykrometre Tekniği
γ_k (gr/cm ³)	W ₀ (%)	W _{em} (%)	Matris Emme	Toplam Emme	
1.25	15	49.30	2.710758	3.264485	3.124500
	20	45.75	2.133276	2.803826	2.711247
	25	42.32	1.553399	2.341256	2.364643
	30	37.69	0.891821	1.813514	1.624711
1.30	15	47.50	2.725379	3.268171	3.173761
	20	44.14	2.128353	2.799899	2.663691
	25	40.52	1.545618	2.327073	2.097812
	30	36.24	0.940363	1.852236	1.554553
1.35	15	46.63	2.710124	3.263979	3.211475
	20	42.53	2.145244	2.821350	2.587544
	25	39.40	1.528574	2.321453	2.311451
	30	34.80	0.914286	1.751664	1.797351
1.40	15	45.13	2.714337	3.267340	3.189756
	20	40.91	2.137512	2.807205	2.734357
	25	37.19	1.560687	2.347070	2.193733
	30	33.35	0.983861	1.886935	1.577359

Çizelge 4.3. Numune 3 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevalarına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi

Başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevaları		Emme Kapasitesi	Emme Basıncı		
			Filtre Kağıdı Tekniği		Saykrometre Tekniği
γ_k (gr/cm ³)	W ₀ (%)	W _{em} (%)	Matris Emme	Toplam Emme	
			ψ_m (log kPa)	ψ (log kPa)	ψ (log kPa)
1.25	15	61.65	3.621743	3.948984	-----
	20	58.56	3.121983	3.576747	3.312569
	25	55.43	2.530558	3.135352	3.085621
	30	51.70	2.131416	2.800146	2.612743
1.30	15	59.63	3.623372	3.950946	-----
	20	55.27	3.127829	3.581110	3.494128
	25	52.22	2.543678	3.145144	3.195648
	30	48.50	2.130628	2.836875	2.601295
1.35	15	56.37	3.622478	3.950279	-----
	20	52.69	3.125048	3.579034	3.568915
	25	48.65	2.537168	3.140285	3.014659
	30	45.83	2.110432	2.821802	2.736538
1.40	15	53.12	3.621772	3.949751	-----
	20	49.45	3.123432	3.577828	3.428412
	25	45.79	2.530761	3.128040	3.032469
	30	43.12	2.137842	2.842259	2.514581

Çizelge 4.4. Numune 4 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevalarına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi

Başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevaları		Emme Kapasitesi	Emme Basıncı		
			Filtre Kağıdı Tekniği		Saykrometre Tekniği
γ_k (gr/cm ³)	W ₀ (%)	W _{em} (%)	Matris Emme	Toplam Emme	
			ψ_m (log kPa)	ψ (log kPa)	ψ (log kPa)
1.25	15	52.29	3.192593	3.623927	3.681249
	20	49.35	2.611714	3.199835	3.037592
	25	45.42	1.978373	2.474610	2.219562
	30	42.91	1.446027	2.253871	1.891874
1.30	15	50.63	3.201025	3.630083	3.418947
	20	47.31	2.602717	3.193267	2.928489
	25	43.12	1.972956	2.733486	2.508459
	30	40.68	1.434856	2.267618	1.911653
1.35	15	48.57	3.217906	3.642408	3.601254
	20	46.35	2.618898	3.205080	3.096524
	25	41.84	1.965348	2.727931	2.331976
	30	38.80	1.415695	2.253629	1.717856
1.40	15	47.30	3.198742	3.628417	3.562387
	20	43.06	2.614097	3.201575	3.046297
	25	40.37	1.987597	2.744176	2.438910
	30	37.63	1.429240	2.292721	1.833685

Çizelge 4.5. Numune 5 için başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak emme kapasitesi ve emme basıncının değişimi

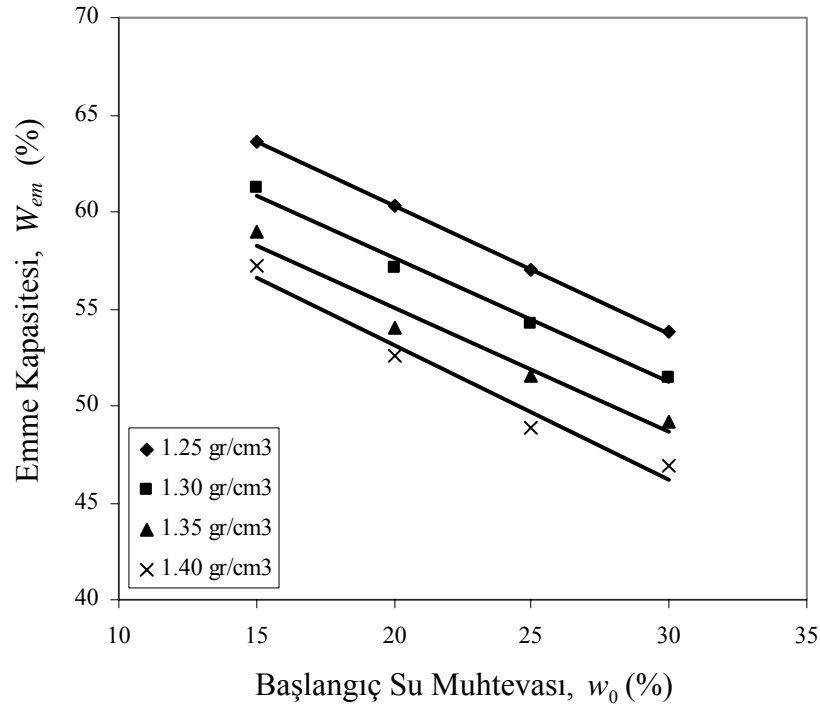
Başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve başlangıç su muhtevaları		Emme Kapasitesi	Emme Basıncı		
			Filtre Kağıdı Tekniği		Saykrometre Tekniği
γ_k (gr/cm ³)	w_0 (%)	W_{em} (%)	Matris Emme	Toplam Emme	
1.25	15	51.26	3.150900	3.600364	3.505148
	20	48.95	2.580000	3.120992	3.066145
	25	45.10	1.945563	2.630875	2.596544
	30	42.00	1.431188	2.239725	1.920650
1.30	15	49.65	3.151569	3.592893	3.440324
	20	46.30	2.571318	3.141798	2.910535
	25	43.75	1.971959	2.667584	2.504357
	30	40.29	1.436865	2.165096	2.035165
1.35	15	48.36	3.159556	3.607213	3.386855
	20	45.19	2.564885	3.136708	3.143241
	25	42.41	1.902202	2.612392	2.349819
	30	39.03	1.394026	2.131201	1.824351
1.40	15	46.89	3.155581	3.604067	3.541659
	20	43.56	2.575937	3.145453	3.016655
	25	41.07	1.956294	2.686838	2.488671
	30	36.95	1.416651	2.228223	2.126343

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.3' te verilen numune 1 ve numune 3 için kuru birim hacim ağırlığın (γ_k) 1.25, 1.30, 1.35 ve 1.40 gr/cm³ olduğu durumlarda, başlangıç su muhtevası (w_0) %15 iken saykrometre tekniği ile toplam emme basınçları (Ψ) ölçülememiştir. Bunun nedeni; incelenen zemin numuneleri için %15 su muhtevastaki emme basınçlarının, saykrometrenin ölçüm aralığının dışında kalmasıdır. Yukarıda verilen çizelgeler ile ilgili değerlendirmeler Bölüm 5' te yapılmıştır.

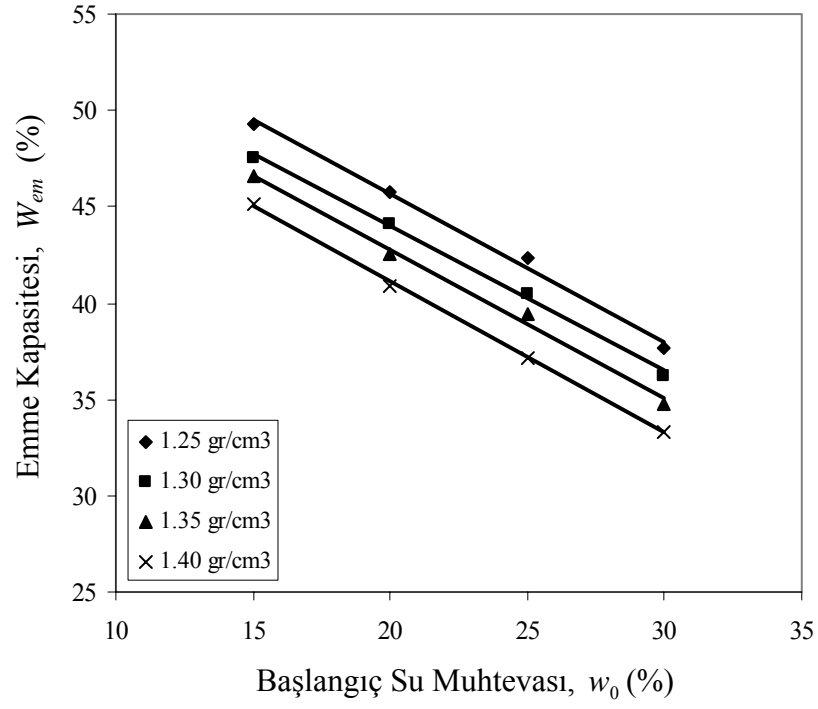
4.2. Emme Kapasitesine Başlangıç Su Muhtevası, Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Plastisite İndisinin Etkisi

4.2.1. Başlangıç Su Muhtevasının Emme Kapasitesi Üzerindeki Etkisi

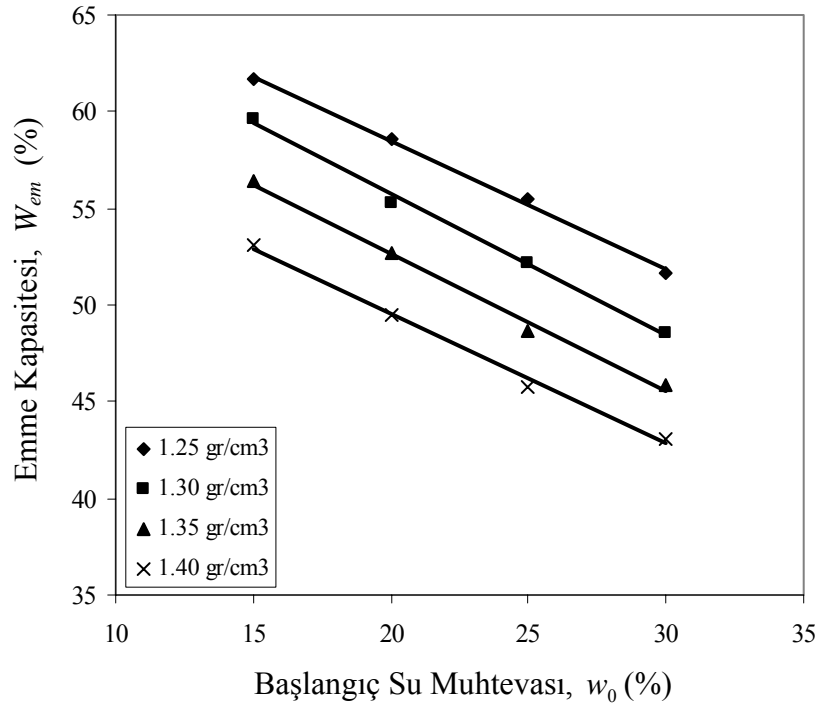
Çalışmada kullanılan beş farklı zemin numunesinden her birinin üzerinde; 1.25, 1.30, 1.35 ve 1.40 gr/cm³ olmak üzere dört farklı kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ve %15, 20, 25 ve 30 olmak üzere dört farklı başlangıç su muhtevasında emme kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak; başlangıç su muhtevasının emme kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve tüm zemin numuneleri için su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisinin doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.1. 'de Numune 1 için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Numune 2, 3, 4, 5 için elde edilen sonuçlar, sırasıyla Şekil 4.2., 4.3., 4.4. ve 4.5.' te verilmiştir.



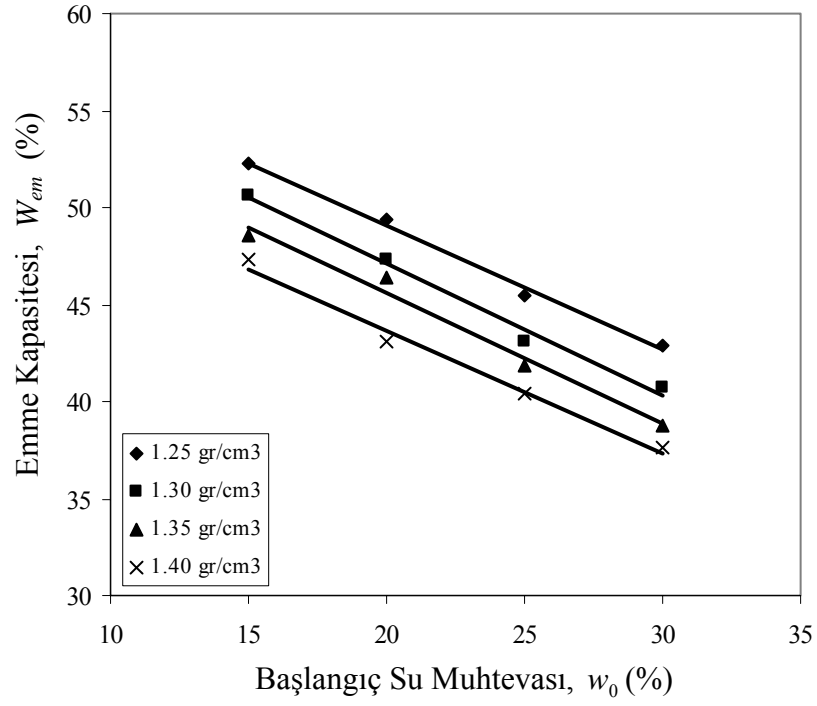
Şekil 4.1. Numune 1 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi



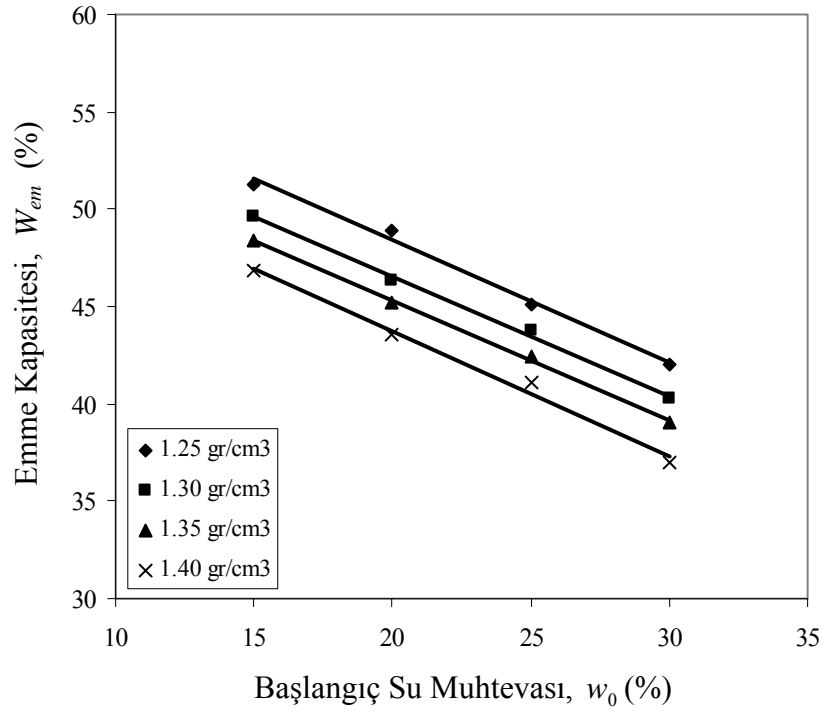
Şekil 4.2. Numune 2 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.3. Numune 3 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.4. Numune 4 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.5. Numune 5 için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkisi

Şekil 4.1., 4.2., 4.3., 4.4. ve 4.5.'de görüldüğü gibi, aynı kuru birim hacim ağırlığa sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin başlangıç su muhtevasının artmasıyla, emme kapasitesi azalmaktadır.

Beş farklı zemin numunesinin her biri için; kuru birim hacim ağırlık değerleri sabit tutulurken $w_0 = \%15, 20, 25$ ve 30 olmak üzere dört farklı su muhtevasında emme kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi değerleri arasında yapılan analizlerden bulunan doğruların denklemleri ve bu denklemlere ait determinasyon katsayıları aşağıdaki Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Determinasyon katsayılarının 1 'e çok yakın olduğu görülmektedir.

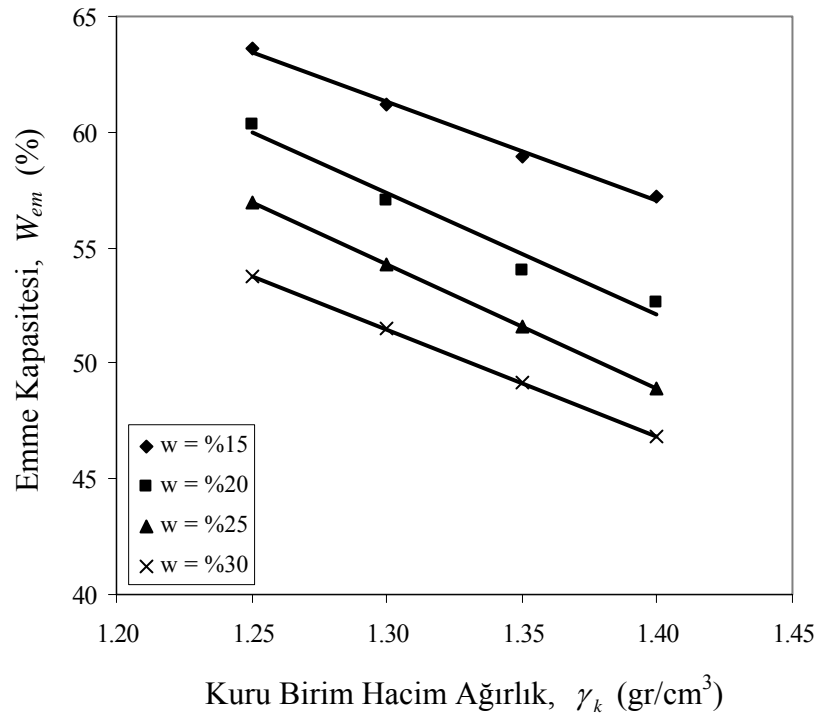
Çizelge 4.6. İncelenen zemin numuneleri için başlangıç su muhtevası – emme kapasitesi ilişkileri

Numune	Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (gr/cm ³)	İlişki	Determinasyon Katsayısı, R^2 (%)
N 1	1.25	$W_{em} = -0.657 w_0 + 73.462$	0.9999
	1.30	$W_{em} = -0.641 w_0 + 70.420$	0.9894
	1.35	$W_{em} = -0.636 w_0 + 67.748$	0.9632
	1.40	$W_{em} = -0.698 w_0 + 67.113$	0.9725
N 2	1.25	$W_{em} = -0.765 w_0 + 60.983$	0.9949
	1.30	$W_{em} = -0.748 w_0 + 59.926$	0.9969
	1.35	$W_{em} = -0.773 w_0 + 58.227$	0.9952
	1.40	$W_{em} = -0.781 w_0 + 56.720$	0.9993
N 3	1.25	$W_{em} = -0.660 w_0 + 71.676$	0.9978
	1.30	$W_{em} = -0.729 w_0 + 70.298$	0.9955
	1.35	$W_{em} = -0.713 w_0 + 66.936$	0.9951
	1.40	$W_{em} = -0.673 w_0 + 63.019$	0.9947
N 4	1.25	$W_{em} = -0.642 w_0 + 61.929$	0.9935
	1.30	$W_{em} = -0.681 w_0 + 60.749$	0.9907
	1.35	$W_{em} = -0.677 w_0 + 59.113$	0.9849
	1.40	$W_{em} = -0.634 w_0 + 56.353$	0.9865
N 5	1.25	$W_{em} = -0.633 w_0 + 61.067$	0.9917
	1.30	$W_{em} = -0.613 w_0 + 58.779$	0.9968
	1.35	$W_{em} = -0.615 w_0 + 57.594$	0.9987
	1.40	$W_{em} = -0.646 w_0 + 56.657$	0.9912

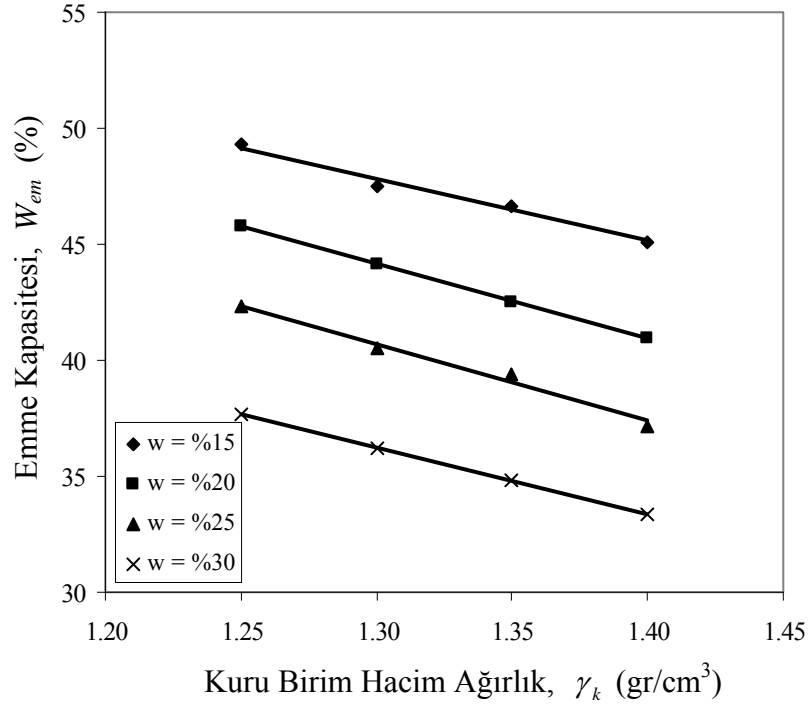
W_{em} – Emme kapasitesi (%), w_0 - Başlangıç su muhtevası (%)

4.2.2. Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlığının Emme Kapasitesi Üzerindeki Etkisi

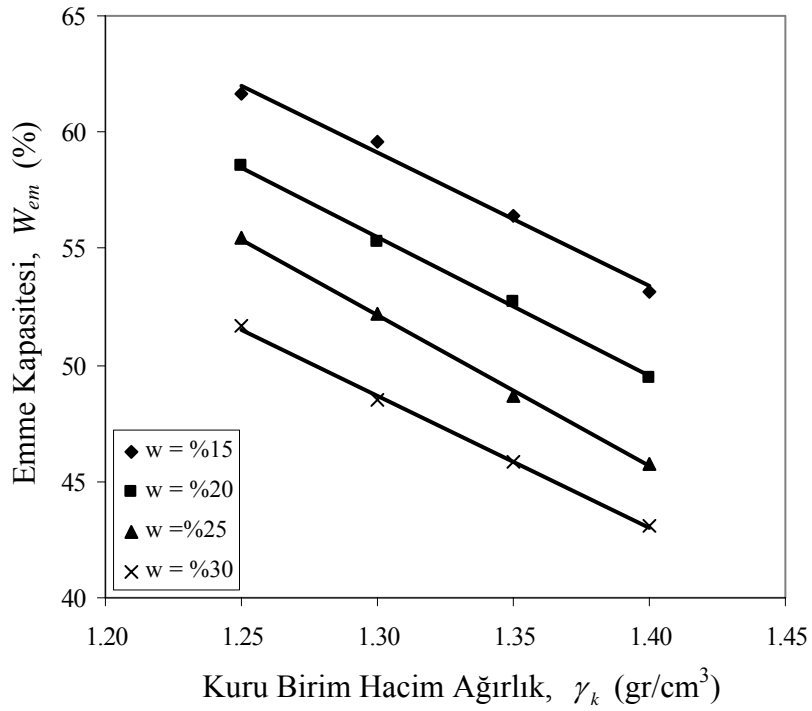
Çalışmada kullanılan beş farklı zemin numunesi üzerinde yapılan emme kapasitesi deneylerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak; başlangıç kuru birim hacim ağırlığının emme kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve tüm zemin numuneleri için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisinin doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.6. 'da Numune 1 için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Numune 2, 3, 4, 5 için elde edilen sonuçlar, sırasıyla Şekil 4.7., 4.8., 4.9. ve 4.10.' da verilmiştir.



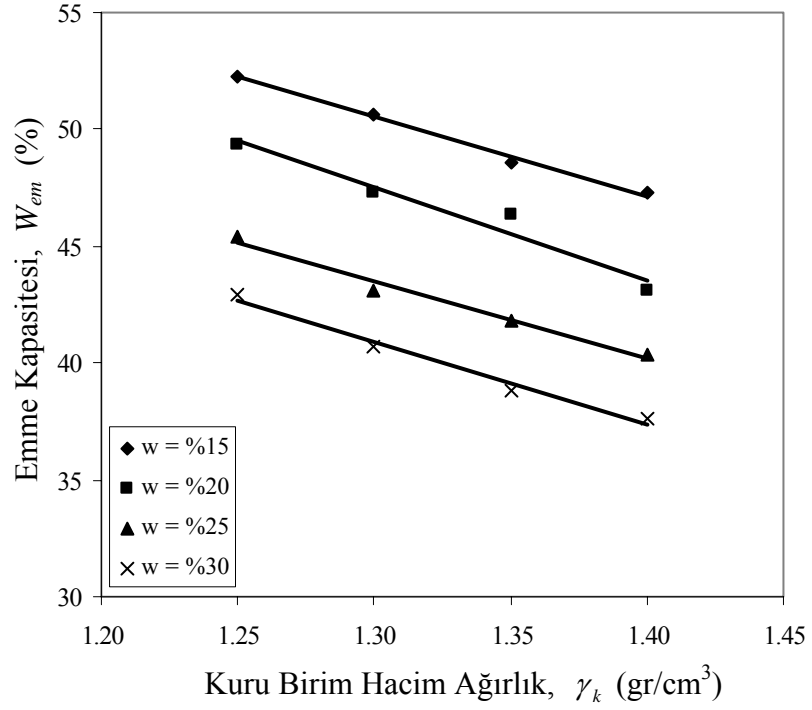
Şekil 4.6. Numune 1 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi



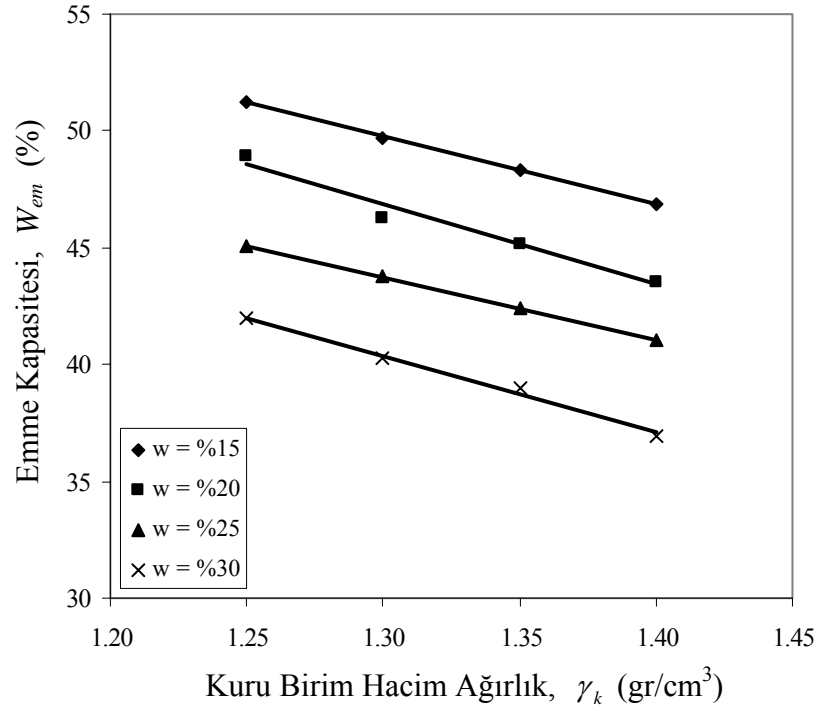
Şekil 4.7. Numune 2 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.8. Numune 3 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.9. Numune 4 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.10. Numune 5 için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkisi

Şekil 4.6., 4.7., 4.8., 4.9. ve 4.10.'da görüldüğü gibi, aynı su muhtevasına sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin başlangıç kuru birim hacim ağırlık değerlerinin artmasıyla, emme kapasitesi azalmaktadır.

Çalışmada kullanılan zemin numunesinin her biri için; su muhtevası değerleri sabit tutulurken, $\gamma_k = 1.25, 1.30, 1.35$ ve 1.40 gr/cm^3 olmak üzere dört farklı kuru birim hacim ağırlık değerlerinde emme kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi değerleri arasında yapılan analizlerden elde edilen doğruların denklemleri ve bu denklemlere ait determinasyon katsayıları aşağıdaki Çizelge 4.7.' de verilmiştir. İncelenen zemin numuneleri için determinasyon katsayılarının bazıları 1, diğerlerinin ise 1' e çok yakın olduğu çizelgeden görülmektedir.

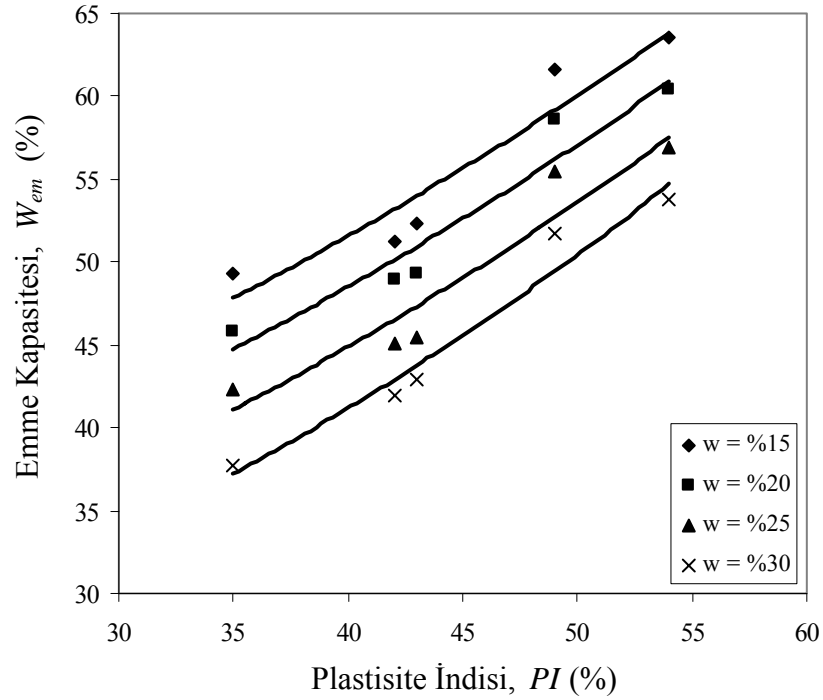
Çizelge 4.7. İncelenen zemin numuneleri için kuru birim hacim ağırlık – emme kapasitesi ilişkileri

Numune	Başlangıç su muhtevası, w_0 (%)	İlişki	Determinasyon Katsayısı, R^2 (%)
N 1	15	$W_{em} = -42.682 \gamma_k + 116.81$	0.9947
	20	$W_{em} = -52.482 \gamma_k + 125.55$	0.9714
	25	$W_{em} = -53.960 \gamma_k + 124.42$	1
	30	$W_{em} = -46.180 \gamma_k + 111.51$	1
N 2	15	$W_{em} = -26.763 \gamma_k + 82.602$	0.9840
	20	$W_{em} = -32.270 \gamma_k + 86.090$	1
	25	$W_{em} = -33.001 \gamma_k + 83.583$	0.9857
	30	$W_{em} = -28.940 \gamma_k + 73.866$	1
N 3	15	$W_{em} = -57.683 \gamma_k + 134.12$	0.9892
	20	$W_{em} = -59.830 \gamma_k + 133.27$	0.9979
	25	$W_{em} = -65.013 \gamma_k + 136.66$	0.9984
	30	$W_{em} = -56.828 \gamma_k + 122.59$	0.9982
N 4	15	$W_{em} = -34.082 \gamma_k + 94.857$	0.9926
	20	$W_{em} = -39.688 \gamma_k + 99.079$	0.9530
	25	$W_{em} = -32.848 \gamma_k + 86.212$	0.9821
	30	$W_{em} = -35.455 \gamma_k + 86.983$	0.9820
N 5	15	$W_{em} = -28.800 \gamma_k + 87.200$	0.9983
	20	$W_{em} = -34.555 \gamma_k + 91.785$	0.9692
	25	$W_{em} = -26.845 \gamma_k + 78.653$	1
	30	$W_{em} = -32.790 \gamma_k + 83.013$	0.9915

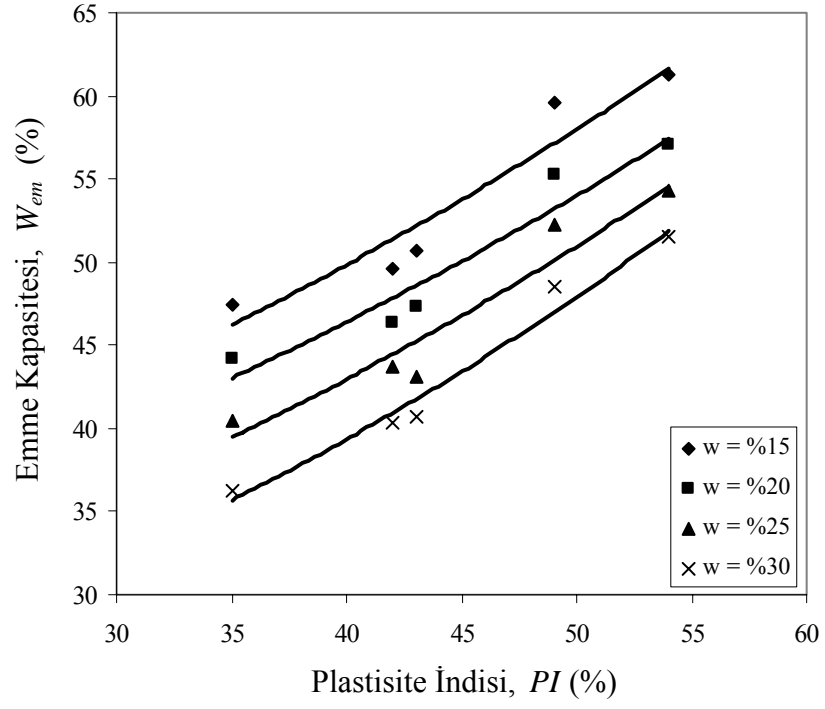
W_{em} – Emme kapasitesi (%), γ_k - kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3)

4.2.3. Plastisite İndisinin Emme Kapasitesi Üzerindeki Etkisi

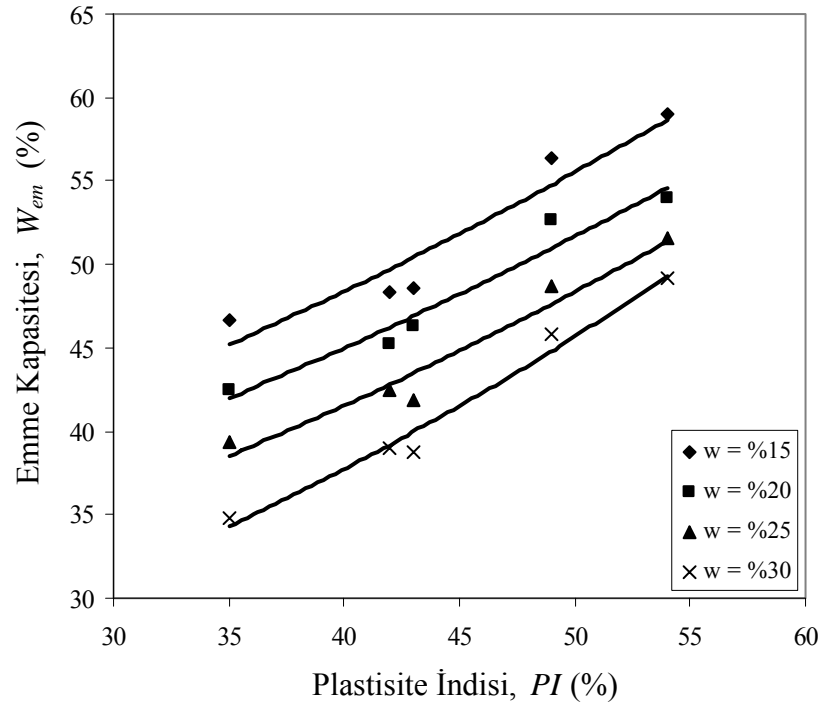
Bu bölümde, incelenen zemin numunelerinin plastisite indisleri ile emme kapasiteleri arasındaki ilişkiler verilmiştir. Zemin numuneleri üzerinde yapılan emme kapasitesi deneylerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak; plastisite indisinin emme kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve çalışmada kullanılan tüm kuru birim hacim ağırlık değerleri için plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisinin üstel olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.11. 'de tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının (γ_k) = 1.25 gr/cm³ olması durumunda elde edilen sonuçlar görülmektedir. γ_k = 1.30, 1.35 ve 1.40 gr/cm³ için elde edilen sonuçlar, sırasıyla Şekil 4.12., 4.13. ve 4.14. 'de verilmiştir.



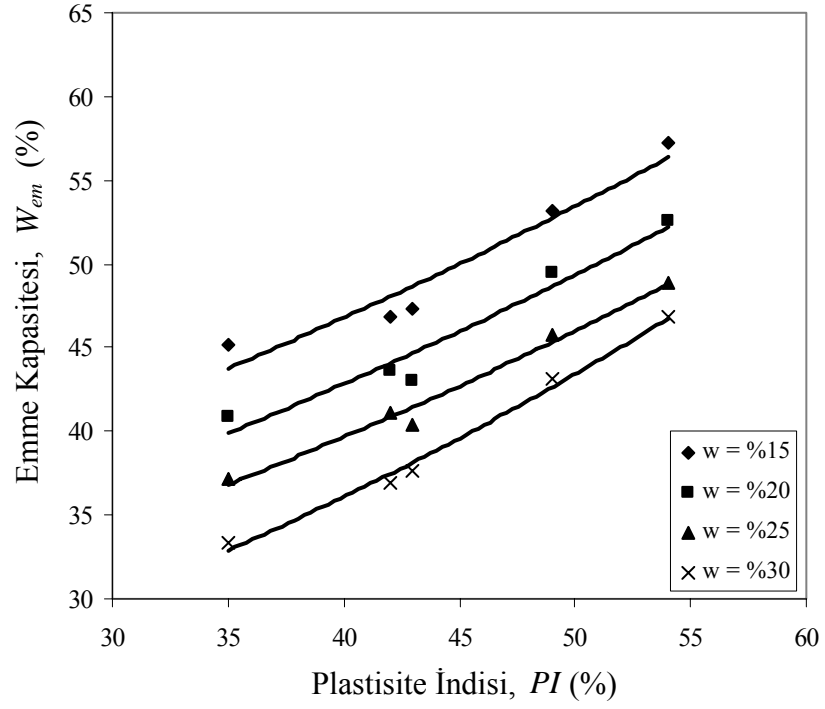
Şekil 4.11. Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının 1.25 gr/cm³ olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.12. Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığın 1.30 gr/cm^3 olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.13. Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığın 1.35 gr/cm^3 olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi



Şekil 4.14. Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının 1.40 gr/cm^3 olması durumunda plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkisi

Şekil 4.11., 4.12., 4.13. ve 4.14.'de görüldüğü gibi, tüm kuru birim hacim ağırlık değerlerinde incelenen zemin numuneleri için plastisite indisi arttıkça emme kapasitesi değerleri artmaktadır.

$\gamma_k = 1.25, 1.30, 1.35$ ve 1.40 gr/cm^3 olmak üzere dört farklı kuru birim hacim ağırlık değerleri için; plastisite indisi değerlerindeki değişime bağlı olarak, plastisite indisi – emme kapasitesi arasında yapılan analizlerden elde edilen eğrilerin denklemleri ve bu denklemlere ait determinasyon katsayıları aşağıdaki Çizelge 4.8.' de verilmiştir. İncelenen tüm zemin numuneleri için determinasyon katsayılarının 1' e çok yakın olduğu çizelgeden görülmektedir.

Çizelge 4.8. İncelenen zemin numuneleri için Plastisite indisi – emme kapasitesi ilişkileri

Numune	Başlangıç su muhtevası, w_0 (%)	İlişki	Determinasyon Katsayısı, R^2 (%)
$\gamma_k = 1.25 \text{ gr/cm}^3$	15	$W_{em} = 28.067 e^{0.0152 PI}$	0.9057
	20	$W_{em} = 25.363 e^{0.0162 PI}$	0.9336
	25	$W_{em} = 22.109 e^{0.0177 PI}$	0.9125
	30	$W_{em} = 18.292 e^{0.0203 PI}$	0.9631
$\gamma_k = 1.30 \text{ gr/cm}^3$	15	$W_{em} = 27.196 e^{0.0151 PI}$	0.9107
	20	$W_{em} = 25.318 e^{0.0151 PI}$	0.9247
	25	$W_{em} = 21.732 e^{0.0170 PI}$	0.9243
	30	$W_{em} = 17.897 e^{0.0197 PI}$	0.9731
$\gamma_k = 1.35 \text{ gr/cm}^3$	15	$W_{em} = 27.899 e^{0.0138 PI}$	0.9068
	20	$W_{em} = 25.874 e^{0.0138 PI}$	0.9507
	25	$W_{em} = 22.654 e^{0.0152 PI}$	0.9495
	30	$W_{em} = 17.604 e^{0.0191 PI}$	0.9792
$\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$	15	$W_{em} = 27.506 e^{0.0133 PI}$	0.9329
	20	$W_{em} = 24.343 e^{0.0141 PI}$	0.9444
	25	$W_{em} = 21.956 e^{0.0148 PI}$	0.9798
	30	$W_{em} = 17.229 e^{0.0185 PI}$	0.9905

W_{em} – Emme kapasitesi (%), PI - Plastisite indisi (%)

4.2.4. Emme Kapasitesinin Başlangıç Su Muhtevası, Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Plastisite İndisine Bağlı Olarak Tahmin Edilmesi

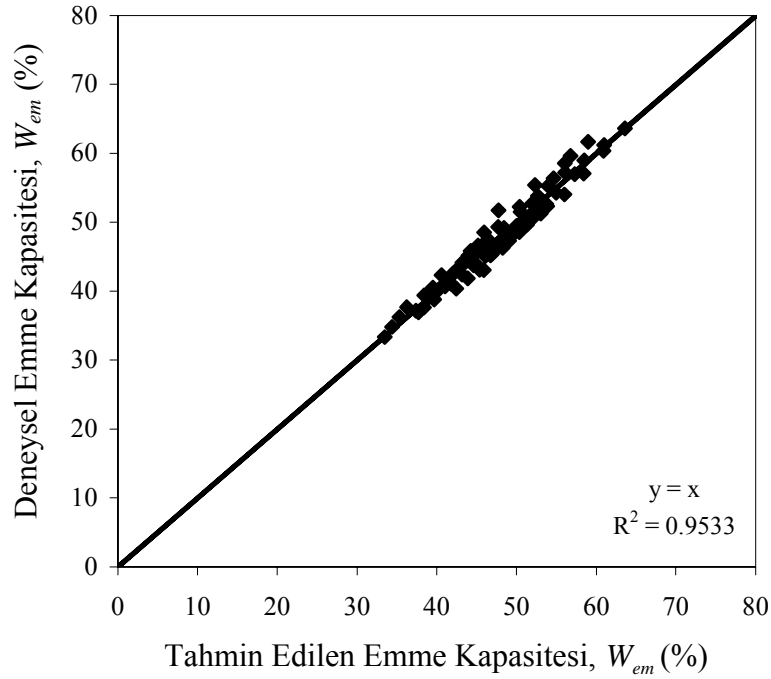
İncelenen zemin numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak yapılan regresyon analizleri sonucunda, başlangıç su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisine bağlı olarak emme kapasitesinin tahmin edilebilmesi

için Eşitlik 4.1. de verilen ilişki elde edilmiştir. Bu ilişkiden elde edilen emme kapasitesi değerleri ve ödometre tekniğiyle deneysel olarak belirlenen emme kapasitesi değerleri Şekil 4.15.'te karşılaştırılmıştır.

$$w_{em} = (-0.65644 \cdot w + 37.94444) \cdot \left(e^{(0.0003 \cdot w - 0.0155 \cdot \gamma_k + 0.03) \cdot PI} \right) \quad (4.1)$$

Burada,

- w_{em} - Emme kapasitesi (%),
- w - Su muhtevası (%),
- γ_k - Kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3),
- PI - Plastisite indisidir (%).



Şekil 4.15. Deneysel emme kapasitesi değerleriyle tahmin edilen emme kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması

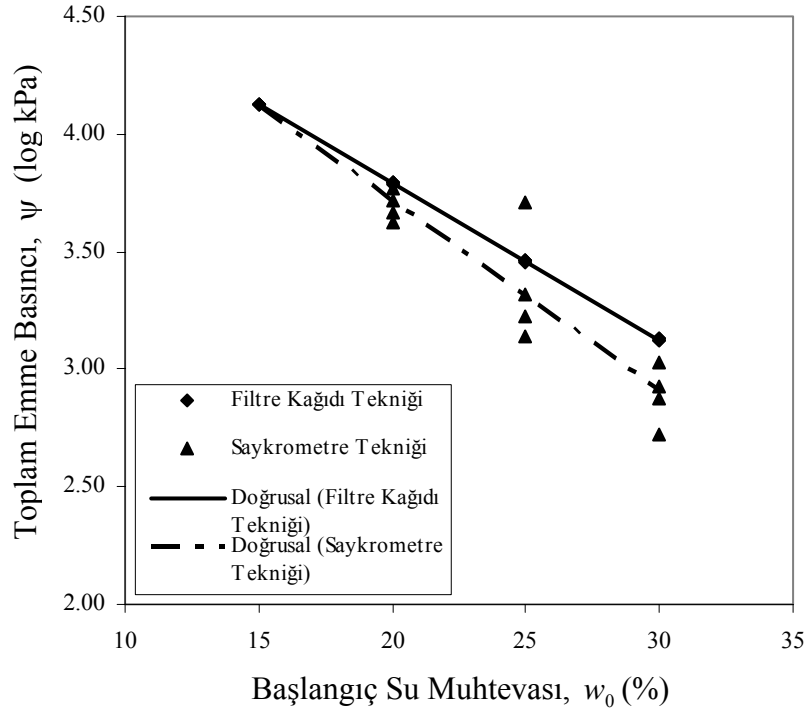
İncelenen zeminler için emme kapasitesi; başlangıç su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisine bağlı olarak, eşitlik 4.1 yardımıyla tahmin edilmiş ve tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.95 olarak belirlenmiştir.

4.3. Emme Basıncı Deneyleri

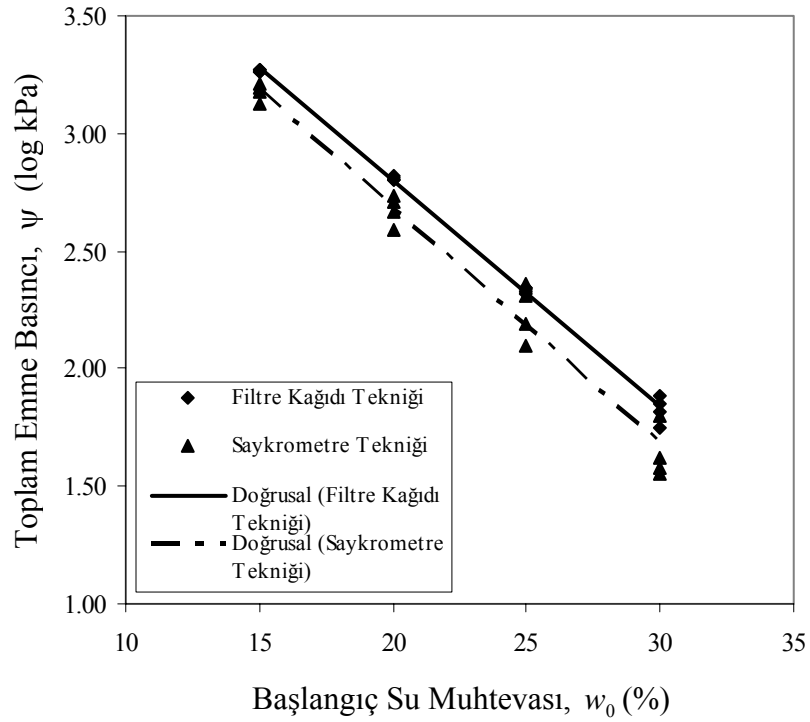
4.3.1. Filtre Kağıdı ve Saykrometre Teknikleriyle Bulunan Emme Basınçlarının Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında, farklı başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık koşullarında dinamik kompaksiyonla hazırlanan numunelerin toplam emme basınçlarının belirlenmesinde filtre kağıdı tekniği ve saykrometre tekniği olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Aşağıda bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.16., 4.17., 4.18., 4.19. ve 4.20.' de sırasıyla Numune 1, 2, 3, 4 ve 5 için bu iki teknikle ölçülen emme basıncı değerlerinin su muhtevasıyla değişimleri (zemin su karakteristik eğrileri) gösterilmiştir. Deneyler, söz konusu teknikler kullanılarak incelenen her bir zemin numunesi için, sabit su muhtevasında ve $\gamma_k = 1.25, 1.30, 1.35$ ve 1.40 gr/cm^3 olmak üzere dört farklı kuru birim hacim ağırlık değerinde yapılmıştır.

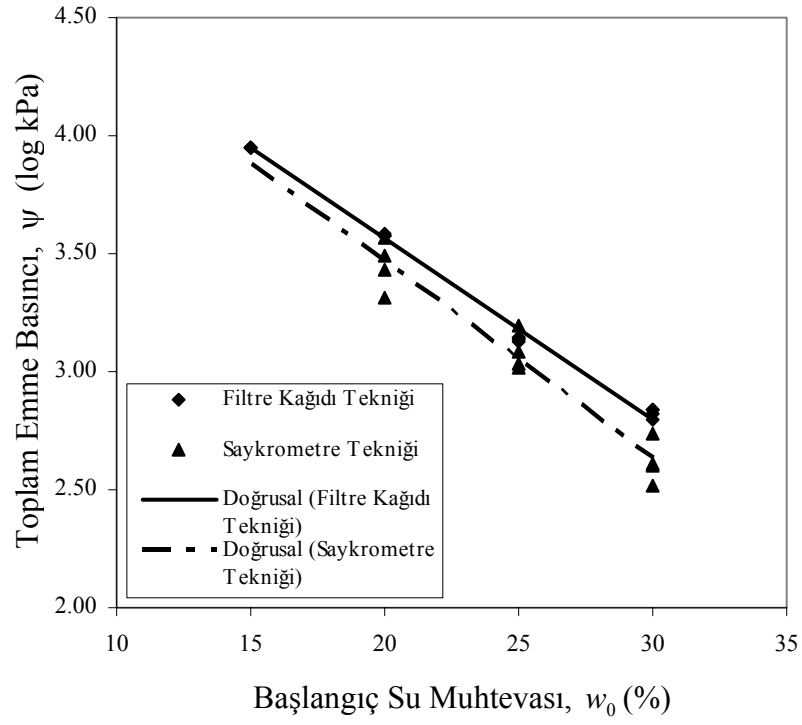
Ayrıca, Çizelge 4.9.' da her iki teknik için elde edilen ilişkiler ve determinasyon katsayıları verilmiştir. Çizelge 4.9.' dan filtre kağıdı tekniği ile yapılan deneylerden elde edilen ilişkilere ait determinasyon katsayılarının, saykrometre tekniği ile yapılan deneylerden elde edilen ilişkilere ait determinasyon katsayılarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum zeminlerin emme basınçlarının belirlenmesinde filtre kağıdı tekniğinin, saykrometre tekniğine oranla daha kararlı sonuçlar verdiği şeklinde yorumlanmıştır.



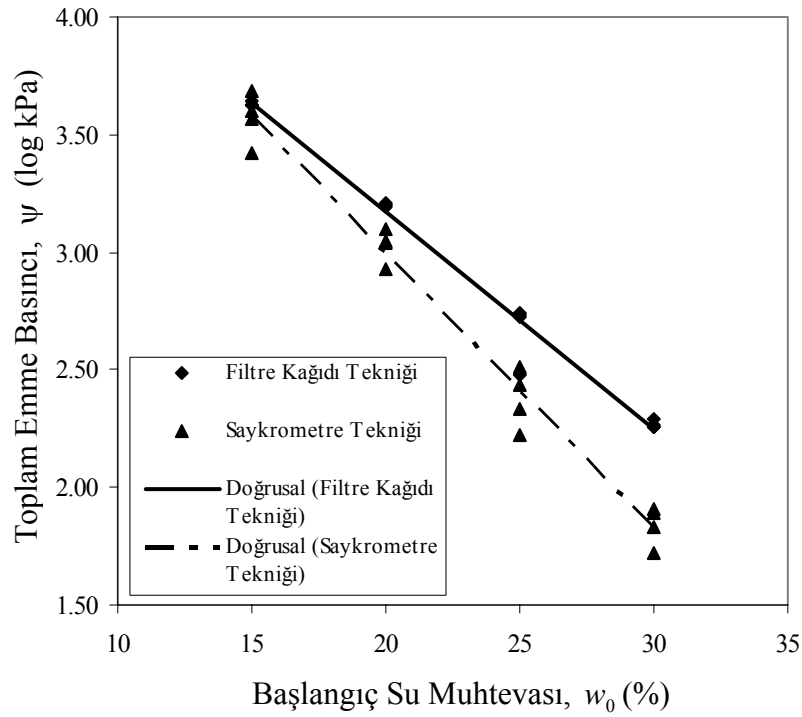
Şekil 4.16. Numune 1 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması



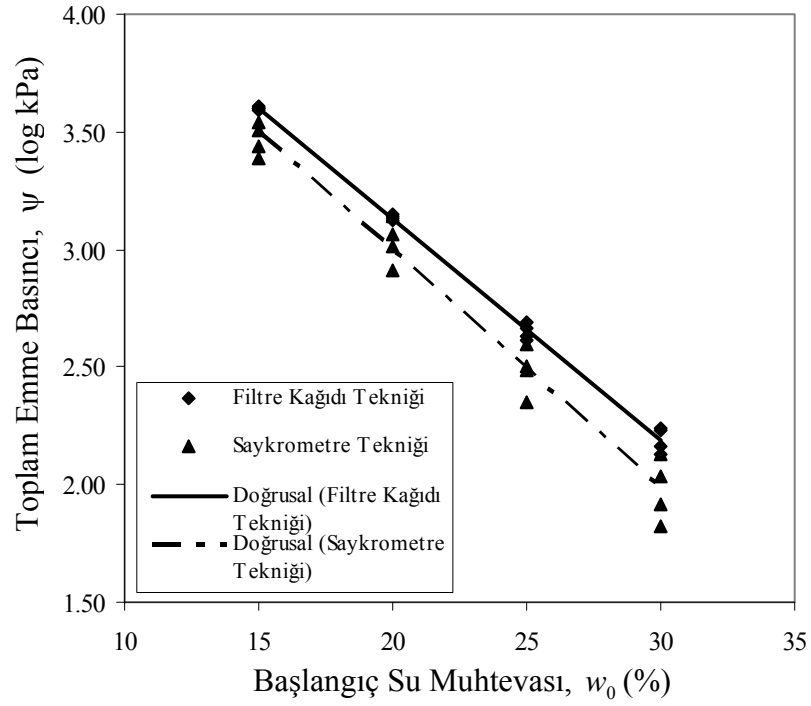
Şekil 4.17. Numune 2 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.18. Numune 3 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.19. Numune 4 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.20. Numune 5 için filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.9. Filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basınçları - başlangıç su muhtevası ilişkileri

Numune	Filtre Kağıdı Tekniği		Saykrometre Tekniği	
	İlişki	R^2 (%)	İlişki	R^2 (%)
N 1	$\Psi = -0.0665 w_0 + 5.1225$	0.9999	$\Psi = -0.0806 w_0 + 5.3269$	0.8322
N 2	$\Psi = -0.0959 w_0 + 4.7157$	0.9971	$\Psi = -0.1008 w_0 + 4.7010$	0.9773
N 3	$\Psi = -0.0763 w_0 + 5.0898$	0.9956	$\Psi = -0.0835 w_0 + 5.1366$	0.9415
N 4	$\Psi = -0.0925 w_0 + 5.0222$	0.9854	$\Psi = -0.1167 w_0 + 5.3270$	0.9809
N 5	$\Psi = -0.0943 w_0 + 5.0171$	0.9972	$\Psi = -0.1005 w_0 + 5.0022$	0.9737

Ψ - emme basıncı (log kPa), w_0 - Başlangıç su muhtevası (%)

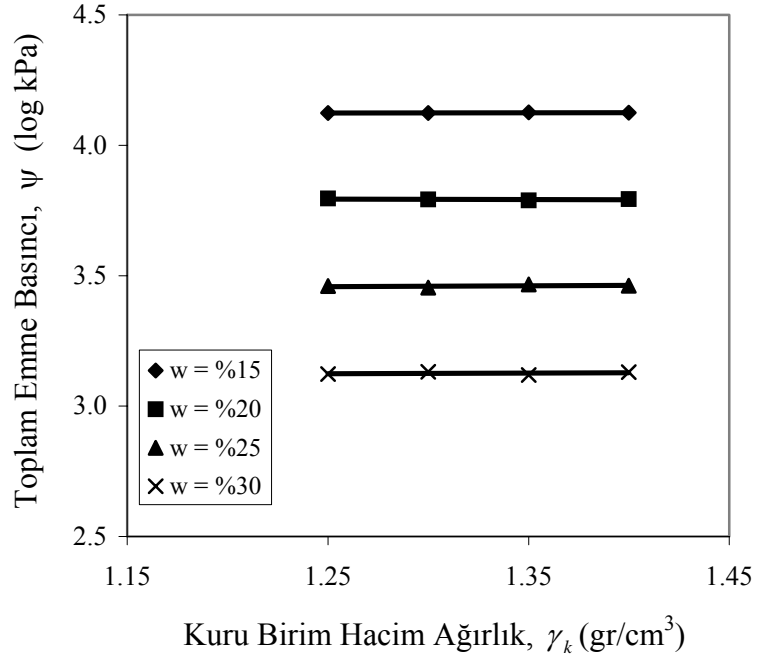
Şekil 4.16., 4.17., 4.18., 4.19. ve 4.20.' de verilen grafiklerde $w_0 = \%15, 20, 25$ ve 30 su muhtevaları ve $\gamma_k = 1.25, 1.30, 1.35$ ve 1.40 gr/cm^3 kuru birim hacim ağırlık değerleri başlangıç koşulu olarak seçilmiştir. Söz konusu şekillerden görüldüğü gibi özellikle başlangıç su muhtevası yüksek olan zemin numunelerinin saykrometre tekniği ile ölçülen emme basıncı değerlerinde büyük saçılmalar görülmektedir. Bu saçılmalar Şekil 4.21.' den de görüldüğü gibi kuru birim hacim ağırlığın emme basıncı üzerindeki etkisinden değil saykrometre tekniği ile yapılan ölçümlerin tekrarlanabilirlik özelliğinin zayıf olmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu durumun temel nedenleri Ridley ve Wray (1996) tarafından da belirtildiği gibi; sensörden sensöre ölçüm hassasiyetinin değişebilmesi, ölçüm aletinin (mikrovoltmetre) doğruluğu ve düşük emme değerlerinin ölçülmesi sırasında ortam sıcaklığındaki çok küçük değişikliklerin okumaları önemli ölçüde etkilemesidir. Bu nedenle çalışmadaki regresyon analizlerinde, zeminlerin emme basıncına etki eden faktörlerin incelenmesinde ve emme basıncı ile emme kapasitesi parametrelerinin ilişkilendirilmesinde, daha kararlı bir ölçüm yöntemi olan filtre kağıdı tekniği ile ölçülen emme basıncı değerleri kullanılmıştır.

4.3.2. Toplam Emme Basıncına Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlık, Başlangıç Su Muhtevası ve Plastisite İndisinin Etkisi

4.3.2.1. Emme Basıncı – Kuru Birim Hacim Ağırlık İlişkisi

Şekil 4.21. de Numune 1 için filtre kağıdı yöntemiyle belirlenen toplam emme basıncı değerleri ile kuru birim hacim ağırlıklar arasındaki ilişki görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, kuru birim hacim ağırlığın emme basıncı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Agus ve Schanz (2005) da çalışmalarında, toplam emmenin, başlangıç koşulları dikkate alındığında, numunenin sadece su muhtevasından etkilendiğini ve kuru birim hacim ağırlığın toplam emme üzerinde açık bir etkisinin gözlenmediğini ifade etmişlerdir.

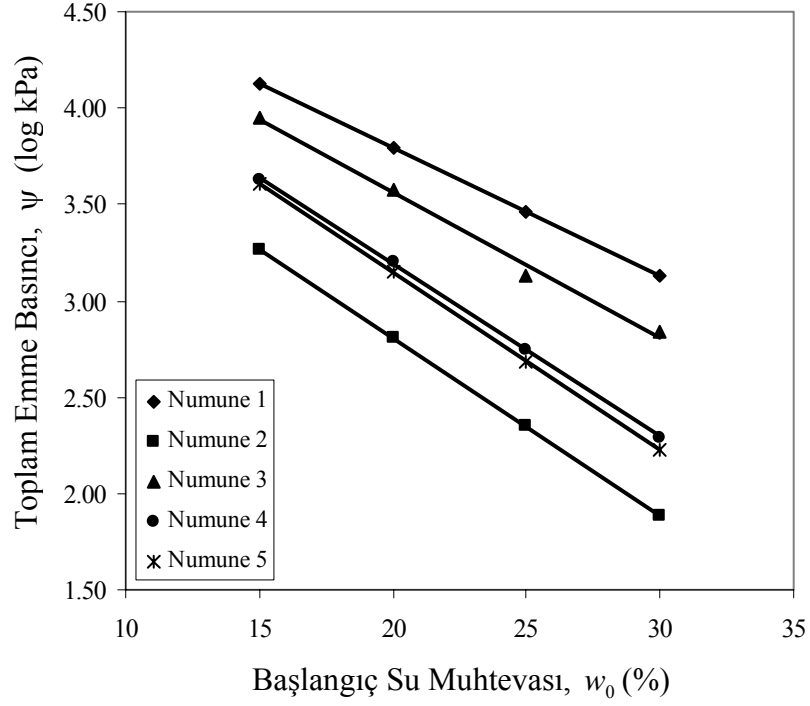
Diğer numuneler için de aynı durum söz konusu olduğu için burada sadece Numune 1 üzerinde yapılan deneylerin sonuçları örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.21. Numune 1 için toplam emme basıncı değerleri ile kuru birim hacim ağırlıklar arasındaki ilişki

4.3.2.2. Emme Basıncı – Su Muhtevası İlişkisi

Toplam emme basıncı değerleri ile numunelerin başlangıç su muhtevalarının arasında logaritmik bir ilişki bulunmaktadır. Aynı kuru birim hacim ağırlığa sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin su muhtevaları arttıkça emme basıncı değerleri azalmaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değerlerinin toplam emme basıncı üzerinde etkisinin olmaması nedeniyle, bu ilişki bir numune için sabit bir ilişkidir ve daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi bu ilişkiye zemin su karakteristik ilişkisi adı verilmektedir. Şekil 4.22.' de incelenen zeminler için elde edilen toplam emme basıncı – su muhtevası ilişkileri görülmektedir. Kuru birim hacim ağırlığın toplam emme basıncı üzerinde etkisinin olmaması nedeniyle, tüm bu ilişkilerde sadece kuru birim hacim ağırlığın 1.40 gr/cm³ olduğu durumdaki değerler dikkate alınmıştır. Tez çalışmasında incelenen tüm zeminler için elde edilen toplam emme basıncı – su muhtevası ilişkileri ve determinasyon katsayıları Çizelge 4.10.' da verilmiştir.



Şekil 4.22. Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığın 1.40 gr/cm^3 olması durumunda toplam emme basıncı – başlangıç su muhtevası ilişkisi

Çizelge 4.10. Toplam emme basıncı – başlangıç su muhtevası ilişkileri

Numune	Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (gr/cm^3)	İlişki	Determinasyon Katsayısı, R^2 (%)
N 1	1.25	$\Psi = -0.0667 w_0 + 5.1263$	1
	1.30	$\Psi = -0.0663 w_0 + 5.1178$	0.9999
	1.35	$\Psi = -0.0668 w_0 + 5.1274$	0.9998
	1.40	$\Psi = -0.0663 w_0 + 5.1184$	1
N 2	1.25	$\Psi = -0.0963 w_0 + 4.7227$	0.9989
	1.30	$\Psi = -0.0944 w_0 + 4.6861$	1
	1.35	$\Psi = -0.1007 w_0 + 4.8062$	0.9968
	1.40	$\Psi = -0.0920 w_0 + 4.6477$	1
N 3	1.25	$\Psi = -0.0778 w_0 + 5.1149$	0.9975
	1.30	$\Psi = -0.0756 w_0 + 5.0787$	0.9961
	1.35	$\Psi = -0.0765 w_0 + 5.0937$	0.9966
	1.40	$\Psi = -0.0754 w_0 + 5.0720$	0.9933
N 4	1.25	$\Psi = -0.0967 w_0 + 5.0640$	0.9647
	1.30	$\Psi = -0.0909 w_0 + 5.0023$	0.9998
	1.35	$\Psi = -0.0929 w_0 + 5.0468$	0.9996
	1.40	$\Psi = -0.0893 w_0 + 4.9757$	0.9998
N 5	1.25	$\Psi = -0.0914 w_0 + 4.9554$	0.9976
	1.30	$\Psi = -0.0952 w_0 + 5.0328$	0.9994
	1.35	$\Psi = -0.0990 w_0 + 5.1004$	0.9996
	1.40	$\Psi = -0.0917 w_0 + 4.9799$	1

Ψ - emme basıncı (log kPa), w_0 - Başlangıç su muhtevası (%)

Çizelge 4.10.' da incelenen her bir numune için, aynı kuru birim hacim ağırlıkta ve $w_0 = \%15, 20, 25$ ve 30 olmak üzere dört farklı su muhtevasında; su muhtevaları değerlerindeki değişime bağlı olarak, emme basıncı – su muhtevası arasında yapılan analizlerden elde edilen eğrilerin denklemleri ve bu denklemlere ait determinasyon katsayıları verilmiştir. İncelenen zemin numuneleri için determinasyon katsayılarının bazıları 1 , diğerlerinin ise 1 ' e çok yakın olduğu çizelgeden görülmektedir.

Kuru birim hacim ağırlığın emme basıncı üzerinde etkisi olmamasına rağmen Çizelge 4.10.' daki a ve b katsayılarının değişmesi yanıltıcı şekilde, bir etkinin olduğu düşüncesini ortaya çıkabilir. Ancak, a ve b katsayıları birlikte dikkate alındığında önemli bir etkinin olmadığı görülecektir. Örneğin, Çizelge 4.11. de Numune 1 için elde edilen ilişkiler değerlendirilmiştir.

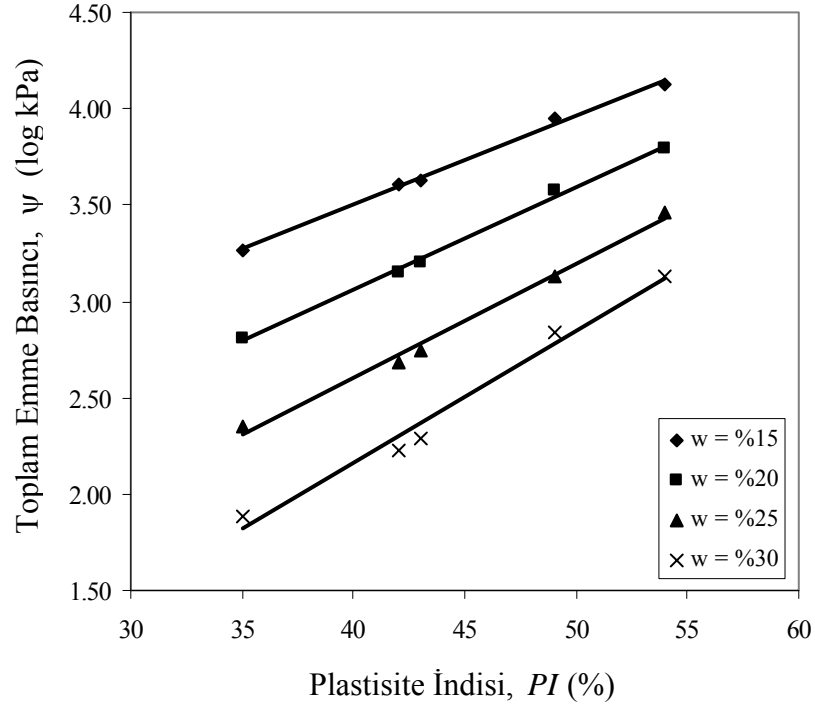
Çizelge 4.11. Numune 1 için elde edilen ilişkilerin nümerik olarak ifadesi

Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (gr/cm ³)	İlişki	Başlangıç su muhtevası, w_0 (%)	Emme basıncı Ψ (log kPa)
1.25	$\Psi = -0.0667 w_0 + 5.1263$	25	3.46
1.30	$\Psi = -0.0663 w_0 + 5.1178$	25	3.46
1.35	$\Psi = -0.0668 w_0 + 5.1274$	25	3.46
1.40	$\Psi = -0.0663 w_0 + 5.1184$	25	3.46

Ψ - emme basıncı (log kPa), w_0 - Başlangıç su muhtevası (%)

4.3.2.3. Emme Basıncı –Plastisite İndisi İlişkisi

Toplam emme basıncı ile plastisite indisi arasındaki ilişkilerin su muhtevalarına bağlı olarak değişimi Şekil 4.23. te görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi emme basıncı ve plastisite indisi arasında logaritmik bir ilişki mevcuttur. Tüm kuru birim hacim ağırlıklar için benzer ilişkiler söz konusu olduğundan, Şekil 4.23.'de örnek olarak sadece kuru birim hacim ağırlığın 1.40 gr/cm^3 değeri için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tüm kuru birim hacim ağırlık değerleri için elde edilen ilişkiler ayrıca Çizelge 4.12.'de eşitlik olarak verilmiştir.



Şekil 4.23. Tüm numuneler için kuru birim hacim ağırlığının 1.40 gr/cm^3 olması durumunda toplam emme basıncı - plastisite indisi ilişkisi

Şekil 4.23.' ten de görüldüğü gibi incelenen zeminler için, plastisite indisi değerleri arttıkça emme basıncı değerleri artmaktadır.

Çizelge 4.12. Toplam emme basıncı – plastisite indisi ilişkileri

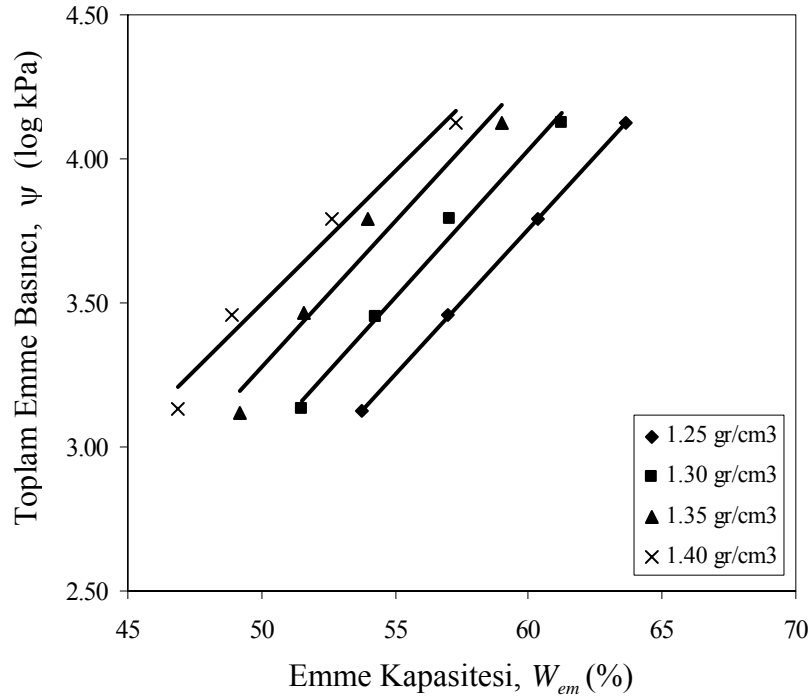
Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (gr/cm^3)	Başlangıç su muhtevası w_0 (%)	İlişki	Determinasyon Katsayısı, R^2 (%)
$\gamma_k = 1.25 \text{ gr/cm}^3$	15	$\Psi = 0.0460 PI + 1.6587$	0.9956
	20	$\Psi = 0.0538 PI + 0.8991$	0.9937
	25	$\Psi = 0.0624 PI + 0.0269$	0.9111
	30	$\Psi = 0.0709 PI - 0.7159$	0.9898
$\gamma_k = 1.30 \text{ gr/cm}^3$	15	$\Psi = 0.0460 PI + 1.6614$	0.9959
	20	$\Psi = 0.0537 PI + 0.9049$	0.9948
	25	$\Psi = 0.0605 PI + 0.1679$	0.9932
	30	$\Psi = 0.0711 PI - 0.7201$	0.9746
$\gamma_k = 1.35 \text{ gr/cm}^3$	15	$\Psi = 0.0460 PI + 1.6675$	0.9960
	20	$\Psi = 0.0525 PI + 0.9633$	0.9938
	25	$\Psi = 0.0619 PI + 0.0919$	0.9851
	30	$\Psi = 0.0754 PI - 0.9480$	0.9846
$\gamma_k = 1.40 \text{ gr/cm}^3$	15	$\Psi = 0.0459 PI + 1.6671$	0.9958
	20	$\Psi = 0.0533 PI + 0.9287$	0.9956
	25	$\Psi = 0.0592 PI + 0.2313$	0.9932
	30	$\Psi = 0.0686 PI - 0.5840$	0.9808

Ψ - emme basıncı (log kPa), PI - Plastisite indisi (%)

Çizelge 4.12.’ de su muhtevalarına bağlı olarak, toplam emme basıncı ile plastisite indisi arasındaki ilişkilerin değişiminden hareketle, emme basıncı – plastisite indisi arasında yapılan analizlerden elde edilen eğrilerin denklemleri ve bu denklemlere ait determinasyon katsayıları verilmiştir. İncelenen zemin numuneleri için determinasyon katsayılarının 1’ e çok yakın olduğu görülmektedir.

4.4. Emme Kapasitesi ve Toplam Emme Basıncı Arasındaki İlişki

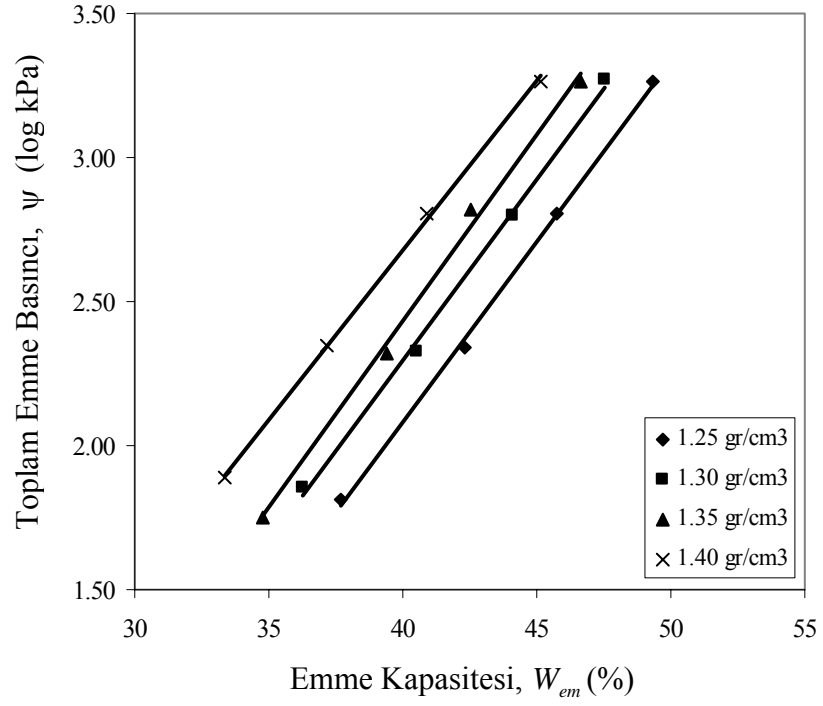
Şekil 4.24.’ de Numune 1 için deneysel çalışmalardan emme kapasitesi değerleri ile toplam emme basınçları arasındaki ilişki verilmiştir.



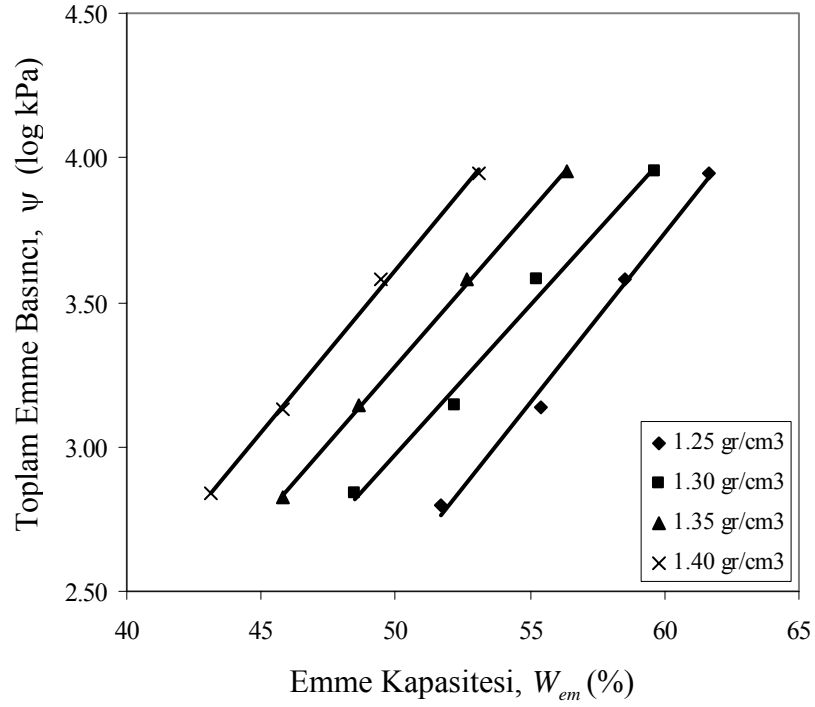
Şekil 4.24. Numune 1 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki

Her ne kadar toplam emme basıncı ile kuru birim hacim ağırlık arasında bir ilişki bulunmasa da, daha önce de bahsedildiği gibi emme kapasitesi kuru birim hacim ağırlığa önemli ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, emme kapasitesi ve toplam emme basıncı arasındaki ilişki incelenirken kuru birim hacim ağırlık değerlerinin dikkate alınması gereklidir. Şekil 4.24.’ den görüleceği üzere emme kapasitesi ve toplam emme basıncı arasındaki ilişki, kuru birim hacim ağırlık değerine bağlı olarak değişmektedir. Numune 2, 3, 4 ve 5 için bu ilişkiler, sırasıyla Şekil 4.25., 4.26., 4.27.

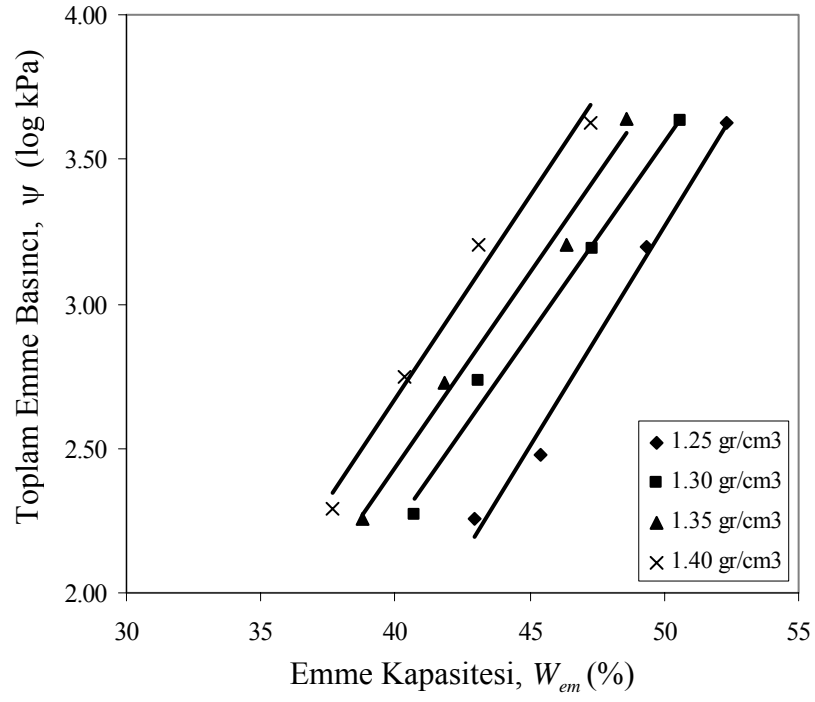
ve 4.28. da verilmiştir. Bu ilişkilerin denklemleri ve determinasyon katsayıları Çizelge 4.13. de görülmektedir.



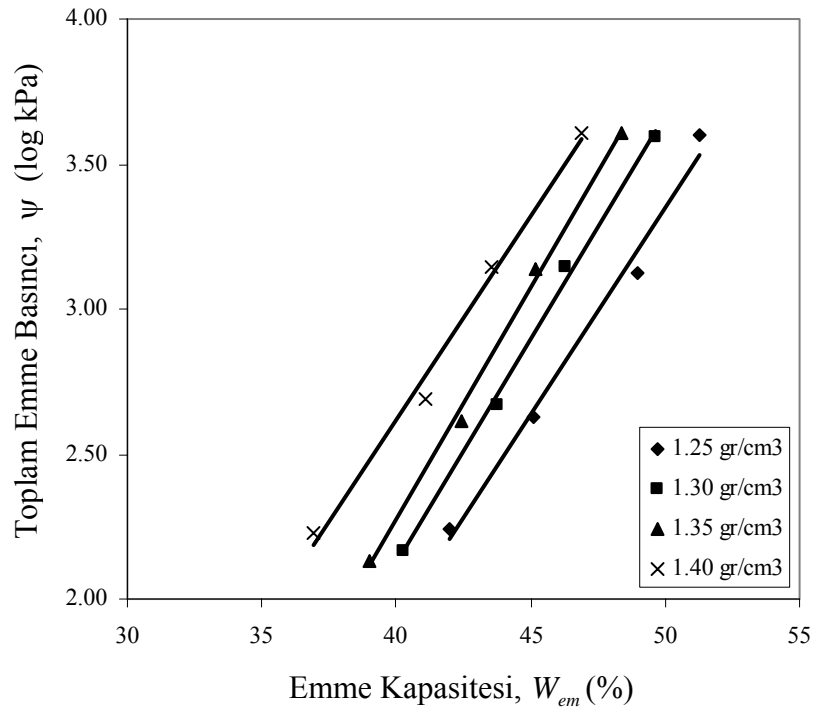
Şekil 4.25. Numune 2 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki



Şekil 4.26. Numune 3 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki



Şekil 4.27. Numune 4 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki



Şekil 4.28. Numune 5 için toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişki

Şekil 4.24., 4.25., 4.26., 4.27. ve 4.28.' den de görüldüğü gibi emme kapasitesi ve toplam emme basıncı arasında logaritmik bir ilişki vardır. Zeminin emme kapasitesinin artmasıyla emme basıncı da artmaktadır.

Çizelge 4.13.' de kuru birim hacim ağırlığa bağlı olarak, toplam emme basıncı ile emme kapasitesi arasındaki ilişkilerden faydalanarak, emme basıncı – emme kapasitesi arasında yapılan analizlerden elde edilen eğrilerin denklemleri ve bu denklemlere ait determinasyon katsayıları verilmiştir. İncelenen zemin numuneleri için determinasyon katsayılarının 1' e yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.13. Toplam emme basıncı – Emme kapasitesi ilişkileri

Numune	Kuru birim hacim ağırlık, γ_k (gr/cm ³)	İlişki	Determinasyon Katsayısı, R ² (%)
N 1	1.25	$\Psi = 0.1015 W_{em} - 2.3332$	0.9998
	1.30	$\Psi = 0.1025 W_{em} - 2.1172$	0.9899
	1.35	$\Psi = 0.1011 W_{em} - 1.7742$	0.9626
	1.40	$\Psi = 0.0923 W_{em} - 1.1170$	0.9725
N 2	1.25	$\Psi = 0.1255 W_{em} - 2.9377$	0.9985
	1.30	$\Psi = 0.1259 W_{em} - 2.7378$	0.9973
	1.35	$\Psi = 0.1300 W_{em} - 2.7675$	0.9955
	1.40	$\Psi = 0.1177 W_{em} - 2.0318$	0.9993
N 3	1.25	$\Psi = 0.1174 W_{em} - 3.3093$	0.9919
	1.30	$\Psi = 0.1031 W_{em} - 2.1799$	0.9890
	1.35	$\Psi = 0.1071 W_{em} - 2.0770$	0.9994
	1.40	$\Psi = 0.1120 W_{em} - 1.9890$	0.9986
N 4	1.25	$\Psi = 0.1520 W_{em} - 4.3332$	0.9881
	1.30	$\Psi = 0.1323 W_{em} - 3.0563$	0.9895
	1.35	$\Psi = 0.1355 W_{em} - 2.9879$	0.9885
	1.40	$\Psi = 0.1387 W_{em} - 2.8717$	0.9829
N 5	1.25	$\Psi = 0.1432 W_{em} - 3.8058$	0.9879
	1.30	$\Psi = 0.1549 W_{em} - 4.0781$	0.9967
	1.35	$\Psi = 0.1607 W_{em} - 4.1567$	0.9972
	1.40	$\Psi = 0.1407 W_{em} - 3.0098$	0.9912

Ψ - emme basıncı (log kPa), W_{em} – Emme kapasitesi (%)

4.5. Emme Basıncının Zemin Özelliklerine Göre Tahmin Edilmesi

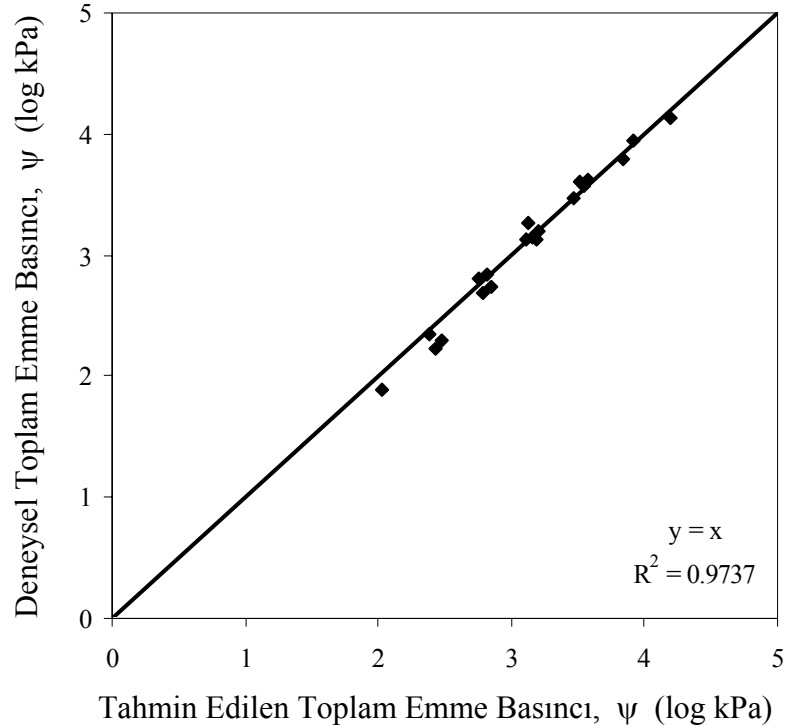
4.5.1. Emme Basıncının Plastisite İndisi ve Başlangıç Su Muhtevasına Bağlı Olarak Tahmini

Çalışmada elde edilen deneysel veriler kullanılarak yapılan regresyon analizleri sonucunda, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine bağlı olarak emme basıncının tahmin edilebilmesi için Eşitlik 4.2. de verilen ilişki elde edilmiştir. Bu ilişkiden elde edilen emme basıncı değerleri ve filtre kağıdı yöntemiyle deneysel olarak belirlenen emme basıncı değerleri Şekil 4.29.'da karşılaştırılmıştır.

$$\Psi = 0.056762 \cdot PI - 0.07295 \cdot w + 2.227142 \quad (4.2)$$

Burada,

- Ψ - Toplam emme basıncı (log kPa),
- PI - Plastisite indisi (%),
- w - Su muhtevasıdır (%).



Şekil 4.29. Deneysel emme basıncı değerleriyle tahmin edilen emme basıncı değerlerinin karşılaştırılması

İncelenen zeminler için emme basıncı; plastisite indisi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak bağlı olarak, eşitlik 4.2. yardımıyla tahmin edilmiş ve tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.97 olarak belirlenmiştir.

4.5.2. Emme Basıncının Emme Kapasitesi, Plastisite İndisi ve Başlangıç Su Muhtevasına Bağlı Olarak Tahmini

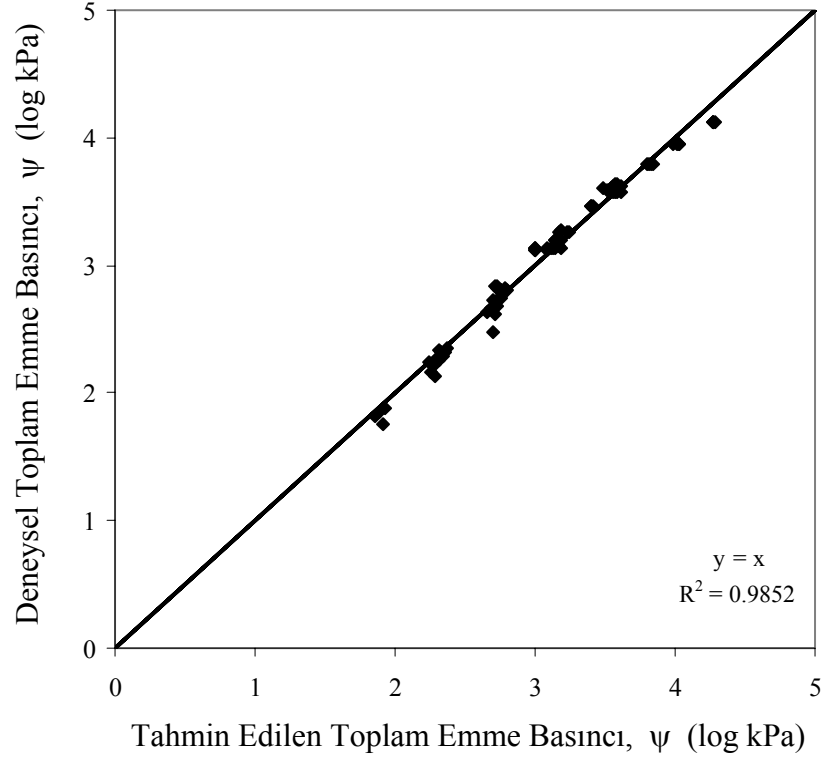
Çalışmada kullanılan zemin numunelerinden elde edilen deneysel veriler kullanılarak yapılan regresyon analizleri sonucunda, emme basıncının; emme kapasitesi, plastisite indisi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak tahmin edilebilmesi için Eşitlik 4.3.' te verilen ilişki elde edilmiştir. Bu ilişkiden elde edilen emme basıncı değerleri ile filtre kağıdı yöntemiyle deneysel olarak belirlenen emme basıncı değerleri Şekil 4.30.'da karşılaştırılmıştır.

$$\Psi = 0.037833 \cdot PI + 1.249029 \cdot \gamma_k - 0.06719 \cdot w + 0.026232 \cdot w_{em} \quad (4.3)$$

Burada,

- Ψ - Toplam emme basıncı (log kPa),
- PI - Plastisite indisi (%),
- γ_k - Kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3),
- w - Su muhtevası (%),
- w_{em} - Emme kapasitesidir (%).

İncelenen zeminler için emme basıncı; emme kapasitesi, plastisite indisi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak, eşitlik 4.3. yardımıyla tahmin edilmiş ve tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.99 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.30. Filtre kağıdı tekniği ile ölçülen emme basıncı değerleri ile tahmin elden emme basıncı değerlerinin karşılaştırılması

Emme basıncı kuru birim hacim ağırlıktan bağımsız olduğu halde emme kapasitesinin kuru birim hacim ağırlığa bağlı bir parametre olması nedeniyle, bu analizin yapılmasında kuru birim hacim ağırlıkların da dikkate alınması gerekmiştir. Eşitlik 4.3' te görülen kuru birim hacim ağırlık terimi, emme kapasitesi üzerindeki etkisi nedeniyle denkleme girmektedir.

Çalışmada kullanılan zeminler için emme basıncı; sadece başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine bağlı olarak tahmin edildiğinde, ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.97 iken analizlere emme kapasitesinin de dahil edilmesiyle ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.99' a çıkmaktadır. Yani emme basıncının belirlenmesinde, emme kapasitesinin analizlere dahil edilmesi halinde tahmin edilen değerler, deneylerden elde edilen sonuçlara daha çok yaklaşmaktadır. Bu durum, deney yapılmaksızın emme basıncının tahmin edilmesi gereken durumlarda, emme kapasitesinin de ilişkiye dahil edilmesinin önemini göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Zeminin emme basıncındaki değişim, zemindeki gerilme durumunun değişmesine neden olmaktadır. Zemin gerilmelerindeki değişim ise zeminlerin kayma mukavemetini, taşıma gücünü, hacimsel deformasyonunu, yanal toprak basınçlarını ve şev stabilitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Doygun olmayan zeminlerde, emme davranışının araştırılması ve doğru olarak belirlenmesi, emmeden dolayı meydana gelebilecek zararların büyük oranda önlenmesini sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında doygun olmayan zeminlerin mühendislik davranışları üzerinde önemli etkileri olan emme basıncı ile yine doygun olmayan zeminlerin mühendislik davranışlarını açıklamada kullanılan emme kapasitesi arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu amaçla farklı plastisite indislerine sahip 5 farklı zemin örneği kullanılmıştır.

Kıvam limitleri, dane boyutu dağılımı, dane birim hacim ağırlığı, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası gibi temel mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için, standart zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır.

Emme basıncının belirlenmesi amacıyla kullanılan zemin numuneleri; dört farklı başlangıç su muhtevası ve dört farklı kuru birim hacim ağırlık koşullarında dinamik olarak sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bu sayede, zeminlerin başlangıç su muhtevası ve başlangıç kuru birim hacim ağırlıklarının emme basıncı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Emme basınçlarının belirlenmesinde filtre kağıdı ve thermocouple (ısı çift) saykrometre tekniği kullanılmıştır.

Emme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla çalışmada kullanılan zemin numuneleri de; emme basıncının belirlenmesi için kullanılanlarla aynı başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık koşullarında dinamik kompaksiyonla hazırlanmıştır. Bu sayede, aynı başlangıç koşullarının emme kapasitesi üzerindeki etkileri de

incelenmiştir. Emme kapasitesinin belirlenmesi için ödometre deney ekipmanı kullanılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar ile modelleme çalışmaları yapılarak; emme kapasitesinin başlangıç su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisine bağlı olarak, emme basıncının plastisite indisi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak ve yine emme basıncının emme kapasitesi, plastisite indisi ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak tahmini için regresyon analizleri yapılmış; deneysel sonuçlarla analiz çalışmalarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu bölümde maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Çalışmada kullanılan zemin numuneleri, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre sınıflandırılmıştır. Buna göre, tüm numuneler yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girmektedir.
2. Aynı kuru birim hacim ağırlığa sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin su muhtevaları arttıkça emme basıncı ve emme kapasitesi değerleri azalmaktadır. Killi zeminler için, emme basıncı – su muhtevası ilişkisinin logaritmik, emme kapasitesi – su muhtevası ilişkisinin ise doğrusal olduğu tespit edilmiştir.
3. Killi zeminler için emme basıncı değerlerinin, aynı su muhtevasına sahip olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerinin kuru birim hacim ağırlık değişimlerinden önemli derecede etkilenmediği görülmüştür. Ancak emme kapasitesi kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki değişimlerden etkilenmektedir. Aynı su muhtevasında kuru birim hacim ağırlık değerleri arttıkça emme kapasitesi azalmaktadır. Emme kapasitesi – kuru birim hacim ağırlık ilişkisinin doğrusal olduğu tespit edilmiştir.
4. Killi zeminlerin, plastisite indisi değerleri arttıkça emme basıncı ve emme kapasitesi değerleri artmaktadır. Emme basıncı – plastisite indisi ilişkisinin logaritmik, emme kapasitesi – plastisite indisi ilişkisinin ise üstel olduğu tespit edilmiştir.

5. Aynı başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık koşullarında filtre kağıdı ve saykrometre teknikleriyle bulunan emme basıncı değerlerinin su muhtevalarıyla değişimleri karşılaştırılmıştır. Özellikle düşük emme basıncı değerlerinde (yüksek su muhtevalarında) saykrometre tekniği ile ölçülen emme basıncı değerlerinde büyük saçılmalar görülmektedir. Bu saçılmalar kuru birim hacim ağırlığın emme basıncı üzerindeki etkisinden değil saykrometre tekniği ile yapılan ölçümlerin tekrarlanabilirlik özelliğinin zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumun temel nedenleri sensörden sensöre ölçüm hassasiyetinin değişebilmesi, ölçüm aletinin (mikrovoltmetre) doğruluğu ve düşük emme basıncı değerlerinin ölçülmesi sırasında ortam sıcaklığındaki çok küçük değişikliklerin okumaları önemli ölçüde etkileyebilmesidir. Bu nedenle çalışmadaki regresyon analizlerinde, zeminlerin emme basıncına etki eden faktörlerin incelenmesinde ve emme basıncı ile emme kapasitesi parametrelerinin ilişkilendirilmesinde, daha kararlı bir ölçüm yöntemi olan filtre kağıdı tekniği ile ölçülen emme basıncı değerleri kullanılmıştır.
6. İncelenen zeminler için, emme kapasitesi; başlangıç su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla regresyon analizleri yapılmış, emme kapasitesinin; başlangıç su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilmesi için bir model oluşturulmuştur. Bu modelden elde edilen Eşitlik 5.1 kullanılarak emme kapasitesi tahmin edilmiş ve tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.95 olarak belirlenmiştir.

$$w_{em} = (-0.65644 \cdot w + 37.94444) \cdot \left(e^{(0.0003 \cdot w - 0.0155 \cdot \gamma_k + 0.03) \cdot PI} \right) \quad (5.1)$$

Burada,

- w_{em} - Emme kapasitesi (%),
 w - Su muhtevası (%),
 γ_k - Kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3),
 PI - Plastisite indisidir (%).

7. İncelenen zeminler için, emme basıncı; başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla regresyon analizleri yapılmış, emme basıncının; başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilmesi için bir model oluşturulmuştur. Bu modelden elde edilen Eşitlik 5.2 kullanılarak emme basıncı tahmin edilmiş ve tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.97 olarak belirlenmiştir.

$$\Psi = 0.056762 \cdot PI - 0.07295 \cdot w + 2.227142 \quad (5.2)$$

Burada,

- Ψ - Toplam emme basıncı (log kPa),
 PI - Plastisite indisi (%),
 w - Su muhtevasıdır (%).

8. İncelenen zeminler için, emme basıncı; emme kapasitesi, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla regresyon analizleri yapılmış, emme basıncının; emme kapasitesi, başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilmesi için bir model oluşturulmuştur. Ancak, emme basıncı kuru birim hacim ağırlıktan bağımsız olduğu halde emme kapasitesinin kuru birim hacim ağırlığa bağlı bir parametre olması nedeniyle, bu analizin yapılmasında kuru birim hacim ağırlıkların da dikkate alınması gerekmiştir. Eşitlik 5.3' te görülen kuru birim hacim ağırlık terimi, emme kapasitesi üzerindeki etkisi nedeniyle denkleme girmektedir. Eşitlik 5.3 kullanılarak emme basıncı tahmin edilmiş ve tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.99 olarak belirlenmiştir.

$$\Psi = 0.037833 \cdot PI + 1.249029 \cdot \gamma_k - 0.06719 \cdot w + 0.026232 \cdot w_{em} \quad (5.3)$$

Burada,

- Ψ - Toplam emme basıncı (log kPa),
 PI - Plastisite indisi (%),
 γ_k - Kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3),
 w - Su muhtevası (%),
 w_{em} - Emme kapasitesidir (%).

9. İncelenen zeminler için emme basıncı; sadece başlangıç su muhtevası ve plastisite indisine bağılı olarak tahmin edildiğinde, ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.97 iken analizlere emme kapasitesinin de dahil edilmesiyle ilişkinin determinasyon katsayısı yaklaşık 0.99' a çıkmaktadır. Bu durum, deney yapılmaksızın emme basıncının tahmin edilmesi gereken durumlarda, emme kapasitesinin de ilişkiye dahil edilmesinin önemini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Agus, S.S., Leong, E.C., and Rahardjo, H., 2001. Soil-water characteristic curve of Singapore residual soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 285-309.
- Agus, S.S., Leong, E.C., and Rahardjo, R., 2003. A flexible wall permeameter for measurements of water and air coefficients of permeability of residual soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 559-574.
- Agus, S.S., Shanz, T., 2005. Comparison of Four Methods for Measuring Total Suction, *Vadose Zone Journal*, 4, 1087-1095.
- Albrecht, B.A., Benson, C.H. and Beuermann, S., 2003. Polymer capacitance sensors for measuring gas humidity in drier soils, *Geotechnical Testing Journal*, 26(1), 3-11.
- Al-Khafaf, S. and Hanks, R.J., 1974. Evaluation of the filter paper method for estimating soil-water potential, *Soil Science*, 117(4): 194-199.
- Andraski, B.J., Scanlon, B.R., 2002. Thermocouple Psychrometry, *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, SSSA Book Series 5, 1692 p.
- ASTM D 5298-92, 1992. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, American Society of Testing and Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 1312 – 131.
- Aung, K.K., Rahardjo, H., Leong, E.C., and Toll, D.G., 2001. Relationship between porosimetry measurement and soil-water characteristic curve for an unsaturated residual soil, technical note, *Geotechnical and Geological Engineering* 19, 401-416.
- Biscontin, G., 2007. CVEN365 Introduction to Geotechnical Engineering, Laboratory Manual, Texas A&M University.
- Bloodworth, M.E. and Page, J.B., 1975. Use of thermistors for the measurement of soil moisture and temperature. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21, 11–15.
- Bocking, K.A. and Fredlund, D.G., 1980. Limitations of the axis-translation technique, *Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, CO, 117-135.
- Bonito, M.D., 2005. Trace elements in soil pore water: A comparison of sampling methods, Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of philosophy, Nottingham.

- Briggs, L.J., and Melane, J.W., 1907. The moisture equivalents of soils, U.S. Department of Agriculture, Bureau of Soils Bulletin No. 45.
- Brown, B.J., Goldsmith, P.R., Shorten, J.P.M., Henderson, L., 2003. Soil expansivity in the Auckland region, Study report, No.120, Branz.
- Bulut, R., Park, S.W., Lytton, R.L., 2000. A new matric suction calibration curve, Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore, 263-268.
- Bulut, R., Park, S.W., Lytton, R.L., 2000. Comparison of total suction values from psychrometer and filter paper methods, Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore, 269-273.
- Bulut, R., 2001. Finite element method analysis of slabs on elastic half space expansive soil foundations, submitted to the office of graduate studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Texas, USA.
- Bulut, R., Lytton, R.L., Wray, W.K., 2001. Soil Suction Measurements by Filter Paper, in Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations, Geotechnical Special Publication No.115, ASCE, 243-261.
- Bulut, R. and Leong, E.C. 2005 .State-of-the-Art Report on Indirect Measurement of Soil Suction, International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Trento, Italy. [www.experus2005.ing.unitn.it/2_Bulut_Leong .pdf](http://www.experus2005.ing.unitn.it/2_Bulut_Leong.pdf)
- Campbell, G.S., 1988. Soil water potential measurement: An overview, Irrigation Science, Vol.9, 265-273.
- Cassell, D.K. and Klute A., 1986. Water Potential: Tensiometry, in Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Chandler, R.J. and Gutierrez, C.I., 1986. The filter paper method of suction measurement. Geotechnique, 36: 265-268.
- Charlesworth, P., 2000. Soil water monitoring, Irrigation insights number one, http://www.lwa.gov.au/downloads/publications_pdf/pr000236.pdf
- Chen, F. H., 1988. Foundation Expansive Soils, 2nd ed. New York, Elsevier Scientific Pub. Co., 280p.
- Çokça, E., 2002. Relationship between Methylene Blue Value, Initial Soil Suction and Swell Percent of Expansive Soils, Turkish J. Eng. Env. Sci. 26, 521-529.

- Daniel, D.E., Hamilton, J.M. and Olson, R.E., 1981. Suitability of thermocouple psychrometers for studying moisture movement in unsaturated soils, *Permeability and Groundwater Containment Transport*, ASTM STP 746, T.F. Zimmie and C.O. Riggs, Eds., American Society for Testing and Materials, 84-100.
- Deka, R.N., Wairiu, M., Mtakwa, P.W., Mullins, C.E., Veenendaal, E.M., and Townend, J., 1995. Use and accuracy of the filter-paper technique for measurement of soil matric potential, *European Journal of Science*, 46: 233-238.
- Dela, B.F., 2001. Measurement of soil moisture using gypsum blocks, Danish building and urban research, *By og byg documentation 004*, 29s.
- Drnevich, V.P., Yu, X., Lovell, J., 2003. Beta testing implementation of the purdue time domain reflectometry (tdr) method for soil water content and density measurement, Final report, FHWA/IN/JTRP-SPR-2489, Purdue University, West Lafayette, Indiana. 255p.
- Edil, T.B. and Motan, S.E., 1984. Laboratory Evaluation of Soil Suction Components, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 7 (4), 173-181.
- Edlefsen, N.E. and Anderson A.B.C., 1943. Thermodynamics of soil moisture, *Hilgardia*, Vol.15, 31-298.
- Essert, S., Hopmans, J.W., 1998. Combined tensiometer–solution sampling probe, *Soil & Tillage Research*, 45, 299–309.
- Fredlund, D.G., 1989. Soil Suction Monitoring for Roads and Airfields, Symposium on the State of the Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields, sponsored by the U.S. Army Corps of Engineers (Hanover, NH), March 6-9 1989.
- Fredlund, D.G., 1991. How negative can Pore-Water Pressure Get?, *Geotechnical News*, vol 9, no. 3, Canadian Geotechnical Society, September 1991, 44-46.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics for unsaturated soils*, John Willey & Sons, New York, 517p.
- Fredlund, D.G., Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
- Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (3), 533-546.

- Fredlund, D.G., Gan, J.K.M. and Gallen, P., 1995. Suction measurements on compacted till specimens and indirect filter paper calibration technique, Transportation Research Board, Record (1481) 3-9.
- Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D. and Barbour, S.L., 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, 33 (3), 440-448.
- Fredlund, D.G., Shuai, F. & Feng, M., 2000. Use of a new thermal conductivity sensor for laboratory suction measurement, Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore, 275-280.
- Gan, J.K.M. and Fredlund, D.G., 1988. Multistage direct shear testing of unsaturated soils. Geotechnical Testing Journal, 11(2): 132-138.
- Gardner, R.A., 1937. The method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range, Soil Science, 43, 277-283.
- Goodwin, I., 1995. Irrigation of Vineyards, Institute of Sustainable Irrigated Agriculture, Tatura, Victoria, Australia.
- Goodwin, I., 2000. How to use tensiometers, Agriculture notes, State of Victoria, Department of Primary Industries, SAG 0298 ISSN 1329-8062.
- Gourley, C.S., Schreiner, H.D., 1995. Field measurement of soil suction, First International Conference on Unsaturated Soils, Paris.
- Göksan, T.S., 1998. Killi zeminlerde emme kapasitesi ve şişme basıncı ilişkisi, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Guan, Y., 1996. The Measurement of Soil Suction, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 331 p.
- Hamblin, A.P., 1981. Filter paper method for routine measurement of field water potential, Journal of Hydrology, 53: 355-360.
- Hamilton, J.M., Daniel, D.E. and Olson, R.E., 1981. Measurement of hydraulic conductivity of partially saturated soils, In Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM Special Technical Publication 746, 182-196.
- Harrison, B.A., Blight, G.E., 2000. A comparison of in-situ soil suction measurements, Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore, 281-285.
- Hassler, G.L., and Brunner, E., 1945. Measurement of capillary pressures in small core samples, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 160, 114-123.

- Hilf, J.W., 1956. An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph.D. Dissertation, Technical memo. No.654, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, Design and construction Div. Denver, CO, 654 pp.
- Hillel, D., 1971. Soil and Water: Physical Principles and Processes, Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Houston, S.L., Houston, W.N. & Wagner, A., 1994. Laboratory Filter Paper Suction Measurements, *Geotechnical Testing Journal*, 17 , 185-194.
- Ireson, A.M., Wheeler, H.S., Butler, A.P., Finch, J., Cooper, J.D., Wyatt, R.G. and Hewitt, E.J., 2005. field monitoring of matric potential and soil water content in the chalk unsaturated zone, *Advanced experimental unsaturated soil mechanics*, Balkema, The Netherlands. 511-518.
- Iyer, B., 1990. Pore water extraction-comparison of saturation extract and high-pressure squeezing, *Physico-chemical aspects of soil and related material*, ASTM, 159-170.
- Jiang, G., Wang, Z., Tan, G., Qiu, J.Y., 2000. Suction calibration curve of filter paper made in China, *Proc. Asian Conference on Unsaturated Soils*, Singapore, 293-296.
- Jones, D.E., Holtz, W.G., 1973. *Expansive Soils-The Hidden Disaster*, Civil Engineering-ASCE, 49-51.
- Jones, S.B. ve Or, D. 2001. Frequency-domain methods for extending TDR measurement range in saline soils, *Second international symposium and workshop on time domain reflectometry for innovative geotechnical application*, Infrastructure technology institute at Northwestern University, Evanston, IL, 2001, 140-148.
- Kang, J.B., Shin, B.W., Bang, S.T., 2002. Soil-water characteristics of unsaturated organic silty soils, *Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan, 26-31.
- Kargas, G. and Kerkides P., 2005. Hysteretic (S) Curve Prediction: Comparison of Two Models, *Transp Porous Med* 59: 97–113.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Göksan T.S., 1999. Sıkıştırılmış Killi Zeminlerde Su Emme Kapasitesinin ve Şişme Basınçlarının Tahmini İçin Bir Yöntem. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi*, Cilt 10 (2), 1925-1939.
- Khanzode, R.M., Vanapalli S.K., and Fredlund, D.G., 2002. Measurement of soil-water characteristic curves for fine-grained soils using a small-scale centrifuge, *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 1209-1217.

- Khoury C.N., 2004. Borehole shear test in unsaturated soil, a thesis submitted to the graduate college in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science (civil engineering), university of oklahoma graduate college, Norman, Oklahoma.
- Konukcu, F., Gowing, J.W. and Rose, D.A., 2002. Simple sensors to achieve fine spatial resolution in continuous measurements of soil moisture and salinity, *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(6), 1043–1051.
- Kosugi, K., 1994. The parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resource Research*, 30:891-901.
- Krahn, J. & Fredlund, D.G., 1972. On total, matric and osmotic suction, *Journal of Soil Science*, 114(5), 339-348.
- Klute, A., 1986. Water retention: Laboratory methods, *Methods of soil analysis, Part 1, Agronomy monograph No. 9, American society of agronomy-soil science of America*, second edition, Madison, Wisconsin, USA, 635-662.
- Kumbasar, V. ve Kip F., 1984. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği, Çağlayan Kitabevi., İstanbul, 350s.
- Lee, H.C., 1991. An Evaluation of Instruments to Measure Soil Moisture Condition, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Texas Tech University, Lubbock, TX.
- Lee, H.C. and Wray, W.K., 1995. Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil variable, *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, Paris*, 2, 615–621.
- Leong, E.C., Rahardjo, H., 1997. Review of soil-water characteristic curve equations, *Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering*, 1106-1117.
- Leong, E.C., He, L. and Rahardjo, H., 2002. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25 (3): 321-332.
- Leong, E.C., Tripathy, S., and Rahardjo, R., 2003. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique, *Geotechnique*, 53(2), 173-182.
- Li, A.G., Yue, Z.Q., Tham, L.G., Lee, C.F. and Law, K.T., 2005. Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope, *Canadian Geotechnical Journal*, 42: 13–26.

- Lin, C.P., 2001. Full waveform analysis of a non-uniform and dispersive TDR measurement system, Second international symposium and workshop on time domain reflectometry for innovative geotechnical application, Infrastructure technology institute at Northwestern University, Evanston, IL, 2001, 117-127.
- Long, X., 2006. Prediction of shear strength and vertical movement due to moisture diffusion through expansive soils. Submitted to the office of graduate studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Texas, USA.
- Loveday, J., 1974. Methods for Analysis of Irrigated Soils, Commonwealth Agricultural Bureaux, Victoria.
- Marinho, F.A.M., Take, W.A., Tarantino, A., 2005. State of the art on tensiometers and axis-translation technique, International Symposium, Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Trento.
- McKee, C., Bumb, A., 1987. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. SPEFormation Evaluation, (10):599-608.
- Mitarai, N. and Nori, Franco., 2006. Wet granular materials, Advances in Physics, Vol.55, Nos. 1-2, 1-45.
- Montanez, J.E.C., 2002. Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures, A thesis submitted to the University of London (Imperial College of Science, Technology and Medicine) in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering. London.
- Mun, B.J., 2004. Unsaturated soil behavior under monotonic and cyclic stress states, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Texas.
- Murray, E.J., 2002. An equation of state for unsaturated soils, Canadian Geotechnical Journal, 39, 125-140.
- Nelson J.D, Miller, D.J., 1992. Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Nguyen, Q., 2006. Long-term matric suction measurements in highway subgrades. Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science A Thesis in the Department of Civil Engineering University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

- Olson, R.E. & Langfelder, L.J., 1965. Pore-Water Pressure in Unsaturated Soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings American Society of Civil Engineers*, 91, 127-160.
- Önalp, A., 1997. *Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekanığı*, Sakarya Üniversitesi Yayın No.27., Sakarya, 438s.
- Peroni, N., 2002. Contributo allo studio delle proprietà idrauliche e della deformabilità di un terreno insaturo, PhD Thesis, Università degli Studi di Ancona, Italy.
- Peroni, N. and Tarantino, A., 2003. Measurement of osmotic suction using the squeezing technique, *Unsaturated Soils: Experimental Studies Proceedings of the International Conference, From Experimental Evidence towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils*, September 18–19, 2003 Volume I, Weimar, Germany, 159-168.
- Phene, C.J., Hoffman, G.J. and Rawlins, S.L., 1971. Measuring Soil Matric Potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body, I. Theory and sensor construction, *Soil Science Society of America Proceedings*, 35, 27-32.
- Proulx, S., 2001. Evaluation of the performance of soil moisture sensors in laboratory-scale lysimeters, A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, Department of Biosystems Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
- Rahardjo, H, and Leong, E.C. 2006 Suction measurements, *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils. Geotechnical Special Publication*, Arizona, 81-104.
- Rao, S.M., and Shivananda, P., 2005. Role of osmotic suction in swelling of saltamended clays, *Canadian Geotechnical Journal* 42, 307–315.
- Ren, L., Ma, J., and Zhang, R., 2003. Estimating nitrate leaching with a transfer function model incorporating net mineralization and uptake of nitrogen, *Vadose Zone Processes and Chemical Transport*, 1455-1463.
- Report on, 05-1412-058, 2006. Approaches and methods for evaluation of unsaturated zone contaminant transport processes and effects on groundwater, Hydrogeological assessment tools Project, Golder Associates Ltd, Burnaby, British Columbia, Canada. 59 p. Submitted to: Science advisory board for contaminated sites in British Columbia Department of Chemistry, University of Victoria, British Columbia, Canada.
- Richards, L.A. and Weaver L.R., 1944. Moisture retention by some irrigated soils as related to soil-moisture tension, *Journal of Agricultural Research*, 69, 215-235.

- Richards, L.A. and Ogata, G., 1958. A thermocouple for vapour pressure measurement in biological and soil systems at high humidity, *Science*, Vol. 128, 1089-1090.
- Richards, B.G., 1965. Measurement of the free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistors, in moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas, A symp, Australia, 39-46.
- Ridley, A.M., 1995. Discussion on "Laboratory filter paper suction measurements" by Houston et al, *Geotechnical Testing Journal*, 18(3): 391-396.
- Ridley, A.M. and Wray, W.K., 1996. Suction measurement: a review of current theory and practices, 1293-1322. In E.E. Alonso and Delage (ed.) *Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 95)*, Paris, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Ridley, A.M., Dineen, K., Burland, J.B. & Vaughan P.R., 2003. Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering, *Geotechnique* 53, No.2, 241–253.
- Rodriguez R., Candela, L. and Lloret, A., 2004. Experimental system for studying the hydromechanical behavior of porous media. *Vadose Zone Journal* , 4, 345-353.
- Romero, E., 1999. Characterisation and thermo-hydromechanical behaviour of unsaturated Boom Clay, an experimental study, PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Romero, E., 2005. Experimental techniques and equipment for testing unsaturated materials, Mechanical for unsaturated soils for engineering 'Marie Curie' research training network, School 'Fundamentals of unsaturated soils'.
- Russell, M.B., and Richards L.A., 1938. The determination of soil moisture energy relations by centrifugation, *Soil Science Society of America Proceedings*, 3, 65–69.
- Ruwaih, I.A., 1987. Experiences with expansive soils in Saudi Arabia, *Proceedings, 6th International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, India. Oxford & IBH Publishing, New Delhi, 317– 322.
- Said, R.A., AlShawawreh N.K., Mohamed A.M.O. 2001. A TDR system for subsurface pollutants detection (II): Application and analysis, *Second international symposium and workshop on time domain reflectometry for innovative geotechnical application, Infrastructure technology institute at Northwestern University, Evanston, IL*, 2001, 384-393.

- Saiyouri, N., Hicher P.Y., Tessier D., 2000. Microstructural approach and transfer water modelling in highly compacted unsaturated swelling clays, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 5, 41-60.
- Samingan, A.S., 2005. An experimental study on hydro-mechanical characteristics of compacted bentonite-sand mixtures. Dissertation as a requirement for the degree of Doktor – Ingenieur at the Faculty of Civil Engineering Bauhaus-University Weimar, Germany
- Scanlon, B. R., Andraski, B. J. and Bilskie, J. 2002. [Methods of soil analysis: Physical Methods: Miscellaneous methods for measuring matric or water potential" \(PDF\)](#), *Soil Science Society of America* 4, 643–670. ISBN 0-89118-810-X.
- Schanz, T., Agus, S.S. and Tscheschlok, G., 2004. Determination of hydro-mechanical properties of Trisoplast, Research Report Bo-015/03. Laboratory of Soil Mechanics, Bauhaus, University Weimar, Weimar, Germany.
- Shuai, F., Yazdani, J., Feng, M. and Fedlund, D.G., 1998. Supplemental report on the thermal conductivity matric suction sensor development (Year II). Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Sask.
- Siddiqui, S.I., and Drnevich, V.P., 1995. A new method of measuring density and moisture content of soil using the technique of time domain reflectometry, Report No.: FHWA/IN/JTRP-95/9, Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation, Purdue University, 271 p.
- Sillers, W.S., Fredlund, D.G., Zakerzadeh, N., 2001, Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 243-283.
- Singh, D.N., Sneha, J.K. and Madhuri, V., 2001. Application of a geotechnical centrifuge for estimation of unsaturated soil hydraulic conductivity, *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, 29(6), 556–562.
- Singh, D.N. and Sneha, J.K., 2002. Estimation of hydraulic conductivity of unsaturated soils using a geotechnical centrifuge, *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 684–694.
- Sivongxay, A., 2005. Hydraulic properties of Toowoomba soils for laundry water reuse, in fulfilment of the requirement of Courses ENG 4111 and 4112 Research Project towards the degree of Bachelor of Engineering (Environmental) University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying.
- Snethen, D.R. 1980. Characterization of Expansive Soils Using Soil Suction Data, 4th International Conference on Expansive Soils, 54-75.

- Spanner, D.C., 1951. The peltier effect and its use in the measurement of suction pressure, *J. Exp. Bot.*, Vol.11, 145-168.
- Sreedeeep, S. and Singh, D.N., 2006. Methodology for determination of osmotic suction of soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1469–1479.
- Take, W.A. & Bolton, M.D., 2002. A new device for the measurement of negative pore water pressures in centrifuge models, *International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 02*, 89–94.
- Tarantino, A. D., Toll, D., Ridley A.M., 2005. Field measurement of suction, water content, and water permeability, *International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Trento, Italy.
- Thakur, A.B., 2005. Determination of diffusion coefficient through laboratory tests and analytically validating it using empirical relations for unsaturated soils, Submitted to the office of graduate studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science, Texas.
- Thakur, V.K.S., Sreedeeep, S., and Singh D.N., 2006. Laboratory investigations on extremely high suction measurements for fine-grained soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 565–578
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry, *Water Resources Research*, 16, 574-582.
- Topp, G.C. and Ferre, P.A. (Ty) 2002. The soil solution phase: Water content, In *Methods of soil analysis part 4, Physical methods*, Dane, J.H., Topp, C.G., (eds), SSSA Book series No.5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 417-545.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan A.P., 2003. The early development of TDR for soil measurement, *Vadose Zone Journal*, 2, 492-499.
- Tremblay, M., 1996. Modelling of groundwater conditions in silts and fine sands, Report No.50, Swedish Geotechnical Institute, Linköping.
- Truong, H.V.P. and Holden, J.C., 1995 Soil suction measurement with transistor psychrometer, *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, 2, 659–664.
- U.S.D.A., 1950. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, *Agricultural Handbook No. 60*.

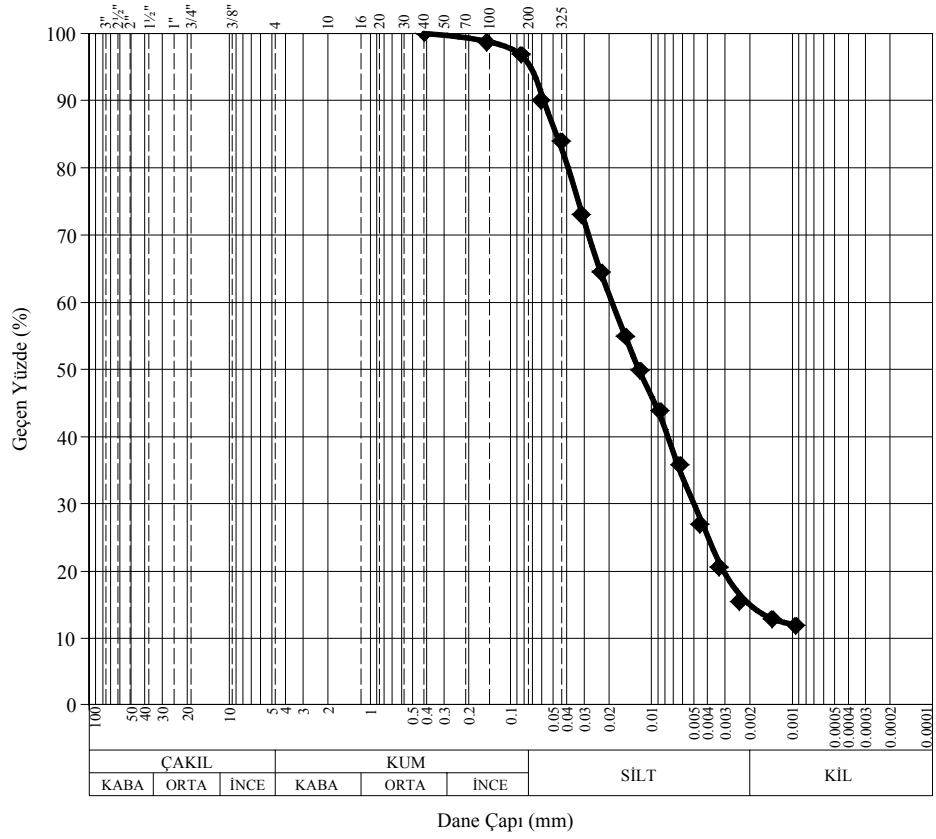
- Uzundurukan, S., 2006. Zeminlerin şişme özelliklerine etkiyen temel parametrelerin belirlenmesi ve modellenmesi, Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A.W., 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (3), 379-392.
- Wang, X.K. and Benson, C.H., 2004. Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve, *Geotechnical Testing Journal*, 27(2), 1-10.
- Whalley, W.R., Watts, C.W., Hilhorst, M.A., Bird, N.R.A., Balendonck, J. & Longstaff, D.J., 2001. The design of porous material sensors to measure the matric potential of water in soil, *European Journal of Soil Science*, 52, 511-519.
- Williams, P.J., 1964. Pressure membrane apparatus for the investigation of high suctions in soils, The numbering of this series is a continuation of the DBR Building Notes, which have been discontinued, Canada.
- Woodburn, J.A., Holden, J.C., Peter, P., 1993. Transistor psychrometer a new instrument for measuring soil suction, *Proceedings of the 1993 ASCE National Convention and Exposition*. Dallas, USA, 91-102.
- Wray, W.K., 1984. The Principle of Soil Suction and its Geotechnical Engineering Applications, *Fifth International Conference on Expansive Soils*, Adelaide, South Australia, 114-118.
- Yong, R. N., Warkentin, B. P., 1975. *Soil properties and behaviour*, Elsevier Scientific, Amsterdam, 449 p.
- Yong, R.N., 1999. Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineering clay barriers, *Engineering Geology*, 54, 3-13.
- Yu, X. ve Yu, X., 2006. Time Domain Reflectometry Tests of Multilayered Soils, *Proc. TDR 2006*, Purdue University, West Lafayette, USA, 3, 16 p.
- Zapata, C.E., Hourtons, W. N., Houston, S. L., and Walsh, K. D., 2000. Soil-water characteristic curve variability, *Proceedings of Sessions of Geo-Denver*, Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers. Denver, 84-124.
- Zhou J. and Yu J.L., 2005, Influences affecting the soil-water characteristic curve, *Journal of Zhejiang University Science*, 6A(8), 797-804.

Znidarcic, D., Gjerapic G., Poulter D.A. and O'Connor K.M. 2001. Measurement of tailing consolidation using TDR technology, Second international symposium and workshop on time domain reflectometry for innovative geotechnical application, Infrastructure technology institute at Northwestern University, Evanston, IL, 2001, 325-333.

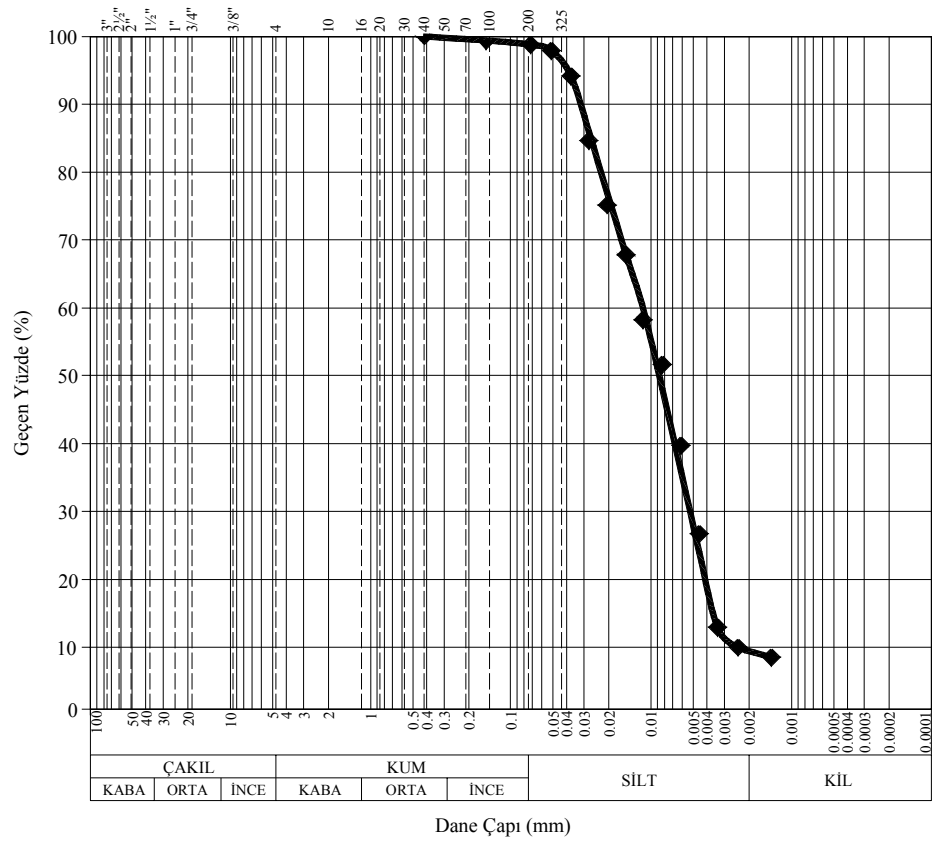
Zupanc, V., Adam, G., Pintar, M., 2005. Comparison of laboratory TDR soil water measurements, *Acta agriculturae Slovenica*, 85, 359-374.

EKLER

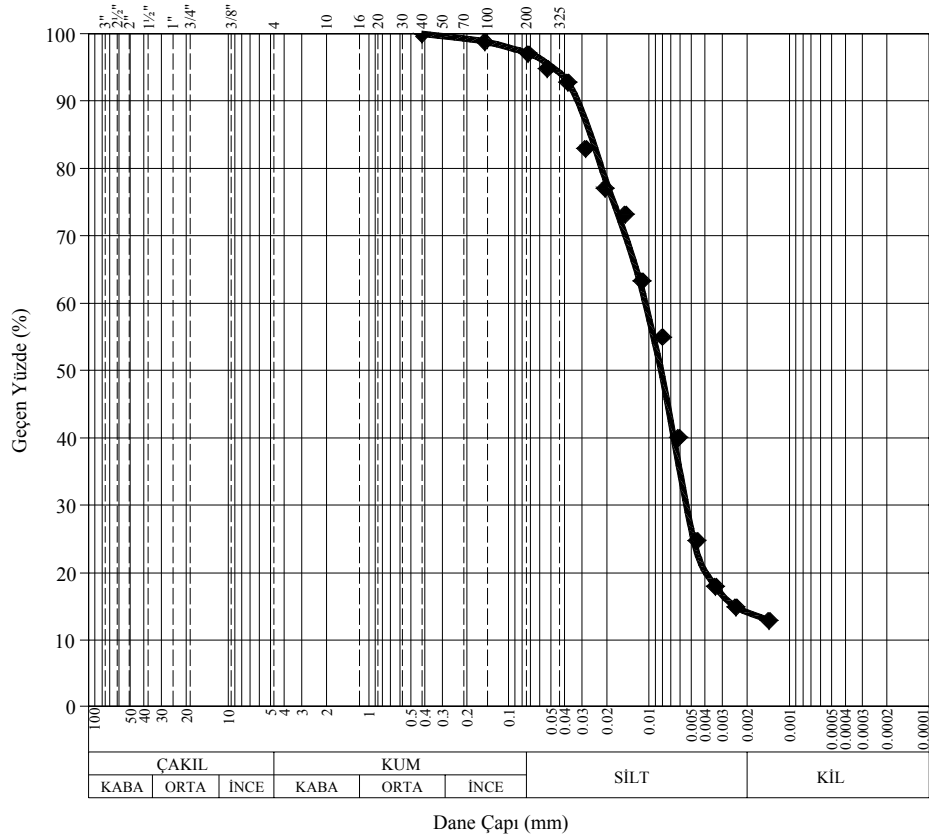
EK 1. Kullanılan Zemin Numunelerine Ait Dane Boyutu Dağılım Eğrileri



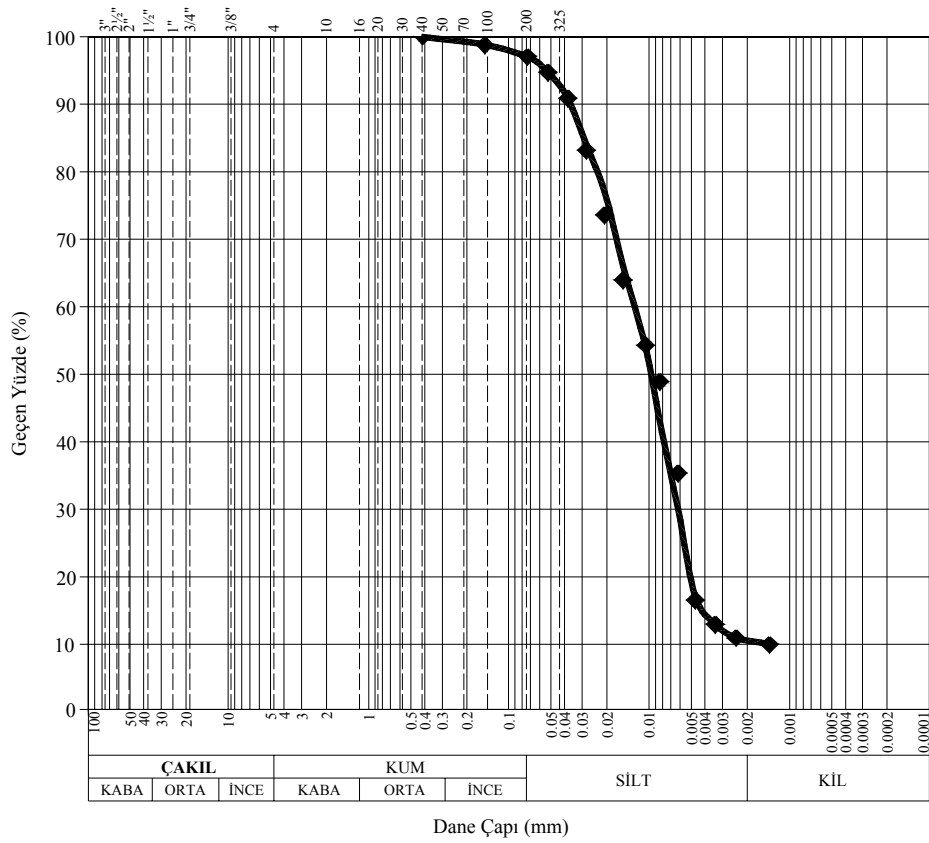
Ek1.1. Numune 1' in dane boyutu dağılım eğrisi



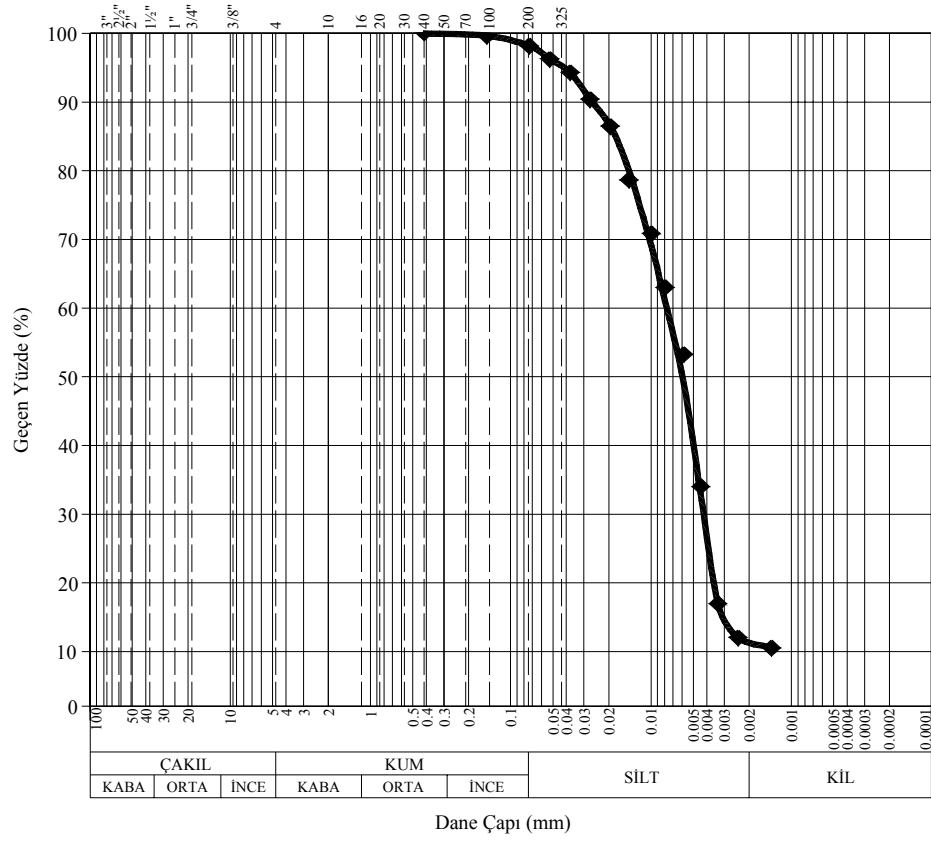
Ek1.2. Numune 2' nin dane boyutu dağılım eğrisi



Ek1.3. Numune 3' ün dane boyutu dağılım eğrisi



Ek1.4. Numune 4' ün dane boyutu dağılım eğrisi



Ek1.5. Numune 5' in dane boyutu dağılım eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Turan Selçuk GÖKSAN
Doğum Yeri : İstanbul
Doğum Yılı : 1966
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dil : İngilizce



Eğitim Durumu:

Lise : 1980-1983 Özel Marmara Lisesi
Lisans : 1992-1995 Süleyman Demirel Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans: 1996-1998 Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum ve Yıl:

1996 – Süleyman Demirel Üniversitesi
Mühendislik – Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi

Yayımları:

1- Uzundurukan, S., Keskin, S.N., Göksan, T.S., 2005. Artificial Neural Network Modelling for Estimation of Suction Capacity. Journal of Applied Sciences 5 (4), 712-715.

2- Tekinsoy M.A., Keskin S.N., Göksan, T.S., Uzundurukan, S., 2002. Şişme Potansiyeline Sahip Olmayan Killi Zeminlerin Kapiler Parametrelerinin Belirlenmesi Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, Eskişehir.

3- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Göksan T.S., 1999. Sıkıştırılmış Killi Zeminlerde Su Emme Kapasitesinin ve Şişme Basınçlarının Tahmini İçin Bir Yöntem. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, Cilt 10 (2), 1925-1939.