

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİTLERDE SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN  
DEĞERLENDİRİLMESİNDE BOŞLUK  
GEOMETRİSİNİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Mehmet Akif KANBUR**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK**  
**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK**

**Ağustos 2011**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLTLERDE SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN  
DEĞERLENDİRİLMESİNDE BOŞLUK  
GEOMETRİSİNİN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Mehmet Akif KANBUR**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK**

**Bu tez 10/08/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

  
Yrd. Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK  
Jüri Başkanı

  
Prof. Dr. Akın ÖNALP  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT  
Üye

## ÖNSÖZ

Bu tez projesinde sitli zeminlerde zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) kullanımıyla sıvılaşma potansiyelinin yorumlanması konusunda görüş ortaya çıkarılması planlanmıştır. Bu amaçla değişik kil oranlarında bulamaç ve düşey konsolidasyon yöntemleri ile hazırlanmış olan siltli numunelerin SWCC eğrileri farklı iki yöntemle belirlenmiştir. Aynı zamanda sınıflama ve hacimsel büzülme limiti deneyleri tatbik edilen numunelerin sıvılaşma potansiyelleri Adapazarı Kriteri'ne göre saptanmış, zemin-su karakteristik eğrilerinden elde edilen boşluk geometrisinin sıvılaşma potansiyeli cinsinden yorumlanmasına çalışılmıştır.

Berber çalışmaya başladığımdan beri hiçbir zaman desteğini esirgemeyen hocam Yrd.Doç.Dr. Aşkın ÖZOCAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca her zaman bilgilerine danıştığım Prof.Dr. Akın ÖNALP, Yrd.Doç.Dr. Sedat SERT, Yrd.Doç.Dr. Ertan BOL, Tekniker Recep EYÜPLER'e, tez malzemelerinin temininde ve uğraşlarımda yardımcı olan sevgili arkadaşlarım Kürşat KANBUR, Kaan KANBUR, Ali KORAL ve Mehmet TAPAN'a, teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, uzun çalışmalarım boyunca maddi manevi hiçbir desteklerini esirgemeyen babam Erol KANBUR, annem Asiye KANBUR ve eşim Gizem KANBUR'a teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
FOTOGRAFLAR LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
-------------	---

## BÖLÜM 2.

ZEMİN EMMESİ.....	2
2.1. Emme Kavramı .....	2
2.1.1. Kılcal gerilme .....	4
2.1.2. Toplam emme .....	5
2.2. Zemin Emmesinin Ölçümü .....	8
2.2.1. Doğrudan ölçüm yöntemlerine örnekler .....	9
2.2.1.1 Basınç membranı .....	9
2.2.1.2. Basınç plakası .....	10
2.2.1.3. Tensiyometreler .....	11
2.2.1.4. IC (Imperial College) tansiyometresi (Emme sondası) .....	11
2.2.2. Dolaylı ölçüm yöntemlerine örnekler .....	12
2.2.2.1. Filtre kağıdı tekniği.....	12
2.2.2.2. Psikrometreler .....	13

2.3. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi .....	15
2.4. SWCC Eğrisinin Oluşturulması .....	17
2.5. Zeminlerde Boşluk Çapı Dağılımının SWCC İle Tayini .....	18
BÖLÜM 3.	
ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞINDA ADAPAZARI KRİTERİ .....	20
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	22
4.1. Zemin Özellikleri .....	22
4.2. Numune Hazırlama İşlemleri .....	23
4.2.1 Ön hazırlık .....	23
4.2.2 Karışımların hazırlanması .....	25
4.2.3 Bir boyutlu konsolidasyon uygulaması .....	25
4.3. Deneysel Çalışmalar .....	27
4.3.1. Büzülme limiti deneyleri .....	28
4.3.2. Zemin–su karakteristik deneyleri .....	30
4.3.2.1. Filtre kağıdı deneyleri .....	30
4.3.2.2. Basınç plakası tekniği ile bulunan SWCC eğrileri .....	36
4.3.3. Boşluk dağılımının belirlenmesi .....	41
4.3.4. Deney sonuçlarının Adapazarı Kriteri açısından incelenmesi .....	43
4.3.5. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi .....	45
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	47
KAYNAKLAR .....	49
EKLER .....	52
ÖZGEÇMİŞ .....	59

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$pF$	Log kPa cinsinden emme birimi
$PI$	Plastisite indisi
$S_r$	Doygunluk derecesi
$t$	Sıcaklık
$T$	Mutlak sıcaklık
$T_s$	Yüzey gerilimi
$u_a$	Boşluk hava basıncı
$u_w$	Boşluk suyu basıncı
$(u_a - u_w)$	Kılcal gerilme
$V$	Zemin numunesinin toplam hacmi
$V_w$	Su hacmi
$w$	Su muhtevası
$w_f$	Filtre kağıdı su muhtevası
$w_0$	Başlangıç su muhtevası
$\alpha$	Islatma açısı
$\theta$	Hacimsel su muhtevası
$\theta_s$	Doygun hacimsel su muhtevası
$\sigma_{av}$	Suyun havaya karşı yüzey gerilimi
$r_c$	Menisk yarıçapı
$\Psi$	Zemin emmesi yada toplam emme
$R$	Üniversal (molar) gaz sabiti
$v_{wo}$	Suyun özgül hacmi yada suyun yoğunluğunun tersi
$\rho_w$	Suyun yoğunluğu
$\omega_v$	Su buharının moleküler kütlesi
$\bar{u}_v$	Boşluk suyu buharının kısmi basıncı
$\bar{u}_{vo}$	Aynı sıcaklıktaki saf suyun düzgün yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı
$\Psi_m$	Kılcal gerilme

$\Psi_{\Pi}$	Eriyik emme
$\Psi_g$	Yerçekimi potansiyeli
$\Psi_a$	Pnömatik (hava basıncı) potansiyeli
$\Psi_p$	Zemin – su sistemine dışarıdan uygulanan basınçtan doğan basınç potansiyeli
$r_p$	Gerçek boşluk boyutu
$r_k$	Kelvin çapı (hava dolu boşluk çapları)
$T_s$	Yüzey gerilme değeri
$\nu_w$	Suyun molar hacmi
$\tau$	Sorbate molekülünün efektif çap
RH	Bağlı nem

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dane sütun dizilimi .....	3
Şekil 2.2.	Emme – su muhtevası bağıntısı.....	3
Şekil 2.3.	Doygun olmayan zeminde kılcal gerilme.....	5
Şekil 2.4.	Bağıl nem - toplam emme ilişkisi.....	7
Şekil 2.5.	Basınç membranı hücresi.....	10
Şekil 2.6.	Basınç plakası deney düzeneği.....	10
Şekil 2.7.	Vakum ölçerli bir tansiyometre ve ölçüm örneği.....	11
Şekil 2.8.	Imperial College (IC) emme sondası.....	12
Şekil 2.9.	Transistörlü psikrometre ve kalibrasyon doğrusu.....	14
Şekil 2.10.	Termokupl psikrometre ve çıkış eğrisi.....	15
Şekil 2.11.	Gözenekli ortam için idealleştirilmiş zemin-su karakteristiği.....	15
Şekil 2.12.	Zemin ortamında tipik histeretik davranış .....	16
Şekil 2.13.	Emme sondası tekniği ile SWCC eğrisi teşkili.....	18
Şekil 4.1.	Filtre kağıdının su muhtevasına bağlı olarak emme-su muhtevası eğrilerinin kalibrasyonu.....	35
Şekil 4.2.	Filtre kağıdı yöntemiyle oluşturulan SWCC eğrileri.....	36
Şekil 4.3.	Basınç plakası deney düzeneği.....	37
Şekil 4.4.	Basınç plakası yöntemiyle oluşturulan SWCC eğrileri.....	39
Şekil 4.5.	Basınç plakası yöntemiyle oluşturulan beş numunenin SWCC eğrileri.....	40
Şekil 4.6.	Basınç plakası ve Filtre kağıdı yöntemiyle oluşturulan SWCC eğrileri.....	40
Şekil 4.7.	Filtre kağıdı yöntemiyle elde edilen boşluk boyutu dağılım eğrileri.....	41
Şekil 4.8.	Basınç plakası yöntemiyle elde edilen boşluk boyutu dağılım eğrileri.....	42



Şekil 4.9. Filtre kağıdı ve Basınç plakası yöntemiyle elde edilen boşluk boyutu dağılım eğrileri.....	43
---	----

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1	Zemin emmesi .....	4
Tablo 2.2	Zemin emmesinin ölçümü yöntemleri.....	9
Tablo 4.1	Çalışmada kullanılan doğal zeminlerin fiziksel özellikleri .....	22
Tablo 4.2	Karışım numuneleri fiziksel özellikleri.....	27
Tablo 4.3	Adapazarı Kriteri açısından numunelerin incelenmesi.....	44

## FOTOGRAFLAR LİSTESİ

Foto 4.1.	Santrifüj yardımıyla kilin ayrıştırılması .....	23
Foto 4.2.	Siltin 200 nolu elek yardımıyla ayrıştırılması .....	24
Foto 4.3.	Elde edilen siltin oda sıcaklığında kurutulması .....	24
Foto 4.4.	Bulamaç numunelerin tek boyutlu konsolidasyonu.....	26
Foto 4.5.	Numunelerin ringlere alınması.....	26
Foto 4.6.	Büzülme potasına numune doldurma .....	28
Foto 4.7.	Büzülme potasını perdahlama.....	29
Foto 4.8.	Büzülme potasından çıkarılacak numune.....	29
Foto 4.9.	Büzülme takımı ve iki parçalı büzülme potası.....	29
Foto 4.10.	Filtre kağıtlarının hazırlanması.....	31
Foto 4.11.	Kılcal gerilme ölçümü .....	31
Foto 4.12.	Ringin üzerine filtre kağıtlarının yerleştirilmesi.....	32
Foto 4.13.	Zemin numunesinin cam kavanoza yerleştirilmesi .....	32
Foto 4.14.	Kavanozların termos kutuya yerleştirilmesi .....	33
Foto 4.15.	Seramiğin desikatörde doyurulma işlemi.....	37
Foto 4.16.	Seramik üzerine yerleştirilen numuneler.....	38

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Emme basıncı, emme kapasitesi, filtre kağıdı, basınç plakası, zemin-su karakteristik eğrisi, boşluk geometrisi, sıvılaşma, Adapazarı Kriteri.

Bilindiği gibi ülkemiz ve özellikle bölgemiz yüksek derecede deprem riski taşıyan bir coğrafya üzerinde yer almaktadır. Bölgemiz yaşam alanlarında da sık rastladığımız siltli zeminlerin deprem durumundaki davranışı henüz yeni çalışılan bir konu sayılır. Siltli Zeminlerde Zemin-Su Karakteristiğinin Belirlenmesi konulu tez projesinden çıkarılacak sonuçların siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde SWCC eğrileri deney sonuçlarının kullanımına katkıda bulunması beklenmektedir. Bu tez kapsamında Adapazarı kent merkezinden alınan siltli numuneler sahip olduğu kum ve kil içeriği ayıklandıktan sonra farklı oranlarda kil eklenerek bulamaçlar hazırlanmış, bu numuneler düşey gerilme altında konsolide edildikten sonra basınç plakası ve süzgeç kağıdı yöntemleri kullanılarak su-zemin karakteristik eğrileri elde edilmiş, aynı zamanda sınıflandırma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu SWCC eğrilerinden numunelerin boşluk boyutu dağılım eğrileri oluşturulmuş ve Adapazarı Kriteri uyarınca, boşluk boyutu dağılım eğrilerini kullanarak siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin yorumlanmasına katkıda bulunulmaya çalışılmıştır.

# **PORE GEOMETRY EFFECT ON THE EVALUATION OF LIQUEFACTION POTENTIAL FOR SILTS**

## **SUMMARY**

Keywords: Suction pressure , suction capacity, filter paper, pressure plate, soil-water carasteristic curve, pore geometry, liquefaction, Adapazarı Criteria.

As well known, our country –especially our region- is positioned in a geography that has a high risk of earthquake. It is a recent subject to research the behavior of silty soils that we often see in the living areas of our region, while the earthquake hits. This thesis is expected to be a helpful document to use the results of using “SWCC curves experiments” to determine the liquefaction potential of silty soils. The thesis is about determining the characteristic of water-soil in silty soils. Some samples that taken from the city center of Adapazarı will be prepared and different ratios of clay will be added in to prepare slurries. These slurries will consolidate under vertical stress. Then soil-water characteristics were obtained by using pressure plate and filter paper techniques. soil classification tests were done for every samples. Than the pore size distribution curves were obtained by using these SWC curves. And finally, the effect of clay ratio to liquefaction in silty soils was observed by using these space size distribution curves.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Bilindiği gibi ülkemiz ve özellikle bölgemiz yüksek derecede deprem riski taşıyan bir coğrafya üzerinde yer almaktadır. Bölgemiz yaşam alanlarında da sık rastladığımız siltli zeminlerin deprem durumundaki davranışı henüz yeni çalışılan bir konu sayılır. Tez projesinden çıkarılacak sonuçların siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde SWCC eğrileri deney sonuçlarının kullanımına katkıda bulunması beklenmektedir.

Zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) zeminin hacimsel su içeriği ile zemin emmesi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Genellikle kılcal gerilme değerinin, emme değerinin büyüklüğünde başrol oynayan su içeriği, hacimsel su içeriği veya doygunluk derecesi eksenlerinde değişimi incelenmektedir. SWCC eğrisinin doymamış zeminlerin davranışını tanımlamada baz alınabildiği görülmektedir. Zemin-su karakteristik özellikleriyle geçirimsizlik ve kayma direnci arasında ilişki kurulabilmektedir (Fredlund vd., 1995).

Bu tez çalışmasında siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde SWCC eğrileri deney sonuçlarının kullanımına katkıda bulunması hedeflenmiştir. Söz konusu tez kapsamında Adapazarı kent merkezinden alınan siltli numuneler sahip olduğu kum ve kil içeriği ayıklandıktan sonra farklı oranlarda kil eklenerek bulamaçlar hazırlanmış, bu numuneler düşey gerilme altında konsolide edildikten sonra basınç plakası ve süzgeç kağıdı yöntemleri kullanılarak su-zemin karakteristik eğrileri elde edilmiş, aynı zamanda sınıflandırma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu SWCC eğrilerinden numunelerin boşluk boyutu dağılım eğrileri oluşturulmuş ve Adapazarı Kriteri uyarınca, boşluk boyutu dağılım eğrilerini kullanarak siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin yorumlanmasına çalışılmıştır.

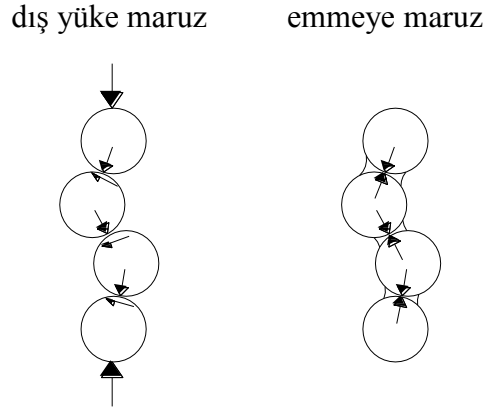
## **BÖLÜM 2. ZEMİN EMMESİ**

### **2.1. Emme Kavramı**

Zemin emmesi teorisi 1900'lü yılların başında, sadece toprak-su-bitki sistemi için geliştirilmiştir. Mühendislik problemleri üzerinde önemli etkisi olan doymun 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).

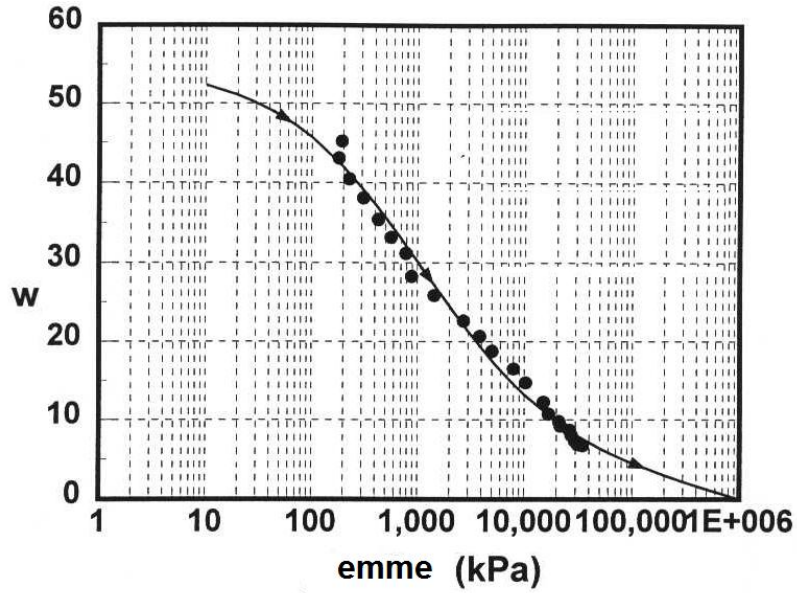
Dış gerilmelerin etkisi altında olmayan bir zeminin boşluklarında suyun tutulmasını sağlayan kuvvete zemin emme basıncı denir; diğer bir deyişle zeminin suya uyguladığı çekme kuvvetidir ve basınç terimi olarak tanımlanır. Emme basıncı, aynı seviye ve aynı sıcaklıkta bulunan saf suya karşılık zemin suyunda olan serbest enerji olarak da tanımlanabilir. (Snethen, 1980). Wray (1984) zemin emme basıncını, bir zeminin içindeki suyu çıkarabilmek için uygulanması gereken basınç olarak tanımlamıştır.

Doymun olmayan zemin ortamında boşluklarda su-hava ara yüzeyinin oluşmasıyla su havaya karşı gerilmekte, oluşan menisklerde çekme gerilmesi alan su yüzeyleri normal sudan farklı özellikler taşımaktadır. Doymun bir zeminde boşluk suyu basıncı atmosfer basıncına göre pozitif bir büyüklük taşırken doymun olmayan ortamda negatif değer almaktadır. Doymun zeminde boşluklardaki su serbest durumdadır. Pozitif boşluk suyu basıncı efektif gerilmeyi azaltmakta yani daneleri birbirinden uzaklaştırıcı rol oynamaktadır. Doymun olmayan zeminde yer alan menisklerdeki kama suyu hava dolu boşluklar civarındaki daneler arası temastaki sudur. Bu durumda zemin daneleri arasında emme temas düzlemine dikey iç kuvveler oluşturarak kaymaya karşı dayanımı arttırmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Dane sütun dizilimi (Burland ve Ridley, 1996)

Şekil 2.2’de su muhtevası ile zemin emmesi arasındaki tipik ilişki görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi zemin emmesi, su muhtevasının azalmasıyla hızla artar. Zemin emmesi; gerilme (kPa), hidrolik yük ya da Schofield tarafından geliştirilen ve özel bir ölçek olan pF ölçeği ile ölçülebilir. pF ölçeği, hidrolik yükün (cm) logaritmik değeridir.



Şekil 2.2. Emme – su muhtevası bağıntısı

Tablo 2.1’ de pF, negatif hidrolik yük ve zemin emmesi arasındaki ilişkiler verilmiştir.



Tablo 2.1. Zemin emmesi boyutu

Zemin Emmesi			
pF	cm	kg/cm <sup>2</sup>	kPa
0	1	1x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-1</sup>
1	10	1x10 <sup>-2</sup>	1
2	10 <sup>2</sup>	1x10 <sup>-1</sup>	1x10 <sup>1</sup>
3	10 <sup>3</sup>	1	1x10 <sup>2</sup>
4	10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>1</sup>	1x10 <sup>3</sup>
5	10 <sup>5</sup>	1x10 <sup>2</sup>	1x10 <sup>4</sup>
6	10 <sup>6</sup>	1x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>5</sup>
7	10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>6</sup>
8	10 <sup>8</sup>	1x10 <sup>5</sup>	1x10 <sup>7</sup>
9	10 <sup>9</sup>	1x10 <sup>6</sup>	1x10 <sup>8</sup>
10	10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>9</sup>

### 2.1.1. Kılcal gerilme

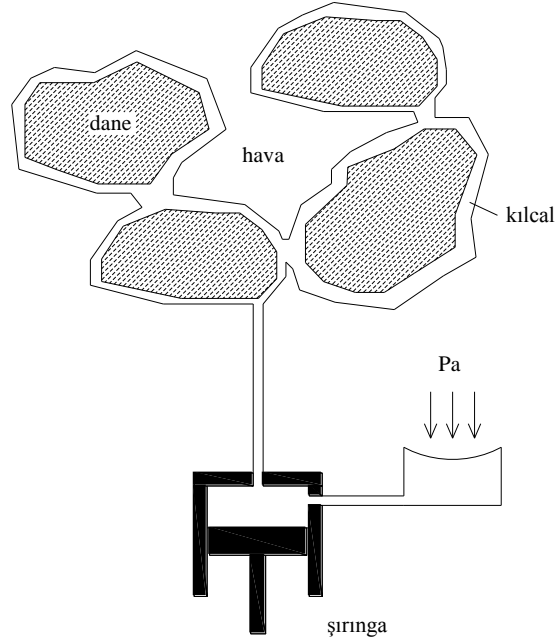
Kılcal durumda su danelere tutunmakta, havaya karşı gerilmekte, yani kılcallık bir ek gerilme doğurmuş olmaktadır. Bu değer ne kadar yükselirse sistemden suyun alınması (Şekil 2.3.'te şırıngayla temsil edilmiş) o kadar güçleşmektedir. Zemin içindeki suyu hareket ettirmek veya bu suyu buharlaşma olmadan zemin kütlesi içinden söküp almak için gereken basınç kılcal gerilme olarak adlandırılmakta ve ortamdaki hava basıncı ile boşluk suyu basıncı (doğal ortamda eksi değerli) arasındaki farka eşit olduğundan  $u_a - u_w$  simgesi ile temsil edilmektedir. Kılcal gerilme için kuvvetler göz önüne alınarak şu eşitlik yazılabilir.

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{r_c} = \frac{2\sigma_{aw}}{r_c} \quad (2.1)$$

Burada

$\sigma_{aw}$  - Suyun havaya karşı yüzey gerilimi (20<sup>0</sup> C 'de 72.8 MN/m)

$r_c$  - Kılcal yarıçapı'nı göstermektedir.



Şekil 2.3 Doymun olmayan zeminde kılcal gerilme (Önalp, 2002).

Kılcal gerilme zemin bünyesindeki sıvı fazda yer alan su moleküllerinde var olan gerilmedir, yani zeminin şekil değiştirme olmadan su kaybına direnme yeteneğidir. Kılcal gerilmenin düzeyi dane boyutu dağılımına, dolayısı ile boşluk yarıçapına, boşluk oranına ve doymunluk derecesine bağlıdır. Normal atmosfer basıncı altında negatif boşluk suyu basıncına eşittir.

### 2.1.2. Toplam emme

Toplam emme bir su molekülünün zemin bünyesindeki sıvı evresinden buhar evresine geçmesi için gereken gerilme, yani sıvı durumdan buhar konumuna geçerken su kaybına direnme yeteneğidir. 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 (ya da zemin suyunun serbest enerjisi) arasındaki termodinamik ilişki Eşitlik 2.2'deki gibi tanımlanabilir.

$$\Psi = -\left(\frac{R \cdot T}{v_{w0} \cdot w_v}\right) \cdot \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.2)$$

Burada,

$\Psi$  - 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

$\rho_w$  - Suyun yoğunluğu

$\omega_v$  - Su buharının moleküler kütlesi (18.016 kg/mol),

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

$\bar{u}_{v0}$  - Aynı sıcaklıktaki saf suyun düzgün yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı (kPa)

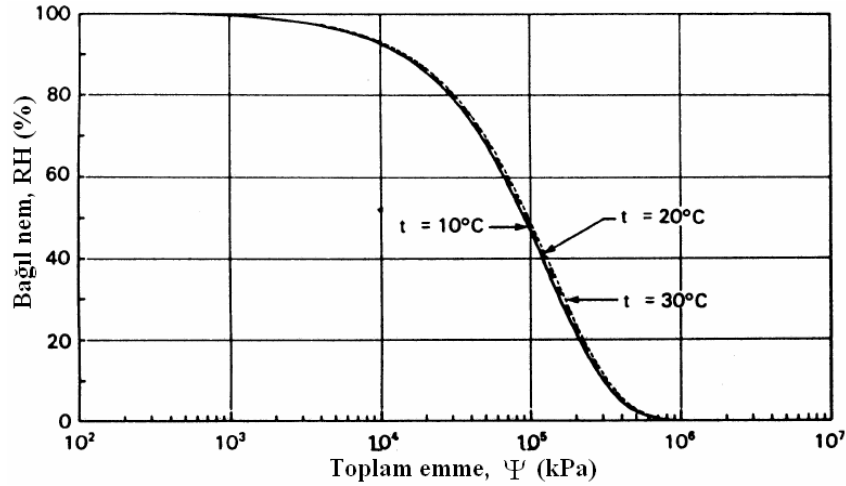
Bu ifadedeki ( $\bar{u}_v / \bar{u}_{v0}$ ) terimi, RH (%) bağıl nemdir. Bağıl nem; hava içinde bulunan su buharı miktarının, havanın aynı sıcaklıkta taşıyabileceği maksimum su buharına

oranıdır. Eğer referans sıcaklık 20 °C olarak seçilirse, Eşitlik 2.2' deki  $\left(\frac{R \cdot T}{v_{w0} \cdot w_v}\right)$  terimi

135022 kPa değerini alır. Bu durumda kPa cinsinden toplam emme basıncı Eşitlik 2.3' deki gibi yazılabilir.

$$\Psi = -135022 \cdot \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.3)$$

Şekil 2.4.'te üç değişik sıcaklık için bağıl nem ve toplam emme ilişkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi bağıl nem %100 iken zemin emmesi sıfırdır. Bir zeminde bağıl nem %100' ün altına düşmeye başlayınca, o zeminde emme ortaya çıkacaktır (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Leong vd., 2003).



Şekil 2.4. Bağlı nem - toplam emme ilişkisi (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Toplam emme terimi, Eşitlik 2.4' de verilen değişik enerji bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanır (Yong ve Warkentin, 1975; Saiyouri vd., 2000).

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{II} + \Psi_g + \Psi_a + \Psi_p \quad (2.4)$$

Burada,

$\Psi_m$  - Kılcal gerilme,

$\Psi_{II}$  - Eriyik emmesi,

$\Psi_g$  - Yerçekimi potansiyeli,

$\Psi_a$  - Pnömatik (hava basıncı) potansiyeli,

$\Psi_p$  - Zemin – su sistemine dışarıdan uygulanan basınçtan doğan basınç potansiyelini ifade etmektedir.

Su molekülleri ve su buharı molekülleri arasındaki hava-su ara yüzeyinde oluşan denge hatırlandığında yüzeyden buhar konumuna geçmek isteyen bir su molekülünün belli bir enerjiye sahip olması gerektiği ortaya çıkar. Kılcal emme varlığı nedeniyle bir meniskteki suyun buharlaşması için gerekli enerji yassı bir yüzeyden buharlaşması için gerekenden büyük olacaktır. Bununla birlikte bir kılcal tüp içindeki sıvının üzerindeki boşluktaki buhar basıncı sıvının doymuş buhar basıncından küçüktür. Bir sıvının buharlaşması için gereken enerjiyi arttıran bir diğer etken eriyik tuzların varlığıdır. Bir tuz çözeltisinin buhar basıncı yüzey eğriliğinden bağımsız olarak doymuş buhar basıncından küçüktür. Buhar basıncının bağıl azalımı doğrudan tuz yoğunluğu ile

ilgilidir. Zemin suyundaki eriyik maddelerin tuzlar nedeniyle zemin suyunun arı sudan daha fazla enerjiye sahip olması eriyik emmesi bileşenini doğurmaktadır. Bu durumda toplam emme boşluk suyunda tuz içeren zeminlerde kılcal emmeden daha büyük bir değere sahip olmaktadır.

## 2.2. Zemin Emmesinin Ölçümü

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 doğrudan ölçebilmektedirler. (Rahardjo and Leong, 2006). Zemin emmesi ölçüm yöntemleri genellikle doğrudan ve dolaylı ölçüm yöntemleri olarak gruplandırılır. Doğrudan yöntemler basınç plakası, basınç membranı, tansiyometreler vb. yöntemleri içerir. Bu yöntemlerde zeminin boşluk basıncı ölçülür yada zemine belli bir basınç uygulanır ve uygulanan bu basınçla su içeriğinin dengeye gelmesi takip edilir. Zemin emmesini doğrudan ölçen yöntemlerin hem negatif hem de pozitif boşluk suyu basınçlarını ölçebilme avantajları vardır. Dolaylı yöntemler ise filtre kağıdı, poroz blok, ısıl iletkenlik sensörü vb. yöntemleri içerir. Bu yöntemler, su içeriğinin değişiminden etkilenen bir fiziksel özelliği yada su içeriği ölçümlerini kullanır (Zapata vd., 2000; Take ve Bolton, 2002)

Tablo 2.2' de emme ölçüm yöntemleri sıralanmaktadır. Bunların bir kısmı doğrudan, diğerleri dolaylı ölçüm yöntemleridir. Kılcal emmenin doğrudan ölçümünde boşluk suyu basıncı ile boşluk hava basıncı arasındaki fark ölçülmektedir. Dolaylı ölçüm yönteminde ise zemin emmesi ile ilişkilendirilebilen bir aletin veya gerecin bilinen bir özelliği ölçülüp kalibrasyon yardımıyla emme değerine ulaşılmaktadır.

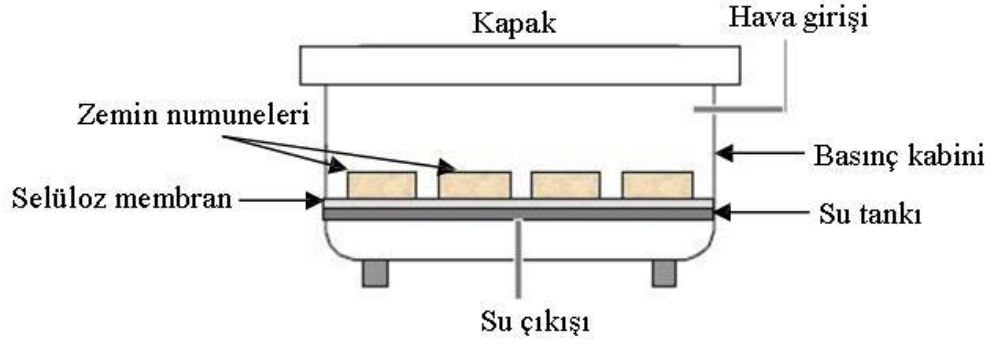
Tablo 2.2.'de Zemin Emmesinin Ölçüm Yöntemleri (Özocak, 2003)

Alet	Emme	Ölçülen değişken	Aralık (kPa)	Denge zamanı	Ölçüm yeri	Referans
Transistörlü psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-70.000	Dakika	Lab Arazi?	Truong&Holden, 1995
Termokupl psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-8.000	Dakika	Lab Arazi?	Brown&Collins, 1980
Süzgeç kağıdı(temas yok)	Toplam	Su içeriği	400-30.000	7-14 gün	Lab Arazi	Al-Khafaf &Hanks,1974
Süzgeç kağıdı	Kılcal	Su içeriği	30-30.000	7 gün	Lab Arazi	Gardner, 1930
Emme plakası	Kılcal	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Saat	Lab	Colmenares 2000
Basınç plakası/membranı	Kılcal	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-10.000	Saat	Lab	Hilf, 1951
Tansiyometre	Kılcal	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Dakika	Lab Arazi	Soil Moisture Equipment
TDR Sonda	Kılcal	Su içeriği	0-1500	Saat	Lab Arazi	Cook&Fredlund, 1998
Eriyik tansiyometresi	Kılcal Toplam?	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-1.500	Saat	Lab Arazi	Bocking&Fredlund, 1979
IC tansiyometresi (emme sondası)	Kılcal Toplam?	Boşluk suyu gerilmesi	0-1.500	Dakika	Lab Arazi?	Ridley&Burland, 1993
Alçı blok	Kılcal	Elektriksel direnç	30-30.000	Hafta	Lab Arazi	Aitchison & Richards, 1965
Isıl iletkenlik	Kılcal	İletkenlik	0-300	Hafta	Lab Arazi	Sattler & Fredlund, 1989
Sızma	Eriyik	İletkenlik	30-3.000	Saat	Lab	Manheim, 1966
Süzme	Eriyik	İletkenlik	30-3.000	Saat	Lab	Manheim, 1966

## 2.2.1. Doğrudan ölçüm yöntemlerine örnekler

### 2.2.1.1 Basınç membranı

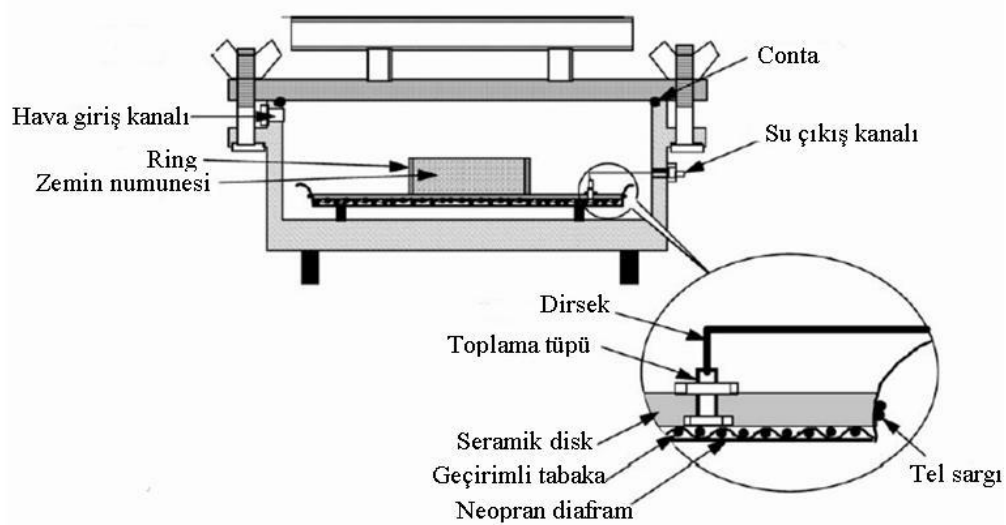
Basınç membranı zeminlerin kılcal gerilme değerini doğrudan belirlemek için kullanılan bir cihazdır. 1500 kPa'dan daha büyük emme basınçlarının ölçülebilmesi amacıyla selüloz bir membran kullanılır. Basınç membranı yöntemiyle 10000 kPa değerine kadar olan kılcal gerilme değerlerini ölçmek mümkündür (Bulut, 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).



Şekil 2.5. Basınç membranı hücresi (Bulut, 2001)

### 2.2.1.2. 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 neopren diyafram serilir ve bu neopren diyafram seramik diskin kenarlarına sabitlenir. Disk ile diyafram arasında suyun düzgün bir akım yolu izleyerek akmasını sağlayan geçirimli bir tabaka bulunur. Bu tabaka su çıkış borusuna bir ara dirsek kullanılarak bağlanır.

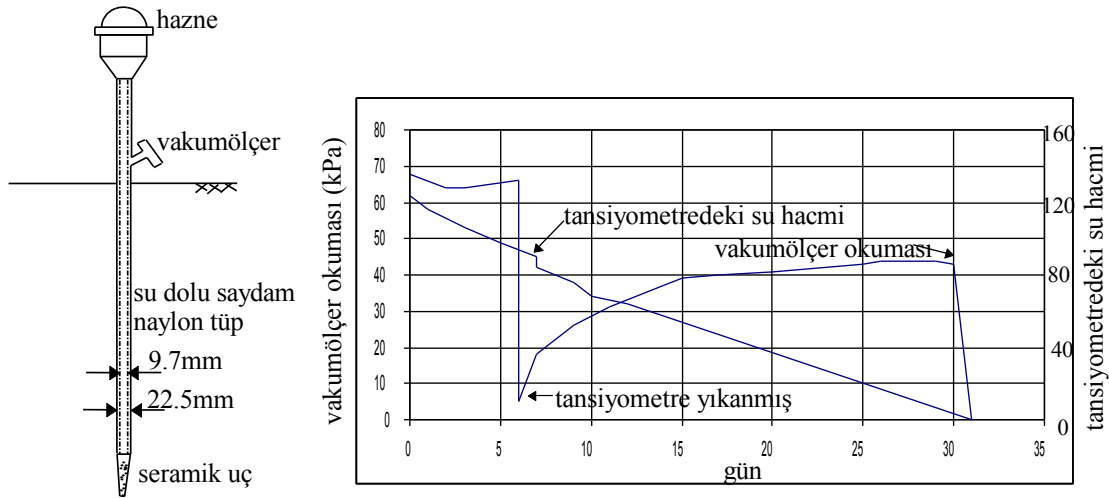


Şekil 2.6. Basınç plakası deney düzeneği

### 2.2.1.3. Tansiyometreler

Tansiyometreler piyezometrelere benzer ancak boşluk suyundaki negatif gerilmeyi ölçmek için tasarlanmış aletlerdir (Şekil 2.7). Suyun tansiyometre haznesinden, suyun gerilmesinin zemin içindeki suyun gerilmesine (zemin emmesi) eşit olmasına dek, zemin içine geçişine izin vererek çalışır. Denge tamamlanana kadar zemin ve tansiyometre arasında yer değiştiren su miktarının sonuca etkisinin ihmal edilebilir düzeyde kalması durumunda ölçüm güvenilir olacaktır. Bu durumda emme, haznede su basıncı şeklinde belirecektir ve bir gerilme ölçme aletiyle (basınç ölçer, vakum ölçer veya bir algılayıcı) ölçülebilmektedir.

Tansiyometrelerde ölçüm için boşluk hava basıncını artırmaya gerek olmadığından bu aletler hem laboratuvar hem de arazide kullanılmaktadır. 90 kPa'a kadar kılcal emme ölçümü yapabilen tansiyometrelerin daha çok ziraatçilerin kullandıkları küçük boyutları da üretilmektedir.



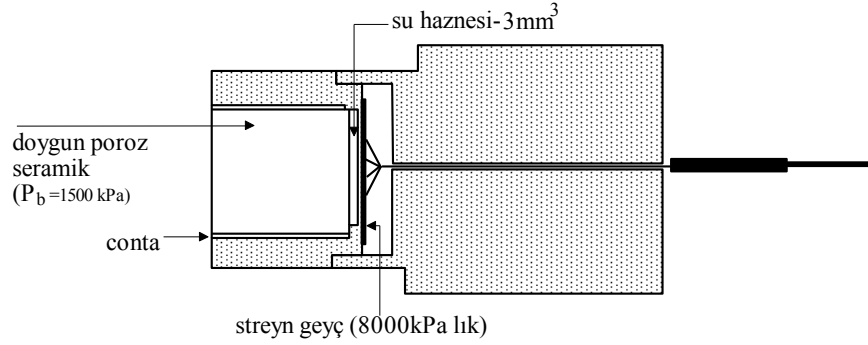
Şekil 2.7 Vakum ölçerli bir tansiyometre (arazi) ve ölçüm örneği

### 2.2.1.4. IC (Imperial College) tansiyometresi (Emme sondası)

Klasik tansiyometrelerde kaynama sebebiyle emme ölçüm aralığının 90 kPa ile sınırlı kalması nedeniyle 0-1500 kPa'a kadar güvenilir ve hızlı kılcal emme ölçümü yapabilen emme sondası geliştirilmiştir (Ridley ve Burland, 1993). Paslanmaz çelik



gövde ve 1500 kPa kapasiteli seramikten oluşan emme sondası (Şekil 2.8) 4000 kPa basınç altında 24 saat doyurulduktan sonra zemin ile temasa getirilip mümkün olduğunca küçük tutulan su haznesinin ( $3\text{mm}^3$ ) arkasına yapıştırılmış streyngeyç vasıtasıyla 10-12 dakikada dengeye gelerek emme ölçümü tamamlanmaktadır.



Şekil 2.8. Imperial College (IC) emme sondası (Ridley ve Burland, 1993)

## 2.2.2. Dolaylı ölçüm yöntemlerine örnekler

Emme ölçüm yöntemlerinin çoğunda dolaylı yoldan sonuca ulaşılr. Ölçümde kullanılan alet bilinen emme değerlerine sahip numunelere karşı kalibre edildikten sonra, bu alet ile ölçülen değişken vasıtasıyla istenen numunenin emme değeri hesaplanabilir. Ölçümde dikkat edilmesi gerekli en önemli husus kullanılan kalibrasyon yöntemi ve onun duyarlılığı olmaktadır.

### 2.2.2.1. Filtre kağıdı tekniği

Filtre kağıdı tekniği zeminlerin emme basınçlarının ölçülmesi için bir çok araştırmacı tarafından kullanılan, hem kılcal hem de toplam emme basıncının ölçülmesinde kullanılabilen ucuz ve oldukça basit bir deney yöntemidir. Filtre kağıdı yöntemi 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 konan filtre kağıdı yardımıyla ölçülür. Burada esas olan filtre kağıtlarının zemin numunesine temas etmemesidir. Zemine temasta yerleştirilecek filtre kağıdı ise

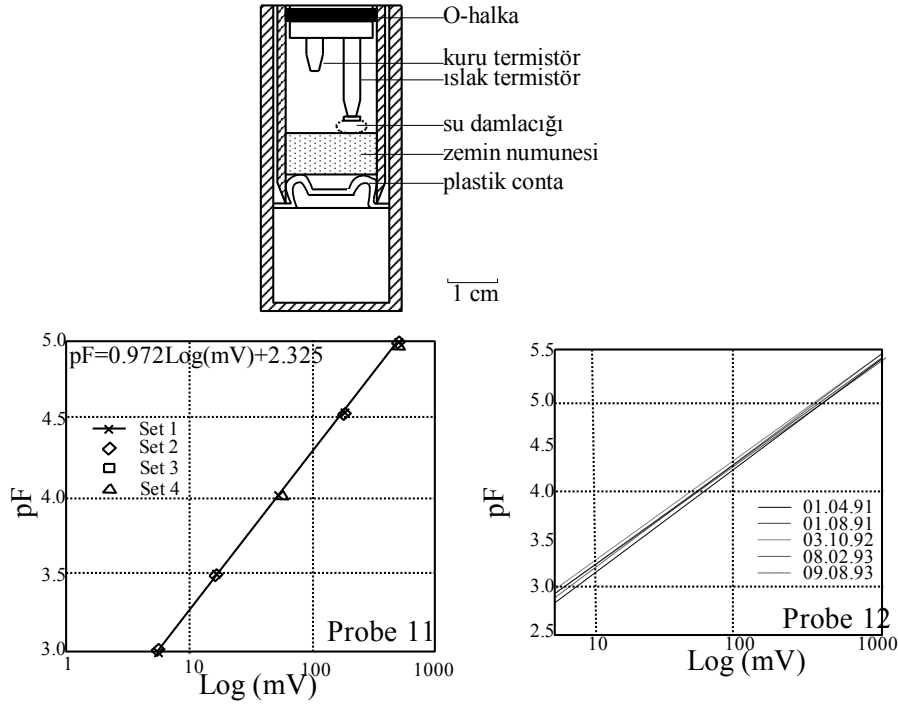
kılcal gerilme ölçümünü verir. Genellikle bir haftalık dengelenme süresinden sonra filtre kağıdının su muhtevası, bir temassız filtre kağıdı kalibrasyon eğrisi kullanılarak emme basıncına dönüştürülür. Temassız filtre kağıdı tekniği için kullanılan kalibrasyon eğrileri buhar denge tekniği kullanılarak 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).

Kılcal gerilme zemin numunelerinin arasına yerleştirilen üç adet filtre kağıdı kullanılarak ölçülür. Burada esas olan ise filtre kağıtların zemin numunelerine temas etmesidir. Bu üç filtre kağıdından ortada olan, kılcal gerilmenin hesaplanmasında kullanılır. Dış taraftaki diğer iki filtre kağıdı ise, ortadaki asıl ölçüm için kullanılan filtre kağıdına zemin danelerinin bulaşmasını önlemek için görev yapar.

#### **2.2.2.2. Psikrometreler**

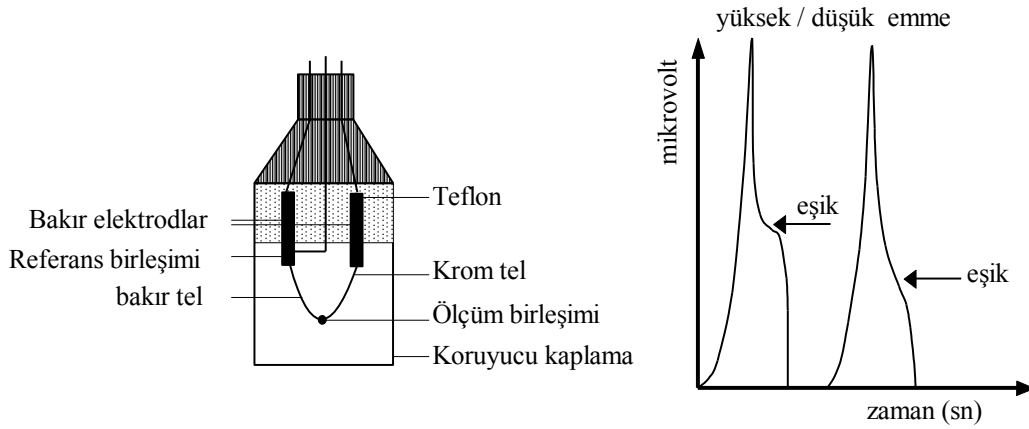
Psikrometre nem ölçen bir alettir. İki farklı prensip ile çalışanları bulunmaktadır: Termistör/Transistör psikrometre ve Termokupl psikrometre. Termistör sıcaklığa duyarlı bir dirençtir. İki eş termistör birlikte kullanılmaktadır. Birincisi bir damla su üzerine yerleştirilir (*wet bulb*), diğeri kuru bırakılır (*dry bulb*). Islak termistörden buharlaşma ve yoğunlaşma oluşmasıyla termistörler arasında ortamın bağıl nemiyle ilişkilendirilebilen bir elektromotor güç ortaya çıkacaktır. Bu gücün ölçümünden emme değeri bulunmaktadır. Son modellerde termistörlerin yerini transistörler almakta ancak işleme ilkesi aynı kalmaktadır.

Transistorlü psikrometre (Şekil 2.9) laboratuvarında toplam emme ölçümü için doğru ve hızlı bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Ancak aletin hassaslığı ve sabit sıcaklık gerekliliği arazide kullanımını engellemektedir.



Şekil 2.9 Transistörlü psikrometre ve kalibrasyon doğrusu (Truong ve Holden, 1995)

Termokupl psikrometreler iki farklı metal içerirler. Bu iki tel arasındaki birleşimden bir elektrik akımı geçtiğinde, birleşim akımın akış yönüne bağlı olarak ısınır veya soğur. Eğer böyle bir birleşim nemli bir ortama yerleştirilip üzerinde su yoğunlaşması oluşturmak için soğuk birleşime bir akım giderse bu aslında bir ıslak termometre haline gelir. Akım kesildiğinde su buharlaşır ve ıslak birleşimdeki sıcaklık değişimi ile çevre sıcaklığındaki bir referans birleşimi arasında bir elektro motor güç oluşturur. Bu tip psikrometre için çıkış eğrisi, çevredeki havanın buhar basıncına karşılık gelen ve plato voltaja sahiptir. Bu değer kalibrasyonundan emme değerine gidilir (Şekil 2.10). Termokupl psikrometreler de sıcaklığa çok duyarlı aletlerdir ve ölçümler değişmez sıcaklıktaki su banyosunda yapılmaktadır. Kalibrasyon genellikle 25°C'de yapılmakta ve 300-8000 kPa arası toplam emme ölçümü yapabilmektedirler.

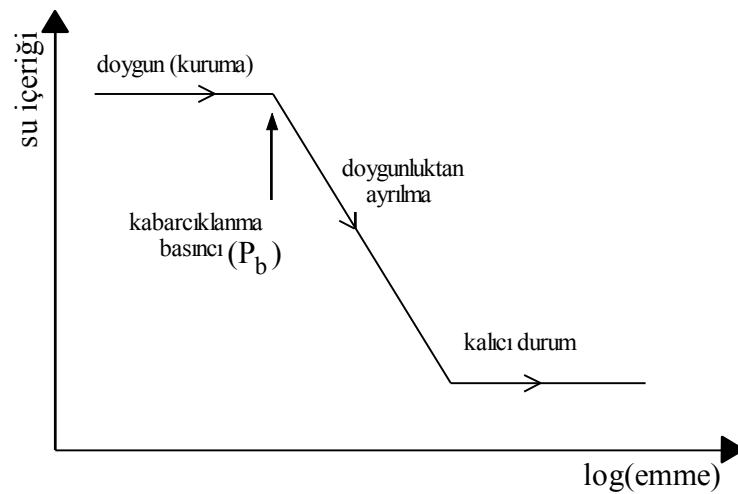


Şekil 2.10 Termokupl psikrometre ve çıkış eğrisi

### 2.3. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi

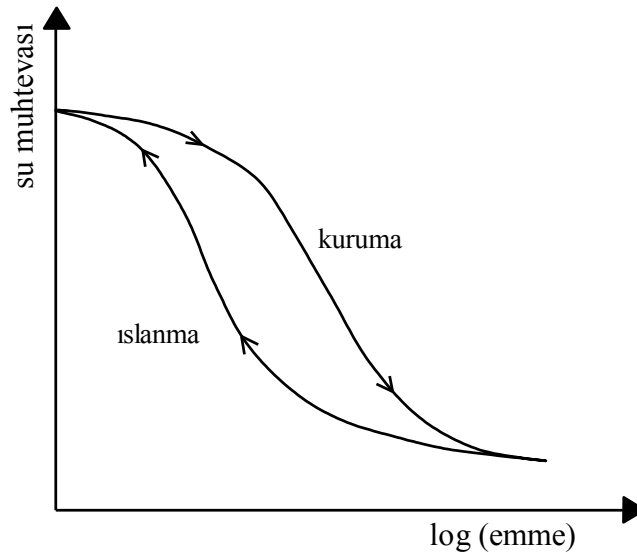
Zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) zeminin kılcal su içeriği ile zemin emmesi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Genellikle kılcal emme değerinin, emme değerinin büyüklüğünde başrol oynayan su içeriği, hacimsel su içeriği veya doygunluk derecesi eksenlerinde değişimi incelenmektedir. SWCC eğrisinin doymun olmayan zeminlerin davranışını tanımlamada baz alınabildiği görülmektedir. Zemin-su karakteristik özellikleriyle geçirimlilik ve kayma direnci arasında ilişki kurulabilmektedir (Fredlund vd., 1995).

Şekil 2.11’de gözenekli bir malzeme için idealleştirilmiş kuruma eğrisi gösterilmektedir. Su içeriği-emme ilişkisi kuruma boyunca üç aşamadan oluşmaktadır.



Şekil 2.11 Gözenekli ortam için idealleştirilmiş zemin-su karakteristiği

Doymun durumdan su yitirilmesi ile başlayan birinci aşamada, emme değerinun artması karşısında zeminin doymunluk derecesi azalmaz. Gerçek zeminler için kuruma davranışı, genel eğilimi sergilediği halde çoğu kez bu idealleştirmeden epeyce farklıdır (Şekil 2.12). Zeminin tipi, dane dağılımı, gerilme geçmişi ve ayrışmayı içeren faktörler zeminini su-emme ilişkisinin biçimini belirlemektedir. Ayrıca aynı zeminin doğal, sıkıştırılmış ve yeniden imal edilmiş veya yoğrulmuş numunelerinin emmeye verdiği tepki arasında farklar bulunmaktadır (Dineen, 2000a). Zemin yapısında emme artışı meydana gelirken su içeriği sabitlenmekte ve büzülme nedeniyle boşluk oranı da azalmaktadır.



Şekil 2.12 Zemin ortamında tipik histeretik davranış

Geçiş safhası denilen ikinci aşamada havanın zemin içine girip kılcal emmenin bir eşik değerini aşmasıyla zemin doymunluktan ayrılır. Kılcal gerilmenin kabarcıklanma basıncı denen bu eşik değerden daha büyük bir değer alıp zemin boşluklarına hava girişi olmasıyla zeminden önemli hacimlerde su çıkışı başlar.

İri daneli zeminler ideal gözenekli ortamın davranışına benzer eğilim gösterirler. Oysa ince daneli zeminler süregelen büzülmeyle iri danelilere göre daha düşük bir eğime sahip davranış gösterirler. Doymunluktan ayrılma noktası en büyük boşluk boyutunca belirlenir ve dane boyutu aralığı ve boşluk boyutuna bağlı olarak emmenin artması ilişkinin eğimini belirler. Bu aşamada kılcal emme değerinin artması ile zeminin su içeriği azalmaktadır. Düşük eğim bir geniş dane aralığını (düzgün dane dağılımı) ve

farklı boşluk boyutlarının varlığını, dik bir eğim ise boşluk boyutunun uniformluğunu gösterir.

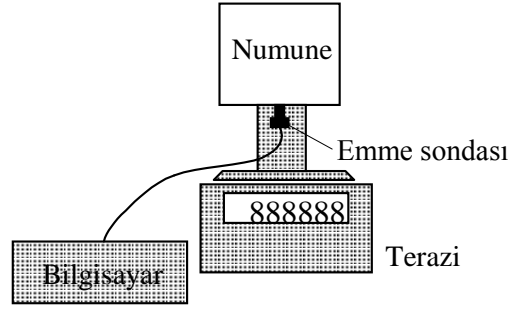
Kalıcı su içeriği denen üçüncü aşamada zemin içinde değişmez bir su oranı kalır ve mevcut su en ince boşluklara kadar çekilir. Bu safhada ortamdan su çıkışı için büyük emme artışına gerek duyulacak, zemin düşük bir doygunluk derecesine sahip olacaktır.

#### **2.4. SWCC Eğrisinin Oluşturulması**

Zemin-su karakteristik eğrisinin belirlenmesi için üç ana yöntem bulunmaktadır: Basınç plakası, filtre kağıdı ve IC emme sondası. Basınç plakası ile istenen emme değerlerini meydana getirmek için eksen kaydırma tekniği kullanılmaktadır. Şekil 2.6'daki düzenek ile numuneye uygulanan hava basıncı ile su basıncı arasındaki fark istenen kılcal emme değerlerinde seçilir. Uygulanan emme sonrası su çıkışı dengeye ulaştığında numune tartılarak su içeriği belirlenir ve bir sonraki emme aşamasına geçilir. Uygulanabilecek en büyük emme değeri kullanılan seramiklerin kabarcıklenme basıncı değeriyle sınırlıdır. Bu değer en fazla 1500 kPa olabildiğinden bundan daha yüksek emme değerleri için basınç zarları kullanılmaktadır.

Filtre kağıdı yöntemi ile, sağlıklı olarak 0.01 – 100 MPa arasındaki emme basınçları ölçülebilmektedir (ASTM D 5298-92). SWCC eğrisini oluşturmak için gerekli farklı emme büyüklükleri numunelerin ıslatılması veya kurutulması ile sağlanmaya çalışılır.

IC emme sondası ile kuruma karakteristikleri numuneye emme sondası ile temasta yerleştirerek ve ikisini birlikte elektronik terazi üzerine yerleştirerek sürekli olarak belirlenebilmektedir (Şekil 2.13). Emme değeri, numune kurudukça sürekli olarak ölçülmekte ve ağırlıktaki azalım su içeriği hesabı için sürekli kaydedilmektedir. Bu yöntemde ölçümler emme sondasının kapasitesiyle (1500 kPa) sınırlı olmakta ve hacim ölçümü alınmadığından doygunluk derecesi ve hacimsel su içeriği hesaplanamamaktadır (Özocak, 2003).



Şekil 2.13 Emme sondası tekniği ile SWCC eğrisi teşkili

## 2.5. Zeminlerde Boşluk Çapı Dağılımının SWCC İle Tayini

Zeminlerin boşluk geometrisi fiziksel ve mekanik davranışını önemli derecede etkileyen önemli bir özelliğidir. Boşluk geometrisini belirlemede en bilinen yöntem civa sokulumu deneyi olmuştur. Zeminin su içeriği ile zemin emmesi arasındaki ilişkiyi tanımlayan zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) ise diğer birçok zemin özelliği hakkında önemli bilgiler vermesinin yanı sıra zeminin boşluk boyutu dağılımı hakkında kullanışlı veri sağlayabilmektedir. Zeminlerin boşluk boyutu dağılımı fiziksel ve mekanik özelliklerinin çoğunu önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle bilinmesi istenmekte ancak genellikle civa sokulumu gibi sıradan laboratuarlarda bulunmayan deney düzeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde önerilen yöntemlere göre (Lu and Likos, 2004) gerçek boşluk boyutu  $r_p$ , Kelvin çapı (hava dolu boşluk çapları)  $r_k$  ile t su filmi kalınlığının toplamından oluşmaktadır. Bu değerler;

$$r_k^i = \frac{2T_s \nu_w}{RT \ln(u_v / u_{vo})} = \frac{2T_s}{(u_a - u_w)} \quad (2.5)$$

$$t_i = \tau \left[ -\frac{5}{\ln(RH)} \right]^{1/3} \quad (2.6)$$

Burada;  $T_s$  = yüzey gerilme değeri (72MN/m),  
 $\nu_w$  = suyun molar hacmi ( $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$ ),  
 $\tau$  = sorbate molekülünün efektif çapı ( $2.77 \text{ \AA}$ )  
 RH = bağıl nemi göstermektedir.

Hesap prosedürü tamamlandığında SWCC eğri verileri kullanılarak söz konusu numunelerin boşluk boyutu dağılımları elde edilebilir.

Boşluk boyutu dağılımı birim kütlede kümülatif boşluk hacmine karşılık ortalama boşluk boyutu eksenlerinde çizilmektedir.



### **BÖLÜM 3. ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞINDA ADAPAZARI KRİTERİ**

Kumlara özgü olduğu düşünülen sıvılaşma olayının depremlerde elde edilen gözlem sonuçları ve araştırmalar neticesinde silt boyutundaki ince daneli zeminlerde de oluşabileceği görülmüştür. 1980'li yıllarda siltlerin de kumlar gibi sıvılaşma göstereceği varsayılır olmuştur. Özellikle Çin depremlerinden elde edilen deneyimler önce Çin Kriteri olarak tanımlanan özelliklerle literatüre yansımıştır (Wang, 1979). Çin kriteri siltin sıvılaşmasını doğal su muhtevası, likit limit, kil yüzdesi ( $<5\mu\text{m}$ ) gibi fiziksel özelliklere bağlamıştır. Sakarya Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiş araştırmalar siltlerin sıvılaşma yeteneğinin zeminin fiziksel özellikleri ile kolayca saptanabileceği bulgularını getirmiş ve bu amaca yönelik olarak Adapazarı Kriteri'nin revize edilmiş biçimi önerilmiştir (Bol v.d., 2010).

Siltlerde sıvılaşmanın, kumlarda görülen kolaylıkla oluşmadığı, hatta MI ve MH siltlerde olağan deprem koşullarında ( $M_w < 7$ ,  $t < 50\text{s}$ ) belki de hiç belirmediği yolunda kuşkular vardır. Buna bağlı olarak da siltlerin kumsu ve kilsli olarak ayırtlanması ve sıvılaşabilir grubun daha ziyade kumsular olduğu öne sürülmüştür (Idriss ve Boulanger, 2006). Daha açık bir ifade ile, kilsli siltte ve killi zeminlerde sadece çevrimsel yumuşama olası iken kumsu karışımlarda tipik sıvılaşma belirtileri ortaya çıkmaktadır. Kesin yargıya varılamayan birçok durumda da dinamik deneyler yapılması hemen tüm araştırmacılarca önerilmektedir.

Adapazarı Kriterleri olarak sunulan (Önalp ve Arel, 2002) ve siltli zeminlerin 1999 depreminde performansını yansıtan bilgiler literatürde Çin kriteri olarak anılan bilgilerin kritik değerlendirilmesi ile üretilmiştir. Bu bilgiler sürekli yeni deneyler ve incelemelerle güncellenmektedir. Bu kriterler büyük arazide sıvılaşmış/sıvılaşmamış sitelerde yapılan gözlemler ve buralardan alınan numunelerin deneye tabi tutulması ile geliştirildiğinden, güvenilirliği yüksek olarak nitelendirilebilir. Son biçimi ile Adapazarı Kriteri'ne göre bir ince daneli zeminin sıvılaşabilmesi için

$I_L \geq 0.9$  ( $w_p$  ölçülemiyor ise  $w_n/w_L$  oranı)

$w_L \leq 33$

$C \leq \%10$

$D_{50} > 0.02$  mm

koşullarının tümünün sağlanması gerekmektedir. Bu kriterde  $25 < w_L < 33$  ve  $10 < \%C < 15$  aralıklarında numunelerin dinamik deneylerle değerlendirilmesi önerilmiştir (Bol vd., 2010). Adapazarı kriterlerinde plastisite indisinin yer almamasının nedeni olarak düşük plastisiteli ile sınıvlaşabilir NP zeminlerde plastik limitin ölçümdeki tutarsızlıklar gösterilebilir. Bölgenin üst sınırı ise  $I_p = 12$  ile gösterilmiş olup, Bray ve Sancio (2006) önerisi ile uyum içindedir. Ancak, bu plastisite indisi değerinin deneyle ölçülebilir en alt sınırı göstermesi nedeniyle, belki de sadece NP siltlerin sınıvlaşabileceği gerçeği tartışılır olmaktadır. Öneriler genel olarak değerlendirildiğinde, sınıvlaşabilir siltli zeminlerin “kumsu” karakterde olduğu hakkında görüş birliği olduğu, kumsu’dan kilsî’ye geçişte mekanik deneylerden de yararlanılarak yargıya varılmasının uygun olacağı ve sonuçta kilsî zeminlerin sınıvlaşmayacağı gibi bir görüş belirlemektedir.

## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Zemin Özellikleri

Bu tez çalışmasında, Adapazarı kent merkezinden sağlanan zemin numuneleri kullanılmıştır. Deneyle hazırlanan karışımlar iki ayrı silt ve bir kil numunesi kullanılarak elde edilmiştir. Siltlerden bir tanesi Adapazarı kent merkezinden, Yenigün Mahallesi Tacettin Sert arsasından alınan numunedan elde edilmiştir. İkinci silt numunesi ise yine kent merkezi Merkez Yenicami Mahallesi Yenikent sitesinden alınan numunedan elde edilmiştir. Karışımlarda kullanılan kil ise Yenigün Mahallesi Tacettin Sert numunesinden elde edilen kildir.

Çalışmada kullanılan bu örselenmiş zemin numunelerinin öncelikle temel özellikleri belirlenmiştir. Kıvam ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; numuneler üzerinde elek ve çöktürme analizleri, kıvam limitleri, büzülme limiti, özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda işlem yapılmamış doğal numuneler üzerinde belirlenen özellikler toplu olarak Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan doğal zeminlerin fiziksel özellikleri

	Yenikent Silti (Doğal)	T.Sert Silti (Doğal)
Simge	ML	ML
Renk	A.Kahve	A.Kahve
Likit Limit ( $w_L$ )	30	34
Plastik Limit ( $w_P$ )	NP	23→NP
Plastisite İndisi ( $I_P$ )	NP	7→NP
Büzülme Limiti ( $w_S$ )	25	31
Özgül Ağırlık ( $G_s$ )	2.69	2.72
Kil Oranı (C %)	9	10
Silt Oranı (M %)	69	60
Kum Oranı (S %)	22	30

## 4.2. Numune Hazırlama İşlemleri

### 4.2.1 Ön hazırlık

Adapazarı kent merkezinden sağlanan zemin numunelerinden saf silt ve kil elde edebilmek için bu numunelere birçok işlem yapılmıştır. Laboratuara getirilen numuneler ilk olarak 40 no'lu elekten elenerek havuza alınmıştır. Havuza yeteri kadar numune alındıktan sonra havuz su ile doldurulup iyice karıştırılmıştır. Karıştırılan numune kronometre kontrolü ile 5 dakika beklenip üst tarafta kalan su ve kil karışımı santrifüj yardımıyla başka bir havuza alınmıştır. Bu numuneye aynı adımlar altı sefer daha yapıp kil numuneden iyice ayrılmıştır (Foto 4.1).



Foto 4.1. Santrifüj yardımıyla kilin ayrıştırılması

Santrifüj ile havuza alınan karışımda, kil tanelerinin havuz tabanına çökmesi beklenilmiş, havuz tabanına killer çökelinece üstte kalan fazla su havuzdan çıkarılmış ve tabandaki kil kovalara alınmıştır. Böylece deneylerde kullanılacak kil elde edilmiştir.

Kili ayrıştırılmış olan numune kovalara alınarak 200 no'lu elekten yıkama yöntemiyle siltin eleğin altına geçmesi sağlanmış, bu şekilde de silt ve kum ayrıştırılmıştır (Foto 4.2).



Foto 4.2. Siltin 200 nolu elek yardımıyla ayrıştırılması

Ayrıştırılan silt içinde az da olsa kil bulunduğu için tekrar havuza alınmış, havuza alınan numune iyice karıştırılıp 5 dakika beklenmiş ve santrifüj yardımıyla tekrar kilinden ayrıştırılmıştır. Bu işlem 5 kez tekrarlanarak numunenin içerdiği kil miktarının tamamına yakınının uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Elde edilen silt metal kaplara koyularak 40°C'lik etüvde 24 saat beklenmiştir. Sonrasında etüvden çıkarılan numune masalara serilerek oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Foto 4.3).



Foto 4.3. Elde edilen siltin oda sıcaklığında kurutulması

Silt kurumaya bırakıldıktan sonra tokmakla dövülerek ve 200 no'lu elekten elenerek muhafaza edilmiştir.

#### 4.2.2 Karışımların hazırlanması

Deneyleerde kullanılacak numunelerin hazırlanması öncesinde eldeki silt ve kilin su muhtevaları hesaplanmıştır. Su muhtevaları hesaplanan silt ve kil numuneler istenen yüzde oranlarını sağlamak amacıyla belirlenen oranlarda ağırlıkça katılarak karışımlar hazırlanmıştır. İki adet doğal silt ve bir adet doğal kil numunesinin yanı sıra farklı oranlarda hazırlanan 13 adet karışım elde edilmiştir.

Fiziksel özellik deneyleri haricinde kullanılacak numuneler likit limit değerinin 1,5 katı su içeriğinde hazırlanarak bulamaç hale getirilmiştir. Hazırlanan bulamaçlar desikatörde emme basıncına maruz bırakıldıktan sonra bir hafta süreyle bekletilmiştir. Yüksek su içeriğine sahip bulamaç belli bir süre bekledikçe üzerinde su birikmektedir. Bu nedenle bulamaçlar kullanılmadan önce tekrar iyice karıştırılmışlardır.

#### 4.2.3 Bir boyutlu konsolidasyon uygulaması

Bulamaç haline getirilen numuneler; basınç plakası ve filtre kağıdı deneylerinde kullanılmak üzere 100 kPa gerilme altında tek boyutlu konsolidasyona tabi tutulmuştur. Konsolidasyon işlemi 55mm çaplı yüksek silindirler içinde gerçekleştirilmiştir. Hücre tabanına doyurulmuş gözenekli taş ve filtre kağıdı konulduktan sonra hücreye yerleştirilmeden önce tekrar karıştırılan numune içerisinde hava kabarcığı oluşmasına meydan vermeyecek şekilde doldurulmuştur. Hücre içindeki bulamaç numunenin üzerine sırasıyla filtre kağıdı gözenekli taş ve üst başlık yerleştirildikten sonra kendi ağırlığı altında konsolidasyonunun sağlanması amacıyla hücre kapatılmış ve bir gün süre ile bekletilmiştir. Sonraki gün hücre düşük gerilme artışlarıyla yüklenmeye başlanmış ve 100 kPa gerilme eşdeğeri yüke kadar yüklenerek konsolidasyona maruz bırakılmıştır. En az bir hafta süren konsolidasyonun tamamlandığı düşey sıkışmanın ölçümü ile kontrol edilmiştir (Foto 4.4). Numunenin 100 kPa altında tek boyutlu konsolidasyonu tamamlanmasından sonra yük boşaltılarak numune çıkartılmıştır.



Foto 4.4. Bulamaç numunelerin tek boyutlu konsolidasyonu

Filtre kağıdı deneyi için iki, basınç plakası deneyi için bir adet numune hazırlanması için numune silindirden çıkartılmıştır. Silindirden çıkarılan numune özel olarak hazırlanan 50 mm çap ve 20 mm yüksekliğe sahip ringlere özenle alınmıştır (Foto 4.5). Numuneler bu halkaların içlerine alındıktan sonra altları ve üstleri düzeltilerek deneye hazır hale getirilmiştir. Her konsolidasyon hücresinden bu şekilde üç adet numune hazırlanmıştır. Bu üç numunenin ikisi filtre kağıdı deneyi için diğer bir tanesi de basınç plakası için hazırlanmıştır.



Foto 4.5. Numunelerin ringlere alınması

### 4.3. Deneysel Çalışmalar

Bu başlık altında tez kapsamında Laboratuvarda yapılmış olan deneyler anlatılmıştır. Araştırmanın bünyesinde numunelerin likit limitini belirlemek için çarpmalı yöntem ve koni düşürme yöntemi ile likit limit deneyleri, plastik limit deneyi, büzülme limitini belirlemek için hacimsel büzülme deneyi, özgül ağırlık deneyi, dane çapı dağılımının bulunması için pipet ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Zemin-su karakteristik eğrilerini elde etmek için ise basınç plakası ve filtre kağıdı deneyleri uygulanmıştır. Karışım numunelerinin fiziksel deney sonuçları özet olarak Tablo 4.2’de görülmekte olup, dane dağılımı eğrileri EK-I’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Karışım numuneleri fiziksel özellikleri

Numune Adı	Çarpmalı $w_L$	Koni $w_L$	Plastik Limit	$I_p=w_L-w_p$	% Kil	$D_{50}$		Büzülme Limiti	$G_s$	Simge
						Hidrometre	Pipet			
K020	NP	38	NP	NP	2	0.037	0.037	29	2.72	ML
K024	NP	38	NP	NP	2.4	0.040	0.035	30	2.71	ML
K032	NP	36	NP	NP	3.2	0.039	0.038	29	2.72	ML
K040	NP	36	NP	NP	4	0.039	0.036	27	2.7	ML
K043	NP	35	NP	NP	4.3	0.037	0.035	29	2.7	ML
K048	NP	34	NP	NP	4.8	0.030	0.036	28	2.7	ML
K050	NP	35	NP	NP	5	0.031	0.035	27	2.7	ML
K056	NP	34	NP	NP	5.6	0.028	0.034	27	2.69	ML
K072	30	33	26	NP	7.2	0.030	0.034	25	2.7	ML
K080	32	36	23	9	8	0.025	0.027	24	2.73	ML
K096	33	37	24	9	9.6	0.024	0.024	23	2.72	ML
K112	34	37	22	12	11.2	0.021	0.030	23	2.72	ML
K144	35	37	22	13	14.4	0.016	0.020	26	2.72	MI
K184	55	52	27	28	18.4	0.007	0.007	22	2.71	CH
Tsert	NP	37	NP	NP	1.6	0.034	0.040	31	2.72	ML
Yenikent	NP	32	NP	NP	3.2	0.046	0.035	23	2.7	ML

Bu kısımda laboratuvarda yapılan hacimsel büzülme deneyi ile zemin-su karakteristik deneylerinden de basınç plakası ve filtre kağıdı deneyleri detaylı olarak anlatılacaktır.



#### 4.3.1. Büzülme limiti deneyleri

Deneyleerde kullanılan 16 karışım numunesinin hepsi için hacimsel büzülme deneyi yapılmıştır. TS 1900-2006' ya göre yapılan deneyleerde hacim ölçümü için cıvaya batırma yöntemi uygulanmıştır.

Bu deneyleerde ince daneli zemin numunesi, kıvamı likit limit değerine yaklaşıana kadar su katılarak karıştırılır. Karıştırılan numune büzülme potasının hacminin 1/3'ü civarında doldurulur (Foto 4.6). Pota hafif vuruşlarla sarsılarak numunenin kenarlara yayılması ve içerisindeki havanın çıkması sağlanır. Pota tamamen doldurulduktan sonra üzeri perdahlanır ve kenarlara bulaşmış olan numuneler temizlenir (Foto 4.7). Doygun karışım çok yavaş olarak kurutulur. Numune rengi koyudan açık olana kadar ve potanın kenarlarından ayrılan kadar beklenir. Kenarlardan ayrılan numune zarar görmeden potanın üst kısmı çıkarılır, daha sonra numune potanın alt kısmından da ayrılarak potadan çıkartılır (Foto 4.8). Numune kuruma esnasında belli aralıklarla hacim ve kütle ölçümleri alınır. Son olarak numune etüvde kurutulur, son hacmi ve kütlesi bulunur.



Foto 4.6. Büzülme potasına numune doldurma



Foto 4.7. Büzülme potasını perdelama



Foto 4.8. Büzülme potasından çıkarılacak numune



Foto 4.9. Büzülme takımı ve iki parçalı büzülme potası

Büzülme limiti ( $w_s$ ), kohezyonlu bir zeminin en küçük boşluk oranında etüvde kurutulmasından sonra boşluklarını dolduran suyun miktarı olarak tarif edilir (TS 1900-2006).

Tablo 4.2’de verilmiş olan büzülme limiti sonuçlarının deney grafikleri EK-II’de sunulmuştur.

#### **4.3.2. Zemin–su karakteristik deneyleri**

Numunelerin zemin-su karakteristik özelliklerini (SWCC) belirlemek için tüm numunelere basınç plakası ve filtre kağıdı deneyleri uygulanmıştır.

##### **4.3.2.1. Filtre kağıdı deneyleri**

Filtre kağıdı yönteminin prensibinde, kılcal gerilmelerin ölçülmesi için filtre kağıdının zemin suyu ile, toplam emme basınçlarının ölçülmesi için ise zemin suyunun buharı ile sabit bir sıcaklıkta dengeye gelmesi beklenir. Genellikle 1 hafta süren dengelenme 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 tüm zemin numuneleri üzerinde filtre kağıdı tekniği kullanılarak toplam ve kılcal gerilme ölçümü deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla Whatman No.42 filtre kağıtları kullanılmıştır. 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.

Filtre kağıdı tekniğinde takip edilen adımlar :

1- Kılcal gerilmenin ölçülmesi amacıyla, 110°C'lik etüvde 24 saat kurutulmuş ve etüvden, desikatöre alınarak korunan bir adet 4.8 cm çapındaki filtre kağıdı, iki adet 5 cm çapındaki koruyucu filtre kağıtlarının arasına yerleştirilmiştir (Foto 4.10). Bu işlemler sırasında kuru olan filtre kâğıtlarının herhangi bir şekilde nem almasını engellemek için cımbız kullanılmıştır. Kılcal gerilme değerini belirlemek için üç adet filtre kağıdı kullanmanın nedeni, asıl ölçüm için kullanılan ortadaki 4.8 cm çapındaki filtre kağıdına zemin numunesinin bulaşmasını engellemektir.



Foto 4.10. Filtre kağıtlarının hazırlanması

2- Sandviç şeklinde hazırlanan filtre kağıtları iki parça zemin numunesinin arasına tam bir temas sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir (Foto 4.11).



Foto 4.11. Kılcal gerilme ölçümü (Sandviç şeklinde hazırlanan filtre kağıtlarının zemin numunelerinin arasına yerleştirilmesi)

3- Toplam emme basıncının ölçülmesi amacıyla, zemin numunesinin üzerine, zemin numunesi ile filtre kağıtlarının temasını önlemesi için 2 cm çapında ve 1 cm yüksekliğindeki plastik ring yerleştirilmiştir.

4-Filtre kağıdı toplam zemin emmesini ölçmek üzere ringin üzerine yerleştirilmiştir (Foto 4.12). Filtre kağıtlarının hiçbir şekilde zemin numunesine, kavanozun yan duvarlarına temas etmemesine dikkat edilmiştir.

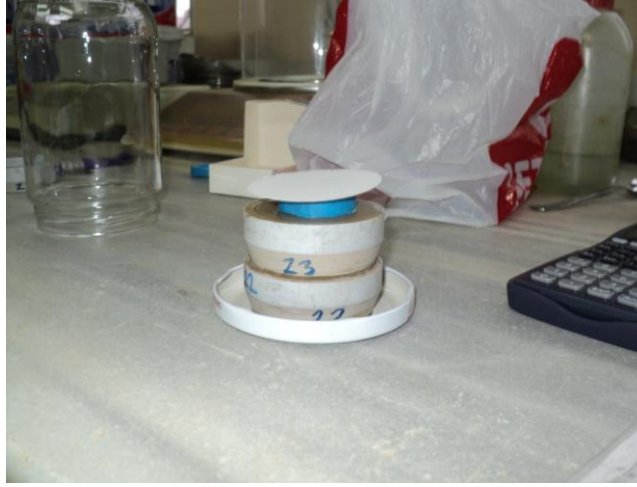


Foto 4.12. Ringin üzerine filtre kağıtlarının yerleştirilmesi

5- Arasında filtre kağıtları bulunan zemin numunesi cam bir kavanozun içine yerleştirilmiştir (Foto 4.13). Filtre kağıtları ile zemin numunesi arasında dengenin kurulabilmesi için hiçbir şekilde hava almayacak kavanozlar seçilmiştir.



Foto 4.13. Zemin numunesinin cam kavanoza yerleştirilmesi



6- Daha sonra, cam kavanozlar dengelenme süresini tamamlamaları için özel olarak yalıtım malzemelerinden hazırlanan termos kutuya yerleştirilmiş ve sıcaklığı 22°C’de sabit tutulan odada muhafaza edilmiştir (Foto 4.14).



Foto 4.14. Kavanozların termos kutuya yerleştirilmesi

Tüm deneyler yukarıda anlatılan toplam 6 adım tekrarlanarak tamamlanmıştır. Deneyler nem ve ısı kontrollü ortamda gerçekleştirilmiştir. Dengelenme için 1 hafta beklenilmiştir.

Filtre kağıtlarında su muhtevalarının belirlenmesi :

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

1- Öncelikle, 2 adet alüminyum, kapaklı numune kutusunun soğuk haldeki daraları ( $T_c$ ) 0.001 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılarak belirlenmiştir. Bu kaplardan biri toplam emme basıncının belirlenmesi için numunenin üzerine yerleştirilen filtre kağıdının su muhtevasının ölçülmesinde; diğeri ise zemin numuneleri arasına kılcal gerilmenin belirlenmesi için yerleştirilen üç adet filtre kağıdından ortadakinin su muhtevasının ölçülmesi için kullanılmıştır.

2- Cam kavanozlar termos kutudan çıkarıldıktan sonra; kavanozun kapağını açar açmaz cımbız kullanarak üstteki filtre kağıtlarından her birini ayrı olmak üzere alüminyum kutulara yerleştirmiş ve nem kaybının önlenmesi için derhal kutuların kapakları kapatılmıştır. Hiç vakit kaybedilmeden içinde, yağ filtre kağıtları olan kutuların ağırlıkları ( $M_1$ ) belirlenmiştir. Tüm bu işlemler 3-5 sn içinde tamamlanmıştır.

3- Daha sonra numunenin arasındaki sandviç şeklinde hazırlanmış filtre kağıtlarından ortadaki alüminyum numune kutusuna alınarak tartılmıştır. İçinde yağ filtre kağıtları bulunan alüminyum numune kutuları  $110^{\circ}\text{C}$ ' lik etüve yerleştirilmiştir.

4- Alüminyum numune kutuları  $110^{\circ}\text{C}$ ' lik etüve 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, soğuması için bir metal blok üzerine yerleştirilmiştir.

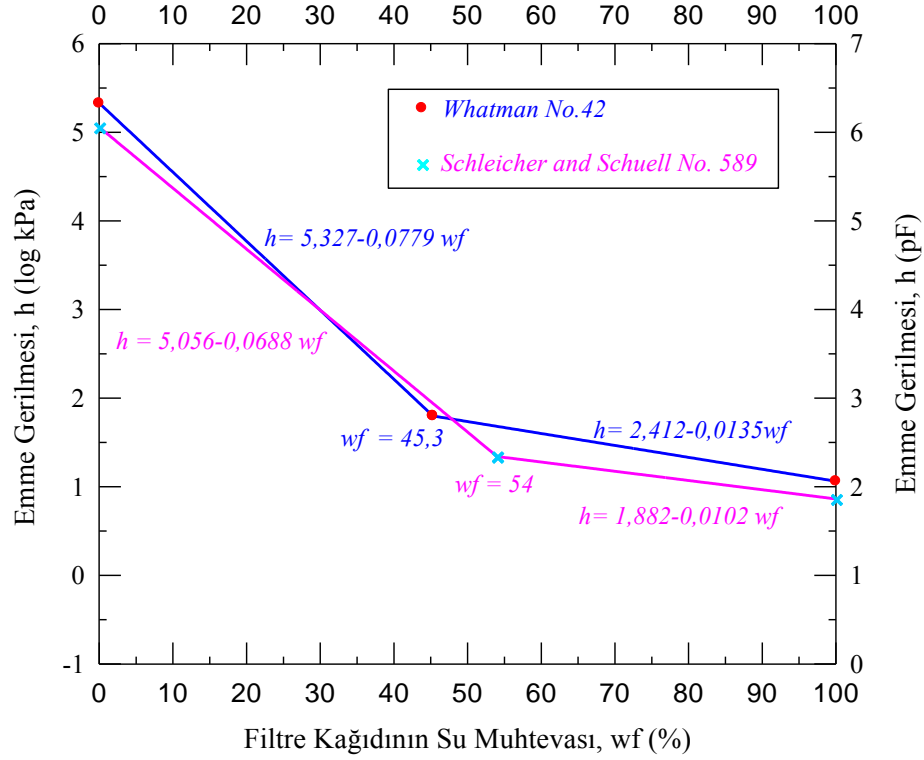
Bu sürecin sonunda kutular içindeki kuru filtre kağıtlarıyla birlikte hemen tartılarak  $M_2$  ağırlıkları belirlenmiştir. Bu işlemi takiben kuru filtre kağıdı kutudan çıkarılmış, boş kutu birkaç saniye içinde tekrar tartılmış ve bu ağırlık, sıcak ağırlık ( $T_h$ ) olarak kaydedilmiştir. Alüminyum numune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

5- Toplam emme ve kılcal gerilme değerlerinin belirlenmesi için filtre kağıtlarının su muhtevaları hesaplanmıştır (ASTM D 5298-92).

Filtre kağıdı tekniği ile toplam emme ve kılcal gerilmelerin belirlenmesi :

Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin emme değerlerinin belirlenmesinde, numunelerin üst kısımlarına temassız olarak yerleştirilen ikişer adet filtre kağıdının su muhtevaları 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 4.1.' de gösterilen kalibrasyon eğrisi ve

Eşitlik 4.1, Eşitlik 4.2 kullanılarak zemin numunelerinin emme büyüklükleri belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Filtre kağıdının su muhtevasına bağlı olarak emme-su muhtevası eğrilerinin kalibrasyonu (ASTM D 5298, 1992)

$$\Psi (\text{Log kPa}) = 5.056 - 0.0688 w_f \quad (w_f < \%54) \quad (4.1)$$

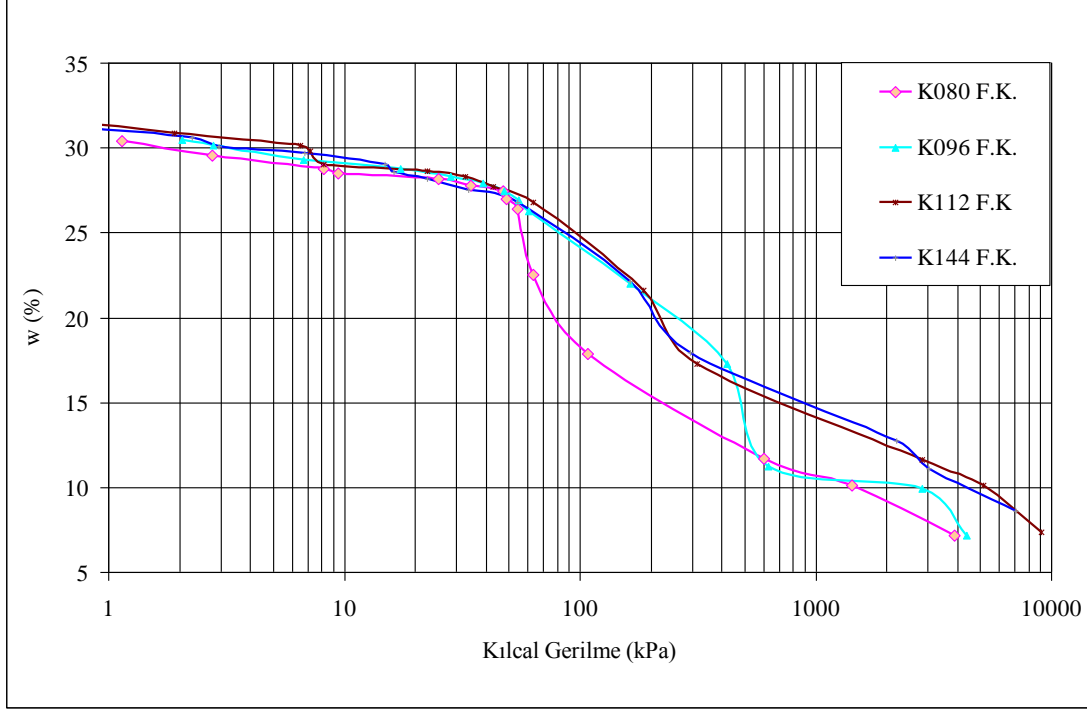
$$\Psi (\text{Log kPa}) = 1.882 - 0.0102 w_f \quad (w_f > \%54) \quad (4.2)$$

Siltli numunelerde hacim ölçümünün zorluğundan dolayı ve numunelerin ringlerden çıkartılmadan deneyler yapılması zorunluluğu olduğundan, SWCC eğrileri sadece su muhtevasına göre oluşturulmuştur.

Filtre kağıdı deneyi K080, K096, K112 ve K144 isimli numunelere uygulanmıştır. Basınç plakası deneyi ile elde edilemeyen yüksek kılcal gerilme değerleri elde edilmiş ve sonuçlar ileriki bölümlerde basınç plakası değerleriyle mukayese edilmiştir. 14 hafta süren deneyler sonucunda SWCC eğrileri oluşturulmuştur.



Deneylerde kullanılan numunelerin filtre kağıdı yöntemiyle oluşturulan SWCC eğrileri Şekil 4.2 'de yer almaktadır.

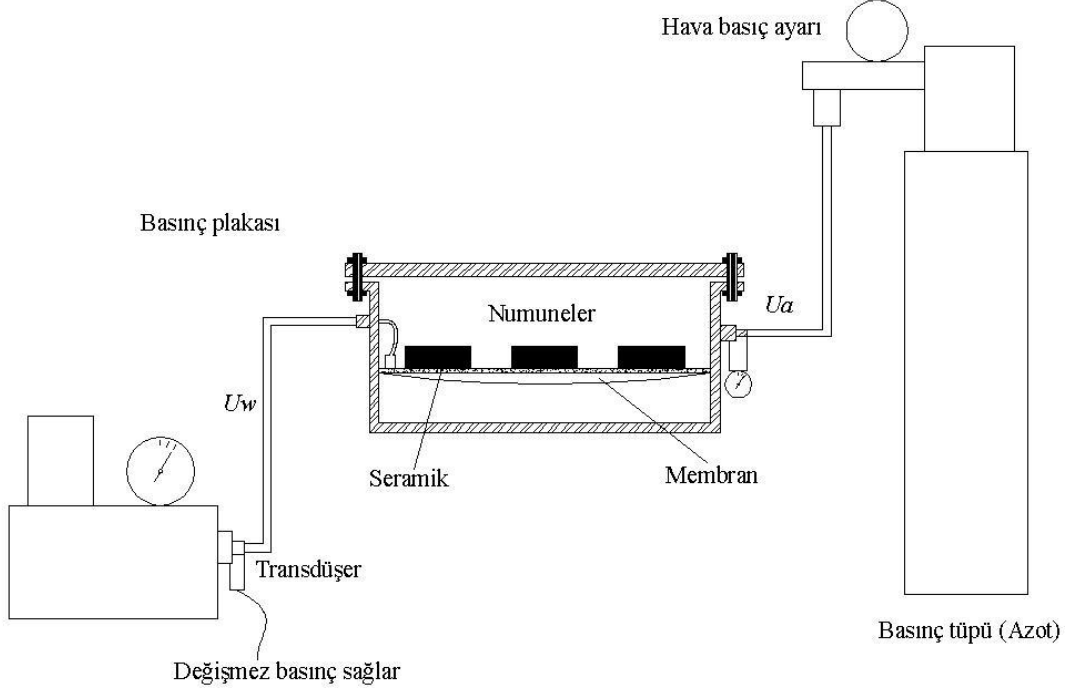


Şekil 4.2. Filtre kağıdı yöntemiyle oluşturulan SWCC eğrileri

#### 4.3.2.2. Basınç plakası tekniği ile bulunan SWCC eğrileri

Tez çalışmasındaki tüm bulamaçların filtre kağıdı yanı sıra, basınç plakası yöntemi ile de SWCC eğrileri oluşturulmuştur. Tüm numuneler 100 kPa'a konsolide edilerek 5 cm çap 2 cm yüksekliğe sahip özel ringlerin içine alınmıştır. Şekil 4.3'de görülen basınç plakası içindeki önceden doyurulmuş (Foto 4.15) 1500 kPa kabarcıklanma basıncı değerli seramik üzerine (Foto 4.16) yerleştirilen doygun numunelere plaka üst girişinden hava basıncı ( $u_a$ ) seramik girişinden de su basıncı ( $u_w$ ) uygulanmıştır. Hava basıncı ve su basıncı arasındaki farka eşit olan kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) büyüklükleri 10 kPa'dan başlayarak artan adımlarla 1500 kPa'a kadar uygulanmıştır. Numunelerin uygulanan emme kademelerinde dengeye gelmeleri için her adımda en az bir hafta beklenmiştir. Her adım sonunda numune su içeriğini belirlemek amacıyla numunelerin ağırlık ve hacim ölçümleri alınmış, 1500 kPa'lık emme altında denge oluşumundan sonra numune kuru ağırlık ölçümü de alınıp SWCC eğrileri teşkil edilmiştir.

Siltli numunelerde hacim ölçümünün zorluğundan dolayı ve numunelerin ringlerden çıkartılmadan deneyler yapılmak zorunda olduğundan sadece su muhtevasına göre SWCC eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 4.3. Basınç plakası deney düzeneği (Özocak, 2003)



Foto 4.15. Seramiğin desikatörde doyurulma işlemi

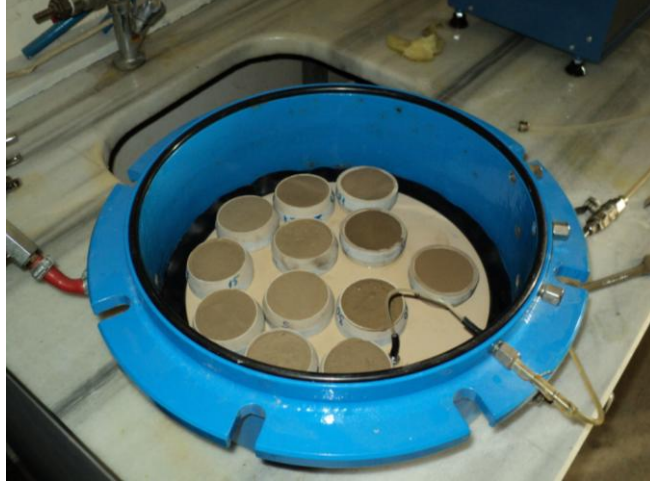
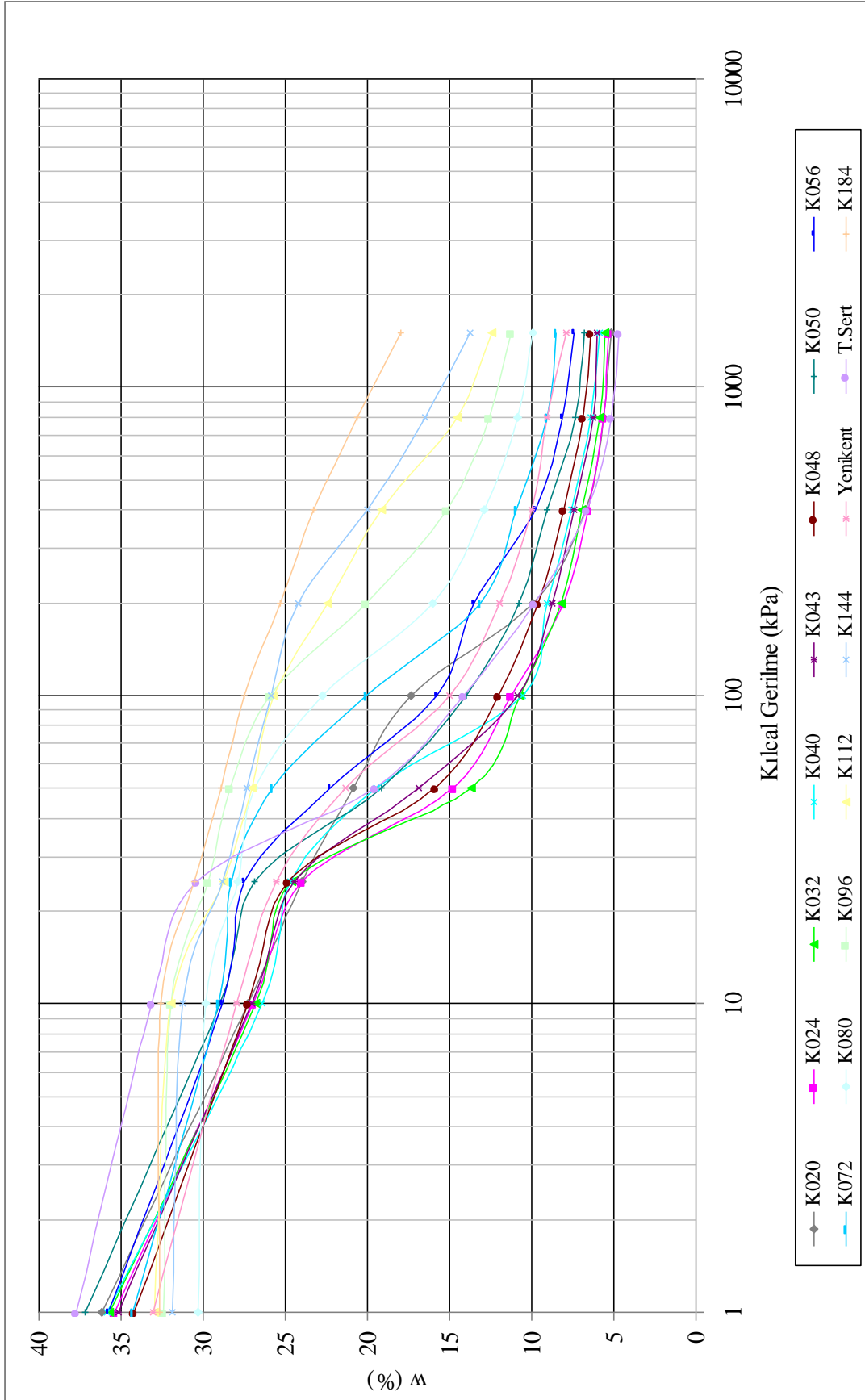
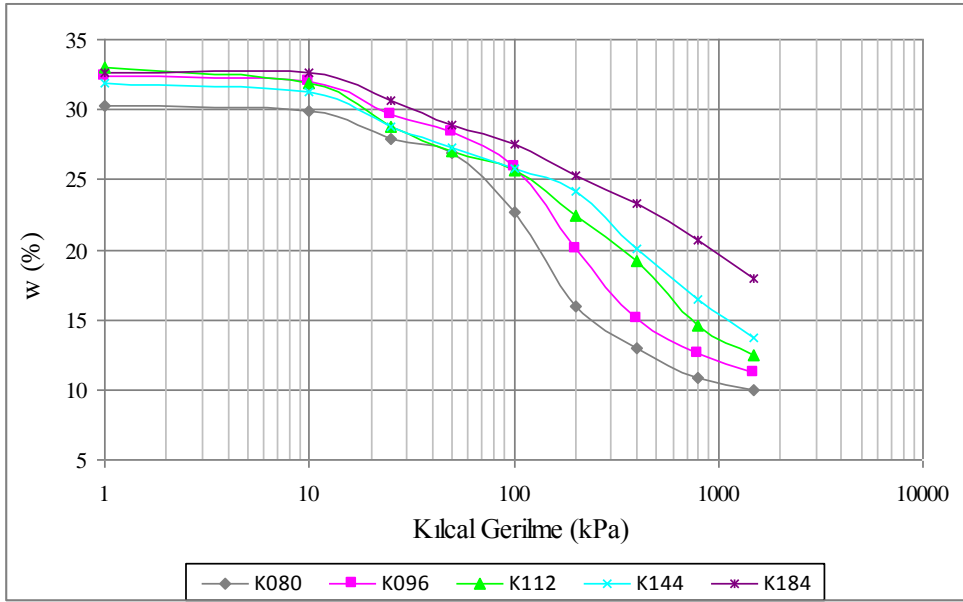


Foto 4.16. Seramik üzerine yerleştirilen numuneler

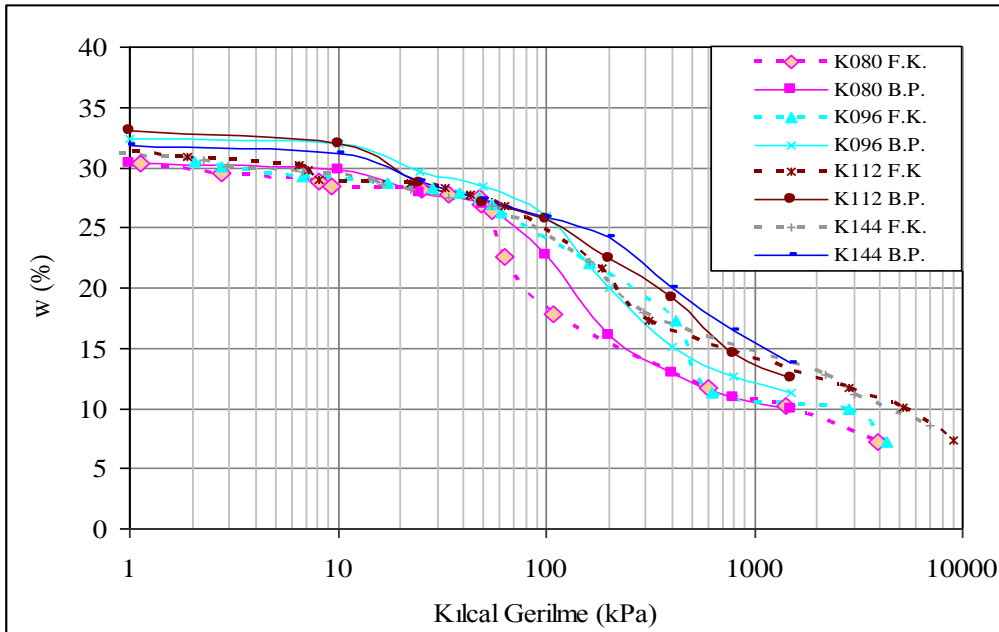
Şekil 4.4'te tüm karışımların basınç plakası deneyinden elde edilen zemin-su karakteristik eğrileri yer almaktadır. Şekil 4.5'de ise, kil oranları %8 den başlayıp %18.4 oranlarına çıkan numunelerin SWCC eğrileri daha net görülmesi ve yorumlanması için Şekil 4.4.'den alınarak bir arada gösterilmiştir. Eğrilerde ilk göze çarpan kil oranı arttıkça eğrilerin yukarı doğru ötelenmesidir. Yine eğrilerin doygunluk oranları kil oranı ile artmaktadır. İdeal bir SWCC eğrisinde eğriler, kabarcıklanma basıncına dek çok düşük eğimlerde devam eder ve bu noktadan sonra geçiş safhası denilen ikinci aşamada zemin boşluklarına hava girişi olmasıyla yüksek eğimde azalmaktadır. İkinci aşamadan sonra ise kalıcı su içeriği denilen son aşamaya geçilir. Bu aşamada ise su en ince boşluklara çekilerek eğrinin eğimini yataya yaklaştırmaktadır. Şekil 4.5'de ilk iki aşama çok net bir biçimde görülmektedir. Son evre olan suyun en ince boşluklara çekilerek eğimi doğruya yaklaştırması Şekil 4.5' te görülemez de eğrinin gidişatı daha yüksek basınçlar uygulanabilse yataya yaklaşacağı yönündedir. Kil oranı daha az olan numunelerde ise durum biraz daha farklı olmaktadır. Şekil 4.4' de kil oranı daha az olan numunelerin son evreye geçişleri daha net görülmektedir. Kil oranı yüksek olan numunelerin SWCC eğrisindeki son evreleri olan suyun en ince boşluklara çekilerek eğimi yataya yaklaştırması aşamasını görebilmek için filtre kağıdı deneyleri yapılmıştır. Basınç plakası ile 1500 kPa gerilme uygulanabilirken filtre kağıdı yöntemiyle 10000 kPa gerilmeler elde edilmiştir.





Şekil 4.5. Basınç plakası yöntemiyle oluşturulan beş numunenin SWCC eğrileri

Şekil 4.6'da önceki konularda yapım aşamaları ve grafikleri verilen filtre kağıdı yöntemiyle elde edilen SWCC eğrileri ve basınç plakası yöntemiyle elde edilen SWCC eğrileri aynı grafikte gösterilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleriyle elde edilen eğriler birbirleriyle benzerlik göstermektedir. Ancak filtre kağıdının hassaslığı konusunda şüpheler yok değildir. Zemin numunesi ile filtre kağıdı arasındaki etkileşim, deneyin doğruluğunu etkilemektedir.

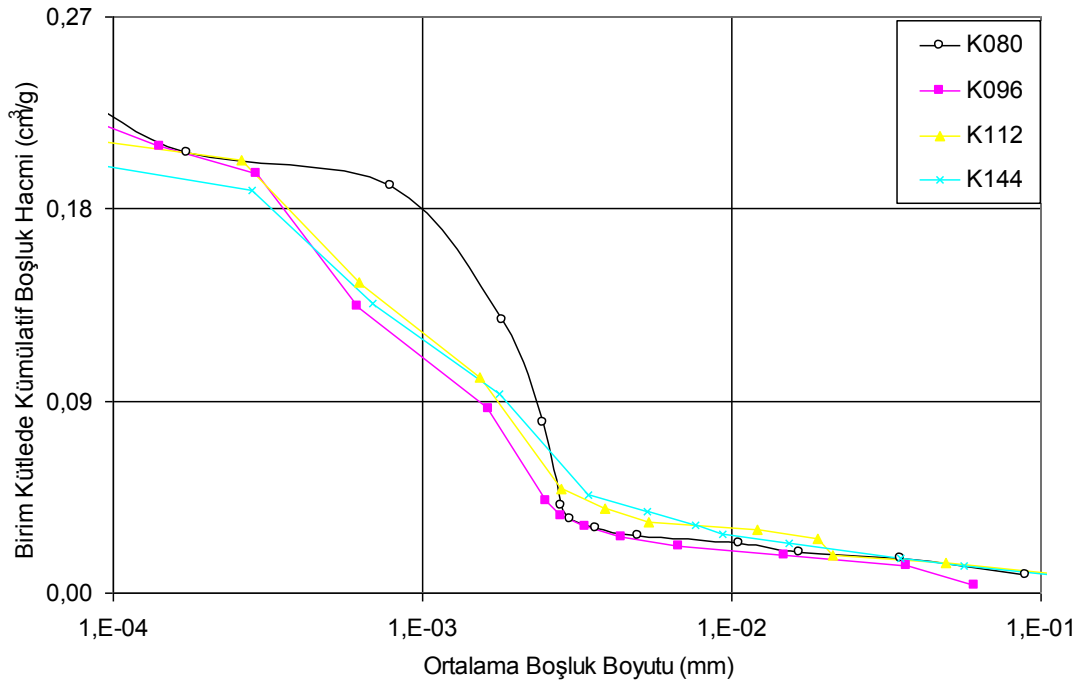


Şekil 4.6. Basınç plakası ve Filtre kağıdı yöntemiyle oluşturulan SWCC eğrileri

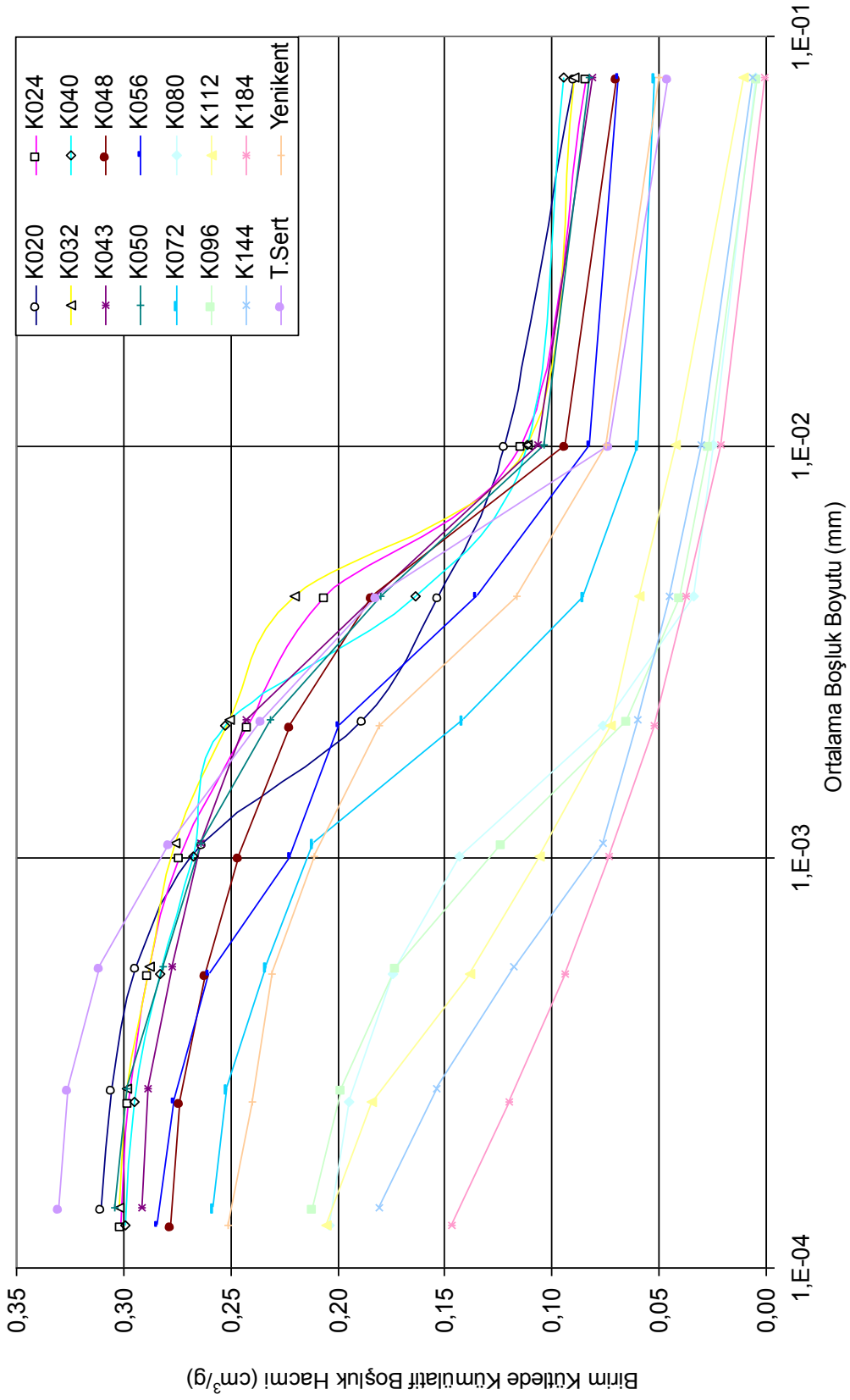
### 4.3.3. Boşluk dağılımının belirlenmesi

Boşluk geometrisi fiziksel ve mekanik davranışı önemli derecede etkileyen önemli bir özelliktir. Zeminin su içeriği ile zemin emmesi arasındaki ilişkiyi tanımlayan zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) ise diğer bir çok zemin özelliği hakkında önemli bilgiler vermesinin yanı sıra zeminin boşluk boyutu dağılımı hakkında kullanışlı veri sağlayabilmektedir. Burada, Bölüm 2’de anlatılan hesap prosedürü uygulanarak SWCC eğri verileri kullanılarak söz konusu numunelerin boşluk boyutu dağılımları elde edilmiştir.

Boşluk boyutu dağılımı birim kütlede kümülatif boşluk hacmine karşılık ortalama boşluk boyutu eksenlerinde çizilmektedir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de Filtre kağıdı ve Basınç plakası yöntemleriyle elde edilen SWCC verileri ile hesaplanan boşluk boyutu dağılım eğrisi görülmektedir. Şekil 4.9’de ise Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’da çizilen boşluk boyutu dağılımı eğrilerinin Filtre kağıdı ve Basınç plakası yöntemlerinde ortak alınan 4 numunenin gösterimi yer almaktadır.



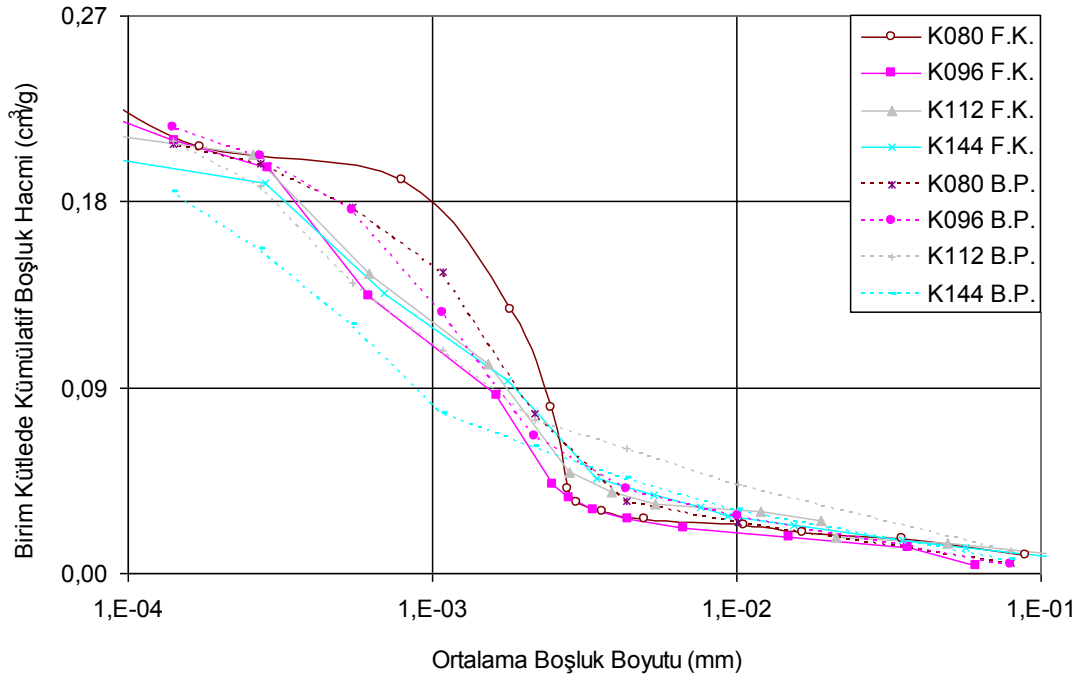
Şekil 4.7. Filtre kağıdı yöntemiyle elde edilen boşluk boyutu dağılım eğrileri



Şekil 4.8. Basınç plakası yöntemiyle elde edilen boşluk boyutu dağılım eğrileri

Boşluk boyutu dağılımı açısından basınç plakası yöntemiyle elde edilenin filtre kağıdına göre elde edilenden daha büyük bir aralığa sahip olması sebebiyle ve grafiklerdeki kararlılığı daha net görüldüğünden Şekil 4.8'i incelemek daha verimli olacaktır. Tüm şekillerde ortalama boşluk boyutunun  $10^{-4}$  ile  $10^{-1}$  mm arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 4.8.'e bakıldığında K080, K096, K112, K144 ve K184 numunelerinin diğer numunelerden çok belirgin bir şekilde ayrıldığını görmekteyiz. Adapazarı kriteri açısından da inceleme yapıldığında bu belirgin grafiğin sıvılaşma potansiyeli açısından da önemli sonuçlar doğuracağı düşünülmektedir.



Şekil 4.9. Filtre kağıdı ve Basınç plakası yöntemiyle elde edilen boşluk boyutu dağılım eğrileri

#### 4.3.4. Deney sonuçlarının Adapazarı kriteri açısından incelenmesi

Sakarya Üniversitesi'nce gerçekleştirilmiş araştırmalar siltlerin sıvılaşma yeteneğinin zeminin fiziksel özellikleri ile kolayca saptanabileceği bulgularını getirmiş ve bu amaca yönelik olarak Adapazarı Kriteri'nin revize edilmiş biçimi önerilmiştir (Bol v.d., 2010). Bölüm 3'de anlatılan Adapazarı Kriterine göre bu çalışmada kullanılan



karışım numunelerinin sınıvlaşım sınıvlaşmayacağına bakılmış ve Tablo 4.3'te bu sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Adapazarı Kriteri açısından numunelerin incelenmesi

Numune Adı	Çarpmalı $W_L$	Koni $W_L$	Plastik Limit	IP= $W_L$ - $W_P$	% Kil	D <sub>50</sub>		Simgesi	Sınıvlaşım*
						Hidrometre	Pipet		
K020	NP	38	NP	NP	2	0.037	0.037	ML	Var
K024	NP	38	NP	NP	2.4	0.040	0.035	ML	Var
K032	NP	36	NP	NP	3.2	0.039	0.038	ML	Var
K040	NP	36	NP	NP	4	0.039	0.036	ML	Var
K043	NP	35	NP	NP	4.3	0.037	0.035	ML	Var
K048	NP	34	NP	NP	4.8	0.030	0.036	ML	Var
K050	NP	35	NP	NP	5	0.031	0.035	ML	Var
K056	NP	34	NP	NP	5.6	0.028	0.034	ML	Var
K072	30	33	26	NP	7.2	0.030	0.034	ML	Var
K080	32	36	23	9	8	0.025	0.027	ML	Var
K096	33	37	24	9	9.6	0.024	0.024	ML	Var
K112	34	37	22	12	11.2	0.021	0.030	ML	Yok
K144	35	37	22	13	14.4	0.016	0.020	MI	Yok
K184	55	52	27	28	18.4	0.007	0.007	CH	Yok
Tsert	NP	37	NP	NP	1.6	0.034	0.040	ML	Var
Yenikent	NP	32	NP	NP	3.2	0.046	0.035	ML	Var

\* Adapazarı Kriterine göre (Bol v.d., 2010)

Adapazarı Kriterleri literatürde Çin kriteri olarak anılan bilgilerin kritik değerlendirilmesi ile üretilmiştir. Bu bilgiler sürekli yeni deneyler ve incelemelerle güncellenmektedir. Bu kriterler sınıvlaşım-sınıvlaşmamış büyük arazilerde yapılan gözlemler ve buralardan alınan numunelerin deneye tabi tutulması ile geliştirildiğinden, güvenilirliği makul derecede yüksek olarak nitelendirilebilir.

Tabloya bakıldığında numunelerin çoğunda bu kritere göre sınıvlaşım oluşması beklenmektedir. Adapazarı kriterinde yer alan  $I_L \geq 0.9$  şartı numuneler doğal numune olmamasından dolayı bu koşul sağlanıyor olarak düşünülmüştür.

#### 4.3.5. Deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi

Bütün yapılan deneylerde ortak sonuç olarak, siltli zeminlerle çalışmanın yüksek derecede hassasiyet gerektirdiği sonucu çıkarılabilir. Tablo 4.2.'den de görüldüğü gibi siltli zeminlerde koni düşürme yöntemiyle likit limit belirlemek şüpheler içermektedir. Bunun sebebinin siltli numunenin kaba yerleştirilmesi esnasında oluşan titreşimlerden dolayı suyun numunede yer değiştirmesi olarak düşünülmektedir. Numunelerin likit limitinin belirlenmesinde çarpmalı yöntemden de yararlanılmıştır. Çarpmalı yöntemde de numunenin siltten dolayı da çanakta toplu olarak kayması sonucu kil oranı düşük numunelerde deney yapılamamıştır.

Hacimsel büzülme deneyinde ise numuneler standartlarda önerilen potadan çıkartma esnasında hasar gördüğü için büzülme potası iki parça olarak kullanılmıştır. Laboratuvarında bulunan özel imal edilmiş büzülme potasında gerçekleştirilen deneylerde numune potadan çıkartılma esnasında minimum hasara uğramakta ve deneyler daha sağlıklı yapılabilmektedir.

Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi zemin-su karakteristik özellikleri hem basınç plakası hem de filtre kağıdı yöntemleriyle ölçülmüştür. Şekillerden de anlaşılacağı gibi basınç plakası deneyi ile elde edilen SWCC eğrileri tek bir iz takip ederken filtre kağıdıyla alınan sonuçlar benzer bir iz etrafında dağılım göstermektedir. Bilindiği gibi filtre kağıdı ile kılcal gerilme ölçümünde, kağıt ile numune arasında tam temasın sağlanması gerekmektedir. Özellikle siltli zeminlerde su içeriği azaldıkça kağıt ile numunenin arasındaki temasın sağlanması güçleşmektedir. Her numunede bu durumun aynı oranda gerçekleşmemesi nedeniyle ölçülen emme değerleri basınç plakasındaki gibi net bir iz takip etmemektedir. Ancak her iki deney yöntemiyle de elde edilen SWCC eğrileri arasında kayda değer bir fark bulunmamaktadır. Her iki yöntemle de çizilen SWCC eğrilerinde kil oranı arttıkça yukarıya doğru ötelenme izlenmektedir. Doygunluktan ayrılmaları kil oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Kil oranı yüksek olan numunelerin SWCC eğrisindeki son evreleri olan suyun en ince boşluklara çekilerek eğimi yataya yaklaştırması aşamasını görebilmek için filtre kağıdı deneyleri yapılmıştır. Basınç plakası ile 1500 kPa gerilme uygulanabilirken filtre kağıdı yöntemiyle 10000 kPa gerilmeler elde edilebilmiştir. Şekil 4.7' de önceki

konularda yapım aşamaları ve grafikleri verilen filtre kağıdı yöntemiyle elde edilen SWCC eğrileri ve basınç plakası yöntemiyle elde edilen SWCC eğrileri aynı grafikte gösterilmektedir. Şekil 4.6.'dan da görülebileceği gibi filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleriyle elde edilen eğriler birbirleriyle yakın ilişki göstermektedir. Ne kadar yakın bir ilişki gözükse de filtre kağıdının hassaslığı konusunda operatöre bağlı olarak şüpheler oluşabilmektedir. Zemin numunesi ile filtre kağıdı arasındaki etkileşim, deneyin güvenilirliğini de etkilemektedir.

Deneye tabi tutulan tüm numunelerde ortalama boşluk boyutunun  $10^{-4}$  ile  $10^{-1}$  mm arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 4.8.'e bakıldığında K080, K096, K112, K144 ve K184 numunelerinin diğer numunelerden çok belirgin bir şekilde ayrıldığını görmekteyiz. Adapazarı Kriteri açısından yapılan incelemede K080 ve K096 numunelerinin kritik durumda sıvılaştığı görülmüştür. Fakat ortalama boşluk boyutu dağılımı eğrisinde ise bu iki numunenin de kil oranları daha yüksek olan numunelerle beraber hareket ettiği diğer numunelerden açık bir şekilde ayrıldığı görülmüştür. Adapazarı Kriteri açısından sınır bölgede olan bu iki numunenin boşluk geometrisi açısından çok açık bir şekilde sıvılaşma ihtimali olmayan numunelerle beraber hareket etmesi bu iki numunenin de sıvılaşmayacağı ihtimali düşüncesini doğurabilmektedir.

Bu bilgilerin ışığında boşluk boyutu dağılım eğrisinin de sıvılaşma bakımından bir anlam taşıdığı ortaya çıkmaktadır. Eldeki veriler ışığı altında ve yukarıdaki ihtimali göz önüne katarak bir yorum yapmak gerekirse örneğin, boşluk boyutu dağılım eğrisinde  $0,175 \text{ cm}^3/\text{g}$  birim kütlede kümülatif boşluk hacmine denk gelen ortalama boşluk boyutu  $10^{-3}$  mm'nin altında ise bu numunelerin sıvılaşma potansiyeli taşımayacağı söylenebilir. Adapazarı kriteri sonuçları baz olarak alındığında ise bu değeri  $0.125 \text{ cm}^3/\text{g}$  olarak vermek mümkündür.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde SWCC eğrileri deney sonuçlarının kullanımına katkıda bulunması hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı kil oranlarına sahip 16 farklı zemin karışımı kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında laboratuvarında çarpmalı alet ve düşen koni penetrasyon yöntemi ile likit limit deneyleri, plastik limit deneyleri, büzülme limitini belirlemek için hacimsel büzülme deneyi, zemin danelerinin özgül ağırlığının tayini için piknometre deneyi, dane çapı dağılımının bulunması için pipet yöntemi ve hidrometre yöntemi ile çöktürme deneyleri yapılmıştır. Zemin-su karakteristik deneylerinden de basınç plakası ve filtre kağıdı deneyleri yapılmıştır.

Siltli numunelerde yapılan filtre kağıdı deneyinde su muhtevasının çok düşük değerlere ( $\leq 4\%$ ) inene kadar devam etme gerekliliği görülmüştür. Kil oranı düşük numunelerle çalışılacağı zaman basınç plakası deneyi ile SWCC eğrilerinin oluşturulmasının daha sağlıklı olacağı görülmüştür. Kil oranı yüksek numunelerle çalışılması durumunda ise SWCC eğrilerinin oluşması için yüksek basınçlar gerekeceğinden dolayı filtre kağıdı deneyinin tercih edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Filtre kağıdı deneylerinde yapılan toplam emme ölçümlerinde, kullanılan hava geçirmez kabın numune ve filtre kağıdı arasında dengenin sağlanabilmesi için olabildiğince küçük boşluk kalacak şekilde seçilmesi önem arz etmektedir. Yine toplam emme ölçümlerinde numunelerin konulduğu kapların hava geçirmemeye karşı çok güvenilir olması gerekmektedir. Oda şartlarının da deneye elverişli şekilde sabit sıcaklıkta olması gerekmektedir.

Filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemleriyle çizilen SWCC eğrilerinde kil oranı arttıkça yukarıya doğru ötelenme izlenmektedir. Doygunluktan ayrılmaları kil oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

Tüm numunelerde ortalama boşluk boyutunun  $10^{-4}$  ile  $10^{-1}$  mm arasında değiştiği görülmektedir. Kil oranı %8 ve üzeri olan numunelerin boşluk boyutu dağılımı açısından diğer numunelerden çok belirgin bir şekilde ayrıldığını görmekteyiz. Adapazarı Kriteri açısından yapılan incelemede %8 ve %9.6 kil oranına sahip numuneler sıvılaşır olarak değerlendirilmektedir. Fakat ortalama boşluk boyutu dağılımı eğrisinde ise bu iki numunenin de kil oranları daha yüksek olan numunelerle beraber hareket ettiği diğer numunelerden açık bir şekilde ayrıldığı görülmüştür. Adapazarı Kriteri açısından sınır bölgede olan bu iki numunenin boşluk geometrisi açısından çok açık bir şekilde sıvılaşma ihtimali olmayan numunelerle beraber hareket etmesi bu iki numunenin de sıvılaşmayacağı ihtimalini akla getirmektedir. Bu bilgilerin ışığında boşluk boyutu dağılım eğrisinin de sıvılaşma bakımından bir anlam taşıdığı ortaya çıkmaktadır. Eldeki veriler ışığında bir yorum yapmak gerekirse örneğin, boşluk boyutu dağılım eğrisinde  $0,175 \text{ cm}^3/\text{g}$  birim kütlede kümülatif boşluk hacmine denk gelen ortalama boşluk boyutu  $10^{-3}$  mm'nin altında ise bu numunelerin sıvılaşma potansiyeli taşımayacağı söylenebilir. Adapazarı kriteri sonuçları baz olarak alındığında ise bu değeri  $0.125 \text{ cm}^3/\text{g}$  olarak vermek mümkündür.

## KAYNAKLAR

- [1] 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
- [2] 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
- [3] BOL, E., ÖNALP, A., AREL, E., SERT, S., ÖZOCAK, A., (2010). Liquefaction of Silts: The Adapazarı Criteria. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010:8:859-873
- [4] BRAY, J.D. and SANCIO, R.B., (2006). Assessment of Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 27:2:31-41.
- [5] 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
- [6] BURLAND, J.B., and RIDLEY, A.M. (1996) The importance of suction in soil mechanics Keynote address. *Proceedings of the Twelfth Southeast Asian Geotechnical Conference*. Vol.2, pp.27-49
- [7] EDLEFSEN, N.E. and ANDERSON A.B.C., 1943. *Thermodynamics of soil moisture*, Hilgardia, Vol.15, 31-298
- [8] FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H., 1993. *Soil Mechanics for unsaturated soils*, John Willey & Sons, New York, 517p
- [9] 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
- [10] GÖKSAN, T.S, *Zeminlerin Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bir Yaklaşım*, Doktora Tezi, SDÜ; FBE
- [11] IDRIS, I.M. and BOULANGER, R.W. (2006). „Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes.„ *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 26:115-130

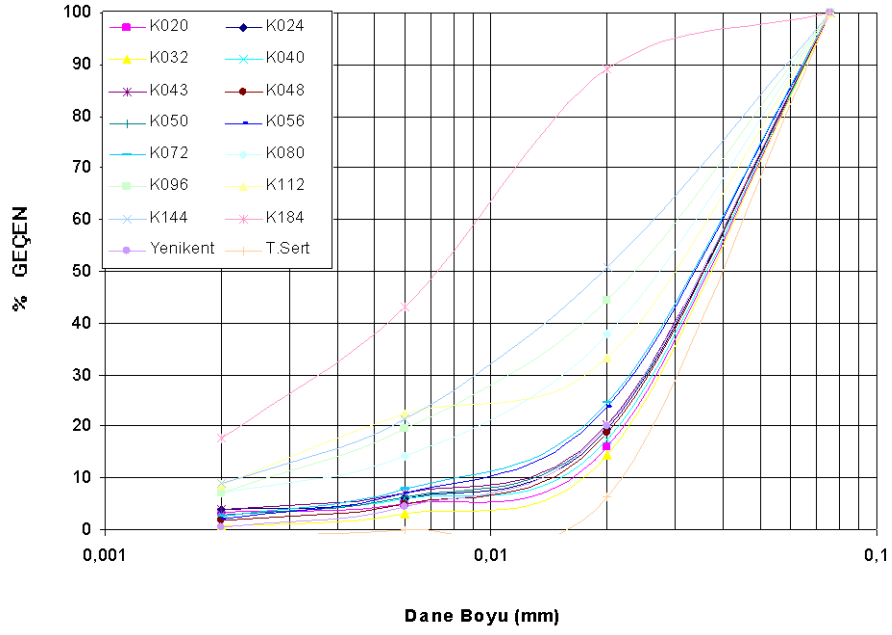
- [12] LEONG, E.C., He, L. and RAHARDJO, H., 2002. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25 (3): 321-332
- [13] LEONG, E.C., TRIPATHY, S., and RAHARDJO, R., 2003. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique, *Geotechnique*, 53(2), 173-182
- [14] 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
- [15] LU, N., and LIKOS, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. New Jersey: John Wiley and Sons Inc
- [16] ÖNALP, A., 2002. *Geoteknik Bilgisi I*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya
- [17] ÖNALP, A. ve AREL, E., (2002). „Siltlerin Sıvılaşma Yeteneği:Adapazarı Kriteri,, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [18] ÖZOCAK, A, (2003). *Doygun Olmayan Siltli Zeminlerin Sıkışabilirliği*, Doktora Tezi, SAÜ; FBE
- [19] ÖZOCAK, A., SERT, S., ÖNALP, A., URAL, N., (2008). The Influence of the Pore Geometry on the Liquefaction Potential of Silt. 8<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering, 15-17 September 2008, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus
- [20] RAHARDJO, H, and LEONG, E.C. 2006 Suction measurements, *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*. Geotechnical Special Publication, Arizona, 81-104
- [21] 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
- [22] 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
- [23] RIDLEY, A.M., DINEEN, K., BURLAND, J.B. and VAUGHAN P.R., 2003. Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering, *Geotechnique* 53, No.2, 241–253

- [24] 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
- [25] SNETHEN, D.R. 1980. Characterization of Expansive Soils Using Soil Suction Data, 4th International Conference on Expansive Soils, 54-75
- [26] TAKE, W.A. and 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
- [27] 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
- [28] TS 1900-1, ,İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar DeneYleri – Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini,, Türk Standartları, Bakanlıklar, Ankara, 2006
- [29] WANG, W.S., (1979) ,Some Findings in Soil Liquefaction,, Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing
- [30] 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
- [31] 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
- [32] YONG, R. N., WARKENTIN, B. P., 1975. Soil properties and behaviour, Elsevier Scientific, Amsterdam, 449 p
- [33] 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

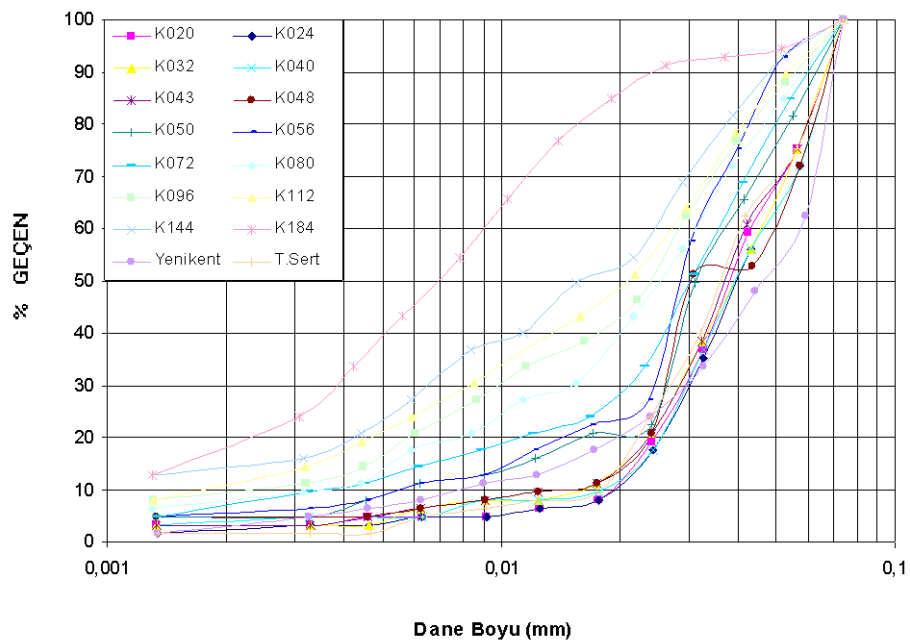


## EKLER

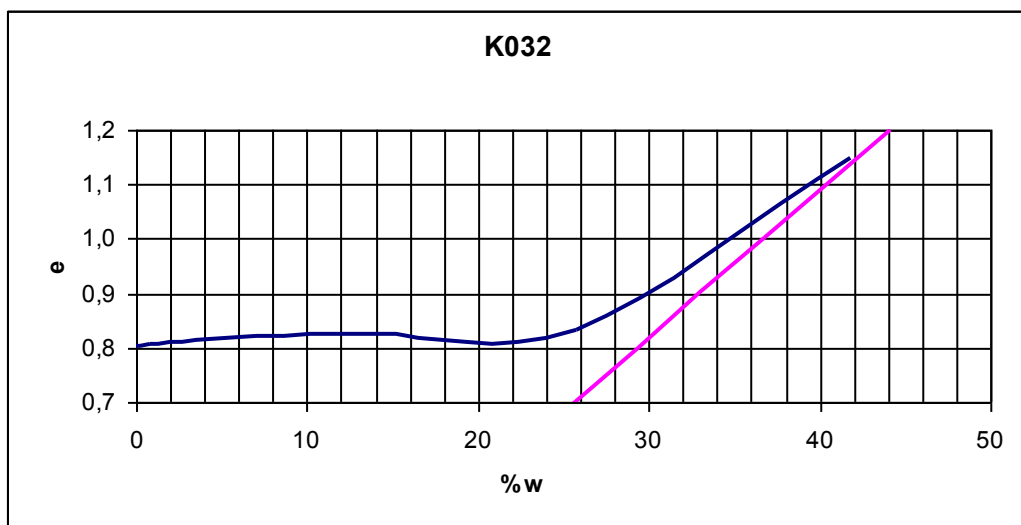
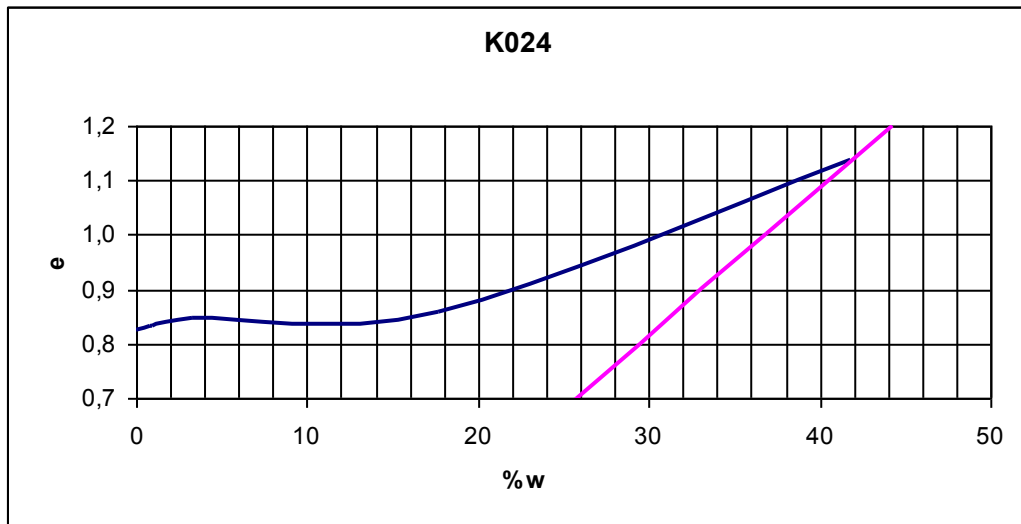
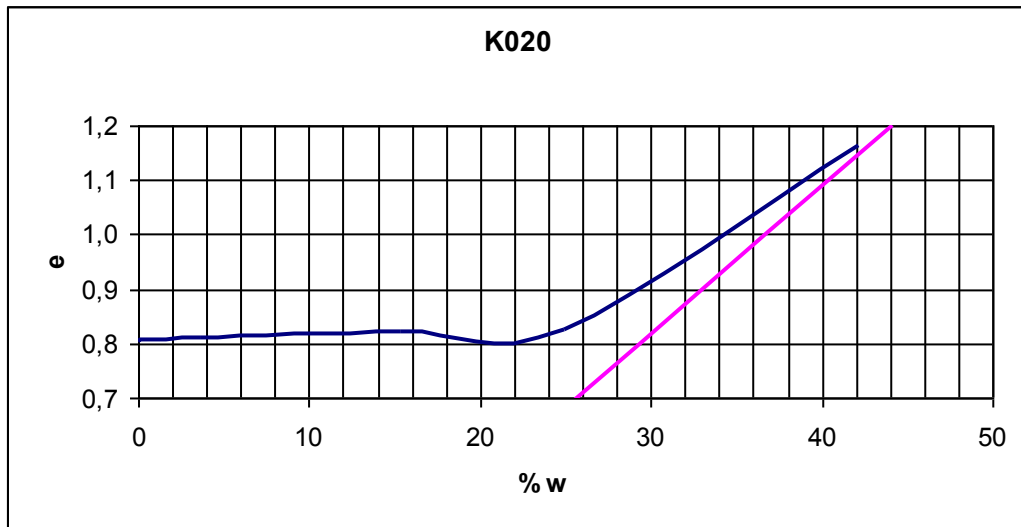
### EK I.a. Dane boyutu dağılım eğrileri (Pipet)

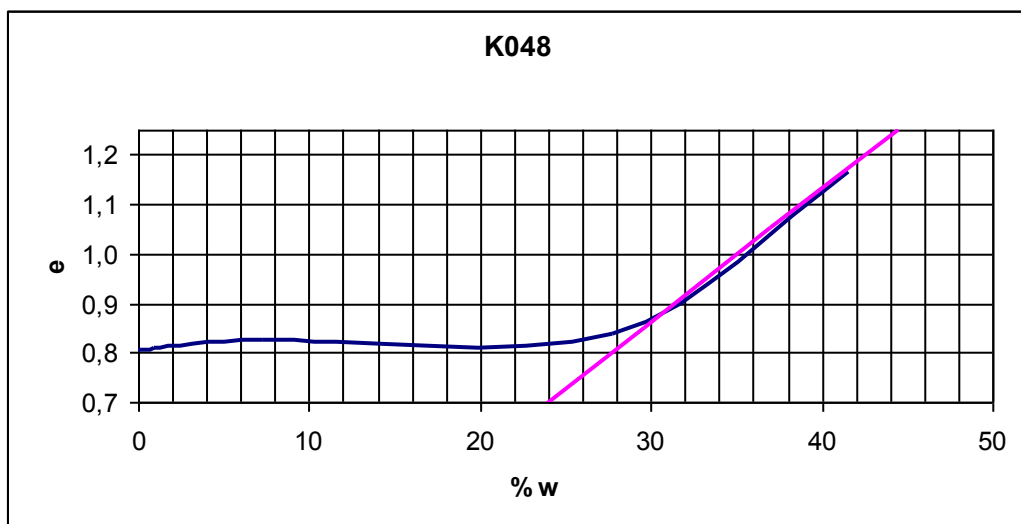
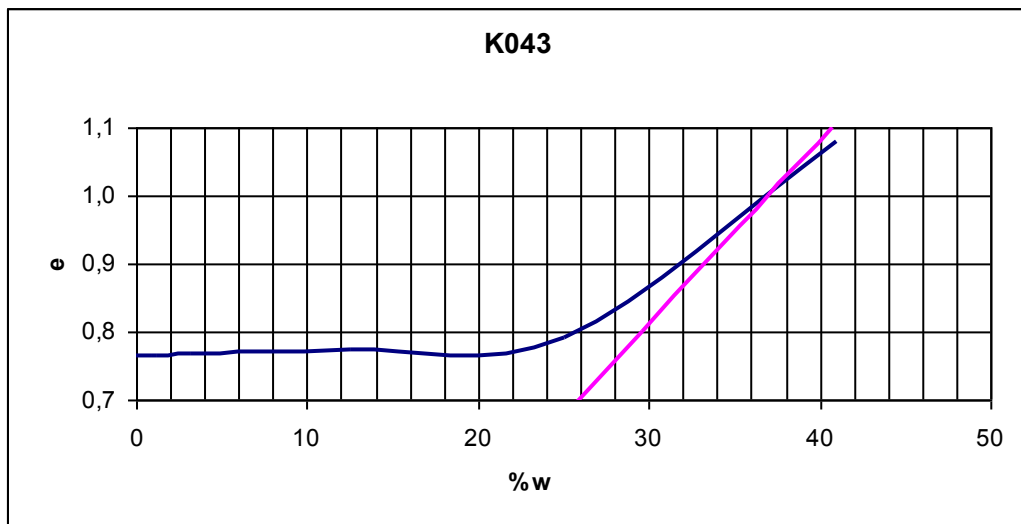
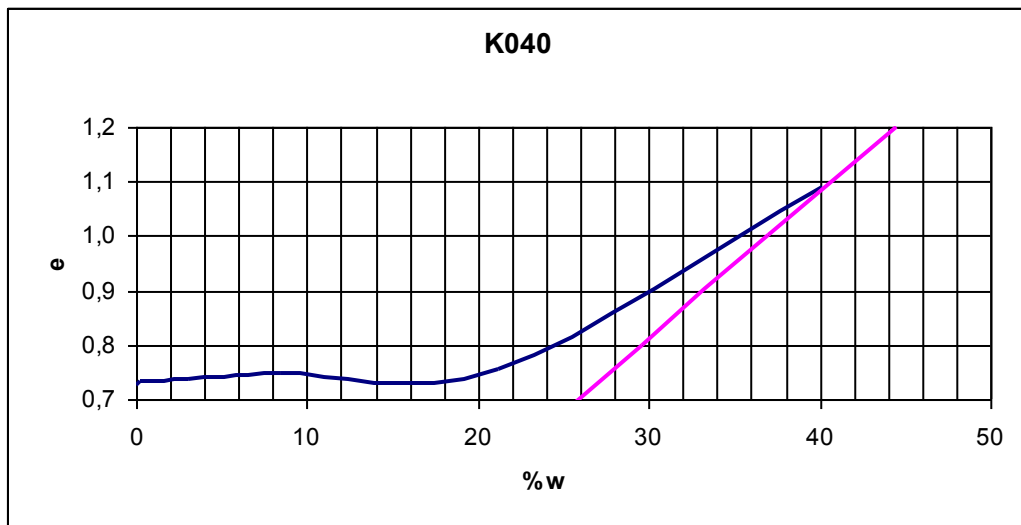


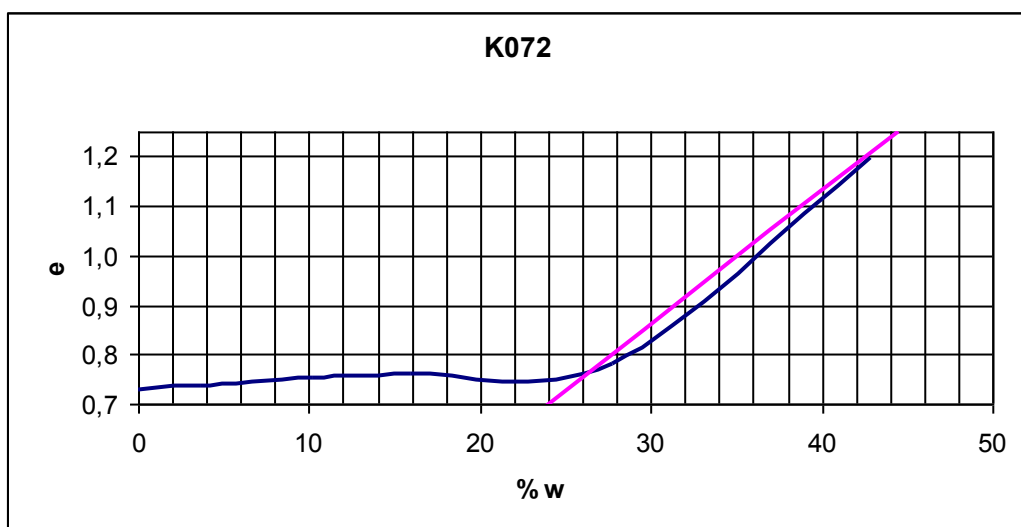
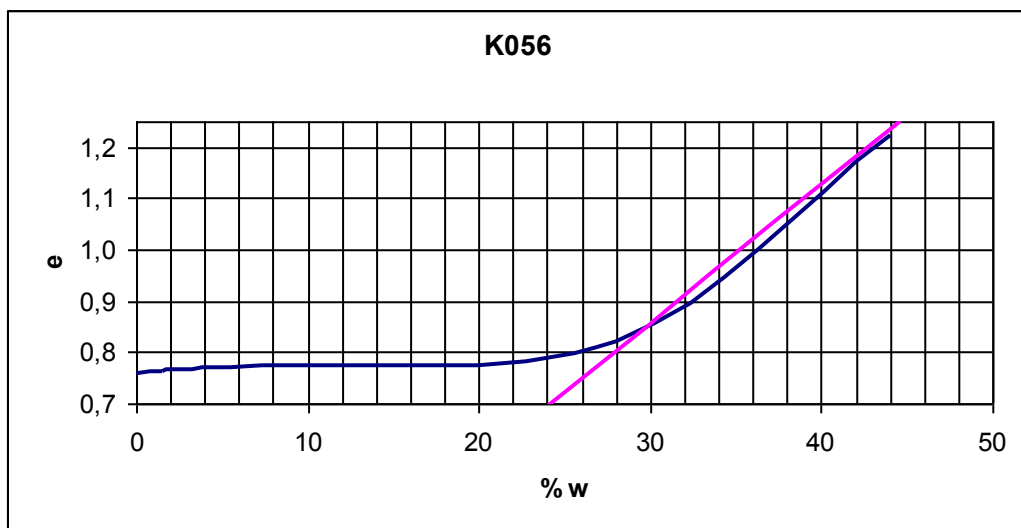
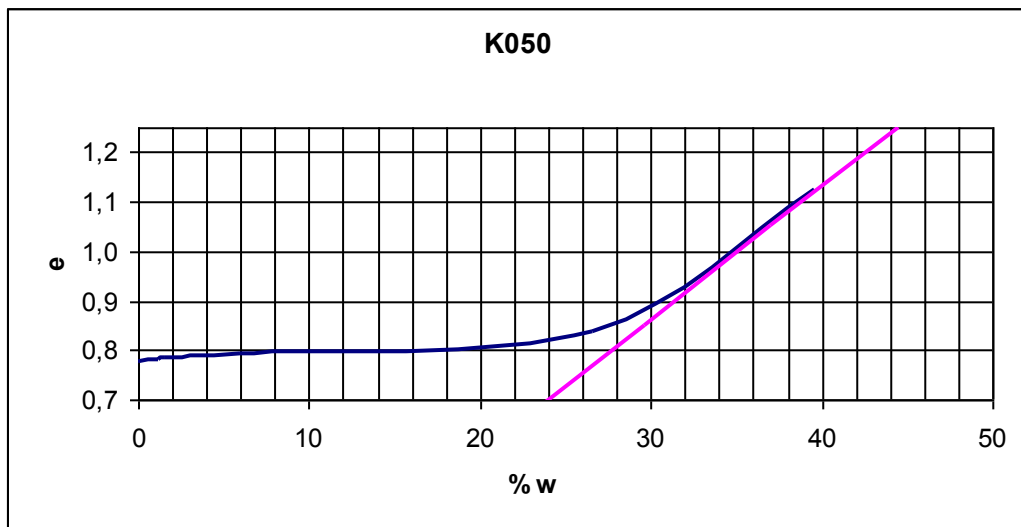
### EK I.b. Dane boyutu dağılım eğrileri (Hidrometre)

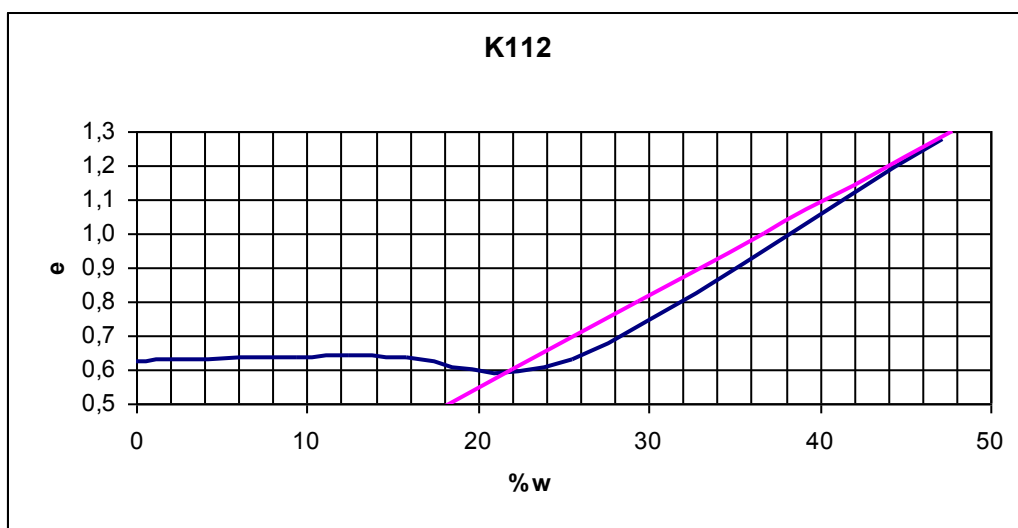
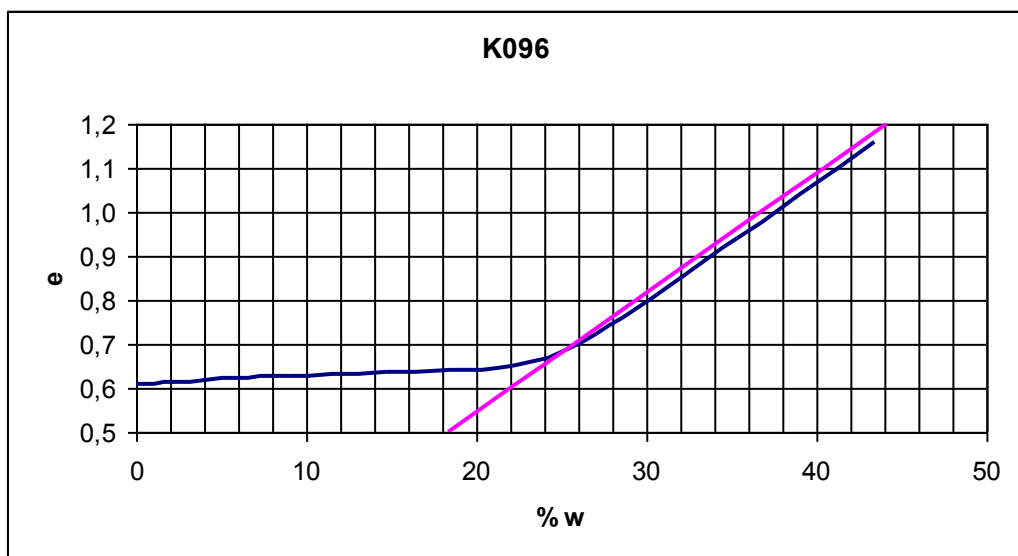
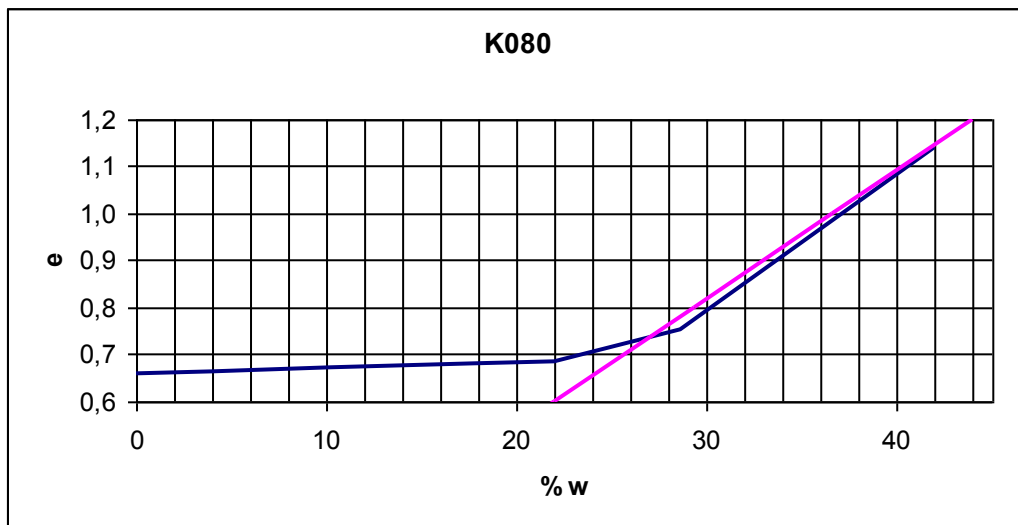


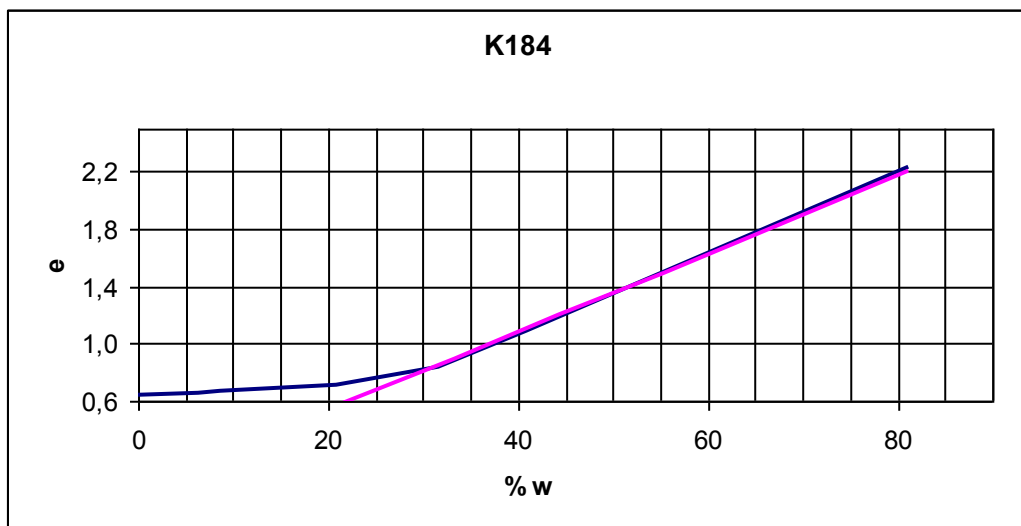
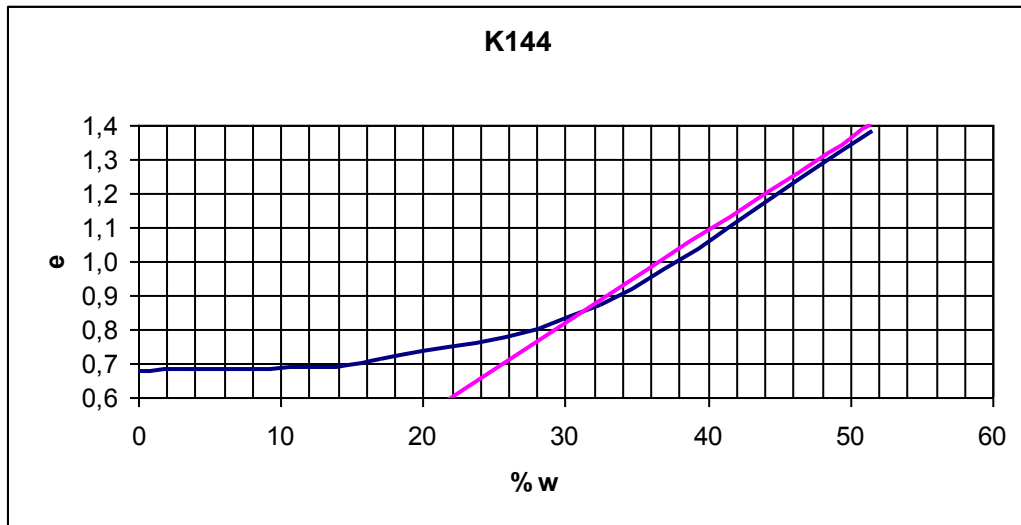
## EK II. Büzülme Grafikleri

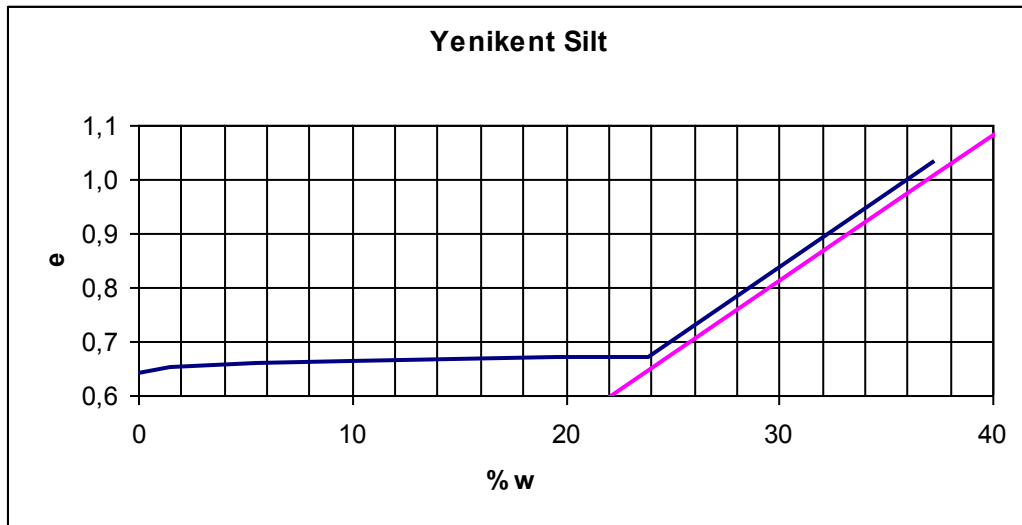












## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Akif KANBUR, 23.02.1986 de Yalova' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Yalova'da tamamladı. 2004 yılında Yalova Lisesindeki eğitimini tamamladı. 2005 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2009 yılında mezun oldu.

2009 yılından itibaren Yalova Etik Yapı Denetimi Ltd. Şti.'nde Kontrol mühendisi olarak çalışmaktadır.