

**ANKARA KİLİNDE ŞİŞME ANİZOTROPİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF SWELLING ANISOTROPY  
IN ANKARA CLAY**

**ELİF AVŞAR**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

olarak hazırlanmıştır.

**Temmuz, 2007**

# ANKARA KİLİNDE ŞİŞME ANİZOTROPİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Elif Avşar

## ÖZ

Simektit grubu kil minerallerince zengin olan ve şişme davranışı sergileyen Ankara kili yüzeyde ve sığ derinliklerde konuşlandırılmış yapılarda hasara neden olmaktadır. Bu nedenle, söz konusu kilin düşey ve yanal yönlerdeki şişme davranışının araştırılması mühendislik uygulamaları açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Ankara kilinin ve neden olduğu yapısal hasarların tipik olarak gözlemlendiği Ankara kenti yerleşiminin güneybatısındaki bazı semtler örnekleme alanı olarak seçilmiş ve (a) yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları ve yüzdeleri farklı laboratuvar teknikleriyle araştırılıp karşılaştırılmış, (b) kilin önkonsolidasyon basıncıyla şişme arasındaki ilişki ve (c) kilin mikro yapısının şişme anizotropisi (yönserliği) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Seçilen alandan derlenen örselenmemiş örneklerin yanal ve düşey yöndeki şişme parametreleri (şişme basıncı ve şişme yüzdesi), klasik odometre deneyleri ve ince çeperli odometre halkası kullanılarak iki ayrı yöntemle belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, her iki yöntemle belirlenen yanal ve düşey yöndeki şişme parametrelerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüş ve şişme basıncının ve yüzdesinin düşey yönde daha büyük olduğu saptanmıştır. Yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçlarının oranı (SR), ince çeperli odometre halkasıyla yapılan deneylere göre 0.34 ile 0.98, klasik odometre deneylerine göre ise 0.41 ile 1.10 arasında değişim göstermektedir. Ankara kilinin ön yükleme basıncının artmasına koşul olarak düşey yöndeki şişme basıncının ve şişme yüzdesinin arttığı belirlenmiş, buna karşın ön yükleme basıncı ile yanal yöndeki şişme parametreleri arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. Taralamalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenen örneklerde kil tanelerinin yatay ve/veya yataya yakın yapraklanma gösterdiği ve basamaklı yüzey-yüzey yapısına sahip oldukları belirlenmiştir. Yapraklanmanın yatay ve yataya yakın olmasının ön yükleme basıncından kaynaklanmış olabileceği sonucuna varılmış ve yapraklanma yönüne dik yöndeki düşey şişme parametrelerinin yanal yöndeki şişme parametrelerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ankara kili, ince çeperli odometre halkası, odometre deneyi, şişme basıncı, şişme anizotropisi, şişme yüzdesi

Danışman: Prof. Dr. Reşat Ulusay, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı

Eş Danışman: Doç. Dr. Harun Sönmez, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı

# INVESTIGATION OF SWELLING ANISOTROPY IN ANKARA CLAY

Elif Avşar

## ABSTRACT

Ankara clay, which is rich in smectite group clay minerals and exhibits swelling behavior, causes damages to structures located at the surface and shallow depths. Due to this, investigation of its swelling behavior both in vertical and lateral directions has an importance in terms of engineering applications. In this study, an area located at the southwestern part of the city of Ankara, where the clay and damages to structures due to its swelling are typically observed, was selected as the sampling area, and (a) swelling pressures and percentages both in vertical and lateral directions were determined using different laboratory techniques and the results were compared, and (b) the relationship between preconsolidation pressure and its swelling and (c) the effect of its microstructure on swelling were investigated. Swelling pressures and swelling percentages of the undisturbed samples obtained from the selected site were determined by two different methods using classical oedometer test and thin-wall oedometer ring. Experimental results revealed that swelling parameters in both directions determined from both methods show a good agreement and the parameters obtained for vertical directions were greater than those determined in lateral direction. The ratio between the swelling pressures in lateral and vertical directions (SR) were found between 0.34 and 0.98, and 0.41 and 1.10 from thin wall oedometer ring and classical oedometer tests, respectively. It is also determined that the swelling pressure and percentage in vertical direction increases with an increase in preconsolidation pressure of the clay, while no meaningful relationship exists between the preconsolidation pressure and swelling parameters measured in lateral direction. The SEM analyses carried out on undisturbed samples suggested that the clay grains show horizontal and/or nearly horizontal sheeting and have stepped face-to-face structure. It is concluded that horizontal or nearly horizontal sheeting is probably resulted from preconsolidation pressure and swelling parameters in vertical direction are greater than those in lateral direction.

**Key words:** Ankara clay, oedometer test, swelling anisotropy, swelling pressure, swelling percent, thin wall oedometer ring

Advisor: Prof Dr. Reşat Ulusay, Hacettepe University, Engineering Geology Faculty, Department of Geological Engineering, Applied Geology Division

Co-Advisor : Doç. Dr.Harun Sönmez, Hacettepe University, Engineering Geology Faculty, Department of Geological Engineering, Applied Geology Division

## TEŞEKKÜR

Tezime ilgili çalışmalarımın her aşamasında çalışmalarına yön veren, ilgi ve katkılarını esirgemeyen ve tezin şekillenmesinde büyük emeği geçen tez danışmanım Prof. Dr. Reşat Ulusay'a,

Çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen ve yapıcı eleştirileriyle tezin son şeklini almasında katkıları olan eş danışmanım Doç. Dr. Harun Sönmez'e,

Arazi ve laboratuvar çalışmaları aşamasında göstermiş oldukları yardımlarından dolayı Jeoloji Mühendisi İsmail Gürel ve Jeoloji Mühendisi Umut Aybay'a,

Taramalı elektron mikroskopunda SEM görüntülerinin alınmasını sağlayan H.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Erkan Aydar ile görüntü alımındaki yardımlarından dolayı Araş. Gör. H. Evren Çubukçu ve Araş. Gör. Orkun Ersoy'a,

SEM görüntüleri ile ilgili değerlendirmelerde ilgi ve katkısını esirgemeyen ODTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Asuman Türkmenoğlu'na,

Laboratuvar çalışmaları sırasındaki yardımlarından dolayı H.Ü. Zemin Mekaniği Laboratuvarı Teknisyenleri Özgür Erol ve Ahmet Bay'a,

Tezin yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Ayşegül Turgut ve Araş. Gör. Nurgül Yeşiloğlu, Araş. Gör. Zeynal Abiddin Ergüler'e,

Laboratuvar çalışmaları aşamasında yardımlarından dolayı ODTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı Sorumlusu Jeoloji Yüksek Mühendisi Nurcan Kaplan ve Teknisyen Ali Bal'a,

Tez savunması sırasındaki katkılarından dolayı jüri üyeleri Prof. Dr. K.Erçin Kasapoğlu'na, Prof. Dr. Erdal Çokça'ya ve Prof. Dr. Asuman Türkmenoğlu'na ve

Çalışmamın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, gösterdikleri sabır ve katkıdan dolayı değerli aileme

İÇTEN TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZ .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Amaç ve Kapsam .....	1
1.2. Önceki Çalışmalar .....	5
1.2.1. Ankara kilinin şişme karakteristiklerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar .....	5
1.2.2. Killerin şişme anizotropisi ile ilgili çalışmalar .....	7
2. ÖRNEKLEME ALANININ TANITIMI .....	14
2.1. Coğrafik Konum ve Morfoloji .....	14
2.2. İklim ve Bitki Örtüsü .....	17
2.3. Yerleşim .....	18
3. ÖRNEKLEME ALANI VE YAKIN ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ .....	19
4. ÖRNEKLEME ÇALIŞMASI VE GÖZLEMLER .....	23
5. LABORATUVAR DENEYLERİ .....	27
5.1. Mineralojik Analizler .....	27
5.2. Ankara Kilinin Fiziksel ve İndeks Özellikleri .....	29
5.2.1 Su içeriği tayinleri .....	29
5.2.2. Birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık tayinleri .....	30
5.2.3. Tane boyu dağılımı çözümlenmeleri .....	31
5.2.4. Kıvam (Atterberg) limitleri ve aktivite .....	33
5.2.5. Zemin sınıflaması .....	34
5.3. Şişme Deneyleri .....	35
5.3.1 Klasik odometre deneyleri .....	35
5.3.1.1. Örselenmemiş yönlü örneklerle yapılan klasik odometre deneyleri .....	35
5.3.1.2. Sıkıştırılmış örneklerle yapılan klasik odometre deneyleri .....	37

5.3.2. İnce çeperli odometre halkası kullanılarak yapılan şişme deneyleri.....	41
5.3.2.1. İnce çeperli odometre deney düzeneğinin özellikleri .....	42
5.3.2.2. İnce çeperli odometrenin kalibrasyonu .....	45
5.3.2.3. İnce çeperli odometre halkasının dayanım deformasyon özelliklerinin araştırılması .....	49
5.3.2.4. İnce çeperli odometre halkasıyla yapılan şişme deneyleri .....	53
5.4. Konsolidasyon Deneyleri .....	57
6. ANKARA KİLİNİN ŞİŞME ANİZOTROPİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	60
6.1. Yanal ve Düşey Yönlerdeki Şişme Parametrelerinin Karşılaştırılması....	60
6.2. Klasik Odometre ve İnce Çeperli Odometre Halkasıyla Yapılan Şişme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması .....	62
6.3. Yanal ve Düşey Yöndeki Şişme Parametreleri ile Ön Yükleme Basıncı, Likit Limit ve Simektit İçeriği Arasındaki İlişkiler .....	65
6.4. Ankara Kilinin Mikro Yapısı ile Şişme Anizotropisi Arasındaki İlişkilerin Değerlendirilmesi.....	73
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	79
KAYNAKLAR.....	83
EKLER	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Örneklem alanında zemindeki şişme (kabarma) nedeniyle tek katlı iki yapıda gelişen deformasyonlar (Fotoğraflar: Z.A. Ergüler ve R. Ulusay, 2000).....	15
Şekil 2.2. Örneklem alanının Türkiye ve Ankara ili içindeki genel konumu ve sınırları.....	16
Şekil 2.3. DMI'nin Ankara istasyonundan alınan 1980-2006 yılları arasındaki kayıtlara göre ortalama sıcaklık ve yağışın aylara göre değişim grafiği.....	18
Şekil 3.1. Ankara ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti (Kasapoğlu, 1980'den).....	20
Şekil 3.2. Örneklem alanındaki Ankara kilinde açılmış bir yol yarmasından görünüm (Yüzüncüyıl Sitesi).....	22
Şekil 3.3. Ankara kilinin içerdiği çakıllı ve kumlu seviyelerden bir görünüm (Yüzüncüyıl sitesi).....	22
Şekil 4.1. İnceleme alanındaki gecekondularında zemindeki şişmeye (kabarmaya) bağlı olarak gelişmiş çatlaklar (6 no.lu örneklem yeri, Öveçler 2. Cadde).....	24
Şekil 4.2. Örneklem alanındaki bir bahçe duvarında yanal yöndeki şişmeye bağlı olarak gelişen kavislenme (3 no.lu örneklem yeri, Yüzüncüyıl Sitesi).....	25
Şekil 4.3. Örneklem yerlerini gösteren harita.....	25
Şekil 4.4. Şişme basınçlarını belirlemek amacıyla (a) yatay yönde ve (b) düşey yönlerde alınan örselenmemiş örnekler.....	26
Şekil 5.1. İncelenen örneklerin tane boyu dağılımı eğrileri.....	31
Şekil 5.2. Ankara kili örneklerinin plastisite abağındaki dağılımı.....	34
Şekil 5.3. 4 no.lu lokasyondan düşey yönde alınan örneğe ait (a) düşey deformasyon-zaman ve (b) düşey deformasyon-basınç grafikleri.....	38
Şekil 5.4. 4 no.lu lokasyondan yanal yönde alınan örneğe ait (a) düşey deformasyon-zaman ve (b) düşey deformasyon-basınç grafikleri.....	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil 5.5.	İnce çeperli odometre halkası ve aksesuarları.....	42
Şekil 5.6.	İnce çeperli odometre halkasından bir görünüm.....	44
Şekil 5.7.	İnce çeperli odometre halkası, kalibrasyon kapakları ve yükleme başlığının kesit görünümü (Ertekin, 1991'den yararlanılarak çizilmiştir).....	44
Şekil 5.8.	Wheaston tam köprü (full bridge) çevriminin şematik görünümü.....	46
Şekil 5.9.	Halka üzerine yerleştirilen aktif ve pasif birim deformasyon ölçerler.....	46
Şekil 5.10.	Çalışmada kalibrasyon için kullanılan alt ve üst başlıklar.....	48
Şekil 5.11.	Odometre halkasının zemin üç eksenli basınç ünitesine bağlanarak kalibre edilmesi.....	48
Şekil 5.12.	Yükleme-geri yükleme çevriminden elde edilen kalibrasyon eğrileri.....	50
Şekil 5.13.	Yanal şişme basıncının belirlenmesinde kullanılan kalibrasyon eğrileri.....	50
Şekil 5.14.	Odometre halkasının ince çeperine etkiyen gerilimlerin dağılımı ve gerilim hesaplamaları için diyagram (Ertekin, 1991'den alınmıştır). ....	52
Şekil 5.15.	(a) Kurutulan örselenmemiş deney örneği, (b) kurutulmuş örneğin odometre halkasına aktarılırken traşlanması ve (c) örneğin halkanın içine yerleştirildikten sonraki görüntüsü. ....	55
Şekil 5.16.	Örneğin ve ince çeperli odometre halkasının deney sırasındaki kesit görünümü.....	56
Şekil 5.17.	İnce çeperli odometre halkası kullanılarak yapılan şişme deneyinden bir görünüm.....	56
Şekil 5.18	4 no.lu lokasyondan alınan örneğin (a) birim deformasyon-zaman ve (b) basınç-zaman grafikleri.....	59
Şekil 6.1.	İnce çeperli odometre halkasıyla belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları ve örneklerin SR değerleri.....	63



<b>ŞEKİLLER</b>	<b>DİZİNİ</b> (devam ediyor)	
Şekil 6.2.	Tüm lokasyonlara ait örneklerin klasik odometre deneyleriyle belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları ve SR değerleri.....	64
Şekil 6.3.	Tüm lokasyonlara ait örneklerin klasik odometre deneyleriyle belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme yüzdeleri.....	64
Şekil 6.4.	Düşey yönde şişme basıncı ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki.....	66
Şekil 6.5.	Düşey yönde şişme yüzdesi ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki.....	66
Şekil 6.6.	Yanal yönde şişme yüzdesi ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki.....	67
Şekil 6.7.	Yanal yönde şişme basıncı ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki.....	67
Şekil 6.8.	Düşey yöndeki şişme basıncı ile likit limit arasındaki ilişki.....	69
Şekil 6.9.	Düşey yöndeki şişme basıncı ile simektit içeriği arasındaki ilişki.....	70
Şekil 6.10.	Düşey yöndeki şişme basıncı ile ön yükleme basıncı ve likit limit arasındaki ilişki.....	70
Şekil 6.11.	Düşey yöndeki şişme basıncı ile ön yükleme basıncı ve simektit içeriği arasındaki ilişki.....	70
Şekil 6.12.	Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki.....	71
Şekil 6.13.	Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran ile likit limit arasındaki ilişki.....	71
Şekil 6.14.	Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran ile simektit içeriği arasındaki ilişki.....	72
Şekil 6.15.	Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran ile ön yükleme basıncı ve likit limit arasındaki ilişki.....	72

Şekil 6.16.	Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran ile ön yükleme basıncı ve simektit içeriği arasındaki ilişki.....	72
Şekil 6.17.	SEM’de incelemek üzere hazırlanan örnekler ve görüntülerin alındığı yüzeyler.....	76
Şekil 6.18.	Çalışmada incelenen Ankara kili örneklerinin SEM görüntüleri (S:silt, K: kil).....	77
Şekil 6.19.	(a) Kitap yapısı, (Sloane and Kell; 1966), (b) ve (c) basamaklı yüzey-yüzey yapısı (Smalley and Cabrera,1969).....	78
Şekil 6.20.	Tane gruplarının sistematik görünüşü: (a), (b), (c) birleştiriciler, (d) birleştirici grupları ile oluşmuş düzensiz kümelenme, (e) bal peteği yapısındaki düzensiz kümelenme, (f) tane hücresi ile ilgili düzenli kümelenme, (g) birbirleriyle dokulu kil grubu, (h) silt içerikli birbirleriyle dokulu kil grubu, (i) kil tanecikleri hücresi, (j) taneli zemin hücresi (Collins and McGovn, 1974’dan).....	78

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. Ankara kiline ait 7 örnek üzerinde yapılan X-ışınları kırınımı (XRD) analizlerinin sonuçları.....	29
Çizelge 5.2. Ankara kilinden alınan örneklerin fiziksel ve indeks özellikleri...	32
Çizelge 5.3. Killerin aktivitelerine göre sınıflandırılması (Skempton, 1953)...	34
Çizelge 5.4. Düşey yönde alınan örneklerin klasik odometre deney sonuçları.....	40
Çizelge 5.5. Yanal yönde alınan örneklerin klasik odometre deney sonuçları.....	40
Çizelge 5.6. Sıkıştırılmış örneklerin klasik odometre deney sonuçları.....	40
Çizelge 5.7. İnce çeperli odometre halkasıyla yapılan şişme deneylerinin sonuçları.....	58
Çizelge 5.8. Ankara kili örneklerinin ön yükleme basınçları ve güncel örtü yükü gerilmeleri.....	59
Çizelge 6.1. Tüm örneklerin klasik odometre deneyleri ve ince çeperli odometre deneyleriyle belirlenen şişme basınçları.....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CH	Plastisitesi yüksek inorganik şişen kil
dR	İnce çeperli odometre halkasının iç yarıçapındaki genişleme miktarı
DYSB	Düşey yöndeki şişme basıncı (kPa)
DYSY	Düşey yöndeki şişme yüzdesi (%)
E	İnce çeperli odometre halkasının yapıldığı metalin elastisite modülü
G <sub>s</sub>	Özgül ağırlık
LL	Likit limit (%)
MBV	Metilen mavisi değeri (g/100g)
MH	İnorganik silt, mikalı veya diyatomeli, ince kumlu veya siltli toprak
ML	İnorganik silt ve çok ince kum, siltli veya killi ince kum
N <sub>T</sub>	İnce çeperli odometre halkasının dik kesitindeki alana etkiyen toplam normal kuvvet
OH	Plastisitesi orta veya yüksek organik kil, organik silt
OL	Organik silt ve plastisitesi düşük organik siltli kil
P <sub>c</sub>	Ön yükleme basıncı (kPa)
P <sub>i</sub>	İnce çeperli odometre halkasının içine etkiyen basınç
PL	Plastik limit (%)
PI	Plastisite indeksi (%)
P <sub>s</sub>	Su basıncı (kPa)
r	İnce çeperli odometre halkasının iç yarıçapı
SBO	Örselenmemiş örneğin şişme basıncının örselenmiş örneğin şişme basıncına oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskop
SL	Büzülme limiti (%)
SR	Yanal yöndeki şişme basıncının düşey yöndeki şişme basıncına oranı
t	İnce çeperli odometre halkasının çeper kalınlığı
W <sub>max24,72</sub>	Örneğin 24 ve 72 saat sonucundaki su içeriği (%)
W <sub>b</sub>	Başlangıç su içeriği (%)
W <sub>n</sub>	Doğal su içeriği (%)
Y <sub>n</sub>	Doğal birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
Y <sub>k</sub>	Kuru birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
δ	Birim Deformasyon

$\sigma_t$

İnce çeperli odometre halkasının çekilme dayanımı

$\varepsilon$

İnce çeperli odometre halkasının çeperinde oluşan birim deformasyon

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Amaç ve Kapsam

Şişme potansiyeline sahip killi zeminler ve bu zeminlerin şişme-büzülme davranışı sonucunda içinde ve/veya üzerinde inşa edilen yapılara olan olumsuz etkileri, sıkça karşılaşılan ve bir çok açıdan araştırılan bir konudur. Pek çok ülkede, özellikle kurak ve yarı kurak bir iklimin egemen olduğu bölgelerde, yeraltısuyu seviyesinin üstünde bulunan yarı doymuş ve kuru killi ıslanma kuruma süreçleri sonucunda şişme-büzülme davranışı göstererek yüzeydeki ve gömülü hafif yapıları değişik boyutlarda hasara uğratmaktadır.

Şişme davranışı gösteren zeminlerden etkilenerek hasara uğrayan yapıların en önemlileri; tek katlı binalar, yollar ve kaldırımlar, havaalanları, çok sığ gömülü yeraltı yapıları (kanalizasyon ve su boruları), istinat ve bahçe duvarları, sulama kanalları ve evlerin bodrum katlarındaki duvarlardır. Bu yapılardan istinat duvarları, bahçe duvarları ve evlerin bodrum katlarındaki duvarlar gibi yapılar zeminin özellikle yanal yöndeki şişmesinden etkilenerek hasar görürken, diğer yapılar düşey yöndeki şişmenin etkisiyle zarar görmektedirler. Bu nedenle, şişme potansiyelinin hem yatay hem de düşey yönde belirlenerek, şişme anizotropisinin (yönserliğinin) varlığının saptanması uygulama aşamasında özellikle hafif ve gömülü yapıların duraylılığı açısından önem kazanmaktadır.

Pek çok araştırmacı (örneğin; Komornik and Zeitlen, 1965; Çetinkaya, 1978; Ofer, 1980; Shiming, 1984; Fourie, 1989; Furtun, 1989; Çokça 1991; Day, 1998; William and Airey, 1999; Ergüler, 2001; Ergüler and Ulusay, 2003a, Avşar, 2003; Avşar et al., 2005), killerin şişme davranışını inceleyerek, şişme potansiyelinin tayinine yönelik çeşitli deney yöntemleri ve görgül eşitlikler önermişlerdir. Killi zeminlerin şişme parametrelerinin (şişme yüzdesi ve şişme basıncı) genellikle düşey yönde incelendiği, yanal yöndeki şişme davranışına yönelik çalışmaların ise daha sınırlı sayıda olduğu dikkat çekmektedir. Chen and Huang (1987), ABD'nin Denver eyaletinde yüksek şişme potansiyeline sahip toprak zeminlerin olduğu bölgelerde, yanal yöndeki şişmenin etkisiyle birçok evin bodrum katlarındaki duvarların (zemin içinde gömülü olan duvarlar) hasara uğradığını belirtmektedirler. Bu araştırmacılar,

bazı evlerin bodrum katındaki duvarlarında yatay yönde 15 cm'ye varan hareketler olduğunu ve duvarların eğildiğini gözlemlemişlerdir.

Şişme davranışı gösteren killi toprak zeminlerde şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinin yanal ve düşey yönlerde farklılık göstermesi "şişme anizotropisi" olarak tanımlanmaktadır. Şişme anizotropisinin, ya da her iki yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesinin saptanması amacıyla kullanılan bazı deney düzenekleri ve bu düzeneklere ait deney yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden ilki, araziden yatay ve düşey olmak üzere, iki yönde örselenmemiş örnekler alınarak yapılan odometre deneyleridir. Diğer bir yöntem ise, bazı araştırmacılar tarafından özel olarak tasarlanmış olan hidrolik üç eksenli şişme düzeneklerinin kullanılmasıdır. Hidrolik üç eksenli şişme düzeneği ilk olarak Bishop and Wesley (1975) tarafından önerilmiş, Fourie (1989) tarafından modifiye edilerek kullanılmıştır. Bu araştırmacılar dışında, Shiming (1984) ve Dhawan et al. (1982) yine çalışmalarında hidrolik üç eksenli şişme düzeneğini kullanmışlardır. Bunun yanı sıra, bazı araştırmacılar (örneğin; Chen and Huang, 1987; Joshi and Katti, 1984) büyük ölçekli ve küçük ölçekli laboratuvar modelleri tasarlayarak inceledikleri zeminlerin yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametrelerini incelemişlerdir. Bazı araştırmacılar, (örneğin; Kassiff and Zeitlen, 1962; Ofer, 1980; Brackley and Sanders, 1992) ise, yanal ve düşey yöndeki şişme parametrelerini arazide yerinde deneylerle tayin etmişlerdir.

Yaygın olarak kullanılan ve daha pratik olan diğer bir yöntem ise, ilk olarak Komornik and Zeitlen (1965) tarafından tasarlanmış olan yanal şişme basıncı halkasıyla (lateral swelling pressure ring) şişme anizotropisinin belirlenmesidir. Bu halka ince çeperli bir odometre halkası olup, Ofer (1980) ve Ertekin (1991) tarafından modifiye edilmiştir. Yanal yöndeki şişme basıncı bu ince halkanın üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerle belirlenirken, düşey yöndeki şişme basıncı ve yüzdesi ise yanal yöndeki şişme basıncı ile eş zamanlı olarak klasik odometre yöntemiyle belirlenmektedir. Şişen killi zeminlerdeki yanal ve düşey yönlerdeki şişme basıncı ve yüzdelilerinin saptanması amacıyla önerilen bu deney yöntemlerinden, ince çeperli odometre halkası ve hidrolik üç eksenli şişme düzeneği diğer yöntemlere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ankara, son yıllarda hızlı bir kentleşmenin ve nüfus artışının yaşandığı ve buna koşut olarak yapılaşma açısından hızla gelişen bir başkenttir. Yapılaşmanın ivme kazanması, Ankara kenti zeminlerinden kaynaklanan bazı sorunların daha yoğun olarak ortaya çıkmasına ve araştırmacıların bu tür sorunların üzerine eğilmesine yol açmıştır. Söz konusu sorunlardan biri de, Ankara kenti ve çevresindeki Üst Pliyosen çökellerinin kil içeriği yüksek düzeyleri olarak tanımlanan Ankara kilinin şişme davranışı gösteren bir zemin olmasıdır. Kentteki yapılaşmanın önemli bir kısmı şişme potansiyeline sahip bu zeminler üzerinde yer almaktadır. Ankara kili üzerinde inşa edilmiş olan hafif yapılarda kilin şişme davranışından kaynaklanan deformasyon ve hasarlar yaygın şekilde gözlenmektedir.

Ankara kilinde düşey yöndeki şişme birçok araştırmacının konusu olmasına rağmen, yanal yöndeki şişme basıncının belirlenmesi ve şişme anizotropisinin araştırıldığı çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bir sonraki bölümde özetlenen önceki çalışmalar arasında Üner (1977), Çetinkaya (1978) ve Ergüler (2001), çalışmalarının birincil amacı olmamakla birlikte, Ankara kilindeki şişme anizotropisini sınırlı sayıda örnek üzerinde yaptıkları deneylerle araştırmışlar ve daha kesin sonuçlara ulaşılması için bu konunun daha fazla sayıda örnek üzerinde araştırılmasını önermişlerdir. Bu araştırmacılar, Ankara kilinin yanal ve düşey yönlerdeki şişme basıncı ve yüzdesi değerlerini belirlemek amacıyla, örselenmemiş yönlü örnekler almışlar ve deney yöntemi olarak klasik odometre deneyleri yapmışlardır.

Ertekin (1991), Hatipoğlu (1993) ve Sapaz (2004), Ankara'daki (Ankara kilinden farklı) şişme potansiyeline sahip bazı killi zeminlerin şişme anizotropisini yukarıda değinilen deney yöntemlerinden biri olan ince çeperli odometre halkasını kullanarak araştırmışlardır. Bu çalışmalarda örselenmiş örnekler sıkıştırılarak test edilmiştir. Ancak, killi zeminlerin şişme özelliklerinde yöne bağlı farklılıkların yersel olarak değişebileceği ve kil tanelerinin yönelimlerinin şişme anizotropisinde etkili olabileceği dikkate alındığında, killi zeminlerde şişme anizotropisinin daha temsil edici nitelik ve nicelikteki örnekler üzerinde araştırılması gerektiği söylenebilir.

Yukarıda değinilen hususlar dikkate alınarak, bu tez çalışmasında; Ankara kent sınırları içinde Ankara kilinin tipik olarak gözlemlendiği bir alanın örnekleme alanı olarak seçilmesi, bu alandan alınan örnekler kullanılarak; (1) Ankara kilinin bazı



fiziksel ve indeks özelliklerinin belirlenmesi, arazide yatay (yanal) ve düşey yönde alınan örselenmemiş örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinin hem klasik odometre yöntemiyle, hem de daha önce bazı çalışmalarda önerilmiş ve kullanılmış olan ince çeperli odometre aletiyle tayin edilmesi, (2) yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları arasında farklılığın olup olmadığının araştırılarak yanal ve düşey yöndeki şişme basıncı arasındaki ilişkinin oransal olarak ifade edilmesi, (3) kilin ön konsolidasyon basıncı, likit limit ve simektit içeriği ile yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametreleri arasındaki ilişkilerin ve (4) kilin mikro yapısının şişme anizotropisi üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda aşağıda belirtilen çalışmalar ve değerlendirmeler yapılmıştır.

- (a) Şişmeyi etkileyebilecek karbonat yumruları ile fisürlerin yoğun olmadığı Ankara kilinin tipik olarak gözlemlendiği yaklaşık 18 km<sup>2</sup>'lik bir alan örnekleme alanı olarak seçilmiştir.
- (b) Yanal ve düşey yöndeki şişme basınçlarının eş zamanlı olarak ölçülebildiği ince çeperli odometre aleti yaptırılmış ve aletin deformasyon ölçmeyle ilgili kısımları ayarlanarak kalibre edilmiştir.
- (c) 7 farklı yerden alınan örselenmiş örneklerin bazı fiziksel ve indeks parametreleri belirlenmiştir. Aynı yerlerden alınmış örselenmemiş örnekler üzerinde ince çeperli odometre ve klasik odometre deneyleri yapılarak, yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları arasındaki ilişki araştırılmıştır.
- (d) Konsolidasyon deneyleri yapılarak Ankara kilinin ön konsolidasyon basıncı belirlenmiş olup, ön konsolidasyon basıncı, likit limit ve simektit içeriği ile yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.
- (e) Alınan tüm örselenmiş örnekler sıkıştırılarak düşey yöndeki şişme parametreleri belirlenmiş ve aynı yere ait örselenmemiş örneklerin düşey yöndeki şişme basıncının örselenmiş örneğin düşey yöndeki şişme basıncına oranı ile ön yükleme basıncı, likit limit ve simektit içeriği arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

(f) Örselenmemiş örneklerin mikro yapısı taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiş ve örneklerin ön konsolidasyon basıncı ve yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametreleri ile mikro yapı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

## **1.2. Önceki Çalışmalar**

Ankara ve çevresinde, jeoloji ve jeo-mühendislik açısından günümüze değin çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak bu tez çalışmasının konusu Ankara kilindeki şişme anizotropisinin araştırılması olduğu için, önceki çalışmalar arasında sadece tez konusu ile ilgili olan çalışmalar (şişme ve şişme anizotropisi) derlenerek konularına göre farklı başlıklar altında sunulmuştur. Ankara kilinin şişme karakteristiklerinin ve şişme anizotropisinin araştırdığı çalışmaların yanı sıra, şişme anizotropisiyle ilgili başlıca uluslararası çalışmalara da ana hatlarıyla değinilmiştir.

### **1.2.1. Ankara kilinin şişme karakteristiklerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar**

Doruk (1968), ODTÜ yerleşkesinden sınırlı sayıda aldığı örselenmiş ve örselenmemiş Ankara kili örnekleri üzerinde yaptığı deneyler sonucunda, aynı koşullar altında örselenmiş örneklerin örselenmemiş örneklere oranla daha fazla şiştiğini saptamıştır. Araştırmacı ayrıca, doğal su içeriğinin artmasına bağlı olarak şişmenin azaldığını, kil içeriğinin ve plastisite indeksi değerinin artmasının ise şişmeyi arttırdığını belirtmiştir.

Yüncü (1972), örselenmiş Ankara kili örnekleri üzerinde yaptığı çalışmada, silt tane boyutundaki malzeme içeriğinin artması durumunda şişme potansiyelinin azaldığını belirtmiştir. Araştırmacı, Ankara kilinin şişme-büzülme davranışı gösterdiğini belirterek, kilin doğal su içeriği, kuru birim hacim ağırlık ve yapısal özelliklerini (fisürler) içeren çok sayıdaki veriyle ve istatistiksel analizlerden yararlanılarak incelenmesini önermiştir.

Birand (1978), Ankara'daki toprak zeminleri kalıntı (rezidüel) zemin, Ankara kili ve alüvyon kili olmak üzere üç gruba ayırarak incelemiş ve bu zeminlerden kaynaklanabilecek jeoteknik sorunları araştırmıştır. Araştırmacı, Ankara kilinin şişme ve büzülme açısından aktif olduğunu, buna koşut olarak kilin üzerinde veya içinde inşa edilmiş olan yollar, az katlı yapılar, istinat duvarları ve alt yapı elemanları gibi hafif yapıların hasara uğradıklarını belirtmiştir. Birand (1978) ayrıca, Ankara kilinin dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda kilin şişme davranışının dolgular üzerindeki mühendislik yapılarını zarara uğratabileceğine değinmiştir.

Furtun (1989), Ankara'daki akarsu ve göl çökelleri ile alüvyal çökellerden örselenmemiş örnekler alarak, sabit hacimde ve örtü yükü altında odometre deneyleri yapmıştır. Araştırmacı, örnekleri farklı su içeriklerinde kuruttuktan sonra odometre deneylerine tabi tutmuştur. Furtun (1989), akarsu ve göl çökellerinin şişme parametrelerinin alüvyal çökellerin şişme parametrelerinden daha yüksek olduğunu saptamıştır. Araştırmacı ayrıca, deney sonuçlarından elde ettiği verileri değerlendirerek şişme basıncının pratik yoldan tayini amacıyla likit limit, doğal su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık gibi indeks parametrelerle şişme basıncı arasında görgül bir ilişki belirlemiştir.

Çokça (1991), metilen mavisi değeri (MBV) ve kil içeriğine bağlı yeni bir şişme potansiyeli sınıflaması önermiştir. Araştırmacı, Ankara'daki göl çökelleri ile güncel çökellerden aldığı örselenmiş örnekler üzerinde Atterberg limitleri, şişme, hidrometre, metilen mavisi deneyleri ve X-ışınları kırınım analizleri yaparak şişme potansiyelini belirlemiş, ayrıca metilen mavisi deneyinin killerin mineralojik bileşiminin belirlenmesinde dolaylı bir yöntem olarak kullanılabileceğini de belirtmiştir.

Çokça and Birand (1993), Ankara'daki Pliyosen-Pleyistosen yaşlı ve Ankara kili olarak tanımlanan çökeller ile alüvyal çökellerden aldıkları örnekler üzerinde Atterberg limitleri, hidrometre, X-ışınları kırınım analizleri ve metilen mavisi deneyleri (MBV) yaparak, bu zeminlerin şişme potansiyellerini belirlemişlerdir. Araştırmacılar, Ankara kilinin montmorillonit içeriği ve MBV değerlerinin, alüvyal çökellerin montmorillonit içeriği ve MBV değerlerinden daha büyük olduğunu

saptamışlardır. Buna bağlı olarak, Ankara kilinin şişme potansiyelinin alüvyal çökellerden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Ankara kilinin şişme davranışını ve örselenmenin şişmeye etkisini inceleyen Ergüler (2001), Ankara kilinin tipik olarak gözlemlendiği 20 yerden örselenmiş ve örselenmemiş örnekler olarak şişme deneyleri ve indeks parametreleri saptamaya yönelik deneyler yapmıştır. Araştırmacı, şişme parametreleri ile indeks parametreler arasındaki ilişkileri basit ve çoklu regresyon analizleriyle değerlendirmiş ve yüksek korelasyon katsayısına sahip yirmi adet görgül ilişki önermiştir. Ergüler (2001), Ankara kilindeki aktif zonun derinliğini araştırmış ve yüzeyden itibaren ilk 2 m'lik derinlikte şişme beklenebileceğini, ayrıca örselenmenin şişmeyi arttırıcı yönde etki ettiğini belirtmiştir. Ergüler (2001), su içeriği ile ilgili olan ve şişme davranışının incelenmesinde kullanılacak " $w_{\max 24,72}$ " olarak adlandırılan yeni bir parametre ve bu parametreyi saptamaya yönelik basit bir deney yöntemi önermiştir. Ergüler (2001) ve Ergüler ve Ulusay (2003a),  $w_{\max 24,72}$  parametresi ile kilin şişme basıncı ve yüzdesi arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu belirtmişlerdir. Söz konusu görgül ilişkiler esas alınarak, Ergüler ve Ulusay (2003b) tarafından Ankara kentinin merkezi ve güneybatı kesimleri için şişme potansiyeli haritaları hazırlanmıştır.

Avşar (2003), karbonat yumruları içeren Ankara kiline ait örselenmiş örneklerin çeşitli indeks parametreleri ile şişme parametreleri arasındaki ilişkileri regresyon analizleriyle değerlendirmiş ve kilin şişme parametrelerinin dolaylı yoldan tayini amacıyla kalsit (karbonat) içeriğinin de dikkate alındığı ve korelasyon katsayısı 0.75 ile 1.00 arasında değişen görgül ilişkiler önermiştir. Karbonatın kilin şişme davranışını sönümleyici yönde etki yaptığını belirten araştırmacı, plastik limit, likit limit ve kil tane boyu yüzdesinin şişme parametreleri ile anlamlı ilişkiler verdiğini belirtmiştir.

## **1.2.2. Killerin şişme anizotropisi ile ilgili çalışmalar**

### **(a) Ankara'daki killi zeminlerin şişme anizotropisi ile ilgili çalışmalar**

Üner (1977), Ankara'daki iki farklı zemin türünün (alüvyon zemin ve Ankara kili) mühendislik özelliklerini karşılaştırmıştır. Yanal ve düşey yönde örnekleme yapan

araştırmacı, ikisi yanal yönde ikisi düşey yönde olmak üzere Ankara kilinden 4, alüvyona ait killi zeminden 4 adet olmak üzere, toplam 8 adet örselenmemiş örnek olarak örtü yükü altında değişik derinliklere ait örneklerin şişme yüzdelerini odometre deneyleriyle belirlemiştir. Araştırmacı, her iki zemin türünde de yanal yöndeki şişmenin düşey yöndeki şişmeden daha büyük ve Ankara kilinin şişme potansiyelinin alüvyon kilinin şişme potansiyelinden daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

Çetinkaya (1978), Ankara kilinde şişme anizotropisini incelemek amacıyla ODTÜ kampüsünde farklı yerlerde 4 adet gözlem çukuru açmış ve bu çukurlardan Ankara kiline ait örselenmemiş örnekler almıştır. rnekleri, yanal ve düşey olmak üzere, iki farklı yönde alan araştırmacı şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerini belirlemiştir. İki çukurdan alınan örneklerin düşey yöndeki şişme parametreleri yanal yöndeki şişme parametrelerinden daha yüksek, üçüncü çukurda yanal yöndeki şişme daha büyük ve dördüncü çukurda ise yanal ve düşey yönlerdeki şişme birbirine yaklaşık eşit çıkmıştır. Çetinkaya (1978), sadece 4 yerden örnek olarak çalışmıştır. şişme anizotropisi ile ilgili çok kesin olabilecek sonuçlar elde edilemediğini belirten araştırmacı, şişme ynderliğinin daha fazla sayıda örnekle araştırılmasını önermiştir. Ayrıca, bu araştırmacının yaptığı çalışmanın asıl konusu Ankara kilinin önyükleme basıncının derinliğe ve yöne (yanal ve düşey) bağlı değişiminin ve zeminin şişme, dayanım ve sıkışabilirliği ile önyükleme basıncı arasındaki ilişkilerin araştırılmasıdır.

Ertekin (1991), Ofer (1980) tarafından önerilen ve yanal yöndeki şişme basıncının birim deformasyon ölçerler kullanarak saptandığı düzeneğe benzer bir düzenek geliştirmiştir. Araştırmacı, yöne bağlı şişme davranışı gösteren zeminler içinde inşa edilecek yapıların projelendirilmesinde yanal yöndeki şişme basıncının dikkate alınması gerektiğini belirterek, Ankara – Macunköy’den aldığı yüksek plastisiteli ve gri kil örneklerinin yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçlarını ince çeperli odometre halkasının kullanıldığı düzenekle saptamıştır. Araştırmacı, incelediği zeminin yanal yöndeki şişme basıncının düşey yöndeki şişme basıncından daha büyük olduğunu saptamıştır.

Hatipoğlu (1993), Aliağa Termik santralinin olduğu bölgeden farklı derinliklerden Şişme özelliğine sahip kil örnekleri almıŐtır. Araştırmacı, yüksek plastisiteye sahip olan bu zeminin Şişme basıncını, Ertekin (1991) tarafından geliştirilmiş olan ince çeperli odometre halkasını kullanarak araştırmış ve birim deformasyon ölçerlerle yanal yöndeki Şişme basıncını saptamıştır. Araştırmacı, yanal yöndeki Şişme basıncının düşey yöndeki yüklemenin ilk aşamalarında belirli bir doruk değere ulaştığını ve daha sonra azalarak nihai bir değere ulaştığını ve yanal ve düşey yönlerdeki gerilme farkından dolayı örneğin yenilmiŐ olabileceğini, bu nedenle yanal yöndeki Şişme basıncının doruk bir değere ulaŐtıktan sonra azaldığını belirtmiŐtır.

Ergüler (2001), çalışmasının birincil amacı olmamakla birlikte, Ankara kilinin tipik olarak gözlendiği iki yerden yanal yönde alınmış örnekler üzerinde odometre deneyleri yapmış ve Şişme anizotropisini incelemiŐtır. Araştırmacı, yanal yönde alınan örneklerin Şişme basıncı değerlerinin düşey yönde alınan örneklerin Şişme basıncı değerlerinden daha büyük olduğunu saptamıştır.

Sapaz (2004), yanal ve düşey yönlerdeki Şişme basınçları arasındaki iliŐkiyi araştırmıştır. Sıkıştırılmış kil örneklerinin Şişme basınçlarını belirlemek amacıyla, Ertekin (1991) tarafından geliştirilmiş olan ince çeperli odometre deney düzeneğini kullanan araştırmacı, örneklerini Batıkent-Sincan metro hattının D29 durağının olduğu bölgedeki tek bir yerden almıŐtır. Sapaz (2004), aynı kuru birim hacim ağırlığa ve su içeriğine sahip örneklerin düşey yöndeki Şişme basıncının yanal yöndeki Şişme basıncından daha büyük olduğunu ve “SR” olarak ifade edilen Şişme basıncı oranının 0.59 ile 0.86 arasında değiştiğini belirtmiŐtır.

## **(b) Killerin Şişme Anizotropisi ile İlgili Uluslararası Çalışmalar**

Kassiff and Zeitlen (1962), Şişme potansiyeline sahip bir zemin içerisinde gömülü olan boruların üzerine sistematik bir Şekilde birim deformasyon ölçerler yerleştirerek ŐiŐmeden kaynaklanan deformasyonları ve Şişmeyi yerinde gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, yanal ve düşey yönlerdeki Şişme miktarlarının eşit olmadığını ve ŐiŐmeden dolayı boru hattının yüksek bir basınca maruz kalarak deformasyona uğradığını belirtmişlerdir.

Komornik and Zeitlen (1965), şişme özelliğine sahip killi zeminlerin yanal yöndeki şişme basıncını ölçmek amacıyla konsolidasyon halkasını modifiye ederek yeni bir deney düzeneği oluşturmuşlardır. Bu deney yönteminde elektrikli deformasyon ölçerlerle yanal şişme basıncı ölçülmüştür. Araştırmacılar, yanal şişme basıncının düşey yöndeki şişme basıncından daha büyük olduğunu saptamışlardır.

Parcher and Liu (1965), sıkıştırılmış kil örneklerinin yanal ve düşey yönlerdeki şişme yüzdesini aynı anda ölçebilen bir düzenek kullanmışlardır. Araştırmacıların kullandığı düzende düşey yöndeki şişme mekanik gereçlerle ölçülürken, yanal yöndeki şişme ise küçük bir tüpün içindeki suyun yükselimindeki değişim ile ölçülmektedir. Parcher and Liu (1965), örselenmemiş örnekler dahil, tüm örneklerin yanal yöndeki şişme yüzdelерinin düşey yönden daha fazla olduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar ayrıca, sıkıştırılmış örneklerin hem yanal hem de düşey yöndeki şişme yüzdelерinin örselenmemiş örneklerin şişme yüzdelерinden yaklaşık 4 kat daha büyük olduğunu ve sıkıştırma (kompaksiyon) enerjisinin artmasına koşut olarak sıkıştırılmış örneklerin şişme yüzdelерinin arttığını belirtmişlerdir.

Ofer (1980), yanal şişme basıncını laboratuvarında ölçmek amacıyla yanal şişme basıncı halkası (lateral swell pressure ring) geliştirmiştir. Ofer (1980)'in geliştirdiği düzenek, esas olarak, Komornik ve Zeitlen (1965) tarafından önerilen düzende aynı çalışma ilkesine sahip olup, odometre halkası çok ince bir şekilde tasarlanmıştır. Halkanın kalınlığı 0.7 mm olup, yanal şişmeyi ölçmek amacıyla 4 adet birim deformasyon ölçer odometre halkasının dış yüzeyine epoksi ile yapıştırılmıştır. Ofer (1980), kil örneklerini ince cidarlı odometre halkasının içine sıkıştırarak hazırlamış ve 19 kPa'lık sabit düşey gerilme altında 24 saat süreyle konsolide ettikten sonra örneği tamamen ıslatarak şişmeye bırakmıştır. Araştırmacının saptadığı en büyük yanal şişme basıncı 100 kPa ve yanal yönde ölçülen şişme yüzdesi ise % 8'dir. Ofer (1980), ayrıca birim hacim ağırlığın artması sonucu kabarma ve yanal şişme basıncının arttığını da belirtmiştir.

Joshi and Katti (1984), Hindistan'daki şişme potansiyeline sahip zeminler içinde ve üzerinde inşa edilmiş olan istinat duvarları, yollar, kanallar ve drenaj sistemlerinin

yanal yöndeki şişme basınçları nedeniyle önemli düzeyde hasara uğradıklarını belirterek, yanal yöndeki şişme basınçlarının belirlenmesinin önemini vurgulamışlardır. Araştırmacılar, özel olarak tasarladıkları bir alet ile örtü yükü altındaki yanal şişme basıncını laboratuvarında belirleyerek, örtü yükünün artmasına koşut olarak yanal yöndeki şişme basıncının hızlı bir şekilde arttığını ve belirli bir örtü yükü değerinden sonra ise basıncın azalarak arttığını saptamışlardır. Araştırmacılar ayrıca, yanal şişme basıncının zamana bağlı olarak önce arttığını doruk bir değere yükseldikten sonra azalarak sabit bir değere ulaştığını saptamışlar ve bu sabit değeri de dengedeki yanal şişme basıncı olarak tanımlamışlardır.

Shiming (1984), şişmeyi hem yanal hem de düşey yönde belirlemek amacıyla, üç eksenli bir şişme düzeneği tasarlamıştır. Üç farklı yerden aldığı şişme potansiyeline sahip örselenmemiş örneklerin şişme basınçlarını ve yüzdelerini bu düzeneği kullanarak belirlemiştir. Araştırmacı ayrıca, incelediği zeminden örselenmemiş yönlü (yanal ve düşey) örnekler almış ve klasik odometre yöntemiyle bu örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerini belirlemiştir. Her iki deney yönteminden elde edilen düşey yöndeki şişme basıncı ve yüzdesinin yanal yöndeki şişme basıncı ve yüzdesi değerlerinden daha büyük olduğu anlaşılmıştır. Shiming (1984), yanal ve düşey yönlerdeki şişme basıncı ve yüzdesi değerlerinin birbirinden farklı olmasının nedenini kil tanelerinin yönlenmesinden kaynaklandığını belirterek, anizotropisinin varlığına işaret etmiştir. Araştırmacı, şişme potansiyeline sahip killi zeminin içinde veya üzerinde inşa edilecek yapıların tasarımında hangi yöndeki şişmenin etkin olacağını belirlenmesini ve bu yöndeki şişmenin dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir.

Fourie (1989), yanal yöndeki şişme basıncını ilk kez Bishop and Wesley (1975) tarafından geliştirilen hidrolik üç eksenli deney düzeneğini kullanarak belirlemiştir. Deneyde belirli bir nem içeriğinde ve kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış kil örneğinin yanal yöndeki şişmesinin belirlenmesinde, Bishop and Henkel (1962) tarafından önerilen ve örneğin etrafına kuşak şeklinde sarılarak kullanılan deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Araştırmacı, yanal yöndeki şişme basıncının düşey yöndeki şişme basıncının iki katından daha fazla olduğunu saptamıştır.



Michel et al. (2000), üç boyuttaki şişmeyi üç eksenli şişme düzeneği kullanarak incelemiştir. Araştırmacılar, Bishop and Wesley (1975) tarafından tasarlanan üç eksenli şişme düzeneğini, GDS (Geotechnical Digital System) adlı ve bilgisayar tabanlı bir cihazla birleştirerek deformasyon okumalarını hassas bir şekilde kaydetmişlerdir. Michel et al. (2000), deneye tabi tutulacak örneklerde örselenmenin tane yönelimlerini etkileyeceğini belirterek, deneyleri örselenmemiş örnekler üzerinde yapmışlardır. Araştırmacılar, yağışlı dönemde örselenmemiş örnekler almışlar ve örnekleri oda sıcaklığında kuruttuktan sonra üç eksenli şişme deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda, 5 farklı yerden alınan örneklerde şişme anizotropisinin örnekleme yerine göre değişim gösterdiğini belirten Michel et al. (2000), tabakalı bir yapı gösteren yerden aldıkları zeminin düşey yönde ve başka bir bölgeden aldıkları zeminin radyal olarak (yanal yönde) daha fazla şiştiğini, diğer üç yerden aldıkları örneklerin ise genel olarak izotrop bir şişme davranışı gösterdiklerini belirlemişlerdir.

Windal and Shahrour (2002), şişme özelliğine sahip sıkıştırılmış kil örneklerinin yanal şişme basıncını ince odometre halkaları kullanarak tayin etmişlerdir. Araştırmacılar, bu halkaların üzerine birim deformasyon ölçerler yapıştırarak kilin yanal yöndeki şişme basıncını saptamışlardır. Araştırmacılar, biri sert (sıkı) diğeri esnek olmak üzere iki çeşit odometre halkası kullanmışlardır. Windal and Shahrour (2002), odometre halkasının sertliğinin artmasıyla yanal ve düşey yöndeki şişme basınçlarının arttığını saptamışlar ve kilin şişmesinin bir yönde engellenmesinin diğer yöndeki şişme miktarının (yüzdesinin) ve basıncının artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Windal and Shahrour (2002), sıkı halka kullanıldığında kilin yanal yöndeki şişmesi engellediği için düşey yöndeki şişme basıncının yerinde (arazide) oluşan düşey yöndeki şişme basınçlarından daha yüksek olarak belirlendiğini ifade etmişlerdir.

Al Shamrani and Dhowian (2003), odometre ve üç eksenli şişme deneylerinin uygulanabilirliğini (güvenilirliğini) araştırmak amacıyla, arazide belirledikleri bir alana ısılıçiftler, bağıl nem ölçerler ile derindeki ve yüzeydeki kabarmayı ölçen plakalar (surface and deep heave plates) yerleştirerek deneyler yapmışlar ve bu deneylerden elde ettikleri değerleri laboratuvarında belirlenen değerlerle karşılaştırmışlardır. Odometre deneyleri ile belirlenen şişme parametrelerinin

(şişme yüzdesi ve şişme basıncı) arazi deneyleriyle belirlenen şişme parametrelerinden daha yüksek, üç eksenli deneylerden elde edilen parametrelerin ise arazide belirlenen değerlere daha yakın olduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar, odometre deneylerinde yanal yöndeki şişmenin tamamen engellendiğini ve tek bir yönde şişmesine izin verilen örneğin arazidekinden daha fazla şiştiğini belirtmişlerdir.

## 2. ÖRNEKLEME ALANININ TANITIMI

Bu tez çalışması için tezin “Giriş” bölümünde ifade edilen gerekçeler ve daha önce bu alanda yapılan çalışmalar (örneğin; Ergüler, 2001; Tonoç, 2001) dikkate alınarak, Ankara'nın güneybatı kesimindeki Yüzüncüyıl, Çukurambar, Balgat, Öveçler, Karakusunlar semtleri ile Eskişehir yolunun bir bölümü örnekleme alanı olarak seçilmiştir.

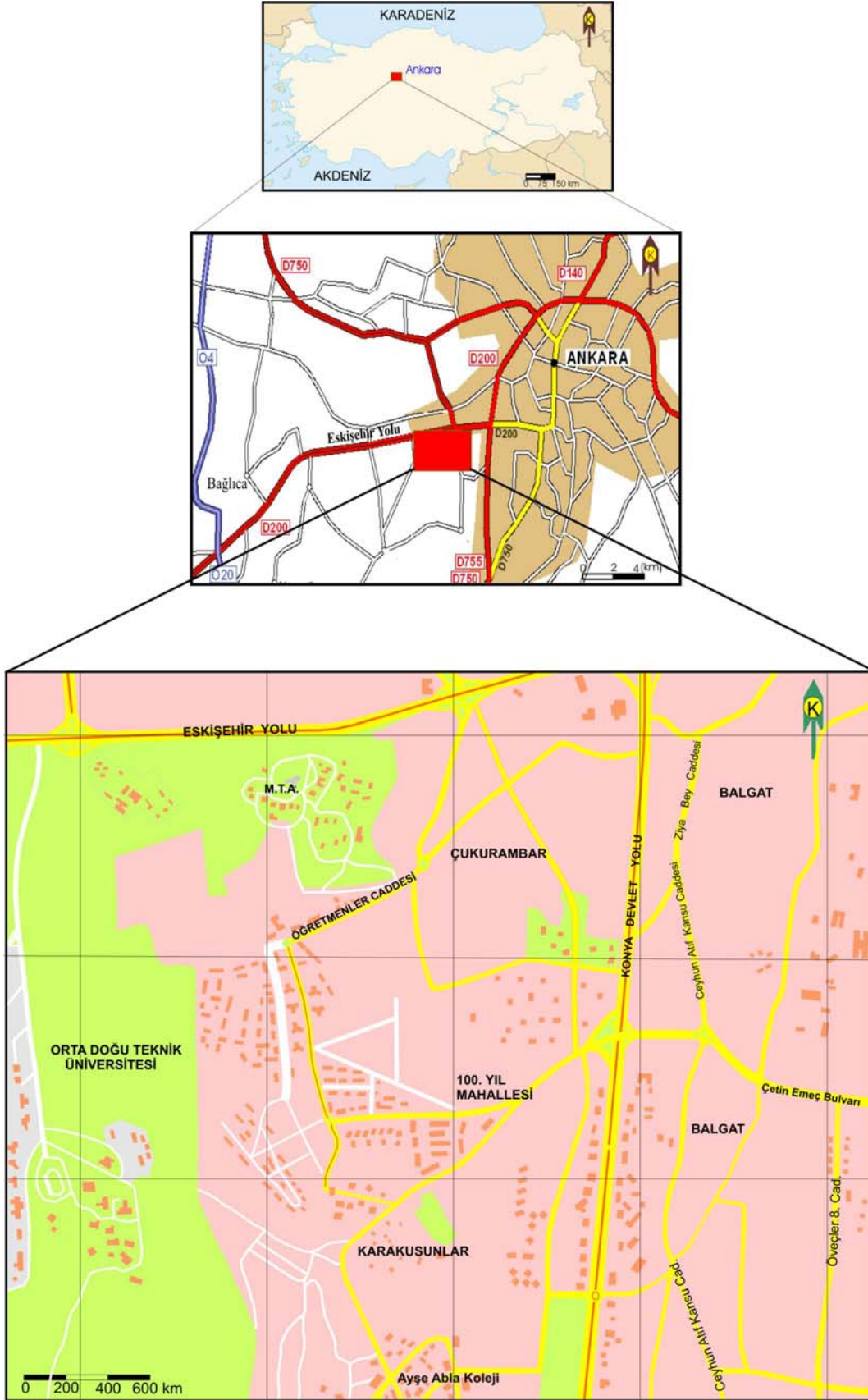
Yüzüncüyıl, Karakusunlar, Çiğdem Mahallesi ve Çukurambar semtlerini içine alan bir bölgeyi inceleme alanı olarak belirleyen Ergüler (2001), bu alandan aldığı örnekler üzerinde şişme deneyleri yapmış ve örneklerin yüksek şişme basınçlarına sahip olduklarını belirtmiştir. Araştırmacı, incelediği alanda yol, bahçe duvarı, gecekondular ve villa gibi yapılarda şişme basınçlarından kaynaklanan hasarlar olduğunu gözlemlemiştir. Ergüler (2001), yollarda ondülasyonlar, kabarmalar ve farklı yönelimlerde çatlaklar geliştiğini gözlemlemiş ve onarım yapılmasına rağmen bu deformasyonların her mevsim değişikliğinde tekrar oluştuğunun bölge sakinleri tarafından ifade edildiğini belirtmiştir. Araştırmacı, gecekondularında değişik yönlerde gelişmiş çatlaklar olduğunu gözlemlemiş ve bu yapıların temellerinde 22 cm'ye varan yükselmeler ölçmüştür. Ergüler (2001), bunun dışında bahçe duvarlarının yan yattığını, çatlama ve/veya çatlak yerlerinde farklı kabarmalar (yükselmeler) geliştiğini gözlemlemiştir. Şekil 2.1'de bu çalışmada örnekleme alanı olarak belirlenen sınırlar içinde hasara uğramış bazı yapıların 2000 yılında kaydedilmiş iki fotoğrafı verilmiştir. Bu çalışmada örnekleme yapılırken buna benzer hasarlar gözlenmiş ve tezin 4. bölümünde bunlara da kısaca değinilmiştir.

### 2.1. Coğrafi Konum ve Morfoloji

38° 43' ve 40° 41' kuzey enlemleri ile 30° 51' ve 34° 05' doğu boylamları arasında yer alan Ankara ili, Orta Anadolu Yaylası'nın kuzey bölümü üzerinde bulunmaktadır. Ankara Yaylası adı verilen bu yayla, daha dağlık ve ormanlık Kuzey Anadolu ile daha kurak ve engebesiz olan Konya Ovası arasında bir geçiş bölgesidir. Kent doğuda Kırıkkale, batıda Eskişehir, kuzeyde Bolu, Çankırı ve güneyde Konya illeri ile çevrilidir (Şekil 2.2).



Şekil 2.1. Örnekleme alanında zemindeki şişme (kabarma) nedeniyle tek katlı iki yapıda gelişen deformasyonlar (Fotograflar: Z.A. Ergüler ve R. Ulusay, 2000).



Şekil 2.2. Örnekleme alanının Türkiye ve Ankara ili içindeki genel konumu ve sınırları.

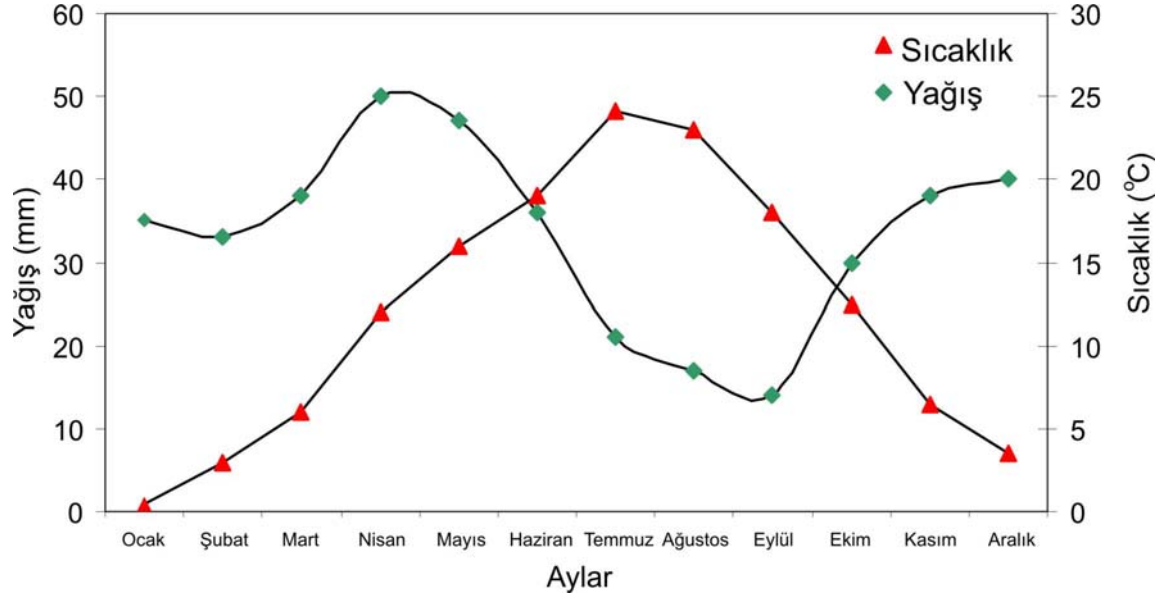
Örnekleme yapılan alan, batıda ODTÜ arazisi, güneyde Ayşe Abla Koleji, doğuda Öveçler 8. Cadde ve kuzeyde Eskişehir Yolu ile sınırlandırılmış olup, yaklaşık 18 km<sup>2</sup>'lik bir yüzölçümüne sahiptir. Bu alanın deniz seviyesinden yüksekliği 880 ile 980 m arasında değişmektedir.

Örnekleme alanındaki Yüzüncüyıl, Karakusunlar, Balgat semtleri ile Eskişehir Yolu fazla dik olmayan hafif eğimli bir topoğrafyaya sahip olup, eğimler Balgat'ın güney kesimleri ve Öveçler semtine doğru bir miktar artış göstermektedir. İnceleme alanındaki gecekondular yıkılarak bunların yerine çok katlı binalar yapılmakta olup, bunun yanı sıra yeni yollar açılmaktadır. Hızlı bir yapılaşma sürecinde olan çalışma alanının topoğrafyası genel hatlarını korumakla birlikte, yeni yapılan inşaatlar ve yol yapım çalışmalarıyla ilgili dolgu ve yarmalar nedeniyle topoğrafya yerel olarak bir miktar değişime uğramıştır. Kasapoğlu (1980), tarafından hazırlanmış olan Ankara kent alanı eğim haritasına göre, çalışma alanının kuzey kesimlerinde eğimler %3-8 arasında, bazı yerlerde %3'den daha az, güneye doğru ise daha da artarak %8-30 arasında değerlere ulaşmaktadır.

## **2.2. İklim ve Bitki Örtüsü**

Ankara ve çevresinde İç Anadolu bölgesine özgü karasal iklim özellikleri hakimdir. Kışlar soğuk ve kar yağışlı, yazlar ise sıcak ve kuraktır. Yağışların büyük bir bölümü, ilkbahar ve kış aylarında gözlenir.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ)'ne bağlı Ankara istasyonu kayıtlarından sağlanan 26 yıllık (1980-2006) aylık ortalama yağış ve ortalama sıcaklık değerleri Şekil 2.3'de sunulmuştur. Bölgedeki yağışların büyük kısmı ilkbahar ve sonbahar aylarında yağmur, kış aylarında ise kar yağışı şeklinde olup, en az yağışın Ağustos ve Eylül, en çok yağışın ise Nisan ve Mayıs aylarında kaydedildiği belirlenmiştir (Şekil 2.3). En yüksek ortalama aylık sıcaklık 24.1 °C ile Temmuz ayı ve en soğuk ay ise ortalama 0.4 °C ile Ocak ayıdır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. DMI'nin Ankara istasyonundan alınan 1980-2006 yılları arasındaki kayıtlara göre ortalama sıcaklık ve yağışın aylara göre değişim grafiği.

Ankara'da bitki örtüsü, güneydeki bozkırla kuzeydeki ormanlık bölge arasında, makilik bir geçit bölgesi karakterindedir. Çalışma alanının batısında ODTÜ ormanı, kuzeyinde ise MTA ve Şap Enstitüsü'nün sınırları içindeki ağaçlarla kaplı alanlar bitki örtüsü açısından zengin alanlardır. Çalışma alanının diğer kesimlerinde ise yapılaşma nedeniyle az miktarda yeşil alanlar mevcuttur.

### 2.3. Yerleşim

İnceleme alanındaki önemli yapılaşmalar; Şap Enstitüsü, MTA Genel Müdürlüğü, Eskişehir Yolu'nun ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yerleşkesinin çalışma alanına dahil edilen kısımları ile Yüzüncüyıl, Balgat, Karakusunlar ve Öveçler'deki yapılarıdır. Çalışma alanında çok katlı binaların yanı sıra, gecekondular, bazı kurumların (MTA, Şap Enstitüsü) laboratuvar binaları, tek veya iki katlı yapılar da bulunmaktadır. ODTÜ, Şap Enstitüsü ve MTA Genel Müdürlüğü arazilerindeki ormanlık alanlar dışında inceleme alanının büyük bir kısmı yerleşim bölgesidir (Şekil 2.2). Yerleşime açık alanlar, özellikle Karakusunlar, Öveçler ve Yüzüncüyıl semtleri hızlı bir yapılaşma sürecine maruz kalmaktadır.

### 3. ÖRNEKLEME ALANI VE YAKIN ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Ankara ve civarının temel kayacını Alt Paleozoyik yaşlı epimetamorfik şistler oluşturmaktadır (Dağar vd., 1963; Çalgın vd., 1973; Kasapoğlu, 1980'den). Bu metamorfik birimlerin üzerinde Permo-Karbonifer ve Triyas yaşlı kireçtaşı blokları içeren grovak ve metagrovaklardan oluşan karışık bir seri, tam belirgin olmayan bir uyumsuzlukla yer almaktadır (Kasapoğlu, 1980). Bu karışık seri bazı araştırmacılar tarafından, "eski Elmadağ Serisi" (Chaput, 1947; Kasapoğlu 1980'den), "Ankara Melanji" (Bailey and Mccallien, 1953), "Ankara Grubu" (Koçyiğit, 1987) olarak tanımlanmıştır. Bu karışık serinin üzerinde belirgin bir uyumsuzlukla Liyas yaşlı granitik çakıllar içeren taban kongloması, kumtaşı, silttaşı, ve fosilli kalkarenitler, üste doğru Dogger, Malm ve Alt Kretase yaşlı, sarımsı-beyaz ve Ammonitli kireçtaşları, silisli-kumlu-killi kireçtaşları, plaket kireçtaşları, yumrulu kireçtaşları gözlenir (Chaput, 1931,1947; Salomon Calvi, 1940,1941; Erol 1956; Erentöz, 1975; Kasapoğlu, 1980'den). Bu serinin üzerine serpantin, radyolarit, spilit, bazalt, kireçtaşı, diyabaz, çamurtaşı, kumtaşı, marn, çakmaktaşı, gabro ve olistostromlardan oluşan "ofiyolitli melanji" ve onun üzerine uyumsuz olarak, Alt ve Üst Kretase yaşlı konglomera, silttaşı, marn, kumtaşı, olistostromları içeren filiş serisi gelmektedir. (Çalgın vd., 1973; Erentöz, 1975; Bingöl, 1976; Kasapoğlu 1980'den). Ankara'nın kuzey ve güney bölgelerinde, denizel ortamda oluşmuş Paleosen çökelleri; konglomera, kumtaşı, silttaşı, marn, ve kireçtaşları, Eosen çökelleri; bol fosilli kumlu kireçtaşlarından oluşmaktadır (Erol, 1954; Gökçen, 1976). Oligosen ise, lagüner ve evaporitik ortam çökelleri ile temsil edilir (Erol, 1954). Miyosen çökelleri; silisli-killi gölsel kireçtaşları, marn, kumtaşı ve konglomeralardan oluşmakta olup; bazaltik ve andezitik lavlar aglomera ve tüflerle ara tabakalıdır (Çalgın vd., 1973; Kasapoğlu, 1980'den). Ankara ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesiti Şekil 3.1'de sunulmuştur.

Ankara havzasının dolgu sedimanları alttan üste doğru, 1-53 m kalınlıkta alüvyon yelpazesi çakıltaşı, 5-10 m kalınlıkta örgülü nehir ovası çakıltaşı-kumtaşı ve 75-100 m kalınlıkta taşkın ovası ince taneli kırıntılılardan oluşur (Koçyiğit and Türkmenoğlu,1991). Ankara'daki toprak zeminlerin büyük bir bölümünü oluşturan Üst Pliyosen yaşlı akarsu ve göl çökelleri, Miyosen yaşlı volkaniklerin üzerinde uyumsuz olarak bulunmaktadır (Chaput, 1931; Leuchs, 1944; Erol, 1956; Çopur,



Eratem Era	Sistem Periyot	Seri Epok	SİMGE	AÇIKLAMALAR	
SENOZOYİK	Kuvaterner			Alüvyon (çakıl, kum, silt)	
	Tersiyer	Neojen	Pliyosen	Üst	Gevşek çimentolu konglomera, kırmızı renkli kumlu siltli kil, kireç yumrulu kırmızı killler
				Alt	Pembe renkli marn ve killlerle karışık lav çakılları ve tüfler
			Miyosen	Silisli-killi gölsel kireçtaşları, marn, kıltaşı, konglomera, andezit, bazalt, aglomera ve tüfler	
		Paleojen	Oligosen	Konglomera, kumtaşı, marn, jips	
			Eosen	Bol fosilli kumlu kireçtaşları ve kumtaşları	
			Paleosen	Filiş (konglomera, kumtaşı, silttaşı, marn, kireçtaşı)	
	MESOZOYİK	Kretase	Geç	Filiş (konglomera, kumtaşı, silttaşı, marn ve olistost-romlar)	
			Erken	Ofiyolitli melanj (serpantin, radyolarit, sipilit, bazalt, diyabaz, kireçtaşı, kumtaşı, çamurtaşı, marn, çakmak-taşı, gabro ve olistostromlar),	
		Jura	Geç	Malm	Ammonitli kireçtaşı, silisli-kumlu-killi kireçtaşları ve plaket yumrulu kireçtaşları
Orta			Dogger		
Erken			Liyas	Taban konglomerası, kumtaşı, silttaşı ve fosilli kalkarenitler	
Triyas			Karışık (Bloklu) Seri: Yastık yapılı sipilit-bazalt blokları, Permo-Karbonifer ve Triyas yaşlı kireçtaşı blokları içeren grovak ve meta-grovaklar		
PALEOZOYİK		Permo-Karbonifer			Epimetamorfik şistler (fillit, grafitşist, mikaşist, kloritşist, kuvarsit)

(ÖLÇEKSİZ)

Şekil 3.1. Ankara ve çevresinin geliştirilmiş stratigrafik dikme kesiti (Kasapoğlu, 1980'den).

1972; Kasapoğlu, 1980'den). Pliyosen yaşlı akarsu ve göl çökelleri, yaygın killi taşkın ovası çökelleri ile kum ve çakıl merceklerinden oluşmuştur. Toplam kalınlıkları havza ortalarında 200 m'ye ulaşabilmektedir. Çökellerin ince taneli düzeyleri, yoğun bir fisür ağı ile örülmüştür ve yarı-kurak iklimlere özgü kaliçi oluşumlarına sahiptir. Ayrıca Kiper (1983), Üst Pliyosen çökellerinin, özellikle havza kenarlarında, Gökkaya Tepe, Elvan ve Beytepe Kampüsü kesimlerinde, yer yer iri çakıllarla ince taneli malzemenin birarada bulunduğu ve çamur akıntıları olarak yorumlanabilen özellikler gösterdiğini belirtmiştir. Pliyosen'in "Balgat Üyesi" olarak tanımlanan (Erol vd., 1980) çökellerin üst düzeylerini Ankara ve yakın çevresinde gözlenen tipik kırmızımsı-kahverenkli, yer yer çakıl ve kireç yumruları içeren ve Ankara kili olarak adlandırılan (Birand, 1978) killi seviye oluşturmaktadır. Üst Pliyosen'e ait bu çökelleri sedimentolojik açıdan inceleyen Aras (1991), bu çökellerin alüvyal yelpaze ortamını temsil ettiklerini belirtmiştir. Ankara kili, Ankara havzasının genellikle iç kısımlarında, derinliği yer yer 20-30 m'yi bulan bir birimdir. Kil, özellikle havza kenarlarında fazla miktarda kum-çakıl düzeylerini içerir (Birand, 1978). Ankara kili profillerinde yaygın olarak gözlenen karbonat yumruları "step kalkerleri" (Salomon-Calvi, 1940; Kiper, 1983'den) olarak tanımlanmış olup, Ulusay (1975), Birand (1978), Kasapoğlu (1980), Kiper (1983), Avşar (2003) ve Avşar et al. (2005) tarafından da Ankara'daki Üst Pliyosen çökelleri içerisinde yaygın olarak gözlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Örnekleme alanı yukarıda tanımlanan Üst Pliyosen'e ait pekişmemiş, kırmızımsı kahverenkli, bazı bölgelerde çakıl ve kireç konkresyonları içeren killi çökellerle kaplıdır (Şekil 3.2). Bu killi çökeller çok kısa mesafelerde değişkenlik göstermektedir. İnceleme alanında yapılan gözlemlerde Ankara kili olarak tanımlanan birimlerin içinde çakıllı, kumlu, siltli ve karbonat yumrularının olduğu seviyelere rastlanmış olup, güneye doğru gidildikçe çakıllı ve kumlu seviyelerin daha yoğun, kuzeydeki kesimlerde ise kil oranının arttığı gözlenmiştir. Çakıllı ve kumlu seviyelerde taneler iyi yuvarlaklaşmış olup, değişik tane boyutunda kırıntılar içermektedir (Şekil 3.3). Örnekleme alanındaki bazı yol yarmaları ve inşaat kazılarında çakıllı, kumlu ve siltli katkılarının yoğun olduğu seviyelerden (kanal çökelleri) belirgin bir sınırla kil oranının çok fazla olduğu seviyelere geçiş olduğu görülmüştür.

Ankara bölgesinde Kuvaterner, alttaki birimler üzerine uyumsuz olarak gelen alüvyal çökeller ile temsil edilir (Erol, 1956; Kasapoğlu 1980'den). Ancak bu alüvyal birimler tez çalışması için seçilen alanda bulunmamaktadır.



şekil 3.2. Örnekleme alanındaki Ankara kilinde açılmış bir yol yarmasından görünüm (Yüzüncüyıl Mahallesi).



şekil 3.3. Ankara kilinin içerdiği çakıllı ve kumlu seviyelerden bir görünüm (Yüzüncüyıl Mahallesi).

#### 4. ÖRNEKLEME ÇALIŞMASI VE GÖZLEMLER

Saha çalışmaları sırasında öncelikle, Ankara kili olarak adlandırılan birimin tipik olarak gözlemlendiği ve örnek alınabilecek yerler belirlenmiştir. Bu yerlerin belirlenmesi aşamasında, inceleme alanındaki kazılar ve yarmalar incelenmiş ve kilin fazla miktarda çakıl ve karbonat yumruları içermediği yerlerden örselenmemiş ve örselenmiş örnekler alınmıştır. Örneklemeye yerlerinin belirlenmesi ve laboratuvar örneklerinin alınması aşamaları devam ederken bölgedeki hafif yapılar da incelenerek, zeminin şişmesinden kaynaklanabilecek deformasyon ve hasarlarla ilgili gözlemler yapılmıştır. İnceleme alanındaki yol, gecekondular ve bahçe duvarları gibi hafif yapılarda çeşitli boyutlarda hasarlar (duvarlarda çatlaklar ve ayrılmalar) (Şekil 4.1); ayrıca yollarda çatlaklar, ondülasyonlar ve kabarmalar saptanmıştır. Hasarlı yapılar incelenirken düşey yöndeki şişmenin yanı sıra, yanal yöndeki şişmenin etkisiyle de bazı yapıların hasara uğradıkları görülmüştür. Şekil 4.2’de örneklemeye alanındaki bir duvarın arkasındaki zeminin yanal yönde şişmesiyle gelişen basınç nedeniyle duvarda yola doğru olan kavislenme görülmektedir.

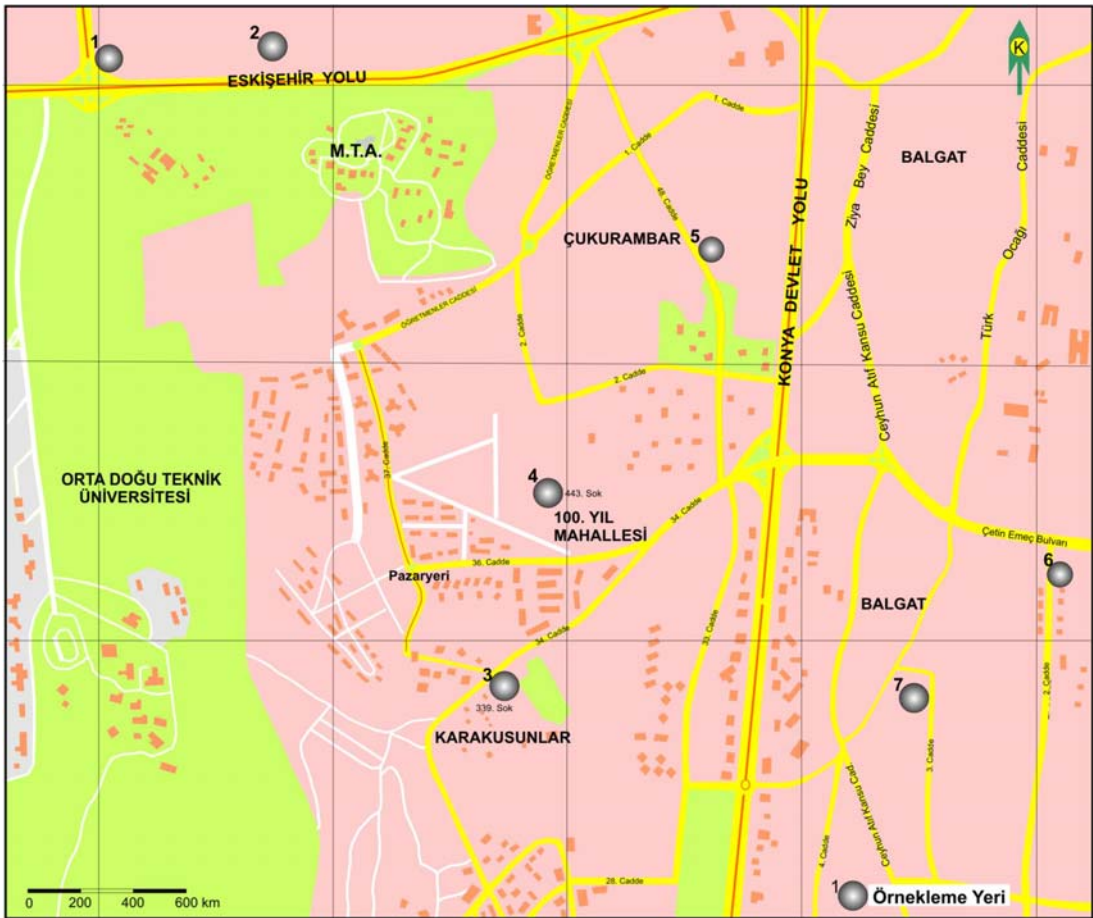
Mevsime bağlı olarak, zemin profilindeki su içeriğinin değiştiği ve şişmenin etkin olduğu seviyenin üstündeki kısım “aktif zon” olarak tanımlanmaktadır (Basma, 1991). Ergüler (2001), aynı bölgede yaptığı çalışmada Ankara kilinde aktif zonun derinliğinin 1-2.4 m arasında değiştiğini belirlemiştir. Buna göre, örneklemeye sırasında 2 m’den daha derin yerlerden (inşaat kazıları) örnek alınmamasına özen gösterilmiştir. Örneklemeye alanından Şekil 4.3’de gösterilen 7 yerden klasik odometre, ince çeperli odometre, konsolidasyon deneyleri ve incelenecek olan killi zeminin fiziksel ve indeks parametrelerinin belirlenmesi amacıyla örselenmemiş ve örselenmiş örnekler alınmıştır. Klasik odometre deneyleri için yatay (yanal) ve düşey yönde olmak üzere 52.5 mm çapında ve 21 mm yüksekliğindeki silindirik kesici metal kalıplar kullanılarak toplam 14 adet yönlü örnek alınmıştır (Şekil 4.4). İnce çeperli odometre deneyleri için ise, her yerden üçer adet olmak üzere, 57.0 mm çapında ve 31 mm yüksekliğindeki silindirik metal kalıplarla toplam 21 adet örnek derlenmiştir. Bunun yanı sıra, Ankara kilinde ön yükleme basıncının belirlenmesi amacıyla 7 adet örselenmemiş ve sıkıştırılmış örneklerin düşey yöndeki şişme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla 7 adet örselenmiş örnek daha alınmıştır.



Şekil 4.1. İnceleme alanındaki gecekondü duvarlarında zemindeki şişmeye (kabarmaya) bağılı olarak gelişmiş çatlaklar (6 no.lu örnekleme yeri, Öveçler 2. Cadde).



Şekil 4.2. Örnekleme alanındaki bir bahçe duvarında yanıl yöndeki şişmeye bağlı olarak gelişen kavislenme (3 no.lu örnekleme yeri, Yüzüncüyıl Mahallesi).

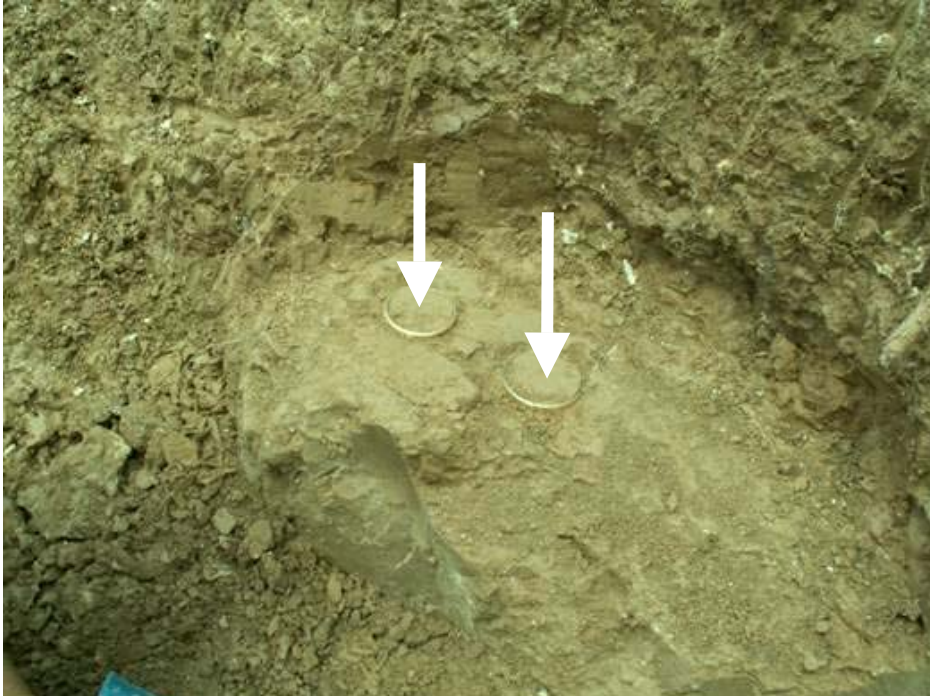


Şekil 4.3. Örnekleme yerlerini gösteren harita.

(a)



(b)



Şekil 4.4. Şişme basınçlarını belirlemek amacıyla (a) yatay ve (b) düşey yönlerde alınan örselenmemiş örnekler.

## 5. LABORATUVAR DENEYLERİ

Ankara kilinin şişme parametrelerinin (şişme yüzdesi ve basıncı) yatay ve düşey yönlerde belirlenmesi amacıyla, derlenen örnekler üzerinde klasik odometre deneyleri yapılmıştır. Yine her iki yönde şişme basıncını eş zamanlı ölçebilmek amacıyla ince çeperli odometre deney düzeneği kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, kilin bazı fiziksel özelliklerinin, indeks parametrelerinin ve mineralojik bileşiminin belirlenmesi amacıyla indeks deneyler ile X-ışınları kırınım analizleri de gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler ve analizler aşağıda gruplar halinde verilmiş olup, bu deney ve analizler ile ilgili başlıca hususlar ve deney sonuçları alt bölümlerde sunulmuştur.

### 1. Mineralojik analizler:

(a) X-ışınları kırınım analizleri (tüm kayaç ve kil fraksiyonu çözümlenmeleri)

### 2. İndeks deneyler:

(a) Su içeriği tayinleri

(b) Birim hacim ağırlık tayinleri

(c) Özgül ağırlık tayinleri

(d) Tane boyu dağılımı çözümlenmeleri

(e) Kıvam (Atterberg) limitleri tayinleri

### 3. Şişme parametrelerini belirlemeye yönelik deneyler:

(a) Odometre aleti kullanılarak yapılan şişme deneyleri

(b) İnce çeperli odometre halkası kullanılarak yapılan şişme deneyleri

### 4. Konsolidasyon deneyleri

## 5.1. Mineralojik Analizler

Şişme davranışı gösteren zeminlerin içerdiği kil minerallerinin türü ve miktarı şişmeyi etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Terzaghi and Peck (1967), killi



zeminlerde montmorillonit gibi şişen kil minerallerinin yüzdesinin artmasına koşut olarak, şişme potansiyelinin ve plastisitenin arttığını belirtmişlerdir. Şişme davranışını inceleyen bir çok araştırmacı (örneğin; Abduljawad, 1993; Çokça and Birand, 1993; Bell ve Maud, 1995; Al-Rawas, 1999; Ergüler 2001), şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde kil minerali türünü ve yarı nicel yüzdelerini dikkate almışlardır.

Şişme deneyleri yapılmadan önce, örneklerin şişme potansiyelleri hakkında fikir edinebilmek, ayrıca araştırmının sonraki aşamalarında elektron mikroskobu incelemelerinde ve yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametrelerinin değerlendirilmesinde gerek duyulabileceği düşünülerek, örnekleme alanından derlenen 7 adet Ankara kili örneği üzerinde X-ışınları kırınımı analizleri gerçekleştirilmiştir. X-ışınları kırınımı analizleri, tüm kayaç (TK) ve kil fraksiyonu (KB) olmak üzere iki ayrı aşamada yürütülmüştür.

Tüm kayaç analizleri sonucunda elde edilen piklerin temsil ettiği mineralleri belirlemek için ASTM (1972)'nin kartotekslerinden yararlanılmıştır. Örneklerle ait difraktogramların değerlendirilmesi sonucunda saptanan minerallerin yarı nicel yüzdeleri ise, Gündoğdu (1982) tarafından önerilen yöntemle göre hesaplanmıştır. Tüm kayaç analizleri sonuçlarına göre, örneklerin ağırlıklı olarak kil mineralleri olmak üzere, kuvars, kalsit ve feldispat gibi mineralleri içerdiği saptanmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Kil bileşeni çözümlenmeleri; ASTM (1972)'nin önerdiği yöntemle göre, normal (N), etilen glikollü (G) ve fırınlanmış (F) olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Kil bileşeni yüzdesini oluşturan kil minerali türleri ve yüzdeleri, N, G ve F kayıtları karşılaştırılarak belirlenmiştir. Örneklerde en fazla bulunan kil minerali türünün montmorillonit olduğu saptanmış olup, illit, kaolinit ve kloritin de önemli miktarlarda buldukları belirlenmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Ankara kiline ait 7 örnek üzerinde yapılan X-ışınları kırınımı (XRD) analizlerinin sonuçları.

Lokasyon No.	Toplam Kayaç (TK) Analizi				Kil Bileşeni (KB) Analizi			
	Kil (%)	Kalsit (%)	Kuvars (%)	Feldispat (%)	Simektit (%)	İllit (%)	Kaolinit (%)	Klorit (%)
1	79	7	6	8	40.1	22.9	14.0	23.0
2	74	11	6	9	17.6	37.6	13.0	31.8
3	82	6	7	5	36.7	31.6	5.1	26.6
4	83	8	5	4	73.4	12.0	9.1	5.5
5	81	6	6	7	53.8	24.6	1.5	20.1
6	83	5	7	5	58.7	18.5	2.2	20.6
7	84	3	7	6	61.7	16.0	3.8	18.5

## 5.2. Ankara Kilinin Fiziksel ve İndeks Özellikleri

### 5.2.1. Su içeriği tayinleri

Killi zeminlerin şişme davranışı zeminin su içeriği ile yakından ilişkilidir. Şişme parametrelerinin görgül eşitliklerle dolaylı yoldan tahminine yönelik çalışmalar ile şişme deneyleri uygulanarak doğrudan belirlendiği birçok çalışmada araştırmacılar (El-Sohby and Rabba, 1981; Furtun, 1989; Edil and Analazy, 1992; Ergüler, 2001; Sapaz, 2004) su içeriğinin etkisini dikkate almışlardır.

El-Sohby and Rabba (1981), başlangıç su içeriğinin şişme basıncı ve yüzdesine etkisini incelemek amacıyla aynı birim hacim ağırlık ve farklı su içeriklerindeki örneklerin şişme parametrelerini saptamışlardır. Araştırmacılar, başlangıç su içeriğinin artmasıyla birlikte şişme basıncının azaldığını ve bu ilişkinin doğrusal olmadığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, su içeriğinin büzülme limitini aşması durumunda şişme basıncının daha hızlı bir şekilde azaldığını saptamışlardır. Yine, su içeriğindeki değişimin şişme parametrelerine etkisini inceleyen Edil and Analazy (1992), buna benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

Ergüler (2001), doğal su içeriği değerleri büzülme limitinin üzerinde olan ve %14 ile %44 arasında değişen örnekler üzerinde odometre deneyleri yapmış ve su içeriği yüksek örneklerde herhangi bir şişme basıncının kaydedilemediğini belirterek, en büyük şişme basıncının belirlenebilmesi amacıyla örneklerin büzülme limiti değerlerinden daha düşük su içeriklerinde deneye tabi tutulmaları gerektiğini belirtmiştir.

Şişme parametrelerinin doğal su içeriği ile ilişkili olması nedeniyle ve inceleme alanından alınan örselenmiş 7 örneğin doğal su içerikleri ASTM (2000)'ye göre tayin edilmiş ve deney sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Örneklerin Çizelge 5.2'de verilen su içerikleri doğal su içerikleri olup, örneklemeler Haziran 2006'da yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, doğal su içeriğinin Haziran 2006 tarihine göre %25 ile %33 arasında değişim gösterdiği saptanmıştır. Tüm örneklere ait doğal su içerikleriyle örneklerin büzülme limitleri karşılaştırıldığında, su içeriklerinin büzülme limitini aştığı ve bu iki parametre arasındaki farkın %22'ye kadar ulaştığı görülmektedir. Yukarıda değinilen hususlar çerçevesinde, alınan örneklerin arazi koşullarında (alındıkları dönemdeki su içeriklerinde) bir miktar şişmeye maruz kaldıkları söylenebilir. En büyük şişme basıncını ve yüzdesini belirleyebilmek amacıyla örnekler belirli bir su içeriğine kadar kurutulduktan sonra şişme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Örnekleri kurutma işlemi, şişme deneyleriyle ilgili bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

### **5.2.2. Birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık tayinleri**

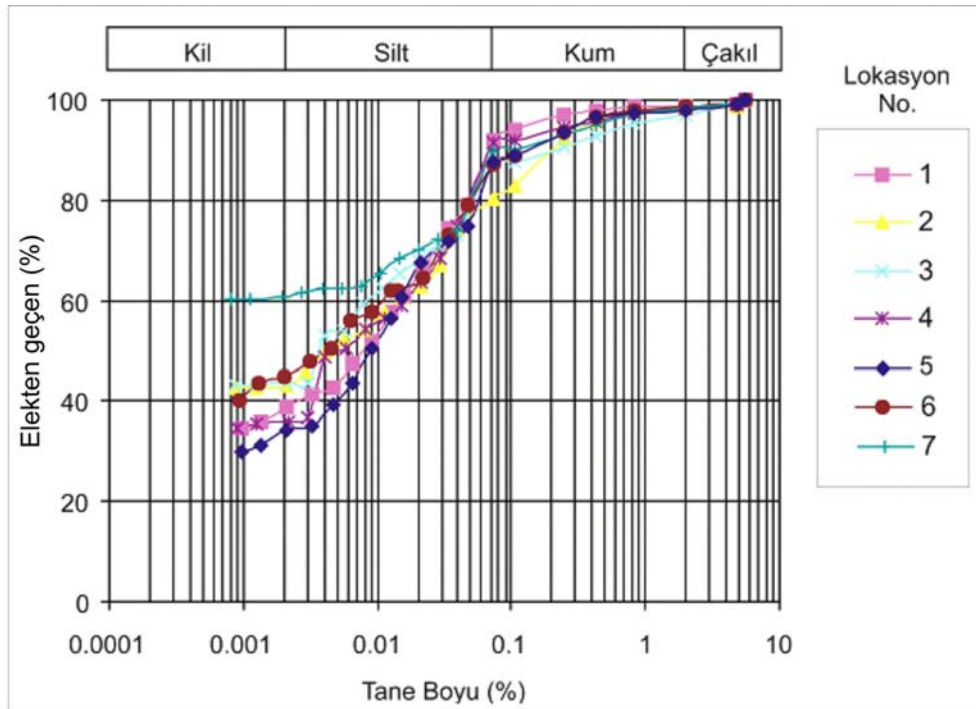
Şişme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla alınan örselenmemiş tüm örneklerin nemli ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Seçilen her yerden 5'er adet olmak üzere toplam 35 adet örselenmemiş örnek alınmış olup, bu örneklerin ortalama birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Şişme deneylerinin sunulduğu bölümlerde nemli ve kuru birim hacim ağırlık değerleri her örnek için ayrıca verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, Ankara kilinin doğal birim hacim ağırlığının  $16.18 \text{ kN/m}^3$  ile  $18.36 \text{ kN/m}^3$ , kuru birim hacim ağırlığının ise  $12.31 \text{ kN/m}^3$  ile  $13.99 \text{ kN/m}^3$  arasında değişim gösterdiği belirlenmiş olup, ortalama değerler birbirlerine oldukça yakındır.

Tane boyu dağılımı çözümlerinin hidrometre analizleri kısmında ve kuru birim hacim ağırlık hesaplamalarında kullanılmak üzere, ASTM (2000)'ye göre tane özgül ağırlığı tayinleri de gerçekleştirilmiştir. Örneklerin  $G_s$  değerleri 2.55 ile 2.73 arasında değişim göstermektedir (Çizelge 5.2).

### 5.2.3. Tane boyu dağılımı çözümlerleri

Şişme potansiyeline sahip killi zeminlerin şişme parametrelerini araştıran birçok araştırmacı (örneğin; El-Sohby and Rabba, 1981; Al-Homoud and Al-Suleiman, 1997; Basma et al., 1995; Abduljawad et al., 2000), kil tane boyutundaki malzeme miktarının şişmeyi etkilediğini belirterek, bu parametrenin artmasına koşut olarak şişme basıncı ve yüzdesinin arttığını saptamışlardır.

Örneklerin tane boyu dağılımı çözümlerleri ASTM (2000)'ye göre yapılmış olup, kuru iri elek, kuru ince elek olmak ve hidrometre üzere üç farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı eğrileri Şekil 5.1'de, tüm örneklere ait çakıl, kum, silt ve kil yüzdeleri ise Çizelge 5.2'de sunulmuştur. Buna göre, incelenen örneklerde silt ve kil tane boyutundaki malzeme egemendir.



Şekil 5.1. İncelenen örneklerin tane boyu dağılımı eğrileri.

Çizelge 5.2. Ankara kilinden alınan örneklerin fiziksel ve indeks özellikleri.

*Lokasyon No.	$w_n$ (%)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$G_s$	Aktivite	Tane Boyu (%)				Kıvam Limitleri (%)				Zemin Sınıfı
						Çakıl	Kum	Silt	Kil	LL	PL	SL	PI	
1	30	17.65	13.55	2.67	0.79	3	8	50	39	75	31	15	44	CH
2	26	17.05	13.35	2.73	0.65	2	18	37	43	88	28	12	60	CH
3	29	17.29	13.35	2.61	0.86	3	10	44	43	91	37	14	54	CH
4	33	17.20	12.93	2.55	1.03	6	7	51	36	112	37	15	75	CH
5	31	17.02	12.97	2.62	1.00	2	11	53	34	76	34	9	42	CH
6	25	17.05	13.64	2.58	0.73	2	12	41	45	80	33	10	47	CH
7	33	17.08	12.83	2.61	0.63	2	9	29	60	92	38	12	54	CH

$w_n$  : Doğal su içeriği (Haziran 2006'da alınan örneklere ait değerler) ;  $\gamma_n$  : Doğal birim hacim ağırlık ;  $\gamma_k$  : Kuru birim hacim ağırlık ;  $G_s$  : Özgül ağırlık ; LL : Likit limit ; PL : Plastik limit ; SL : Büzülme limiti ; PI : Plastisite indeksi \* Bakınız Şekil 4.3

#### **5.2.4. Kıvam (Atterberg) limitleri ve aktivite**

Kıvam limitleri, killi zeminlerin şişme potansiyelleri hakkında değerlendirme yapabilmek amacıyla yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Kil içeren toprak zeminlerin şişme davranışını inceleyen ve değerlendiren birçok araştırmacı (örneğin; Abduljawad, 1993; Bell and Maud, 1995; Al-Rawas, 1999; Kollaros and Athanasopoulou, 1997; Ergüler, 2001) likit limit, plastik limit ve büzülme limiti ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri arasında önemli bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir.

7 adet örselenmemiş örnek üzerinde ASTM (2000)'ye göre kıvamlılık (likit limit, plastik limit, büzülme limiti) limitleri tayin edilmiş ve deney sonuçları Çizelge 5.2'de verilmiştir. Means and Parcher (1963; Ulusay, 1975'den), killi toprak zeminlerin likit limit değerlerinin %50'ye yakın veya daha büyük olması durumunda, bu zeminin montmorillonit türü kil minerali içereceğini belirtmişlerdir. Tüm örneklerin likit limit değerleri %50'nin üzerinde olup, montmorillonitin varlığına işaret etmekte ve X-ışınları kırınımı analizleri sonuçlarını desteklemektedir (Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2).

Örnekleri aktivite değerlerine göre değerlendirmek amacıyla Skempton (1953) tarafından önerilen aktivite çizelgesi kullanılmıştır (Çizelge 5.3). Örneklerin Çizelge 5.2'de verilen aktivite değerleri Çizelge 5.3 ile karşılaştırıldığında; üç örnek aktif kil grubu sınırına yakın olmakla birlikte aktif olmayan kil, diğer dört örnek ise normal aktif killer grubuna girmektedir.

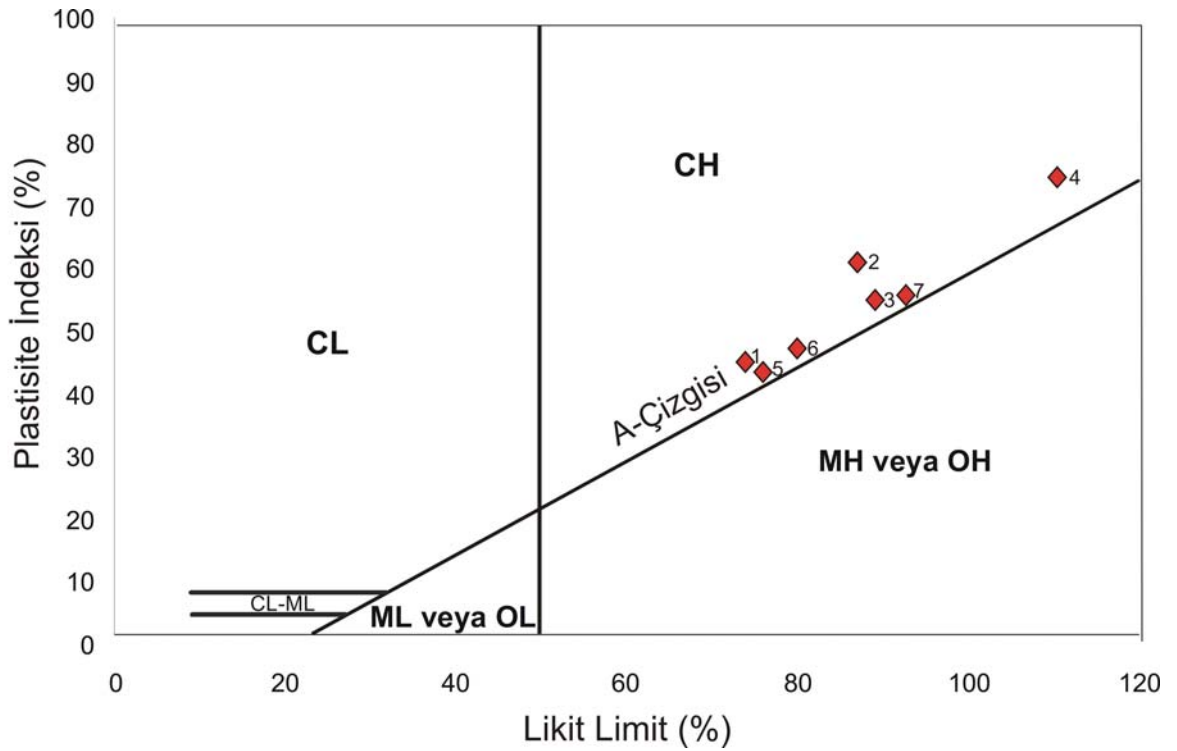
#### **5.2.5. Zemin sınıflaması**

Örneklerin Birleştirilmiş Toprak Zemin Sınıflaması Sistemi'ne göre sınıflandırılması amacıyla US Interior Bureau of Reclamation (1974) tarafından önerilmiş olan sınıflama ölçütleri kullanılmıştır. İncelenen tüm örneklerin içerdiği ince tane yüzdesinin %50'den fazla olması nedeniyle, örnekler US Interior Bureau of Reclamation (1974) tarafından önerilen plastisite abağı kullanılarak sınıflandırılmış ve sonuçlar Çizelge 5.2'de, örneklerin plastisite abağı üzerindeki dağılımları ise

Şekil 5.2'de verilmiş olup, tüm örnekler yüksek plastisiteli şişen killer olarak tanımlanan CH zemin grubunda yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Killerin aktivitelerine göre sınıflandırılması (Skempton, 1953).

Aktiviteye göre kil tanımlaması	Aktivite
Aktif olmayan kil	< 0.75
Normal aktif kil	0.75 - 1.25
Aktif kil	> 1.25



Şekil 5.2. Ankara kili örneklerinin plastisite abağındaki dağılımı (Numaralar örneklerin lokasyonunu ifade etmektedir).

### 5.3. Şişme Deneyleri

Bu alt bölümde, şişme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan iki farklı deney yöntemi ve bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

#### 5.3.1. Klasik odometre deneyleri

Şişme potansiyeline sahip killi zeminlerde örselenmenin şişmeye etkisini araştıran Shenglin and Yanjun (1997), örselenip tekrar sıkıştırılan örneklerin şişme basınçlarının, örselenmemiş örneklerin şişme basınçlarından çok daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar, örselenmiş ve örselenmemiş örneklerin elektron mikroskop (SEM) görüntülerini karşılaştırmışlar ve kil tanelerinin örselenme sonucunda yönelimlerinin düzensiz bir hale geldiğini belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak araştırmacılar, kil tanelerinin yönelimlerinin değişmesinin zeminin şişme parametreleri üzerinde etkili olduğunu savunmuşlardır.

Parcher and Liu (1965), kil malzemesinin depolandıktan sonra buldukları ortamın koşullarından etkilenip tanelerin boyut ve yönelimlerinin değiştiğini belirterek, örneklerin sıkıştırılması için kullanılan kompaksiyon yönteminin ve uygulanan kompaksiyon enerjisinin kilin yapısını etkilediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, kilin yapısının bozulmasıyla birlikte yanal yöndeki şişmenin düşey yöndeki şişmeye oranının da değişebileceğini ifade etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında, zemindeki kil tanelerinin yönelimlerinin şişme davranışını ve şişme anizotropisini etkileyeceği düşünülerek, yanal ve düşey yöndeki şişme basıncı ve yüzdesi değerlerinin belirlenmesi ve şişme anizotropisinin araştırılması amacıyla yapılan şişme deneylerinde örselenmemiş örnekler kullanılmıştır. Şişme anizotropisinin değerlendirilmesi amacıyla örselenmemiş yönlü örneklerle yapılan klasik odometre deneylerinin yanı sıra, ön yükleme basıncı ile düşey yöndeki şişme basıncı arasındaki ilişkilerin araştırılması amacıyla örselenerek sıkıştırılmış örnekler de klasik odometre deneylerine tabi tutulmuşlardır.



### 5.3.1.1. Örselenmemiş yönlü örneklerle yapılan klasik odometre deneyleri

Killi zeminler, hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde nem içeriklerini kaybederek büzölmeye maruz kalırlar ve buna bağlı olarak büzölen killi zemin sertleşir. Zeminin kuru olduğu dönemde kesici metal kalıplarla örselenmemiş örnek alımında güçlükler yaşanacağı düşünölerek, örnekleme çalışması için yağışlı dönem beklenmiştir. Ergöler (2001), Ankara kilinden yağışlı dönemde aldığı örselenmemiş örneklerin çoğunun en büyük şişme basıncı ve yüzdesini belirleyememiştir. Araştırmacı, yağışlı dönemde alınan örneklerin su içeriklerinin fazla olması nedeniyle, alındıkları dönemde zaten önemli düzeyde şişmiş durumda olduklarını belirtmiştir. Bu çalışmada böyle bir sorunla karşılaşılmaması için, odometre deney hücrelerinin boyutlarından daha büyük boyutta paslanmaz metalden kesici kalıplar yaptırılmış ve bu kalıplarla alınan örnekler belirli bir su içeriğine kadar kurutulduktan sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Nemli dönemde ilk aşamada silindir şeklinde kesici metal kalıplarla üç adet örselenmemiş örnek deneme amacıyla alınmış ve bu örnekler %13 su içeriğine kadar kurutulmuş ve büzölme sonucu boyutları kaydedilmiştir. Boydaki kısalma ve çaptaki azalma değerleri esas alınarak, laboratuvarında kullanılacak olan odometre hücresinden daha büyük boyutta kesici metal kalıplar yaptırılmıştır. Kurutma işlemi, ince çeperli odometre deneyleri için de aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.

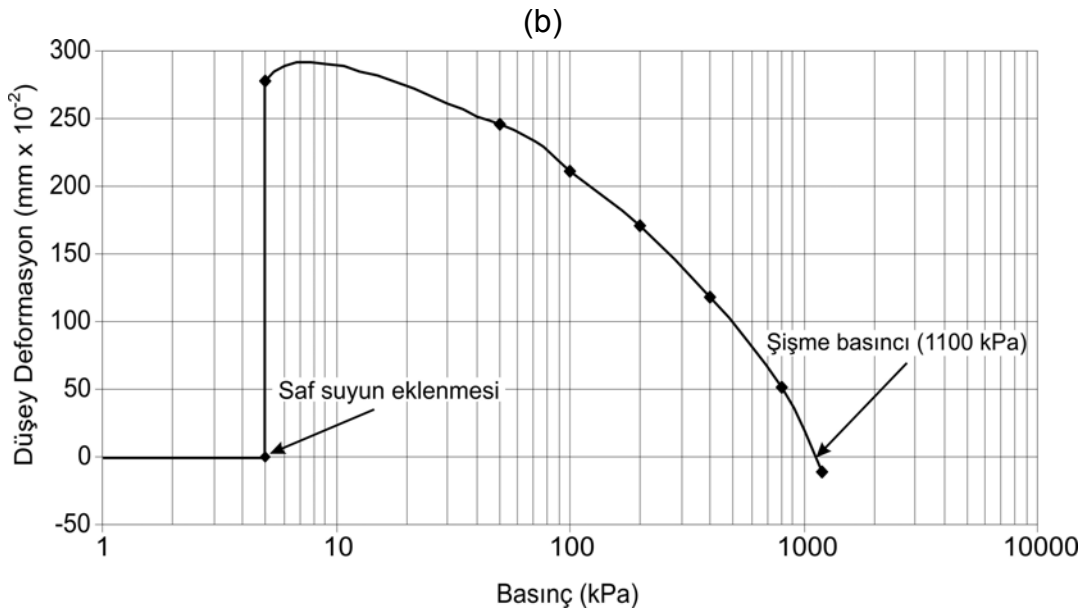
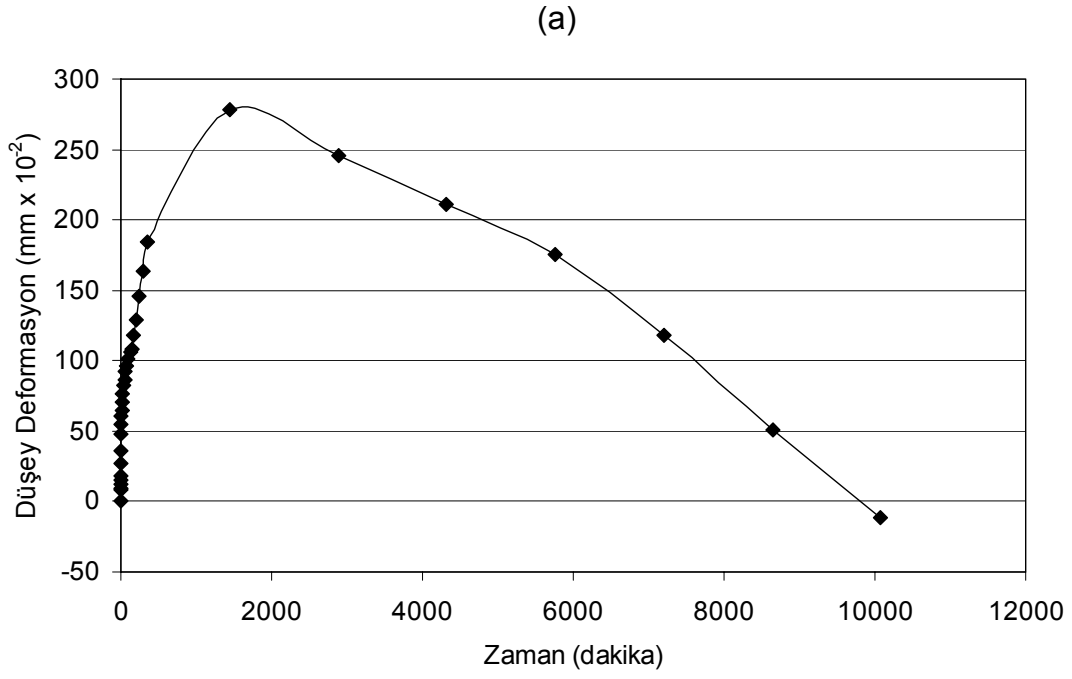
Örnekleme alanından alınan 14 adet örselenmemiş yönlü örneğin doğal su içerikleri %25 ile %33 (bkz. Çizelge 5.2) arasında değişim gösterdiği için, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, örnekler deneye tabi tutulmadan önce başlangıç su içeriği değerleri büzölme limitine daha yakın değerler olan %12 ile %14 arasında değişen aralıklarda kalacak şekilde nem odasında kurumaya bırakılmıştır. Nem odasında tutulan örnekler deney hücresine sığacak boyuta geldiğinde ve su içeriği istenilen değere ulaştığı anda deney aşamasına geçilmiştir. Nem odasında bekletme işlemi sonucunda, her örnekte aynı miktarda hacim küçölmesi gerçekleşmemiş ve bazı örneklerin boyutlarının aktarılabilecekleri deney hücresinden az miktarda büyük ya da küçük olduğu durumlarla karşılaşılmıştır. Büyük boyutlu örnekler dikkatli bir şekilde traşlanarak deney hücresine aktarılmış, küçük boyutlu örnekler ise deney hücresine yerleştirildikten sonra su almayan yağlı kağıtlar kullanılarak hücre ile örnek arasında kalan boşluklar sıkıca doldurulmuştur.

Klasik odometre deneyleri, ASTM (2000)'nin önerdiği B yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Deneylere tabi tutulan örselenmemiş örnekler, 5 kPa'lık sabit basınç altında su verilerek serbest şişmeye bırakılmış ve şişme sona erdiğinde geri yükleme aşamasına geçilmiştir. Serbest şişme ve geri yükleme aşamalarında kaydedilen düşey deformasyon ve yüklerin değişim grafikleri hazırlanarak şişme basınçları belirlenmiştir. Şişme basıncı tayini grafiklerinden 4 no.lu lokasyondan düşey yönde alınan örneğe ait “düşey yöndeki deformasyon-zaman” ve “düşey yöndeki deformasyon-basınç” ve aynı yerden yanal yönde alınan örneğe ait “düşey yöndeki deformasyon-zaman” ve “düşey yöndeki deformasyon-basınç” grafikleri Şekil 5.3 ve 5.4'de, tüm örnekler için “düşey yöndeki deformasyon-basınç” grafikleri ise Ek 1'de verilmiştir. Klasik odometre deneylerinden elde edilen düşey ve yanal yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri sırasıyla, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'de örneklerin başlangıç su içeriği, nemli ve kuru birim hacim ağırlık değerleri ile birlikte sunulmuştur.

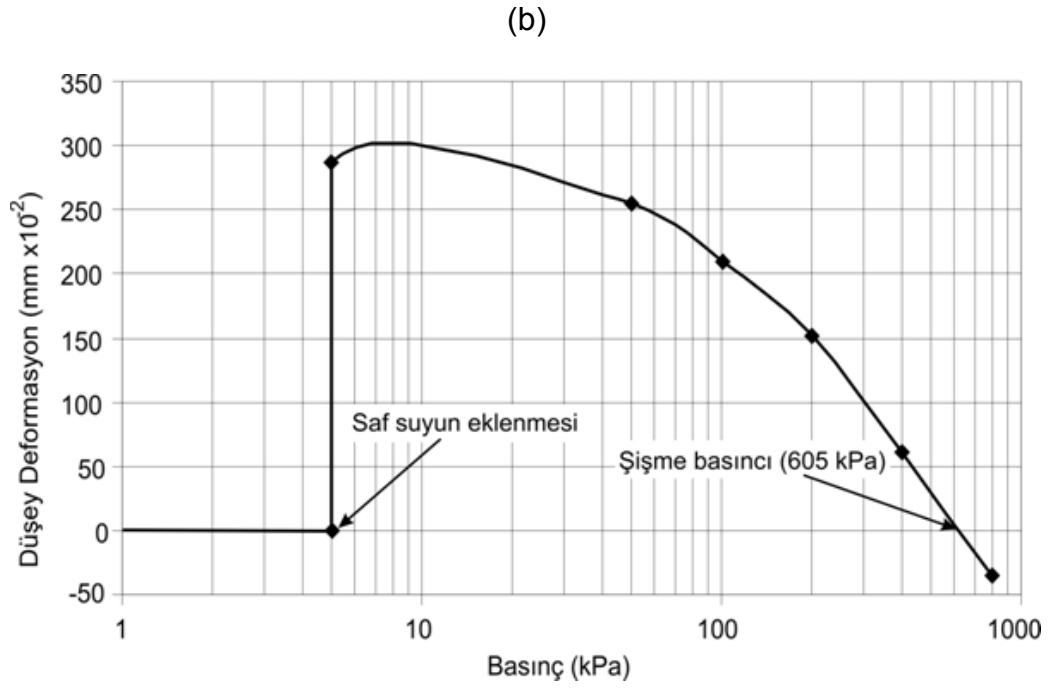
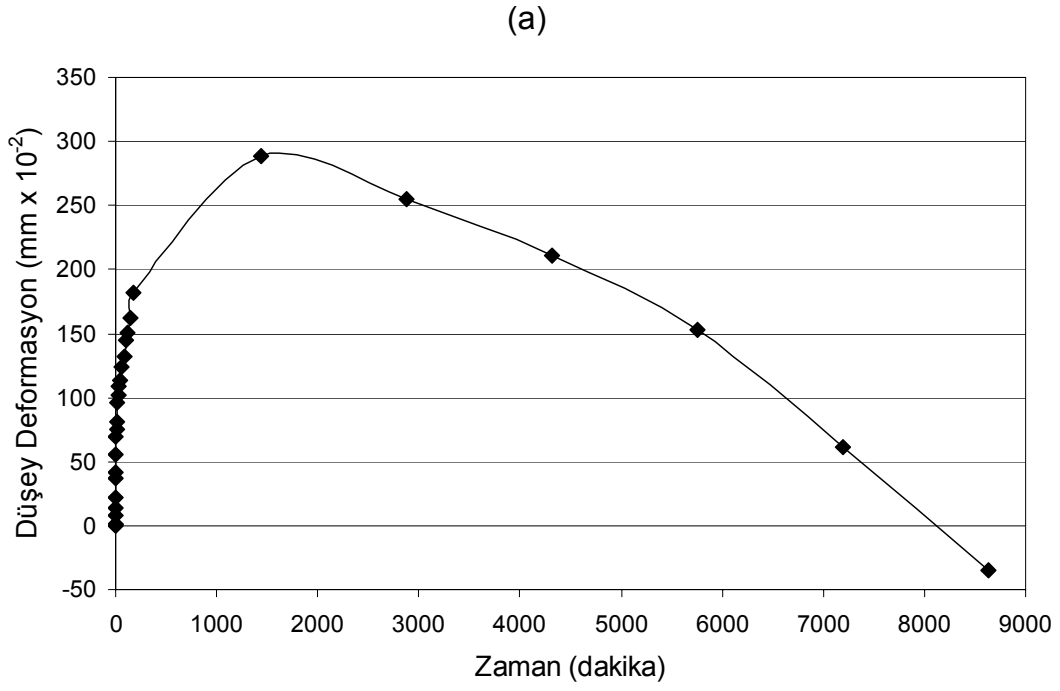
#### **5.3.1.2. Sıkıştırılmış örneklerle yapılan klasik odometre deneyleri**

Ön yükleme basıncı ile örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basıncı arasındaki ilişkilerin araştırılması sırasında değerlerin normalizasyonunda kullanılmak üzere örselenmiş örnekler sıkıştırılarak klasik odometre deneylerine tabi tutulmuşlardır. Deneylerin sonuçları ve örnekler için uygulanan sıkıştırma yöntemi ile ilgili bilgiler aşağıda sunulmuş olup, deney sonuçlarının ön yükleme basıncı ile birlikte değerlendirilmesi ayrıntılı olarak 6. Bölüm'de verilmiştir.

Her yerden birer adet olmak üzere toplam 7 adet örselenmiş örnek, ASTM D 698-91 (2000)'nin örneklerin laboratuvarında sıkıştırılması için önerdiği A yöntemine göre hazırlanmışlardır. Düşey yönde alınan ve klasik odometre deneylerine tabi tutulan örselenmemiş örneklerin su içeriklerine (bkz. Çizelge 5.4) eşit su içeriklerinde sıkıştırılan örneklerin birim hacim ağırlıkları belirlenerek, ASTM (2000) B yöntemine göre klasik odometre deneylerine tabi tutulmuşlardır. Sıkıştırılmış örneklerin düşey yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri, su içerikleri ve birim hacim ağırlıkları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Tüm örnekler için “düşey yöndeki deformasyon-basınç” grafikleri ise Ek 2'de verilmiştir.



Ŗekil 5.3. 4 no.lu lokasyondan düŖey yönde alınan örneğe ait (a) düŖey deformasyon-zaman ve (b) düŖey deformasyon-basıncı grafikleri.



Şekil 5.4. 4 no.lu lokasyondan yanal yönde alınan örneğe ait (a) düşey deformasyon-zaman ve (b) düşey deformasyon-basınç grafikleri.

Çizelge 5.4. Düşey yönde alınan örneklerin klasik odometre deney sonuçları.

Klasik Odometre Deneyleri					
Lokasyon No.	$w_b$ (%)	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_k$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Düşey yönde şişme basıncı (kPa)	Düşey yönde şişme yüzdesi (%)
1	13	17.25	13.20	490	8.0
2	12	16.97	13.54	300	9.2
3	13	16.93	12.97	1010	19.5
4	13	18.36	13.74	1100	14.0
5	12	17.36	13.24	1080	21.0
6	13	17.30	13.81	705	17.0
7	14	17.62	13.20	1070	23.1

$w_b$ : Başlangıç su içeriği;  $\gamma_d$ : Doğal birim hacim ağırlık;  $\gamma_k$ : Kuru birim hacim ağırlık

Çizelge 5.5. Yanal yönde alınan örneklerin klasik odometre deney sonuçları.

Klasik Odometre Deneyleri					
Lokasyon No.	$w_b$ (%)	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_k$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Yanal yönde şişme basıncı (kPa)	Yanal yönde şişme yüzdesi (%)
1	12	17.51	13.43	540	8.5
2	13	16.87	13.39	160	9.2
3	13	16.75	12.90	700	15.9
4	13	16.80	12.76	605	11.4
5	12	17.00	12.95	480	7.0
6	14	16.80	13.46	430	15.7
7	13	16.41	12.31	440	11.5

$w_b$ : Başlangıç su içeriği;  $\gamma_d$ : Doğal birim hacim ağırlık;  $\gamma_k$ : Kuru birim hacim ağırlık

Çizelge 5.6. Sıkıştırılmış örneklerin klasik odometre deney sonuçları.

Klasik Odometre Deneyleri				
Lokasyon No.	$w_b$ (%)	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Düşey yönde şişme basıncı (kPa)	Düşey yönde şişme yüzdesi (%)
1	13	16.97	570	10.5
2	12	16.27	310	14.6
3	13	16.99	470	15.5
4	13	15.86	320	15.6
5	12	16.16	330	18.1
6	13	15.66	450	18.0
7	14	16.81	640	26.7

$w_b$ : Başlangıç su içeriği;  $\gamma_d$ : Birim hacim ağırlık

### **5.3.2. İnce çeperli odometre halkası kullanılarak yapılan şişme deneyleri**

Şişme potansiyeline sahip killi zeminlerde yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametrelerinin belirlenmesi ve şişme anizotropisinin araştırılması amacıyla literatürde bazı deney düzenekleri ve deney yöntemleri önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu çalışmada, şişme anizotropisinin araştırılması amacıyla geliştirilmiş deney düzeneklerinden biri olan “ince çeperli odometre halkası” kullanılmıştır.

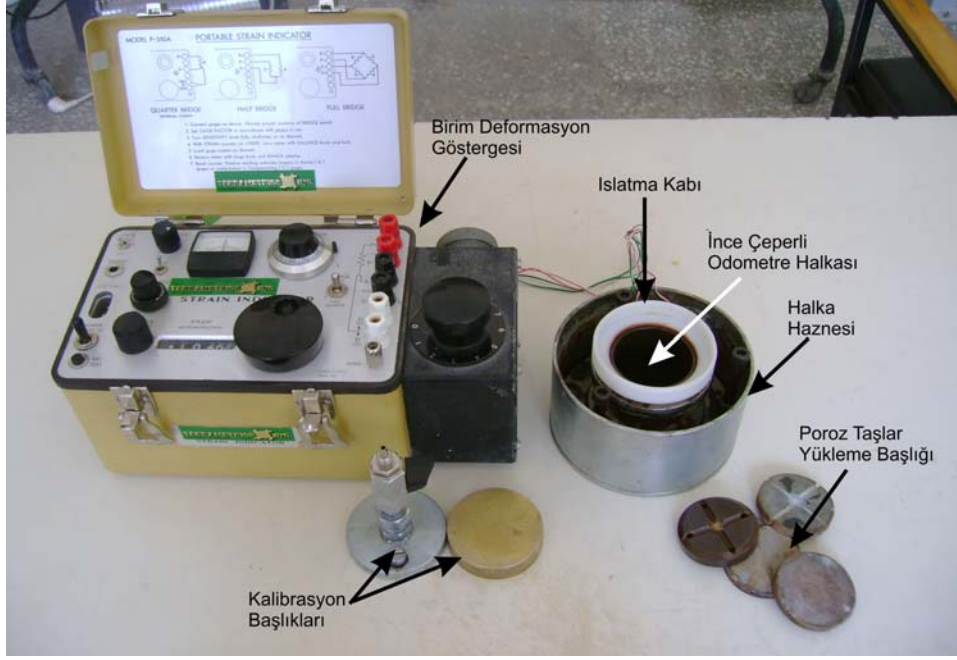
Ertekin (1991), yanal yöndeki şişme basıncının zamana bağlı değişimini ve en büyük değerini belirlemek için, şişmeye bağlı olarak gelişen yanal yöndeki hareketin tamamiyle sınırlandırılması gerektiğini belirtmiştir. Deney örneğinin yanal yönde hareketinin engellenmesi amacıyla çelik bir membranın kullanılması ve bu membranın deformasyon kontrollü olması durumunda yanal yöndeki şişme basınçlarının belirlenebileceğini söyleyen Ertekin (1991), Ofer (1980) tarafından önerilen düzeneğe benzer bir düzenek geliştirmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılmak üzere, Ertekin (1991) tarafından tasarlanan ince çeperli odometre halkası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği Laboratuvarı'ndan alınarak bir benzeri yaptırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan odometre halkası Hacettepe Üniversitesi, Zemin Mekaniği Laboratuvarı'ndaki odometre deney düzeneğine sığacak şekilde tasarlanmıştır. Halka, Ertekin (1991) tarafından tasarlanan halkadan biraz daha küçük boyutlara sahip olup, bunun dışındaki tüm donanım ve malzemeler aynı özelliktedir.

#### **5.3.2.1. İnce çeperli odometre deney düzeneğinin özellikleri**

İnce çeperli odometre deney düzeneği, aşağıda belirtilen kısımlardan oluşmaktadır (Şekil 5.5).

- 1) İnce çeperli halka (gövde)
- 2) Kalibrasyon sırasında kullanılan alt ve üst kapaklar
- 3) Halkanın yerleştirildiği hazne ve ıslatma kabı
- 4) Yükleme başlığı, poroz taşlar
- 5) Birim deformasyon ölçerler
- 6) Birim deformasyon göstergesi (strain indicator).

Halkanın gövdesi, kodu Ç 4140 olan yüksek kalitedeki bir çelikten oluşmakta olup, iç çapı 54.5 mm, çeperinin kalınlığı 0.35 mm ve ince kısmının yüksekliği 30 mm'dir. Halkanın ince kısmının kalınlığının homojen olabilmesi için elektronik torna tezgahı (CNC aleti) kullanılmıştır. Halkanın gövdesinin ıslatma haznesine tam olarak yerleşmesini ve deney sırasında hareket etmesini engellemek amacıyla, taban kısmında 120°'lik açılarla 3 adet vida deliği bulunmaktadır.



Şekil 5.5. İnce çeperli odometre halkası ve aksesuarları.

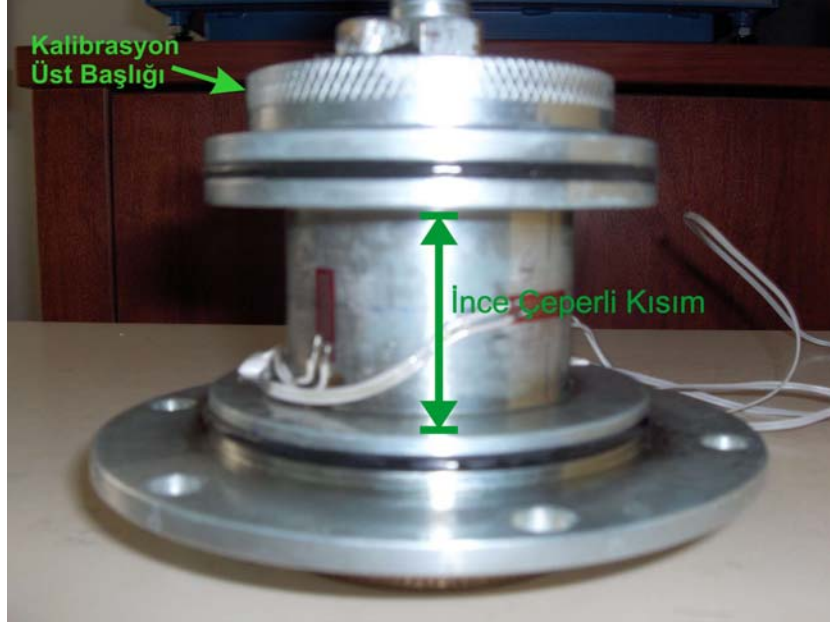
Deney sırasında ince çeperli odometre halkası ıslatma haznesinin içine yerleştirildikten sonra sıkıca vidalanmaktadır. Şekil 5.6'da bu çalışmada kullanılan odometre halkasına ait bir görünüm, Şekil 5.7'de ise halkanın kesit görünümü boyutları ile birlikte verilmiştir.

Halkanın alt ve üst kısımları kalibrasyon başlıklarının takılabileceği şekilde tasarlanmış ve kalibrasyon sırasında su çıkışının olmaması için plastik contalar yerleştirilmiştir. Kalibrasyon yapılırken halkanın içine uygulanan su basıncının ve deney sırasında gelişen şişme basınçlarının odometre halkasında herhangi bir kalıcı deformasyon meydana getirme olasılığına karşı, halka gövdesi çeliğe su verme yöntemiyle sertleştirilmiştir. Basınçlardan etkilenmeyecek olan deney düzeneğinin diğer parçalarına sertleştirme işlemi uygulanmamıştır.

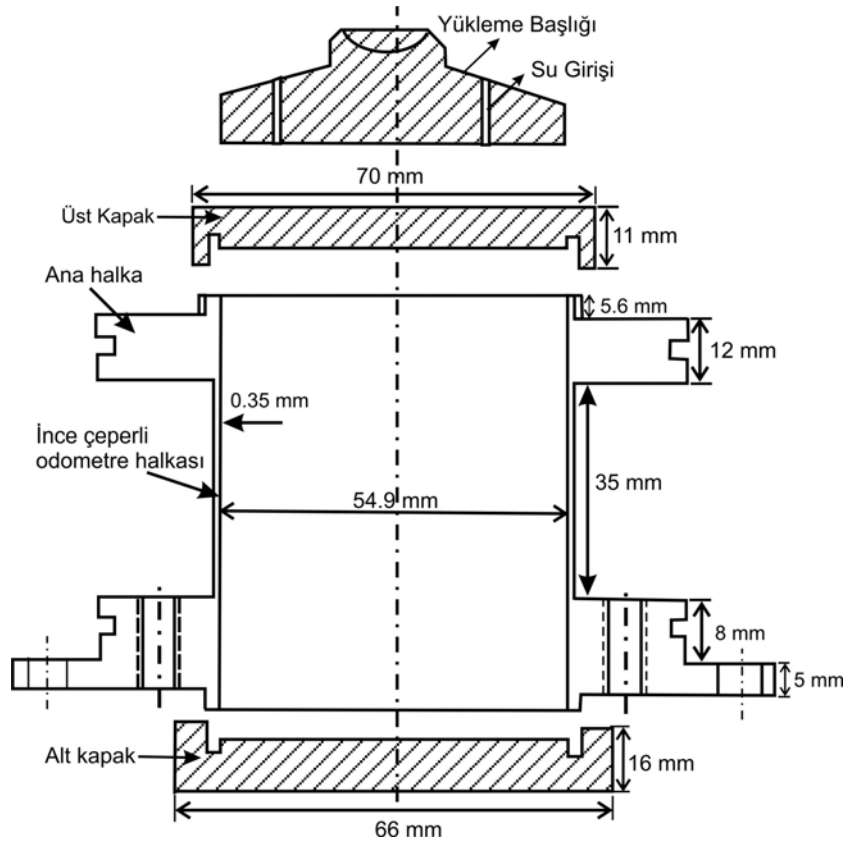
Odometre halkasının ince çeperli kısmına deney sırasında etkiyen şişme basınçları doğrudan ölçülemeyeceğinden, basınç nedeniyle gelişen birim deformasyonları belirlemek ve malzeme özelliklerinden yararlanarak oluşan birim deformasyon için gerekli olan basınçları belirlemek mümkündür. Şişme basınçlarının neden olduğu birim deformasyonları belirlemek amacıyla, Ertekin (1991)'in önerdiği şekilde, odometrenin ince kısmına birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerin kurulumu ve odometre aletinin üstüne yapıştırılması aşamaları Hacettepe Üniversitesi, Zemin Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. 4 adet 120 ohm'luk birim deformasyon ölçer ince çeperli odometre halkasının yüksekliğinin yarısına karşılık gelen ve aralarında  $90^0$  açı bulunan 4 noktaya yapıştırılmış ve bu amaçla  $10^6$  kez yükleme ve geri yükleme çevrimine kadar dayanabilen özelliğe sahip, "TML-FLA-10-11" tipi birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerin uzunluğu 10 mm, deformasyon limiti %3, geyç faktörü 2.11'dir. Yapıştırma işlemi amacıyla, birim deformasyon ölçer yapıştırıcısı olan "P2" kullanılmıştır.

Birim deformasyon ölçerler, Wheaston tam köprü çevrimini (Full Wheaston Bridge Configuration) oluşturacak şekilde halkanın üzerine yapıştırılmış ve bağlantıları yapılmıştır. Bu bağlantı şeklinde deformasyon ölçerden iki tanesi halkanın ince kısmına dik, diğer ikisi ise paralel olacak şekilde yapıştırılmıştır.





Şekil 5.6. İnce çeperli odometre halkasından bir görünüm.



Şekil 5.7. İnce çeperli odometre halkası, kalibrasyon kapakları ve yükleme başlığının kesit görünümü (Ertekin, 1991'den yararlanılarak çizilmiştir).

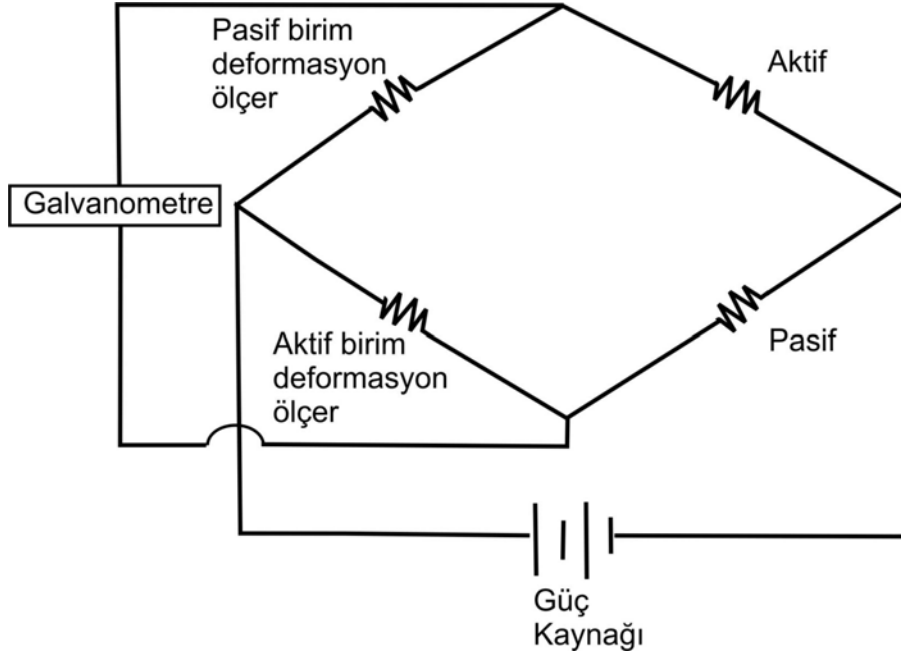
Wheaston tam köprü çevriminde, paralel olarak yerleştirilen birim deformasyon ölçerler “aktif (active) birim deformasyon ölçer”, dik olarak yerleştirilen ise “pasif (dummy) birim deformasyon ölçer” olarak adlandırılmaktadırlar. Şekil 5.8’de Wheaston tam köprü çevriminin kurulum şeması, Şekil 5.9’da ise odometre halkasına yerleştirilen aktif ve pasif birim deformasyon ölçerlerin halka üzerindeki konumu görülmektedir.

Yukarıda belirtilen şekilde bağlantısı yapılan birim deformasyon ölçerler, iletken kablolar aracılığıyla “birim deformasyon göstergesi”ne bağlanarak örneğin şişmesiyle oluşan birim deformasyonlar kaydedilmiştir. On kanallı terminale sahip olan birim deformasyon göstergesinin dokuzuncu kanalı, ince çeperli odometre aletine uygun şekilde ayarlanmış ve tüm veriler bu kanaldan alınmıştır. Tüm deneylerde; örnek, poröz taşlar ve yükleme başlığının ince çeperli odometre aletine yerleştirilmesi ve halkanın su haznesine vidalanması sırasında küçük ölçekte birim deformasyonlar geliştiği için, örneğe su verilmeden önce birim deformasyon göstergesinden ilk okuma alınmış ve bu değer sıfır olarak kabul edilmiştir. Birim deformasyon göstergesindeki ibre şişme devam ettikçe sapma göstermekte ve okumaların alınması için ibrenin merkezlenmesi gerekmektedir.

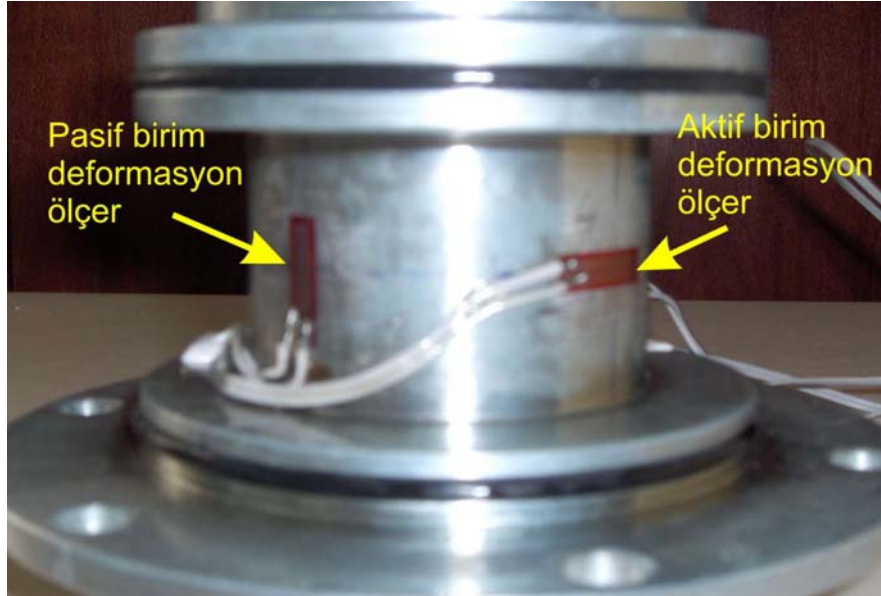
Örneğe su verildikten sonra şişme basıncından kaynaklanan birim deformasyonlar belli zaman aralıklarında birim deformasyon göstergesinin ibresi merkezlenerek kaydedilmiştir. Deneylerde kullanılan birim deformasyon göstergesi Şekil 5.5’de görülmektedir.

### **5.3.2.2. İnce çeperli odometrenin kalibrasyonu**

Odometre halkasının üzerine yerleştirilen birim deformasyon ölçerler sadece deformasyon değerlerini verdiği için, deney örneğinin yanal yöndeki şişmesi sonucu ince çeperli halka üzerine etkiyen şişme basınçlarını doğrudan belirlemek olanaklı değildir. Bu nedenle, ince çeperli odometre halkasına bilinen büyüklükte su basınçları verilmiş ve birim deformasyon göstergesinden bu basınçlara karşılık gelen birim deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Böylelikle hem halka kalibre edilmiş, hem de birim deformasyon değerlerinden yanal şişme basınçlarının belirlenmesine yönelik bir grafik çizilmiştir.



Şekil 5.8. Wheaston tam köprü (full bridge) çevriminin şematik görünümü.



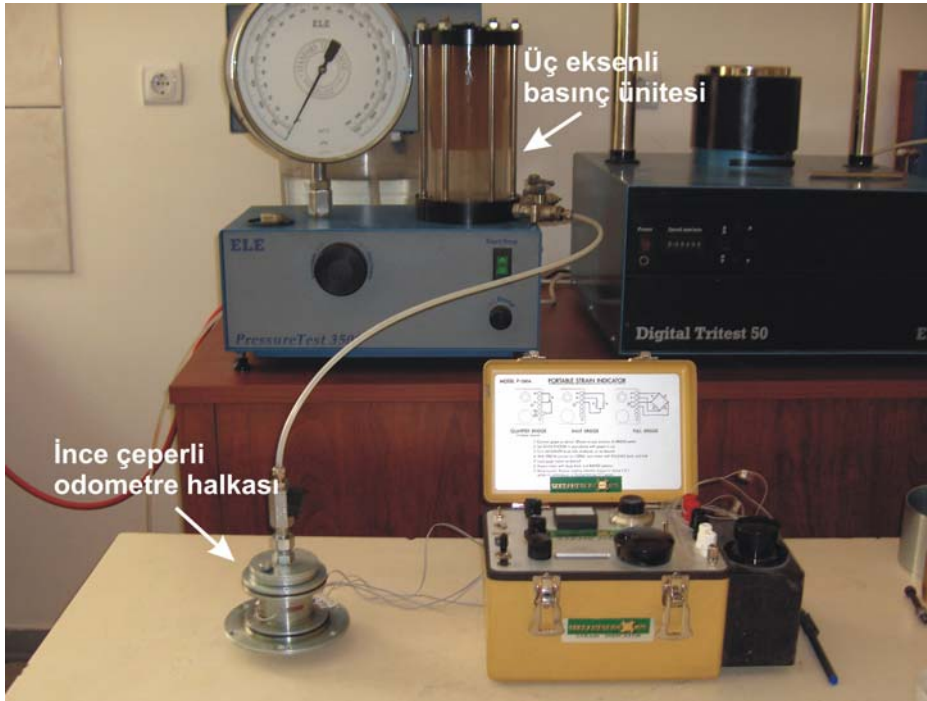
Şekil 5.9. Halka üzerine yerleştirilen aktif ve pasif birim deformasyon ölçerler.

Ertekin (1991), odometre halkasının kalibrasyonu amacıyla “serbest şişme yöntemi” ve “sıfırlama yöntemi” adı altında iki farklı yöntem uygulamıştır. Araştırmacı, bu kalibrasyon yöntemlerinin her ikisinde de odometre halkasının içine bilinen büyüklükte hava basınçları vermiş ve bu basınçlara karşılık gelen birim deformasyon değerlerini kaydetmiştir. Ertekin (1991), bu iki kalibrasyon yönteminden elde edilen basınç ve birim deformasyon değerlerinde önemsenmeyecek kadar küçük farklılıklar olduğunu belirtmiş ve daha pratik olan serbest şişme yönteminin kullanılmasını önermiştir. Hatipoğlu (1993) ve Sapaz (2004), ince çeperli odometre halkasını serbest şişme yöntemini kullanarak kalibre etmişler ve halkaya basınç uygulamak amacıyla hava yerine su kullanmışlardır. Bu çalışmada, odometre halkası serbest şişme yöntemi uygulanarak kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon yönteminde, yukarıda da belirtildiği gibi, halkaya basınç uygulanması amacıyla su veya hava kullanılabilir. Sistemde oluşabilecek kaçağın kolaylıkla farkedilebileceği düşünülerek, bu çalışmada kalibrasyon için su kullanılmıştır.

Kalibrasyon işleminde basınçlı su verildiğinde su kaçağı olmaması için odometre halkası Şekil 5.10’da gösterilen alt ve üst kapaklarla sıkıca kapatılmış ve laboratuvardaki zemin üç eksenli basınç ünitesine bağlanmıştır (Şekil 5.11). Sistemle ilgili tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra, üst kapaktaki vana yardımıyla halkanın içine su verilmiştir. Şekil 5.10’da gösterilen üst kapak üzerindeki kontrol vidası açılarak, bu delikten su çıkışı gerçekleşene değin su verme işlemine devam edilmiştir. Odometre halkası su ile dolduktan sonra, delikten su çıkışı olduğu gözlenmiş ve halkanın içindeki hava kabarcıkları bitene değin su çıkışına izin verilmiştir. Sistemdeki tüm hava alındıktan sonra delik plastik conta kullanılarak vidalanmış ve birim deformasyon göstergesi sıfırlanarak basınçlı su verme aşamasına geçilmiştir. Halkaya artan miktarlarda su basıncı uygulanmış ve her basınç değeri için birim deformasyon göstergesinden birim deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Halkaya, en fazla 550 kPa su basıncı uygulandıktan sonra basınç kademeli şekilde azaltılarak geri yükleme aşaması gerçekleştirilmiştir. Değerlerin doğruluğunun sınanması amacıyla yükleme ve geri yükleme aşamaları üç kez tekrar edilmiştir. Her yükleme ve geri yükleme aşaması sonunda kalibrasyon üst kapağı üzerindeki vida açılarak, halkanın içinde hava kabarcığı varsa bunların çıkışı sağlanmıştır.



Şekil 5.10. Deneylerde kalibrasyon için kullanılan alt ve üst başlıklar.



Şekil 5.11. Odometre halkasının zemin üç eksenli basınç ünitesine bağlanarak kalibre edilmesi.

Üç kez tekrarlanan yükleme-geri yükleme aşamalarında, aynı su basıncı değerlerine karşılık, hemen hemen aynı birim deformasyon değerleri elde edilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen su basıncı-birim deformasyon değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Yükleme ve geri yükleme sırasında bu doğrusallıktan herhangi bir sapma olmadığı gözlenmiştir. Böylece, deney düzeneğindeki birim deformasyon ölçerlerin ve ince çeperli odometre halkasının yükleme çevriminde duraylı olduğu saptanmıştır.

Kalibrasyon eğrilerinin tümü, Şekil 5.12'de tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu eğrilerden yükleme ve geri yükleme aşamasında birim deformasyon değerlerinin birbirine en yakın olduğu 1 no.lu yükleme ile 1 no.lu geri yükleme kalibrasyon eğrileri ve bu eğrilere ait eşitlikler Şekil 5.13'de verilmiştir. Bu çalışmada, ince çeperli odometre deneyleri sonucunda elde edilen birim deformasyon değerlerinin yanal şişme basıncına dönüştürülmesinde, 1 no.lu yükleme ve 1 no.lu geri yükleme kalibrasyon eşitlikleri kullanılmıştır.

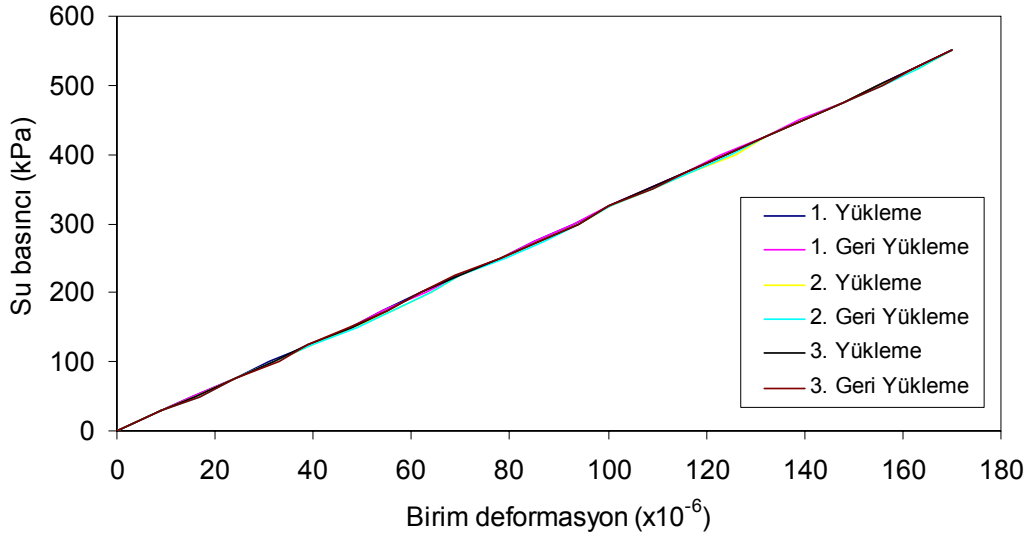
### **5.3.2.3. İnce çeperli odometre halkasının dayanım ve deformasyon özelliklerinin araştırılması**

Bu çalışmada kullanılan ve 0.35 mm kalınlığındaki ince çeperli odometre halkasının yapıldığı malzemenin dayanım parametrelerinin kullanılmasıyla, halkanın içine uygulanabilecek güvenli en büyük basınç değeri, bu değere karşılık gelen birim deformasyonu ve halkanın iç çapının genişleme miktarı belirlenebilir. Halkaya uygulanan gerilmelerin dağılımını gösteren ve hesaplamalar için kullanılan kesitler Şekil 5.14'de, hesaplamalara ilişkin eşitlikler ise aşağıda verilmiştir.

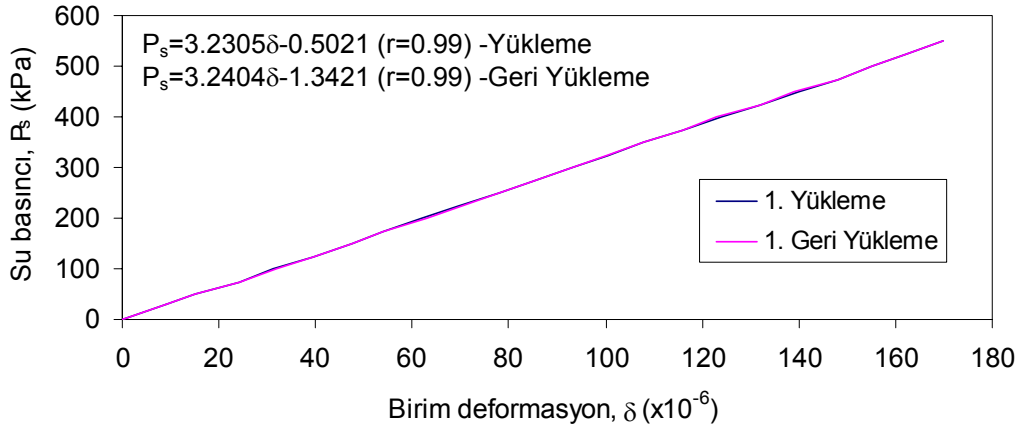
İnce çeperli halkaya etkiyen toplam normal kuvvet,  $N_T$ :

$$N_T = \int_0^{\pi/2} P_i \sin \theta ds \quad (5.1)$$

$$ds = r . d\theta \quad (5.2)$$



Şekil 5.12. Yükleme-geri yükleme çevriminden elde edilen kalibrasyon eğrileri.



Şekil 5.13. Yanal şişme basıncının belirlenmesinde kullanılan kalibrasyon eğrileri.

Eşitlik 5.2, Eşitlik 5.1'de yerine konarak,

$$N_T = \int_0^{\pi/2} P_i r \sin\theta d\theta \quad (5.3)$$

$$\int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta = 1 \quad (5.4)$$

$$N_T = P_i .r \quad (5.5)$$

elde edilir.

Halkanın çekilme dayanımı aşağıdaki ifadeden belirlenir.

$$\sigma_t = P_i .r / F \quad (5.6)$$

Burada F halkanın bir birimlik dik kesitinin alanı ise,

$$F = t.h \quad ve \quad F = t.1 \quad (5.7)$$

$$\sigma_t = P_i .r / t \quad (5.8)$$

$$P_i = \sigma_t .t / r \quad (5.9)$$

olur. Halkanın dış çeperindeki birim deformasyon (Teğetsel birim deformasyon)

$$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E} \quad (5.10)$$

$$\varepsilon = \frac{P_i .r}{E.t} \quad (5.11)$$

Olup, halkanın iç yarıçapındaki genişleme miktarı:

$$[(r + dr)2\pi - 2\pi r] / 2\pi r = \varepsilon \quad (5.12)$$

$$dr / r = P_i .R / E.t \quad (5.13)$$

$$dr = P_i .r^2 / E.t \quad (5.14)$$

İle ifade edilir.

Burada;

r : Halkanın iç yarıçapı

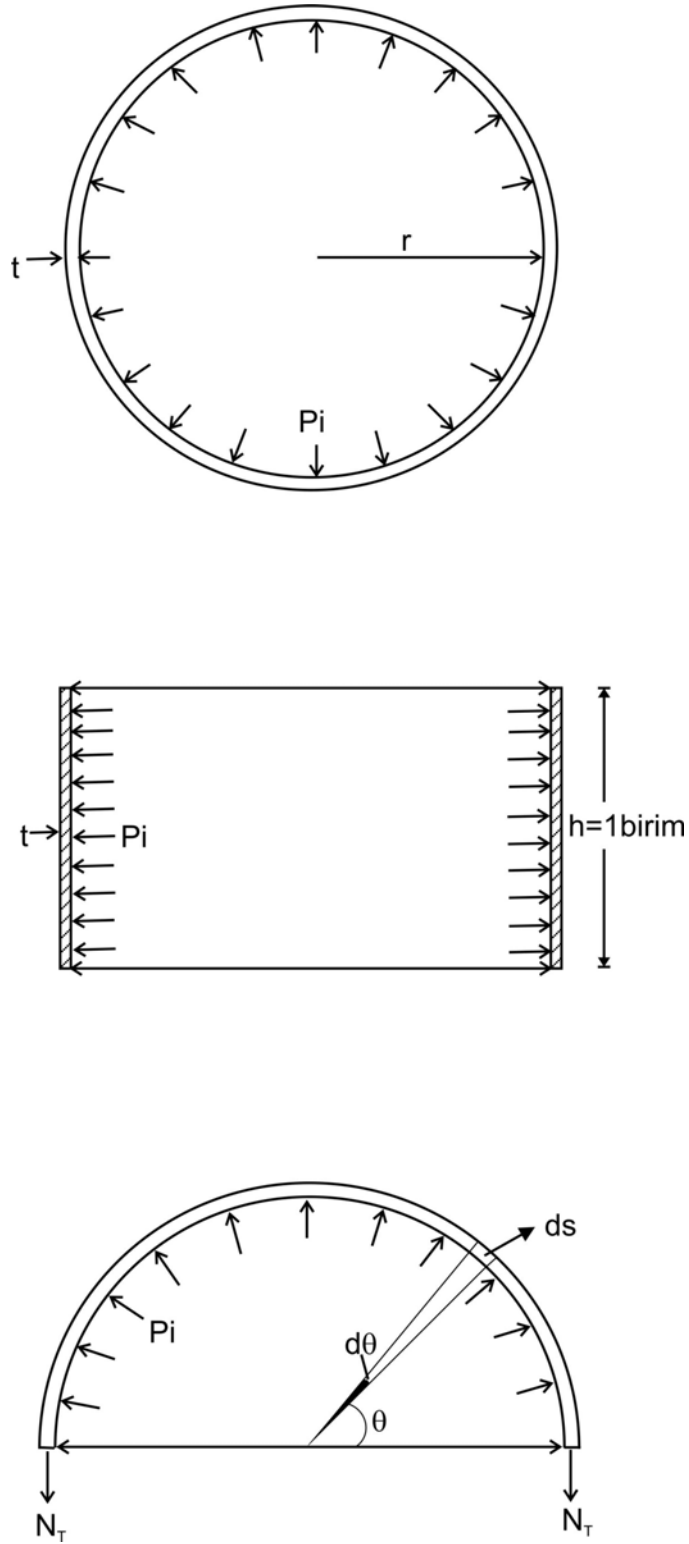
E : Halkanın üretildiği metalin elastisite modülü

t : Halka çeperinin kalınlığı

P<sub>i</sub> : Halkanın iç çeperine etkiyen basınç

σ<sub>t</sub> : Halkanın çeperinin çekilme dayanımı





Şekil 5.14. Odometre halkasının ince çeperine etkileyen gerilmelerin dağılımı ve gerilme hesaplamaları için esas alınan kesitler (Ertekin, 1991'den).

$\varepsilon$  : Halka çeperinde oluşan birim deformasyon

dR : Halkanın iç yarıçapındaki genişleme miktarı

$N_T$  : Halkanın dik kesitindeki alana etkiyen toplam normal kuvvet

Bu çalışmada kullanılan ince çeperli odometre halkasının yapıldığı Ç 4140 kodlu çeliğin Makina Kimya Endüstrisi Kurumu tarafından belirlenen dayanım parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$(\sigma_t) = 55 \times 10^4 \text{ kPa}$$

$$(E) = 2.53 \times 10^8 \text{ kPa}$$

Burada;

$\sigma_t$  : Tasarımda kullanılan (güvenli) çekilme dayanımı

E : Elastisite modülüdür.

Yukarıdaki eşitliklerde bu değerler kullanılarak ince çeperli odometre halkasının içine uygulanabilecek güvenli en büyük basınç, ( $P_{max}$ ), Eşitlik 5.9 kullanılarak,  $P_{max} = 7 \times 10^3$  kPa olarak hesaplanmıştır.

$P_{max}$  değeri; odometre halkasının 0.35 mm kalınlığa sahip çeperinin yenilmeden ve kalıcı deformasyona uğramadan dayanabileceği güvenli basınç değeri olup, bu dayanım şişme özelliğine sahip killi zeminlerin beklenen yanal şişme basıncı değerlerinden oldukça büyüktür. Bu çalışmada, ince çeperli odometre halkasının kalibrasyonu amacıyla halkanın içine uygulanan en büyük su basıncı 550 kPa olup,  $P_i = 550$  kPa için halka çeperinde oluşan birim deformasyon,  $\varepsilon = 170 \times 10^{-6}$  olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, halkanın kalibrasyonu sonucu elde edilen su basıncı-birim deformasyon değerleriyle uyum göstermektedir (bkz. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13).

#### **5.3.2.4. İnce çeperli odometre halkasıyla yapılan şişme deneyleri**

Ankara kilinin yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametrelerinin ve şişme anizotropisinin araştırılması amacıyla yönlü olarak alınan örselenmemiş örnekler

üzerinde yapılan klasik odometre deneylerinin yanı sıra, yukarıda kalibrasyonu ve deney düzeneği sunulan ince çeperli odometre halkası kullanılarak da şişme deneyleri yapılmıştır.

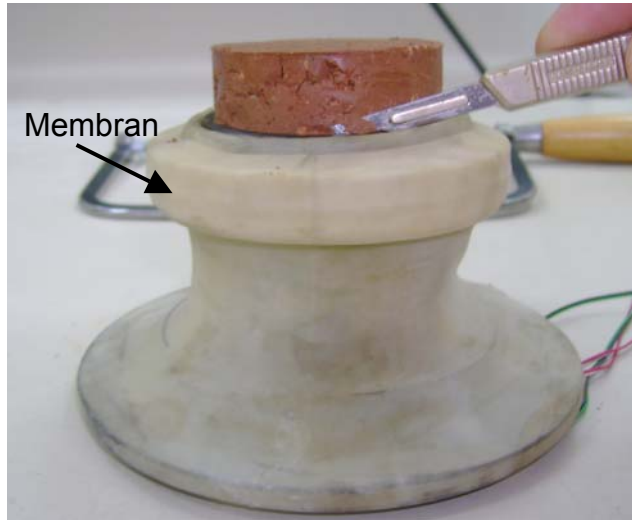
İnce çeperli odometre halkasıyla yapılacak olan şişme deneyleri için silindirik kesici metal kalıplarla alınan örnekler klasik odometre deneylerinin sunulduğu bölümde belirtildiği gibi, başlangıç su içerikleri büzülme limitine yakın değerler olan %12 ile %14 arasında kalacak şekilde nem odasında muhafaza edilmiş ve yine örnekler ince çeperli odometre halkasına aktarılırken traşlama veya yağlı kağıtlar kullanılarak örneğin hücreye yerleştirilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Örnek ince çeperli halkanın içine neşter yardımıyla traşlanarak aktarılmış ve birim deformasyon ölçerlerin deney sırasında suyla etkileşimini engellemek amacıyla halka membranla kaplanmıştır (Şekil 5.15).

Deney aşamasına geçildiğinde; poröz taşlar, yükleme başlığı ve ıslatma kabı yerleştirilmiş ve odometre halkası haznesine vidalanarak sabitlenmiştir (Şekil 5.16). Daha sonra halka, konsolidasyon aletine Şekil 5.17'de gösterildiği gibi yerleştirilmiş ve birim deformasyon ölçerlerden gelen kablolar aracılığıyla birim deformasyon göstergesine bağlantısı yapılmıştır. Birim deformasyon göstergesi sıfırlandıktan sonra, örneğe su verilmiş ve zamana bağlı olarak yanal ve düşey yöndeki deformasyonlar kaydedilmiştir. Tüm örneklerin düşey yöndeki şişme parametreleri, ASTM (2000)'nin önerdiği B yöntemi uygulanarak belirlenirken, yanal yöndeki şişme sonucu gelişen birim deformasyonlar, düşey yöndeki şişme ile eş zamanlı olarak, birim deformasyon göstergesinden kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda kaydedilen yanal yöndeki birim deformasyon değerleri, Şekil 5.13'deki kalibrasyon eğrisine ait eşitlik kullanılarak yanal yöndeki şişme basıncı değerleri elde edilmiştir.

Deneylere tabi tutulan tüm örneklerin düşey ve yanal yönlerdeki şişme basınçları ile şişme yüzdeleri Çizelge 5.7'de sunulmuştur. Şişme grafiklerinden 4 no.lu lokasyondan alınan örneğe ait yanal birim deformasyon-zaman ve yanal basınç-zaman grafikleri örnek olarak Şekil 5.18'de, tüm örneklerle ait yanal yöndeki şişme basıncı-zaman grafikleri ise Ek 3'de sunulmuştur.



(a)

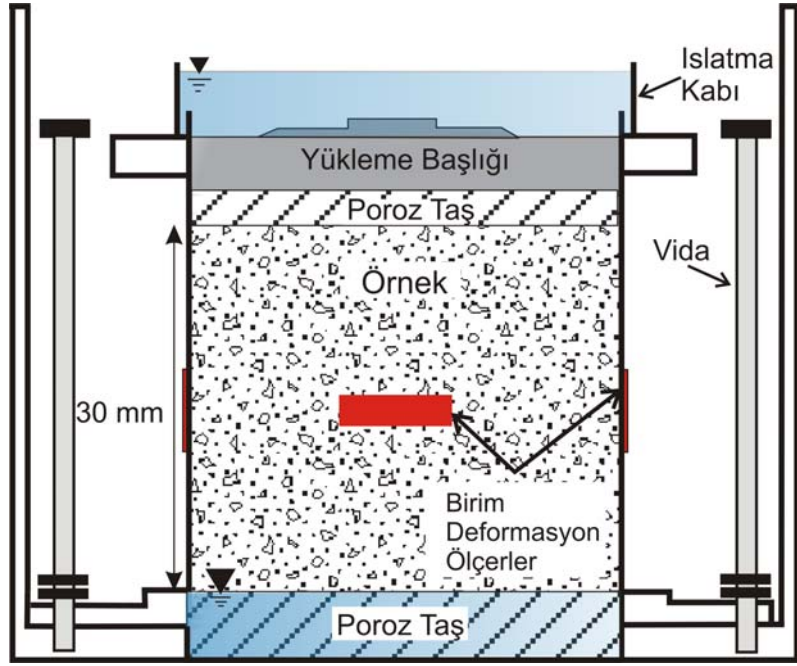


(b)

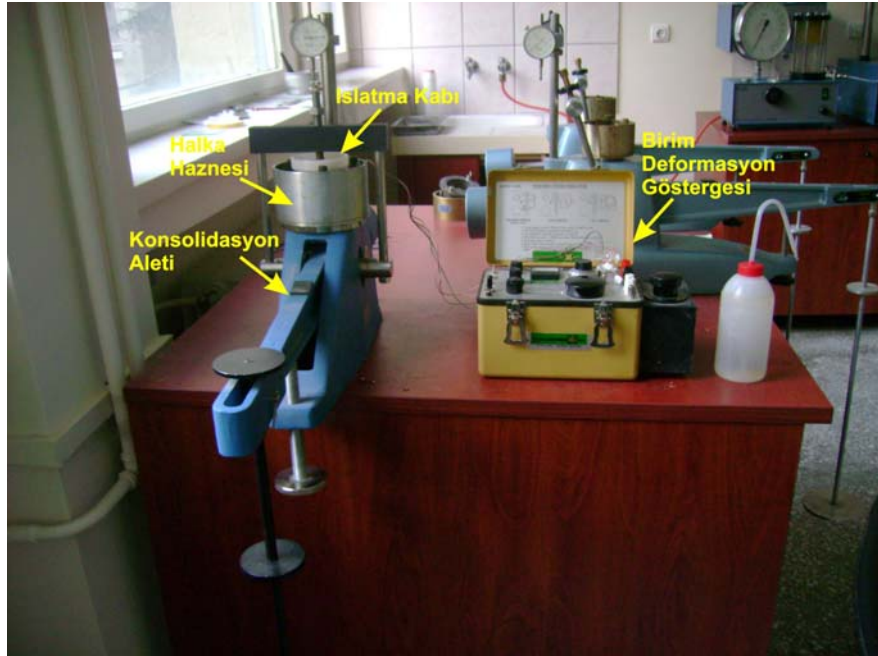


(c)

Şekil 5.15. (a) Kurutulan örselenmemiş deney örneği, (b) kurutulmuş örneğin odometre halkasına aktarılırken traşlanması ve (c) örneğin halkanın içine yerleştirildikten sonraki görüntüsü.



Şekil 5.16. Örneğin ve ince çepirli odometre halkasının deney sırasındaki kesit görünümü.



Şekil 5.17. İnce çepirli odometre halkası kullanılarak yapılan şişme deneyinden bir görünüm.

#### 5.4. Konsolidasyon Deneyleri

Ankara kili örneklerinde ince çeperli odometre halkası kullanılarak yapılan şişme deneyleri ve yönlü örnekler alınarak yapılan odometre deneylerinden belirlenen yanal ve düşey yöndeki şişme basıncı değerleri ile kilin önkonsolidasyon basıncı değerleri arasındaki ilişkinin araştırılması amacıyla örnekler üzerinde ayrıca konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

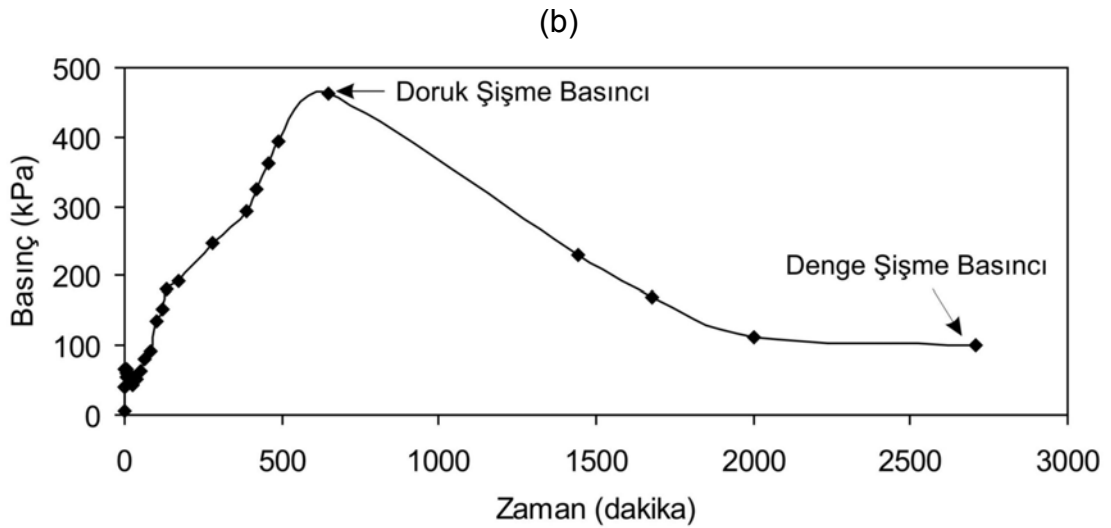
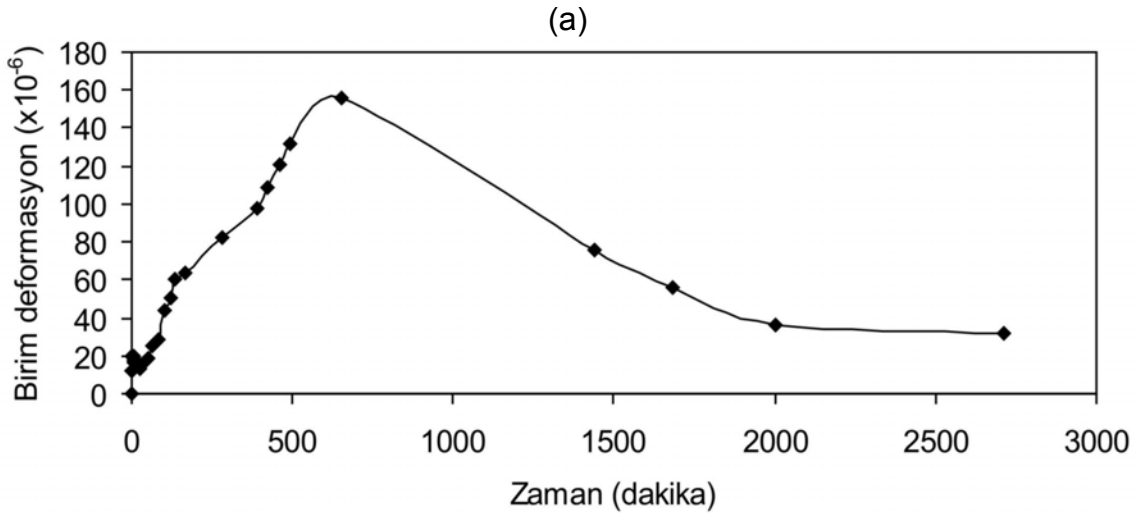
Ankara kilinin şişme büzülme davranışı nedeniyle maruz kaldığı ön yükleme süreci ilk 2 m derinlikte (aktif zonun derinliği) etkin olduğundan, konsolidasyon deneylerine tabi tutulan örnekler yaklaşık 1.5 m derinlikten alınmıştır. 10x10x2 cm boyutlarındaki kesici metal kalıplarla alınan örselenmemiş örnekler laboratuvara getirilerek konsolidasyon halkalarına aktarılmıştır. Ankara kilinin ön yükleme basıncını ve konsolidasyon özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM (2000)'nin önerdiği yöntemle göre konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Örneklerin ön yükleme basınçları e-logP grafikleri çizilerek belirlenmiş ve tüm örneklere ait ön yükleme basıncı değerleri Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

Örneklerin ön yükleme basınçları 240 kPa ile 500 kPa arasında, güncel olarak maruz kaldıkları örtü yükü gerilmeleri ise 25 kPa ile 27 kPa arasında değişim göstermektedir. Önyükleme basınçları örneklerin güncel örtü yükü değerlerinden belirgin bir biçimde yüksektir. Bu çalışmada Ankara kili için belirlenen ön yükleme basıncı değerleri, Çetinkaya (1978) ve Kiper (1983)'in Ankara kili için belirledikleri ön yükleme basıncı değerleriyle uyum göstermektedir. Aynı araştırmacılar, Ankara kilinin aşırı konsolide bir kil olduğunu belirtmişlerdir. Konsolidasyon deneyleri ile şişme deneylerinin sonuçları bundan sonraki bölümde karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.7. İnce çeperli odometre halkasıyla yapılan şişme deneylerinin sonuçları.

Lokasyon No.	$w_b$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	Düşey yönde şişme basıncı (kPa)	Düşey yönde şişme yüzdesi (%)	Yanal yönde doruk şişme basıncı (kPa)	Yanal yönde denge şişme basıncı (kPa)
1	12	17.88	13.73	440	6.7	385	91
	12	17.56	13.54	500	5.4	375	78
	13	18.05	13.88	460	11.5	441	98
2	13	17.56	13.94	430	6.2	424	167
	12	17.26	13.44	320	7.3	210	43
	14	16.80	12.76	280	6.7	185	33
3	13	16.87	13.08	820	17.9	560	41
	13	18.05	13.99	940	16.9	521	58
	14	17.88	13.83	750	12.4	570	73
4	14	17.07	12.78	1000	21.7	463	99
	12	16.58	12.42	1100	18.1	492	94
	14	17.27	12.95	920	19.4	375	111
5	14	16.18	12.30	1010	22.0	420	67
	14	17.58	13.40	800	22.4	351	32
	13	17.00	13.00	880	18.5	459	112
6	13	17.13	13.73	800	24.0	393	60
	13	17.43	13.96	705	20.0	410	112
	12	16.62	13.25	740	17.0	407	43
7	13	16.60	12.49	890	20.5	379	85
	14	17.90	13.47	1040	23.0	400	126
	14	16.89	12.69	1100	24.5	375	119

$w_b$ : Başlangıç su içeriği;  $\gamma_d$ : Doğal birim hacim ağırlık;  $\gamma_k$ : Kuru birim hacim ağırlık



Şekil 5.18. 4 no.lu lokasyondan alınan örneğin (a) yanıl birim deformasyon-zaman ve (b) yanıl basınç-zaman grafikleri.

Çizelge 5.8. Ankara kili örneklerinin ön yükleme basınçları ve güncel örtü yükü gerilmeleri.

Lokasyon No.	Ön Yükleme Basıncı (kPa)	Örtü Yükü Gerilmeleri (kPa)
1	300	25.5
2	240	26.2
3	300	27.0
4	400	25.6
5	500	26.9
6	290	26.7
7	320	27.0



## 6. ANKARA KİLİNİN ŞİŞME ANİZOTROPİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 6.1. Yanal ve Düşey Yönlerdeki Şişme Parametrelerinin Karşılaştırılması

Killi zeminlerdeki şişme anizotropisinin araştırılmasına yönelik yapılan çalışmalarda, araştırmacılar (örneğin; Kassiff and Zeitlen; 1962; Komornik and Zeitlen, 1965; Parcher and Liu; 1965; Shiming,1984; Fourie, 1989; Windal and Shahrour, 2002) inceledikleri zeminlerde yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametrelerinin (şişme basıncı ve/veya şişme yüzdesi) farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, inceledikleri killi zeminlerden aldıkları bazı örneklerin yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametrelerinin eşit olduğunu saptayan araştırmacılar da mevcuttur (örneğin; Michel et al., 2000; Çetinkaya, 1978).

Şişme anizotropisinin araştırıldığı ve/veya değerlendirildiği çalışmalarda, bazı araştırmacılar (örneğin; Komornik and Zeitlen, 1965; Parcher and Liu, 1965; Üner, 1977; Fourie, 1989; Ertekin, 1991) yanal yöndeki şişme parametrelerinin düşey yöndeki şişme parametrelerinden daha yüksek olduğunu belirlerken, bazı araştırmacılar ise (örneğin; Shiming, 1984; Sapaz, 2004) düşey yönde daha yüksek şişme parametreleri elde etmişlerdir.

Tez çalışmasının “Giriş” bölümünde belirtildiği gibi, yaptıkları çalışmaların asıl amacı olmamakla birlikte, Üner (1977), Çetinkaya (1978) ve Ergüler (2001), az sayıdaki örnekle Ankara kilindeki şişme anizotropisini araştırmışlardır. Üner (1977) ve Ergüler (2001), yanal yöndeki şişme parametrelerinin düşey yöndeki şişme parametrelerinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Çetinkaya (1978) ise, incelediği iki örnekte düşey şişmenin ve bir örnekte yanal şişmenin daha büyük, diğer bir örnekte ise yanal ve düşey şişmenin yaklaşık olduğunu belirlemiştir.

Bu çalışmada, tüm örneklerin ince çeperli odometre halkası kullanılarak düşey yöndeki şişme basınçlarının yanal yöndeki şişme basınçlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Çizelge 6.1). Klasik odometre deneyleri ile belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları incelendiğinde ise, sadece 1 no.lu lokasyona ait örneklerin yanal yöndeki şişme basıncı düşey yöndeki şişme basıncından daha

büyük olup, diğer tüm örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları yanal yöndeki şişme basınçlarından daha büyüktür (bkz. Çizelge 6.1). Bunun nedeninin kil minerallerinin yönelimiyle ilişkili olabileceği düşünülmüş olup, buna ilişkin değerlendirmeler elektron mikroskobunda yapılan gözlemlerin sunulduğu 6.4. numaralı alt bölümde tartışılmıştır.

Klasik odometre deneyleri sonucunda belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme yüzdeleri incelendiğinde ise, 1 ve 2 no.lu lokasyonlardan alınan örneklerin yanal ve düşey yöndeki şişme yüzdeleri benzer değerlere sahip olup, diğer tüm örneklerin düşey yönde şişme yüzdesi değerleri yanal yöndeki şişme yüzdesi değerlerinden daha büyüktür (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. Tüm örneklerin klasik odometre deneyleri ve ince çeperli odometre deneyleriyle belirlenen şişme basınçları.

Lok. No.	Klasik Odometre Deneyleri				İnce Çeperli Odometre Deneyleri		
	Düşey yönde şişme basıncı (kPa)	Düşey yönde şişme yüzdesi (%)	Yanal yönde şişme basıncı (kPa)	Yanal yönde şişme yüzdesi (%)	Düşey yönde şişme basıncı (kPa)	Düşey yönde şişme yüzdesi (%)	Yanal yönde doruk şişme basıncı (kPa)
1	490	8.0	540	8.5	440	6.7	385
					500	5.4	375
					460	11.5	441
2	300	9.2	160	9.2	430	6.2	424
					320	7.3	210
					280	6.7	185
3	1010	19.5	700	15.9	820	17.9	560
					940	16.9	521
					750	12.4	570
4	1100	14.0	605	11.4	1000	21.7	463
					1100	18.1	492
					920	19.4	375
5	1080	21.0	480	7.0	1010	22.0	420
					800	22.4	351
					880	18.5	459
6	705	17.0	430	15.7	800	24.0	393
					705	20.0	410
					740	17.0	407
7	1070	23.1	440	11.5	890	20.5	379
					1040	23.0	400
					1100	24.5	375

## 6.2. Klasik Odometre ve İnce Çeperli Odometre Halkasıyla Yapılan Şişme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

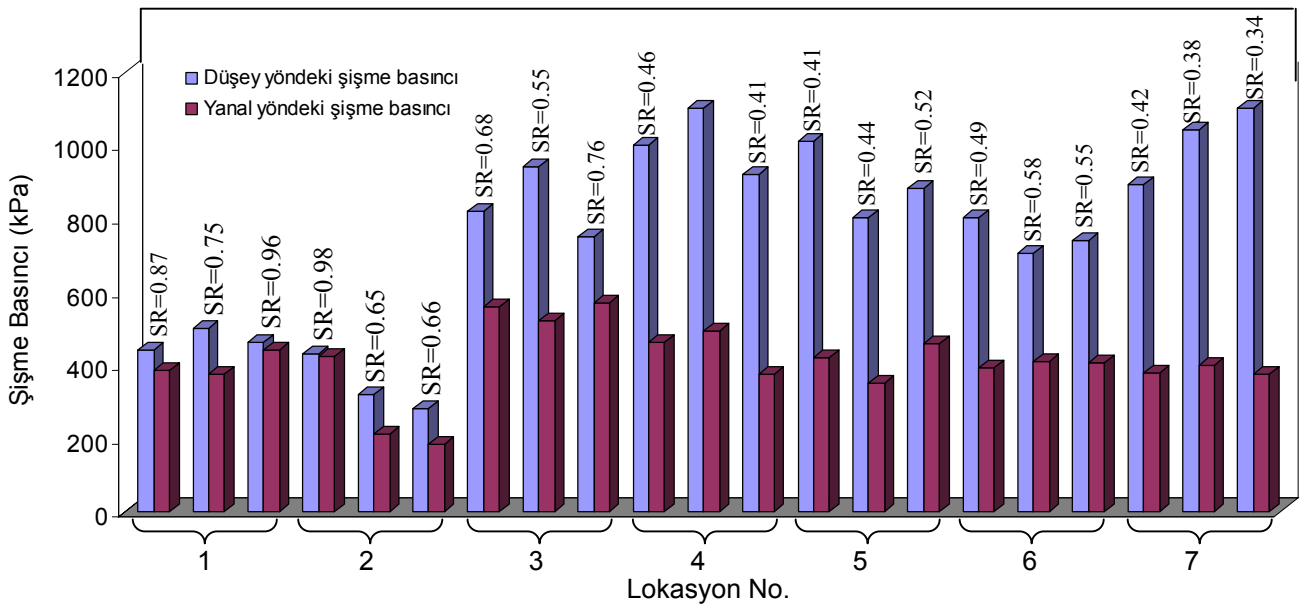
İnce çeperli odometre halkasıyla yapılan şişme deneylerinde, örneğin 4 kPa gibi düşük ve sabit bir yük altında düşey yöndeki şişmesine izin verilirken (ASTM, 2000'in B yöntemine göre), yanal yöndeki şişmesi sınırlandırılmıştır. Buna göre, ince çeperli odometre halkası kullanılarak yapılan şişme deneylerinde örneklerin yanal yöndeki şişme basıncı değerleri düşey yönde şişmeye izin verilirken belirlenmiştir. Klasik odometre deneylerine tabi tutulan örneklerin yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları, 5. Bölüm'de sunulduğu gibi, yönlü örnekler alınarak iki ayrı örnek üzerinde belirlenmiştir. Bu yöntemle yapılan şişme deneylerinde, düşey yönde alınan örneğin düşey yöndeki şişme parametreleri belirlenirken yanal yöndeki şişme tamamıyla sınırlandırılmış olup, aynı şekilde yanal yönde alınan örneğin yanal yöndeki şişme parametreleri belirlenirken düşey yöndeki şişme tamamıyla sınırlandırılmış durumdadır.

Chen and Huang (1987), Windal and Shahrour (2002) ve Al Shamrani and Dhowian (2003), killi bir zeminde şişmenin bir yönde engellenmesinin, diğer yöndeki şişme miktarının (yüzdesinin) ve şişme basıncının artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu bilgi dikkate alınarak, örneklerin şişme basınçları ve şişme yüzdeleri çalışmada uygulanan deney yöntemleri açısından birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

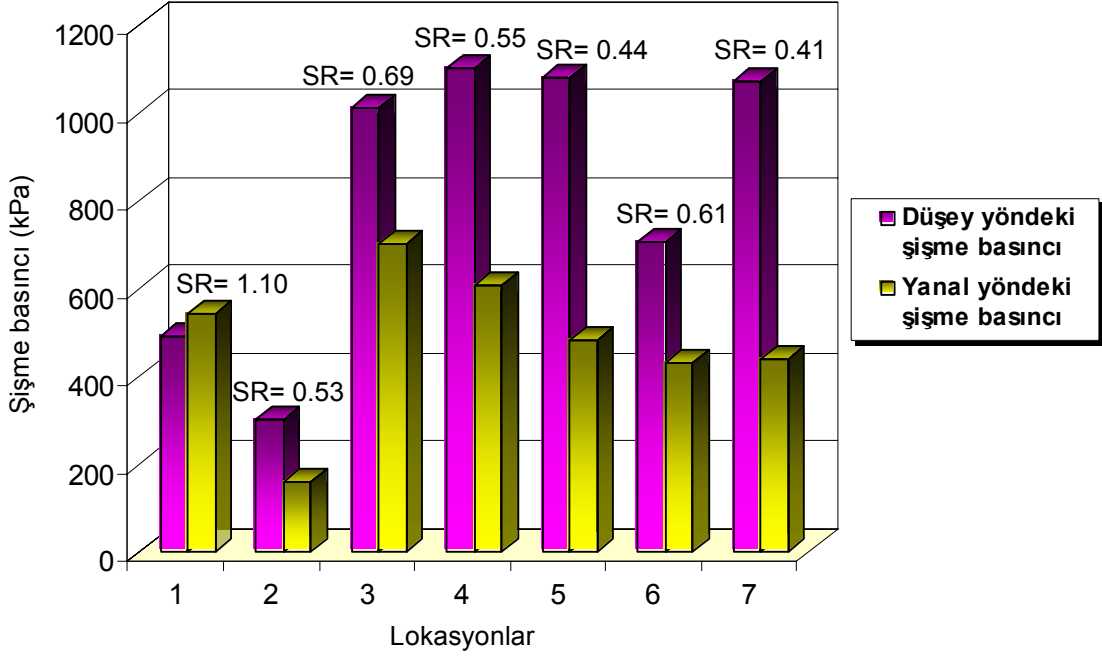
Klasik odometre deneyleriyle belirlenen düşey yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri ile ince çeperli odometre halkasıyla belirlenen düşey yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri uyumluluk göstermektedir (bkz. Çizelge 6.1). Buna karşın, klasik odometre deneylerinde ince çeperli odometre deneylerinden farklı olarak, yanal yöndeki şişme basıncı düşey yöndeki şişme sınırlandırılarak belirlendiğinden, 2 no.lu lokasyondan alınan örnekler dışında tüm örneklerin klasik odometre deneyleriyle belirlenen yanal yöndeki şişme basınçları, ince çeperli odometre halkasıyla belirlenen yanal yöndeki şişme basınçlarından daha büyüktür (bkz. Çizelge 6.1).

Her lokasyondan alınan üçer adet örselenmemiş örneğin ince çeperli odometre halkası kullanılarak belirlenen yanal ve düşey yöndeki şişme basınçları Şekil 6.1’de, klasik odometre deneyleriyle belirlenen yanal ve düşey yöndeki şişme basınçları ve yüzdeleri ise sırasıyla Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de histogramlar şeklinde sunulmuştur.

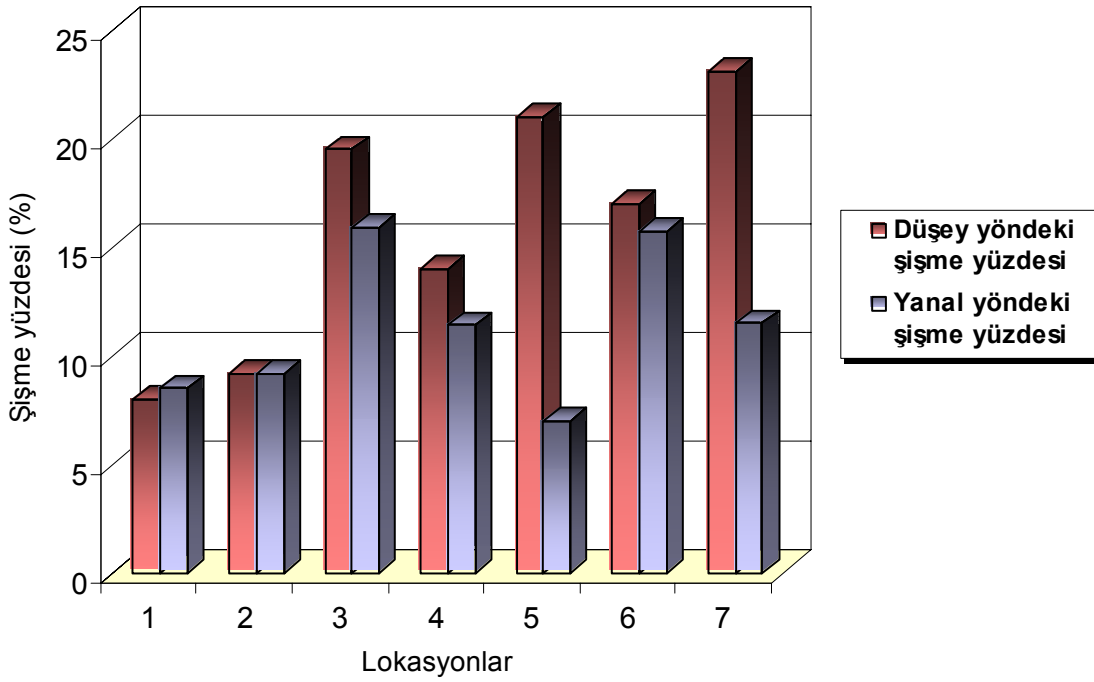
Yanal yöndeki şişme basıncının düşey yöndeki şişme basıncına oranı, “şişme basıncı oranı”, SR, olarak ifade edilmiş ve Şekil 6.1 ve 6.2’de tüm örneklerin SR değerleri verilmiştir. İnce çeperli odometre halkası kullanılarak belirlenen şişme basınçları için örneklerin SR değerleri 0.34 ile 0.98 arasında değişim gösterirken, klasik odometre deneylerinin sonuçlarına göre belirlenen SR değerleri ise 0.41 ile 1.10 arasında değişim göstermektedir (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2).



Şekil 6.1. İnce çeperli odometre halkasıyla belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları ve örneklerin SR değerleri.



Şekil 6.2. Tüm lokasyonlara ait örneklerin klasik odometre deneyleriyle belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları ve SR değerleri.



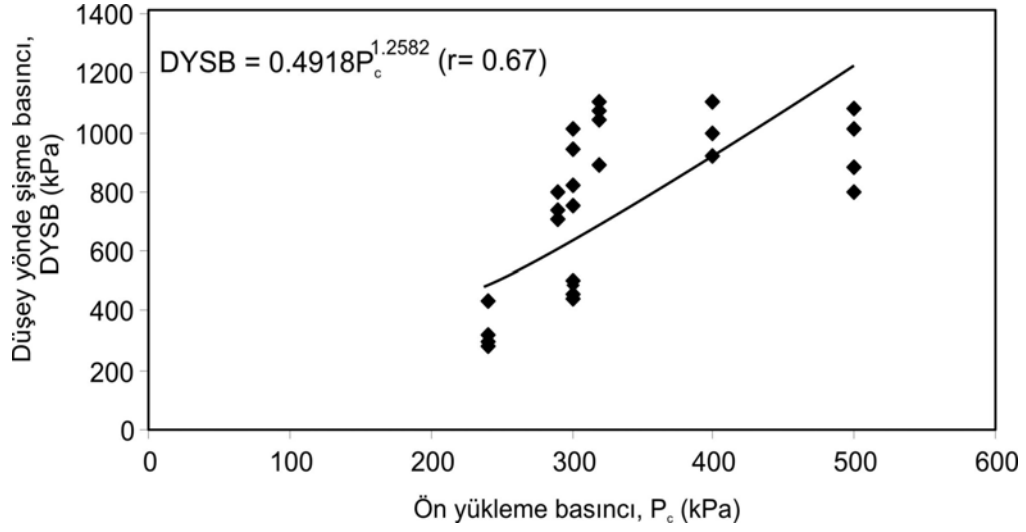
Şekil 6.3. Tüm lokasyonlara ait örneklerin klasik odometre deneyleriyle belirlenen yanal ve düşey yönlerdeki şişme yüzdeleri.

### 6.3. Yanal ve Düşey Yöndeki Şişme Parametreleri ile Ön Yükleme Basıncı, Likit Limit ve Simektit İçeriği Arasındaki İlişkiler

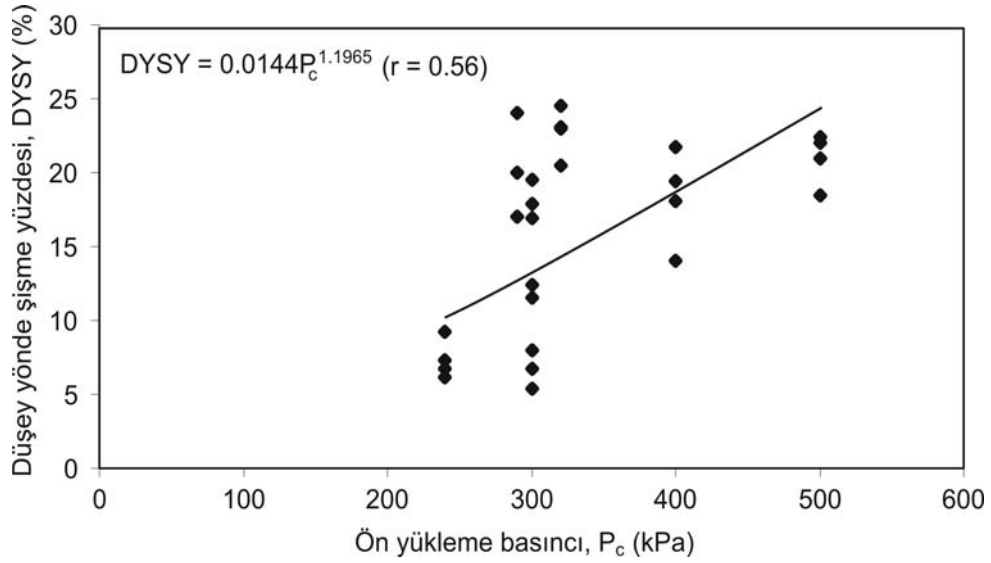
Ankara kilinin ön yükleme basıncı ile yanal ve düşey yönlerdeki şişme basınçları ve şişme yüzdeleri arasındaki ilişkiler incelenerek grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Şekil 6.4'de verilen ön yükleme basıncı ile düşey yönde şişme basıncı grafiğinde, ön yükleme basıncına karşılık klasik odometre ve ince çeperli odometre yöntemleriyle belirlenen düşey yöndeki şişme basınçları birlikte değerlendirilmiştir. Ön yükleme basıncının artmasına koşut olarak, düşey yöndeki şişme basıncı artma eğiliminde olup, bu iki parametre arasındaki korelasyon katsayısı  $r=0.67$ 'dir (Şekil 6.4). Şekil 6.5'de ise, ön yükleme basıncı ile her iki deney yöntemiyle belirlenen düşey yöndeki şişme yüzdelerinin grafiği sunulmuştur. Bu iki parametre arasında da düşey yöndeki şişme basıncı ön yükleme basıncı arasındaki ilişkiye benzer ve korelasyon katsayısı  $r=0.56$  olan bir ilişki elde edilmiş olup, ön yükleme basıncının artmasıyla düşey yöndeki şişme yüzdesinin arttığı görülmektedir (Şekil 6.5).

İnce çeperli odometre deneyleri sırasında yanal yöndeki şişme yüzdesi değerleri belirlenemediğinden, yalnızca klasik odometre deneylerinden belirlenen yanal yöndeki şişme yüzdesi ile ön yükleme basıncı değerleri arasındaki ilişki incelenebilmiştir (Şekil 6.6). Ön konsolidasyon basıncı ile yanal yöndeki şişme parametreleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, yanal yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesi ile ön yükleme basıncı arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmektedir (Şekil 6.6 ve Şekil 6.7).

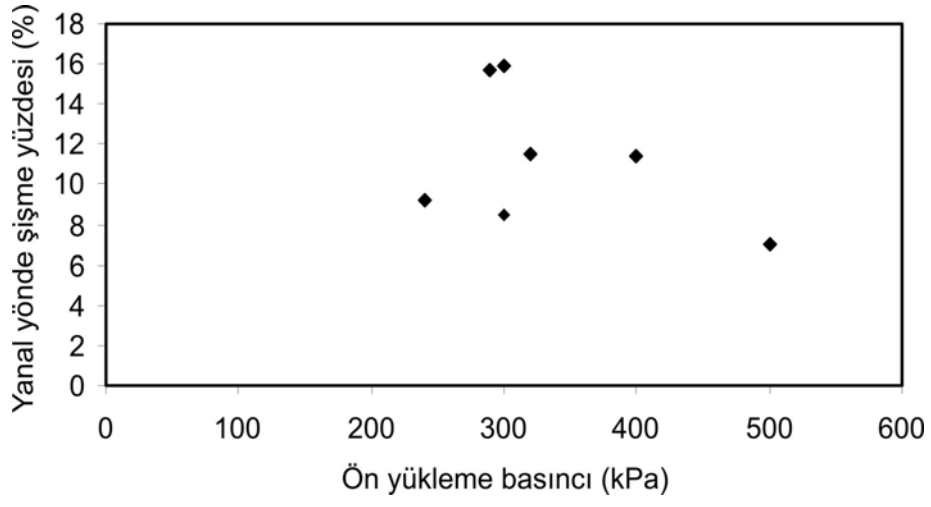
Ankara kilinin önyüklem basıncının derinliğe ve yönlere (yanal ve düşey) göre değişimini ve zeminin şişme, dayanım ve sıkışabilirliği ile önyüklem basıncı arasındaki ilişkileri araştıran Çetinkaya (1978), bu çalışmadaki sonuçlara benzer şekilde önyüklem basıncının artmasıyla düşey yöndeki şişme basıncının ve şişme yüzdesinin artış gösterdiğini, ancak yanal yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesi ile önyüklem basıncı arasında belirgin bir ilişki gözlenmediğini belirtmiştir.



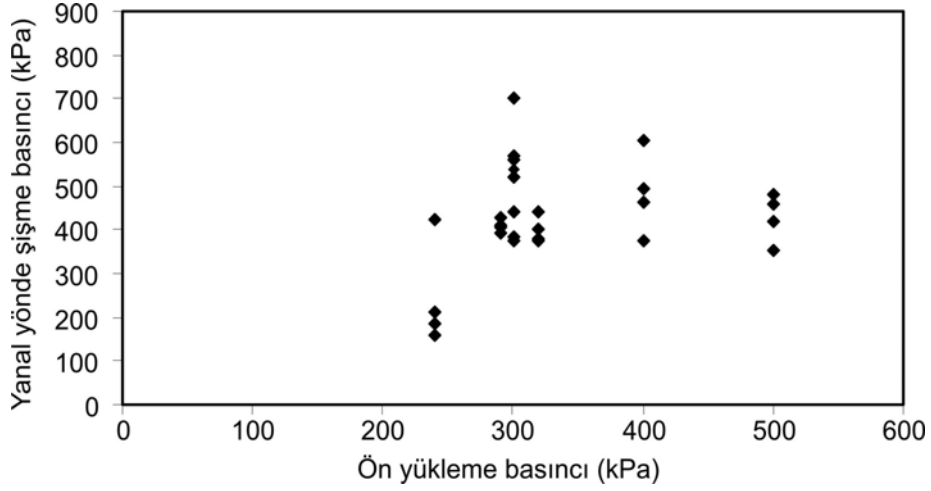
Şekil 6.4. Düşey yöndeki şişme basıncı (DYSB) ile ön yükleme basıncı ( $P_c$ ) arasındaki ilişki.



Şekil 6.5. Düşey yöndeki şişme yüzdesi (DYSY) ile ön yükleme basıncı ( $P_c$ ) arasındaki ilişki.



Şekil 6.6. Yanal yöndeki şişme yüzdesi ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki.



Şekil 6.7. Yanal yöndeki şişme basıncı ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki.



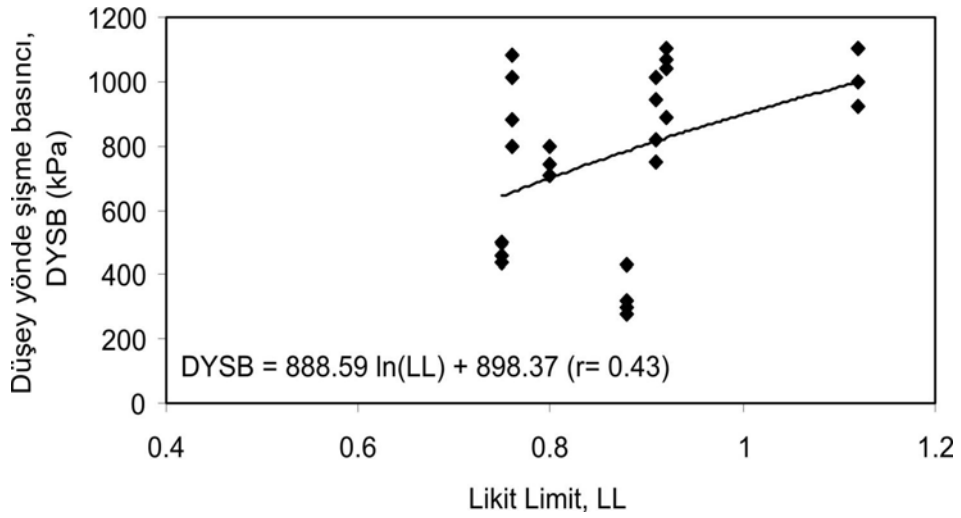
Likit limit ve simektit içeriğinin şişme potansiyeliyle ilişkili olması nedeniyle bu iki parametre ile düşey yöndeki şişme basıncı arasındaki ilişkiler de grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Likit limit ile düşey yöndeki şişme basıncı arasında korelasyon katsayısı  $r= 0.43$  olan bir ilişki elde edilmiş olup, likit limitin artmasına koşut olarak şişme basıncının da artma eğiliminde olduğu saptanmıştır (Şekil 6.8). Simektit içeriği ile düşey yöndeki şişme basıncı arasında ise daha yüksek korelasyon katsayısına ( $r=0.83$ ) sahip bir ilişki elde edilmiş olup, yine simektit içeriğinin artmasıyla şişme basıncının da arttığı görülmektedir (Şekil 6.9).

İncelenen kilin türü ve niteliği açısından daha temsil edici olabilmesi için, likit limit ve simektit içeriği değerleri ile ön yükleme basıncı birlikte değerlendirilmiştir. Düşey yöndeki şişme basıncı ile önyükleme basıncı ve likit limit arasında artan bir ilişki söz konusu olup,  $r=0.74$  gibi bir korelasyon katsayısına sahiptir (Şekil 6.10). Düşey yöndeki şişme basıncı ile ön yükleme basıncı ve simektit içeriği ilişkisinin korelasyon katsayısı daha yüksek bir değere sahip olup ( $r=0.85$ ), simektit içeriği ve ön yükleme basıncının artmasına koşut olarak düşey yöndeki şişme basıncının arttığı görülmektedir (Şekil 6.11).

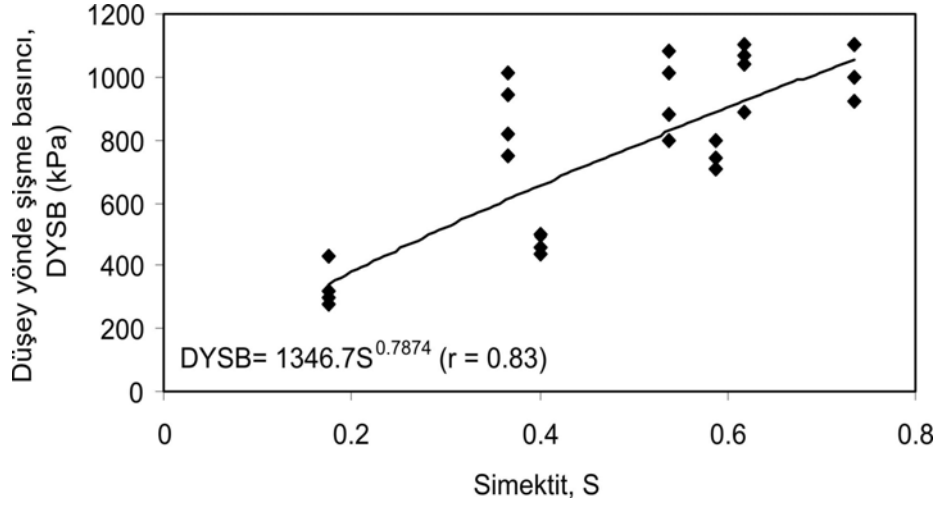
Tezin 5. Bölümü'nde değinildiği gibi, örselenmemiş örnekler yağışlı dönemde alınmış ve kurutulduktan sonra şişme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Ancak, örselenmemiş örneklerin alınmasında ve örneklerin kurutulduktan sonra deney hücrelerine aktarılmasında güçlüklerle karşılaşmıştır. Bir ön kestirim amacıyla kullanılabilceği düşünülerek örselenmemiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçlarına oranlamış (SBO) ve bu oran ile ön yükleme basıncı, likit limit (LL) ve simektit içeriği (S) arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Örselenmemiş örneklerin şişme basıncının örselenmiş örneklerin şişme basıncına oranları ile ön yükleme basıncı arasındaki ilişki Şekil 6.12'de verilen grafikteki gibi olup, ön yükleme basıncındaki artışa koşut olarak, şişme basıncı oranlarının da artış gösterdiği görülmektedir. Şekil 6.13'de ve Şekil 6.14'de örselenmemiş örneklerin şişme basıncının örselenmiş örneklerin şişme basıncına oranları ile sırasıyla likit limit ve simektit içeriği arasındaki ilişkilerin incelendiği grafikler verilmiştir. Şişme basıncı oranları ile likit limit ve simektit içeriği arasında artan bir

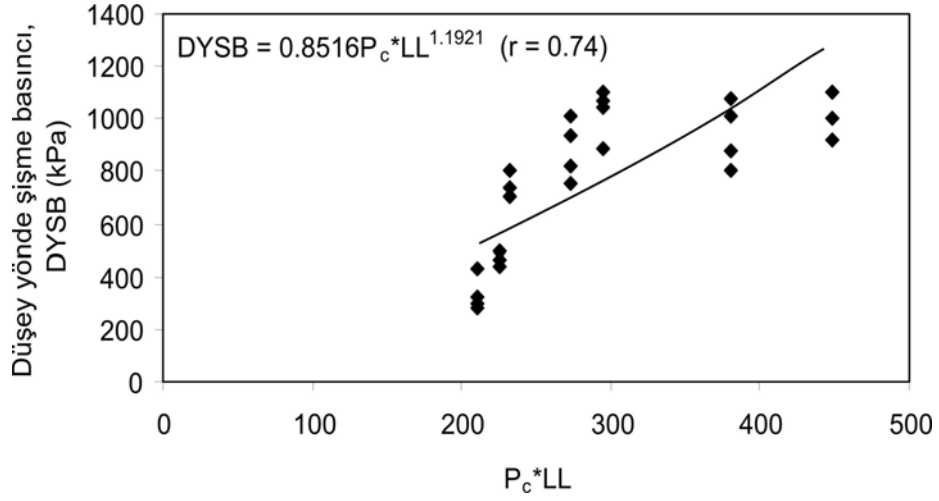
ilişki söz konusu olup, likit limit ile şişme basıncı oranı arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı  $r = 0.47$  ve simektit içeriği ile şişme basıncı oranı arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ise  $r = 0.62$ 'dir (Şekil 6.13 ve 6.14). Bunun yanı sıra, şişme basıncı oranı ile ön yükleme basıncı, simektit içeriği ve likit limit ile birlikte değerlendirilmiş ve daha yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler elde edilmiştir. Şekil 6.15'de şişme basıncı oranına karşılık ön yükleme basıncı ve likit limitin birlikte değerlendirildiği grafik verilmiş olup, bu parametreler arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı  $r = 0.89$ 'dur. Şişme basıncı oranı ile ön yükleme basıncı ve simektit içeriğinin ilişkisinin incelendiği grafik Şekil 6.16'da verilmiş olup, bu ilişkinin korelasyon katsayısı ise  $r = 0.72$  olarak belirlenmiştir. Şişme parametrelerine karşılık ön yükleme basıncı, simektit içeriği ve likit limit arasındaki tüm ilişkiler için F testi yapılmış ve bu parametreler arasındaki ilişkilerin %95 güvenilirlik sınırları içinde istatistiksel olarak anlamlı oldukları saptanmıştır (Şekil 6.4-Şekil 6.16).



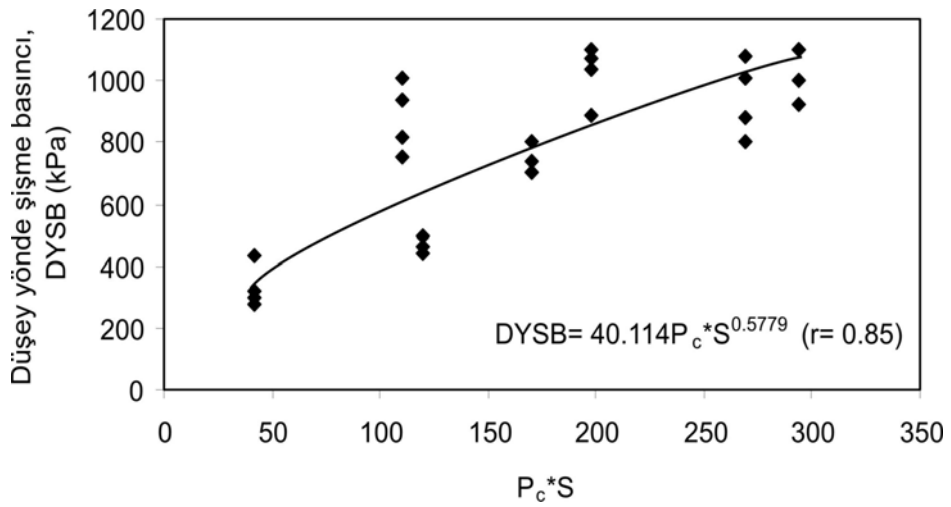
Şekil 6.8. Düşey yöndeki şişme basıncı (DYSB) ile likit limit (LL) arasındaki ilişki.



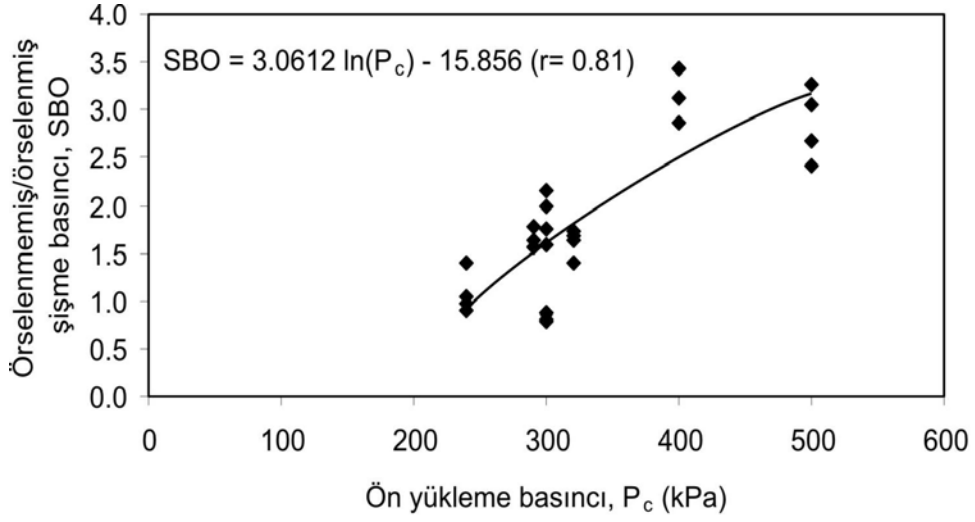
Şekil 6.9. Düşey yöndeki şişme basıncı (DYSB) ile simektit içeriği (S) arasındaki ilişki.



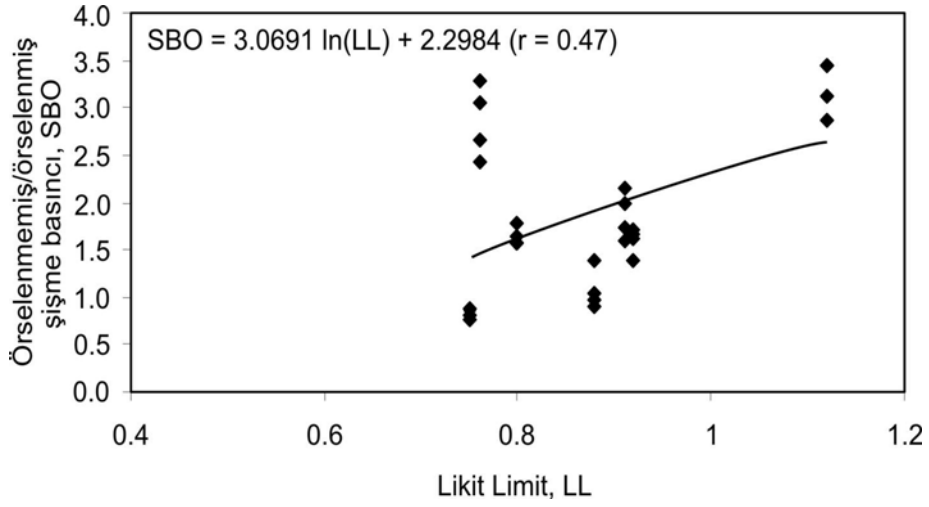
Şekil 6.10. Düşey yöndeki şişme basıncı (DYSB) ile ön yüklem basıncı ( $P_c$ ) ve likit limit (LL) arasındaki ilişki.



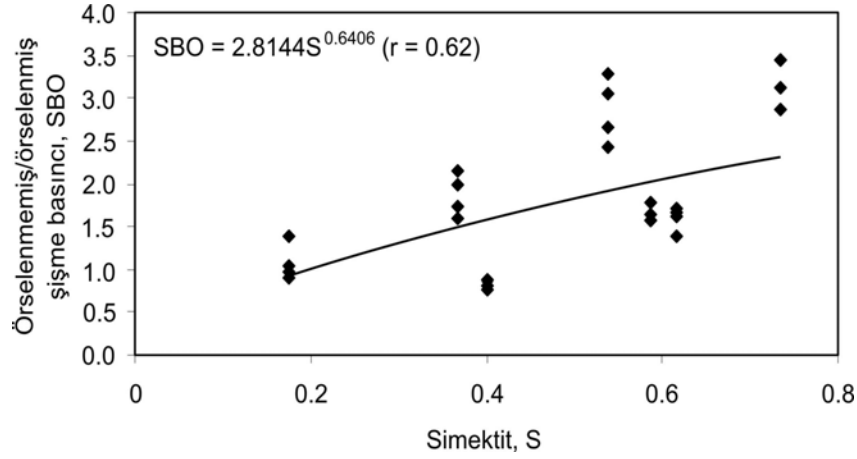
Şekil 6.11. Düşey yöndeki şişme basıncı (DYSB) ile ön yüklem basıncı ( $P_c$ ) ve simektit içeriği (S) arasındaki ilişki.



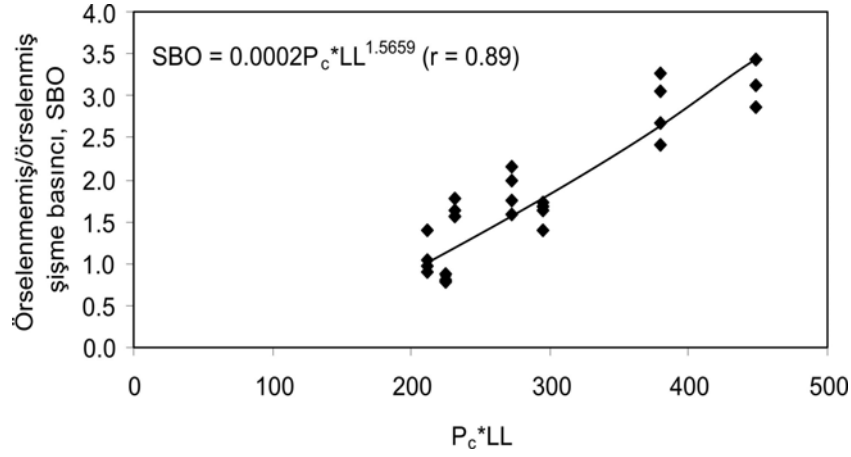
Şekil 6.12. Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran (SBO) ile ön yükleme basıncı ( $P_c$ ) arasındaki ilişki.



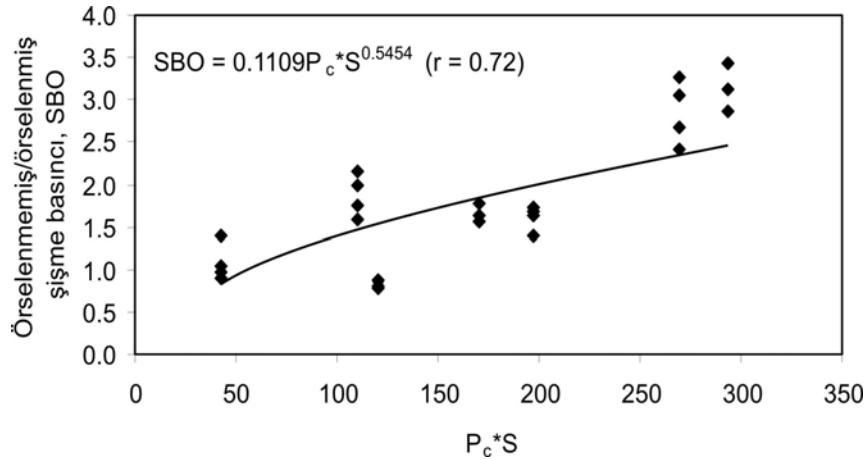
Şekil 6.13. Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran (SBO) ile likit limit (LL) arasındaki ilişki.



Şekil 6.14. Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran (SBO) ile simektit içeriği (S) arasındaki ilişki.



Şekil 6.15. Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran (SBO) ile ön yükleme basıncı ( $P_c$ ) ve likit limit (LL) arasındaki ilişki.



Şekil 6.16. Örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları arasındaki oran (SBO) ile ön yükleme basıncı ( $P_c$ ) ve simektit içeriği (S) arasındaki ilişki.

#### **6.4. Ankara Kilinin Mikro Yapısı ile Şişme Anizotropisi Arasındaki İlişkilerin Değerlendirilmesi**

Toprak zeminleri oluşturan tanelerin üzerlerine gelen yükler arttıkça bunlar biraraya gelirler ve buldukları ortamın koşullarına göre yeniden konumlanırlar (Lambe, 1958; Moon, 1972'den). Greene-Kelly and Macney (1970) ve Moon (1972), toprak zeminlerdeki kil tanelerinin zemin konsolide olmadan önce rastgele dizildiğini, daha sonra örtü yükü altında konsolidasyon süreciyle birlikte yapraklanma oluşturacak şekilde paralel dizilim gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Toprak zeminlerin bir çoğunun mühendislik parametreleri açısından anizotropik davranış gösterdiğini belirten Kirkpatrick and Rennie (1972), zeminlerin depolandıktan sonra zaman içinde farklı gerilme koşullarına maruz kaldıklarını ve çoğunlukla bu gerilmelerin izotrop olmadığını belirtmişlerdir.

Kirkpatrick and Rennie (1972), % 45 su içeriğine sahip ve sadece kaolin minerali içeren killi örnekler hazırlamışlar ve en yüksek 690 kPa olmak üzere bu örnekleri farklı basınçlar altında konsolide etmişlerdir. Araştırmacılar, konsolidasyon deneylerinde normal konsolide olan örneklerin konsolidasyon hücresinden çıkarılırken su alıp şişmesi nedeniyle, aşırı konsolide olmuş gibi düşünülebileceğini belirtmişlerdir. Kirkpatrick and Rennie (1972), konsolide ettikleri örneklerden konsolidasyon basıncının uygulandığı yöne dik ve paralel yönde olmak üzere 8 mm çaplı örnekler alarak, elektron mikroskopunda kil tanelerinin yönelimlerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, 550 kPa basınç altında izotropik konsolidasyona tabi tutulan örneklerden aldıkları yönlü örnekleri elektron mikroskopunda incelediklerinde kil tanelerinin herhangi bir yönlenme göstermediğini gözlemlemişlerdir. Yine 550 kPa altında, ancak tek yönde konsolide olmuş örneklerin elektron mikroskop incelemeleri sonucunda, yataydan bakıldığında tanelerin konsolidasyon basıncının uygulandığı yöne dik yönde yapraklanma gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca, tek yönlü konsolidasyona ve izotropik konsolidasyona tabi tutulan örneklerin makaslama dayanımı parametrelerinin ( $c$  ve  $\phi$ ) anizotropi göstermediğini, ancak konsolidasyon basıncının uygulandığı yöndeki sıkışabilirliğin buna dik yöndeki sıkışabilirlikten daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Clark and Gillott (1985), toprak zeminlerin depolanma sürecinin ve devamında uğradığı tarihsel gerilmelerin zeminin jeomekanik özelliklerini şekillendirdiğini, mühendislik açısından önemli olan parametrelerin anlamlı bir şekilde değerlendirilmesi ve verilerin güvenilirliğinin denetlenmesi için zeminin mikroyapısının incelenmesinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Clark and Gillott (1985), normal konsolide killi bir zeminden yönlü olarak aldıkları örselenmemiş örnekleri, mikro yapıyı belirlemek amacıyla elektron mikroskopunda incelemişlerdir. Araştırmacılar, kil tanelerinin tabakalanmaya dik yönde belirgin bir yönelme gösterdiğini ve bu nedenle zeminin anizotrop davrandığını belirtmişlerdir.

Yukarıdaki bilgiler gözönüne alındığında, Ankara kilindeki şişme anizotropisinin kilin mikro yapısıyla ilgili olabileceği düşünülmüş ve elektron mikroskopunda incelenmek üzere, örnekleme alanındaki her lokasyondan örselenmemiş örnekler alınmıştır. Örnekler kurutulduktan sonra temiz bozunmamış yüzeyler elde etmek için elle kırılmıştır. İncelenecek olan yüzeyler, Barden and Sides (1971) tarafından önerildiği gibi, yapışkan bantlar kullanılarak temizlenmiştir. Tüm örnekler, Zeiss EVO 50 EP taramalı elektron mikroskopunda (Scanning Electron Microscope, SEM) 100-200 Pa vakum altında kaplamasız olarak incelenmiştir. Şekil 6.17’de SEM için hazırlanan örneklerden üç tanesinin görüntüsü verilmiş olup, şekilde okla gösterilen yön arazideki düşey yönü göstermektedir. SEM’de tüm örneklerin bu yöne dik olan yatay yüzeyleri incelenmiştir (Şekil 6.17). Tüm lokasyonlara ait örneklerin SEM görüntüleri Şekil 6.18’de verilmiştir.

Toprak zeminlerdeki taneler çökeldikten sonra konsolidasyonla birlikte bir araya gelir ve yönleneren gruplar (domains) oluştururlar (Aylmore and Quirk, 1960). Sloane and Kell (1966), konsolidasyonla birlikte yönleneren gruplar oluşturan kil tanelerinin birbirlerine göre durumlarını elektron mikroskopunda incelemişler ve tanelerin yüzeylerinin birbirine yapıştığı (yüzey-yüzey temaslı) ve üst üste sıralandığı “kitap yapısı” (bookhouse) kavramını ortaya atmışlardır (Şekil 6.19). Smalley and Cabrera (1969) ise, tanelerin yüzey-yüzey temaslı olduğunu belirtmişler, ancak kitap yapısı kavramından farklı olarak “basamaklı yüzey-yüzey” (stepped face to face) yapısının var olduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 6.19). Bu

çalışmadaki SEM görüntüleri incelendiğinde (bkz. Şekil 6.18), kil tanelerinin basamaklı yüzey-yüzey yapısında dizildiği görülmektedir.

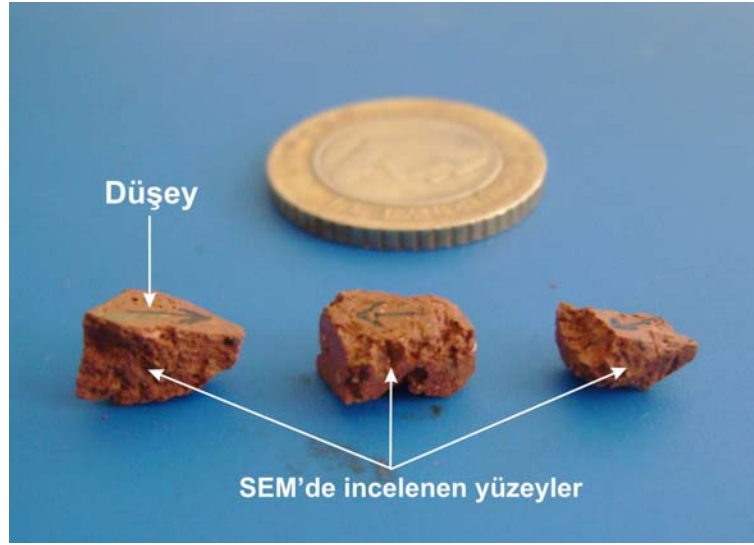
Collins ve McGovn (1974), toprak zeminin içerdiği taneler (silt ve/veya kum) ve kil minerallerinin birlikte oluşturduğu grupları sınıflandırmışlardır (Şekil 6.20). Bu sınıflandırmaya göre, Ankara kilinin mikro yapısı “birbirleriyle dokulu kil grubu” veya “silt içerikli birbirleriyle dokulu kil grubu”nun oluşturduğu dokulu guruba benzerlik göstermektedir (Şekil 6.20 g, h).

SEM görüntüleri incelendiğinde, 1 no.lu lokasyona ait örnekte yapraklanma düşey yöne paralelken, diğer örneklerdeki yapraklanma yatay veya yataya yakın açılardadır (Şekil 6.18). Kirkpatrick and Rannie (1972), 69 kPa gibi düşük konsolidasyon basınçları altında dahi tanelerin düzensiz dağılımdan konsolidasyon basıncına dik yönde yapraklanmaya geçiş gösterdiğini belirtmişlerdir. Ankara kili aşırı konsolide bir kil olup, bu çalışmada belirlenen ön yükleme basıncı değerleri 240 kPa ile 500 kPa arasında değişim göstermektedir. Yapraklanmanın yatay ve yataya yakın açılarda olması ön yükleme basıncından kaynaklanmaktadır.

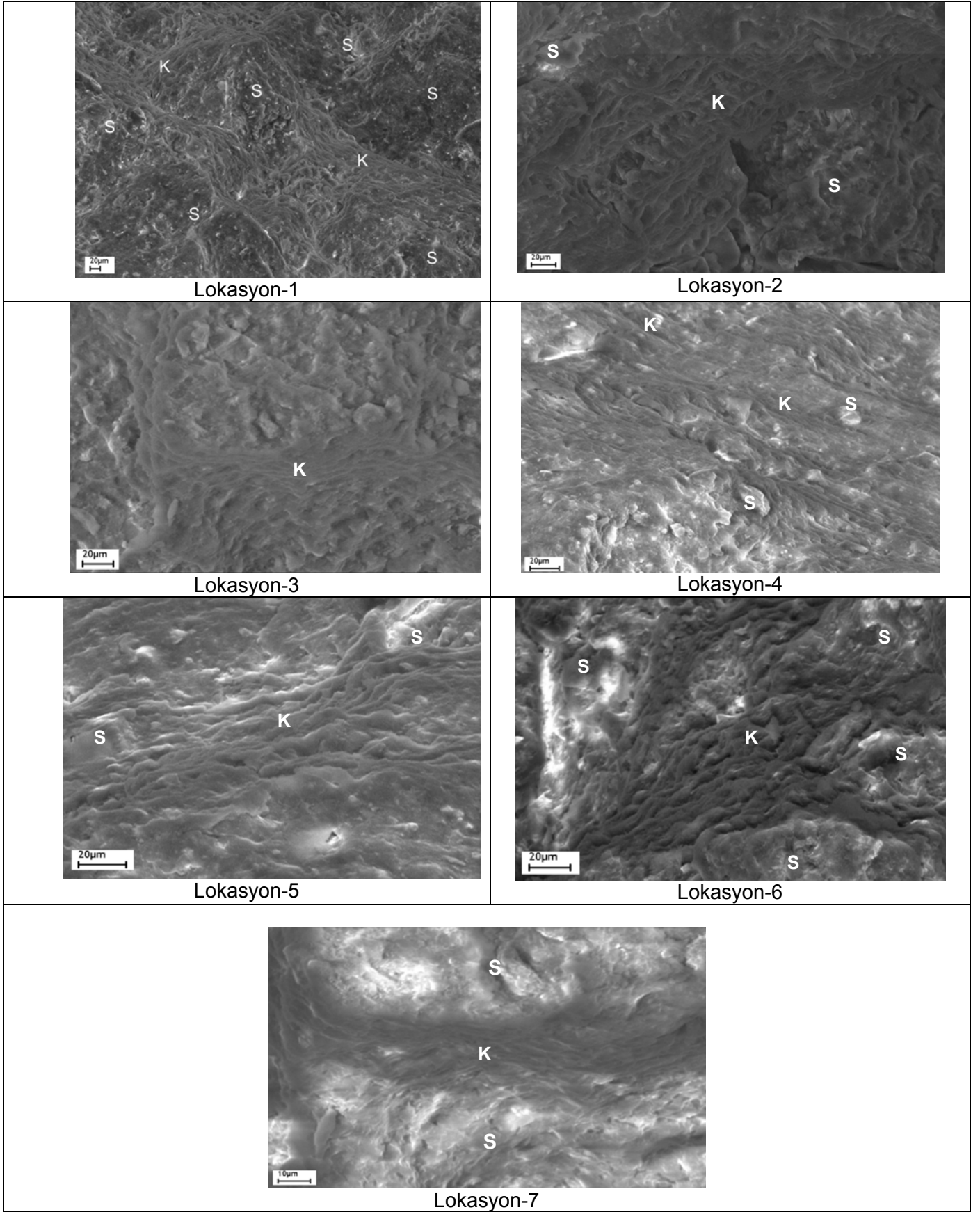
Chen and Huang (1987), toprak zeminlerde kil minerallerinin oluşturduğu yapraklanmanın yönüne dik yöndeki şişme basıncının, yapraklanmanın yönüne paralel olan yöndeki şişme basıncından daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Bu tez çalışmasında, yapraklanmanın yönüne dik yöndeki şişme düşey yöndeki şişme olup, daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, neredeyse tüm örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları yanal yöndeki şişme basınçlarından daha büyüktür (Çizelge 6.1). Sadece 1 no.lu lokasyona ait örneklerin klasik odometre deneyleri sonucunda elde edilen yanal yöndeki şişme basıncı düşey yöndeki şişme basıncından büyüktür (bkz. Çizelge 6.1). Bu lokasyondaki yapraklanmanın düşey yönde olması, yanal yöndeki şişme basıncının artmasına ve düşey yöndeki şişme basınçlarından daha büyük olmasına neden olmuş olabilir (Türkmenoğlu, 2007). Yine, önyükleme basıncının artmasıyla düşey yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesinin artmasının nedeni (Şekil 6.4 ve Şekil 6.5), önyükleme basıncının artmasına koşut olarak, yatay veya yataya yakın açılarda yapraklanma miktarının artması, buna bağlı olarak da düşey yöndeki şişme parametrelerinin yükselmesi olabilir. Bu konuda daha kesin sonuçlara ulaşmak için daha fazla sayıda örnek



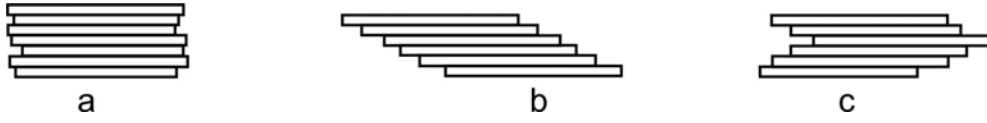
üzerinde SEM analizlerinin yapılması ve şişme parametrelerinin belirlenmesinde yarar vardır.



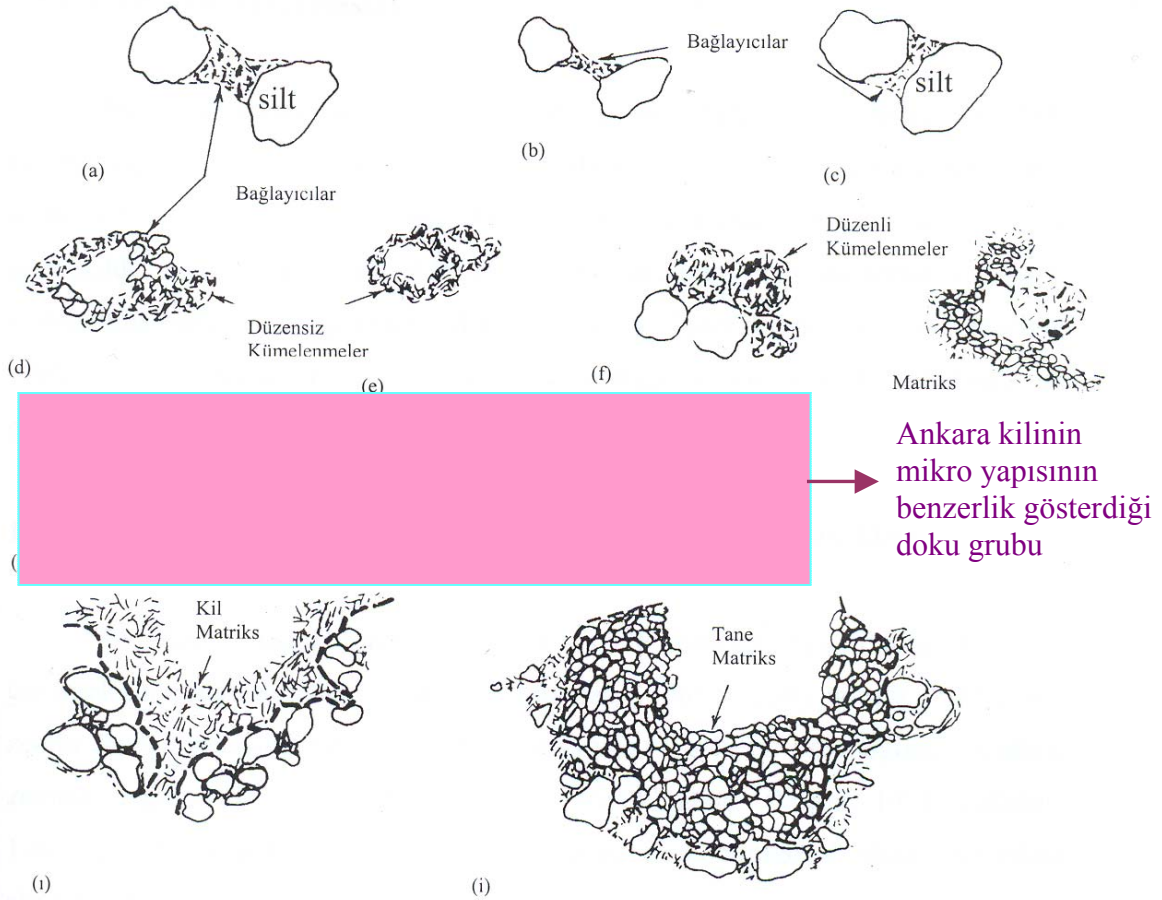
Şekil 6.17. SEM'de incelemek üzere hazırlanan örnekler ve görüntülerin alındığı yüzeyler.



Şekil 6.18. Çalışmada incelenen Ankara kili örneklerinin SEM görüntüleri (S:silt, K: kil).



Şekil 6.19. (a) Kitap yapısı, (Sloane and Kell; 1966), (b) ve (c) basamaklı yüzey-yüzey yapısı (Smalley and Cabrera, 1969).



Şekil 6.20. Tane gruplarının sistematik görünüşü: (a), (b), (c) birleştiriciler, (d) birleştirici grupları ile oluşmuş düzensiz kümelenme, (e) bal peteği yapısındaki düzensiz kümelenme, (f) tane hücresi ile ilgili düzenli kümelenme, (g) birbirleriyle dokulu kil grubu, (h) silt içerikli birbirleriyle dokulu kil grubu, (i) kil tanecikleri hücresi, (j) taneli zemin hücresi (Collins and McGovn, 1974'den).

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının amacı doğrultusunda, Ankara'nın güneybatı kesimindeki Yüzüncüyıl, Balgat, Öveçler ve Karakusunlar semtleri ile Eskişehir yolunun bir bölümü örnekleme alanı olarak seçilmiş ve bu alandan derlenen örneklerin yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametreleri (şişme basıncı ve şişme yüzdesi) ve ön yükleme basınçları belirlenmiş, Ankara kilindeki şişme anizotropisi değerlendirilmiş, kilin ön yükleme basıncı ile yanal ve düşey yöndeki şişme parametreleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Ayrıca, Ankara kilinin mikro yapısı incelenmiş ve kilin mikro yapısı ile şişme yöserliği arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- (1) Tüm örneklerin ince çeperli odometre halkası kullanılarak belirlenen düşey yöndeki şişme basınçlarının yanal yöndeki şişme basınçlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Klasik odometre deneyleri sonucunda ise, 1 no.lu lokasyondan alınan örnek dışında, yine tüm örneklerin düşey yöndeki şişme basınçlarının yanal yöndeki şişme basınçlarından daha büyük olduğu saptanmıştır. 1. nolu lokasyondan alınan örnekte kil tanelerinin gösterdiği yapraklanma düşey yöne paralel olduğu için, yanal yöndeki şişme daha yüksek değerlere sahiptir.
- (2) İnce çeperli odometre deneyleriyle yanal yöndeki şişme yüzdeleri belirlenemediğinden, klasik odometre deneyleri sonucunda belirlenen şişme yüzdesi değerleri birbirleriyle karşılaştırılmış ve 1 ve 2 no.lu yerlerden alınan örneklerin yanal ve düşey yöndeki şişme yüzdelerinin yaklaşık oldukları, diğer tüm örneklerin ise düşey yöndeki şişme yüzdelerinin yanal yöndeki şişme yüzdelerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir.
- (3) Tüm örneklerde yanal yöndeki şişme basıncının örnek doygun hale geldikçe artış göstererek doruk bir değere ulaştığı, daha sonra azalarak sabitlendiği gözlenmiştir. Yanal yöndeki şişme basınçlarındaki bu değişimin örnek doygun hale geldikçe tane

yönelimlerinin değişmesinden veya yanal yöndeki şişmenin ulaştığı doruk şişme basınçlarından itibaren düşey yöndeki şişme sınırlandırılmamış olduğundan örneğin artık düşey yöne doğru daha fazla şişmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünölmüştür.

- (4) Her iki deney yöntemiyle belirlenen düşey yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri uyum göstermektedir. Ancak, ince çeperli odometre deneylerinden farklı olarak, klasik odometre deneylerinde yanal yöndeki şişme basıncı belirlenirken düşey yöndeki şişme sınırlandırılmıştır. Bu sınırlama nedeniyle, aralarındaki farklar çok büyük olmamakla birlikte, klasik odometre deneylerinde yanal yöndeki şişme basınçları, ince çeperli odometre halkasıyla belirlenen değerlere göre daha büyük çıkmıştır.
- (5) İnce çeperli odometre halkasıyla yapılan deneyler sonucunda, örneklerin yanal yöndeki şişme basıncının düşey yöndeki şişme basıncına oranının (SR), 0.34 ile 0.98, klasik odometre deneyleri sonucunda ise 0.41 ile 1.10 arasında değişim gösterdiği saptanmıştır.
- (6) Ankara kili aşırı konsolide bir kil olup, alınan örneklerin ön yükleme basınçlarının 240 kPa (2.45 kg/cm<sup>2</sup>) ile 500 kPa (5.1 kg/cm<sup>2</sup>) arasında değişim gösterdiği saptanmıştır. Ön yükleme basıncı ile yanal ve düşey yöndeki şişme basınçları ve şişme yüzdeleri arasındaki ilişkilere göre, ön yükleme basıncının artmasına koşut olarak, düşey yöndeki şişme basıncının ve şişme yüzdesinin de artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Ön konsolidasyon basıncı ile yanal yöndeki şişme parametreleri arasında ise anlamlı bir ilişkinin olmadığı görölmüştür. Bu durumda şişme davranışı açısından ön yükleme basıncının önem arzedebileceği dikkate alınmalıdır.
- (7) Simektit içeriği ile düşey yöndeki şişme basıncı arasında yüksek korelasyon katsayısına (0.83) sahip bir ilişki elde edilmiş olup, simektit içeriğinin artmasına koşut olarak şişme basıncının arttığı

belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, simektit içeriği, likit limit ve ön yükleme basıncının düşey yöndeki şişme basıncını etkilediği saptanmıştır.

(8) Ön yükleme basıncının artmasına koşul olarak, düşey yöndeki şişme basıncı oranlarının arttığı da belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, örselenmemiş ve örselenmiş örneklerin şişme basıncı oranları ile ön yükleme basıncı, simektit içeriği ve likit limit ile birlikte değerlendirilmiş ve daha yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler elde edilmiştir.

(9) Kil tanelerinin yatay veya yataya yakın yapraklanma gösterdiği ve basamaklı yüzey-yüzey yapısında olduğu belirlenmiştir. Yapraklanmanın yatay ve/veya yataya yakın açılarda olmasının ön yükleme basıncından kaynaklanmış olabileceği düşünülmüştür. Yapraklanma yönüne dik yöndeki şişme düşey yöndeki şişme olup, neredeyse tüm örneklerin düşey yöndeki şişme basınçları yanal yöndeki şişme basınçlarından daha büyüktür. Killi zeminlerin mikro yapısının şişme davranışıyla yakından ilişkili olduğu anlaşılmıştır.

Yukarıda belirtilen sonuçlar çerçevesinde Ankara kilinde veya bunun dışındaki toprak zeminlerde şişme anizotropisi ile ilgili yapılacak olan çalışmalar açısından aşağıdaki hususlar önerilmiştir.

(a) Ön yükleme basıncının artmasıyla kil tanelerinin yatay veya yataya yakın açılarda yapraklanma göstermesi ve yatay yapraklanmaya koşul olarak düşey yöndeki şişme basıncı ve şişme yüzdesinin arttığı düşünülebilir. Ancak, bu konuda daha kesin ve ayrıntılı sonuçlara ulaşmak için daha fazla sayıda örnek üzerinde SEM analizlerinin yapılması ve şişme parametrelerinin belirlenmesi önerilir.

(b) Klasik odometre deneylerinde yanal ve düşey yönlerdeki şişme parametreleri yönlü olarak alınmış örneklerle iki ayrı deney yapılarak belirlenirken, ince çeperli odometre halkasıyla yapılan deneylerde her iki

yöndeki şişme parametreleri tek bir örneğin deneye tabi tutulmasıyla belirlenebilmektedir. Bu nedenle, şişme anizotropisinin veya yanal yöndeki şişme basınçlarının araştırıldığı çalışmalarda ince çeperli odometre halkasının tercih edilmesi önerilir.

- (c) Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında, Ankara kilinde veya şişme davranışı gösteren killi zeminlerde yüzeyde veya sığ derinliklerdeki hafif yapıları etkileyen yanal ve düşey yöndeki şişme basınçları dikkate alınmalıdır.
- (d) Ankara kilinin maruz kaldığı yüksek ön yükleme basıncının nedeni, mevcut zemin mekaniği çalışmalarının yanı sıra, jeolojik ve mikroyapıya yönelik araştırmalar da yapılarak daha ayrıntılı şekilde aydınlatılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abduljawad, S.N., 1993. Study on the performance of calcareous expansive clay. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 4, 481-498.
- Abduljawad, S. N., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., and Al-Burain, I., 2000. Laboratory and field studies of response of structures to heave of expansive clay. Geotechnique, 50 (2), 197-198.
- Al-Homoud, A.S., and Al-Suleiman, T.I., 1997. Loss in serviceability of pavements due to expansive clay subgrades. Environmental and Engineering Geosciences, III(1), 277-294.
- Al-Rawas, A.A., 1999. The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of northern Oman. Engineering Geology, 53, 327-350.
- Al-Shamrani, M. A., and Dhowian, A. W., 2003. Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave of expansive soils. Engineering Geology, 69, 63-81.
- Aras, İ. A., 1991. Clay mineralogy and sedimentological features of the late Pliocene sediments in Ankara area. MSc Thesis, METU, Ankara, 79 p (yayımlanmamış).
- ASTM, 1972. Inorganic index to the powder diffraction file: Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Pennsylvania, 1432 p.
- ASTM, 2000. Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Section-4, Construction, V. 04.08, ASTM Publication, 972 p.
- Avşar, E., 2003. Karbonat yumrularının Ankara kilinin şişme özelliklerine etkisi: Beytepe Kampüsü örneği. Bitirme Projesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, 72 s (yayımlanmamış).
- Avşar, E., Ulusay, R., and Ergüler, Z.A., 2005. Swelling properties of Ankara (Turkey) clay with carbonate concretions. Environmental and Engineering Geosciences, 11 (1), 73-93.
- Aylmore, L.A.G., and Quirk, J.P., 1960. Domain or turbostratic structure of clays. Nature, 187, 1046-1048.
- Bailey, E. B., and Maccallien, W. J., 1953. Serpentine lavas, Ankara melange and the Anatolian thrust. Transactions Royal Society Edinburgh, 62, 2, 403-422.
- Barden, L., and Sides, G., 1971. Sample disturbance in the investigation of clay structure. Geotechnique, 21 (3), 211-222.
- Basma, A.A., 1991. Estimating uplift of foundations due to expansion: A case history. Geotechnical Engineering, 22, 217-231.



- Basma, A. A., Al-Homoud, A. S., and Husein, A., 1995. Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Applied Clay Science*, 9, 355-368.
- Bell, F.G., and Maud, R.R., 1995. Expansive clay and construction, especially of low - rise structure: A viewpoint from Natal, South Africa. *Environmental and Engineering Geosciences*, I(1), 41-59.
- Birand, A.A., 1978. Ankara yöresi zeminleri ve jeoteknik sorunlar. Türkiye Jeoloji Kurumu Yerbilimleri Açısından Ankara'nın Sorunları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 55-60.
- Bishop, A. W., and Henkel, D. J., 1962. The measurement of soil properties in the triaxial test. Edward Arnold Ltd., London, United Kingdom, 247 p.
- Bishop, A.W., and Wesley, L.D., 1975. A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique*, 25, 657-670.
- Brackley, I.J.A., and Sanders, P.J., 1992. In situ measurement of total natural horizontal stresses in expansive clay. *Geotechnique*, 42 (2), 443-451.
- Clark, J.I., and Gillott, J.E., 1985. The role of composition and fabric of soils in selected geotechnical engineering case histories. *Applied Clay Science*, 1, 173-191.
- Chen, F.H., and Huang, D., 1987. Lateral expansion pressure on basement walls. In: *Proceedings of the 6th International Conference Expansive Soils*, New Delhi, Vol. 1, 55-59.
- Collins, K., and McGown, A., 1974. The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Geotechnique*, 24 (2), 234-254.
- Çetinkaya, A.S., 1978. Preconsolidation Pressure and its Effects on Some Properties of METU Campus Clay. MSc Thesis, METU, Civil Engineering Department, Ankara, 157 p (yayımlanmamış).
- Çokça, E., 1991. Swelling Potential of Expansive Soils with A Critical Appraisal of the Identification of Swelling of Ankara Soils by Methylene Blue Tests. PhD Thesis, METU, 323 p (yayımlanmamış).
- Çokça, E., and Birand, A.A., 1993. Prediction of swelling potential of Ankara soils by methylene blue test. *Doğa -Tr.J. of Engineering and Environmental Sciences*, 17, 57-63.
- Day, R.W., 1998. Swelling behavior of desiccated clay. *Environmental and Engineering Geosciences*, IV(1), 124-129.
- Doruk, M., 1968. Swelling Properties of Clays on the METU Campus. MSc Thesis, METU, Civil Engng. Department, 46p (yayımlanmamış).

- Dwahan, P.K., Mathur, R., Lal, N.B., 1982. Effects of Lateral confinement on swell pressure in expansive soils. Highway Bulletin, 17, 49-60.
- Edil, T. B., and Alanazy, A. S., 1992. Lateral swelling pressure. 7th International Conference on Expansive Soils, Dallas, USA, pp. 227-232.
- El-Sohby, M. A., and Rabba, E. A., 1981. Some factors affecting swelling of clayey soils. Geotechnical Engineering, 12, 19-39.
- Ergüler, Z.A., 2001. Ankara Kilinin Şişme Davranışının ve Örselenmenin Şişmeye Etkisinin İncelenmesi, Şişme Potansiyelinin Görgül Yaklaşımlarla Belirlenmesi. Yüksek Mühendislik Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 125 s (yayımlanmamış).
- Ergüler, Z.A., and Ulusay, R., 2003a. A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey). Engineering Geology, 67, 331-352.
- Ergüler, Z. A., and Ulusay, R., 2003b. Engineering characteristics and environmental impacts of the expansive Ankara Clay, and swelling maps for SW and central parts of the Ankara (Turkey) metropolitan area. Environmental Geology, 44, 979-992.
- Erol, O., 1954. Ankara ve civarının jeolojisi hakkında rapor. MTA Enstitüsü Bilimsel Dökümantasyon Şubesi, Derleme No: 2491, 238 s (yayımlanmamış).
- Erol, O., Yurdakul, E., Algan, Ü., Gürel, N., Herece, E., Tekirli, E., Ünsal, Y. ve Yüksel, M., 1980. Ankara metropoliten arazi kullanım haritası. MTA Genel Müdürlüğü Raporu, 99 s (yayımlanmamış).
- Ertekin, Y., 1991. Measurement of lateral swell pressure with thin wall oedometer technique. MSc Thesis, METU Civil Engineering Department, 112 p (yayımlanmamış).
- Fourie, A. B., 1989. Laboratory evaluation of lateral swelling pressure. Journal of Geotechnical Engineering, 115 (10), 1481-1486.
- Furtun, U., 1989. An Investigation on Ankara Soils with Regard to Swelling. MSc. Thesis, METU, Civil Engineering Department, Ankara, 151 p (yayımlanmamış).
- Gökçen, S. L., 1976. Haymana güneyinin sedimantolojik incelenmesi (SW Ankara). Doçentlik Tezi, H.Ü, Yerbilimleri Enstitüsü, Ankara, 192 s (yayımlanmamış).
- Greene-Kelly, R., and Macney, D., 1970. Preferred orientation of clay in soils: the effect of drying and wetting. Micromorphological Techniques and Applications Soil Survey Technical Monograph, 2, 43-52.

- Gündoğdu, M. N., 1982. Neojen yaşlı Bigadiç sedimater baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Enstitüsü, 386 s (yayımlanmamış).
- Hatipoğlu, Ü., 1993. Lateral pressure in expansive soils. MSc Thesis, METU, Civil Engineering Department, Ankara, 98 p (yayımlanmamış).
- Joshi, R. P., and Katti, R. K., 1984. Lateral pressure development under surcharges. Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, South Africa, 227-241.
- Kasapoğlu, K.E., 1980. Ankara kenti zeminlerinin jeo-mühendislik özellikleri, Doçentlik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Enstitüsü, Ankara, 206 s (yayımlanmamış).
- Kassif, G., and Zeitlen, J. G., 1962. Behaviour of pipes buried in expansive clays. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division ASCE, 88(2), 133-148.
- Kiper, O. B., 1983. Etimesgut-Batıkent Yöresindeki Üst Pliyosen Çökellerinin Jeo-Mühendislik Özellikleri ve Konsolidasyonu. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, 160 s (yayımlanmamış).
- Kirkpatrick, W. M., and Rennie, I.A., 1973. Directional properties of consolidated kaolin. Geotechnique, 22, 166-169.
- Koçyiğit, A., 1987. Hasanoğlan (Ankara) yöresinin tektono-stratigrafisi: Karakaya orojenik kuşağının evrimi. Yerbilimleri Dergisi, 14, 269-293.
- Koçyiğit, A., and Türkmenoğlu, A., 1991. Geology and mineralogy of the so-called Ankara Clay formation: a geologic approach to the Ankara Clay problem. Proceedings of the 5th National Symposium on Clay, Anadolu University, Eskişehir, pp. 112-125.
- Kollaros, G.A., and Athanasopoulou, A.D., 1997. The character and identification of swelling soils in road construction projects. Engineering Geology and the Environment, 187-192.
- Komornik, A., and Zeitlen, J.G. (1965). An apparatus for measuring lateral soil swelling pressure in the laboratory. Proceedings of the 6th International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 278-281.
- Michel, J. C., Beaumont, A., and Tessier, D., 2000. A laboratory method for measuring the isotropic character of soil swelling. European Journal of Soil Science, 51, 689-697.
- Moon, C. F., 1972. The microstructure of clay sediments. Earth-Science Reviews, 8, 303-321.

- Ofer, Z., 1980. Instruments for laboratory and in-situ measurement of the lateral swelling pressure of expansive clays. Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, American Society for Civil Engineers, Vol.1, 45-53.
- Parcher, J. V., and Liu P. C., 1965. Some swelling characteristics of compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 91 (3), 1-17.
- Sapaz, B., 2004. Lateral versus vertical swell pressures in expansive soils. MSc Thesis, METU Civil Engineering Department, 109 p (yayımlanmamış).
- Shenglin, L., and Yanjun, D., 1997. On the swelling-shrinkage properties and mechanism of compacted expansive soils. Proceedings of the 30th International Geology Congress, Vol. 23, 253-259.
- Shiming, H., 1984. An experimental apparatus for three-dimensional soil expansion. Proceedings of the 8th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harare, pp. 139-142.
- Skempton, A. W., 1953. The colloidal activity of clays. Proceedings of the 3th International Conference on Soil Mechanics, Zurich, Vol. 1, 57-61.
- Sloane, R. L., and Kell, T. F., 1966. The fabric of mechanically compacted kaolin. Proceedings of the National Conference on Clays and Clay Minerals, Berkeley, California, Vol. 14, 289-296.
- Smalley, I.J., and Cabrera, J.G., 1969. Particle association in compacted kaolinite. Nature, 222, 80-81.
- Terzaghi, K., and Peck, R.B., 1967. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, New York, 729 p.
- Tonoz, M. C., 2001. Killi zeminlerin kireçle stabilizasyonu: Ankara kilinde indeks, şişme ve dayanım özellikleri açısından bir inceleme. Yüksek Mühendislik Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 82 s (yayımlanmamış).
- Türkmenoğlu, A., 2007. Sözlü görüşme. ODTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Ulusay, R., 1975. Ankara Kenti Kuzey-Orta Bölgesinin Geo-Mühendislik Özellikleri. Yüksek Mühendislik Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, 81 s (yayımlanmamış).
- U.S. Interior Bureau of Reclamation, 1974. Earth Manual. A Water Resources Technical Publication, Denver, 810 p.
- Üner, A. K., 1977. A Comparison of Engineering Properties of Two Soil Types in the Ankara Region. MSc Thesis, METU, Civil Engineering Department, Ankara, 112 p (yayımlanmamış).

- William, E., and Airey, D., 1999. Influence of swelling strain on selected engineering properties of Bringelly shale at Southwest Region of Sydney, Australia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 4, 245-259.
- Windal, T., and Shahrour, I., 2002. Study of swelling behavior of a compacted soil using flexible odometer. *Mechanics Research Communications*, 29, 375-382.
- Yüncü, H., 1972. An Investigation of Volume Change of Ankara Clay. MSc Thesis, METU, Civil Engineering Department, 52 p (yayımlanmamış).

## **ÖZGEÇMİŞ**

**DOĞUM YERİ ve TARİHİ** : Ankara, 1981

**MEDENİ HALİ** : Bekar

### **EĞİTİM DURUMU :**

Lise (1995 -1999) : Dikmen Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)

Lisans (1999 - 2003) : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

**YABANCI DİL:** İngilizce

### **İŞ TECRÜBESİ:**

Ocak 2004 – Şubat 2005 : S.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

Şubat 2005- : H.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

### **ÜYESİ OLDUĞU ULUSAL VE ULUSLARARASI MESLEKİ KURULUŞLAR:**

-TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (2003- )

-Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi (2006- )

### **ALDIĞI ÖDÜLLER:**

Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bitirme Ödevi Dalında ERGUVANLI Ödülü

### **KULLANABİLDİĞİ BİLGİSAYAR PROGRAMLARI** : Office 2000 programları

( Word, Excel, PowerPoint), CorelDRAW, Surfer (Win32), Statgraphics Plus 3.0.

### **YAYINLAR:**

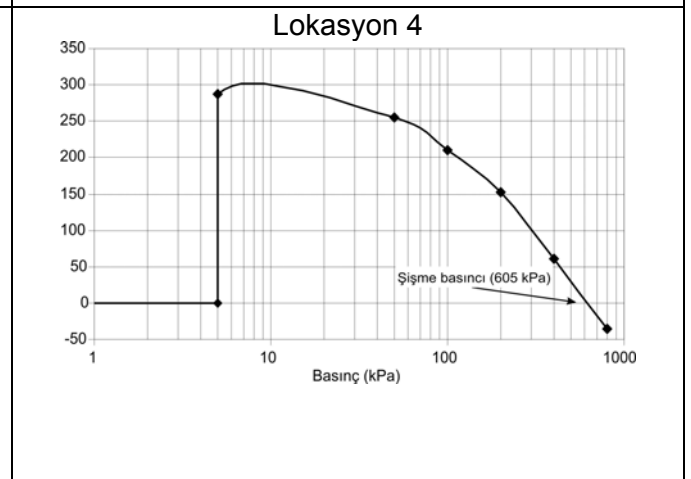
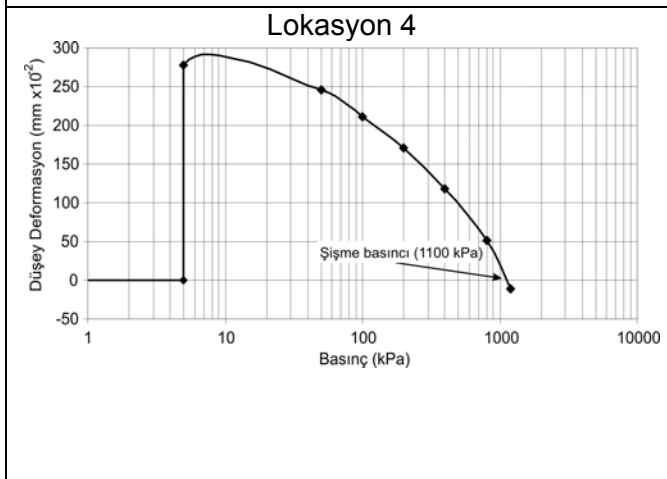
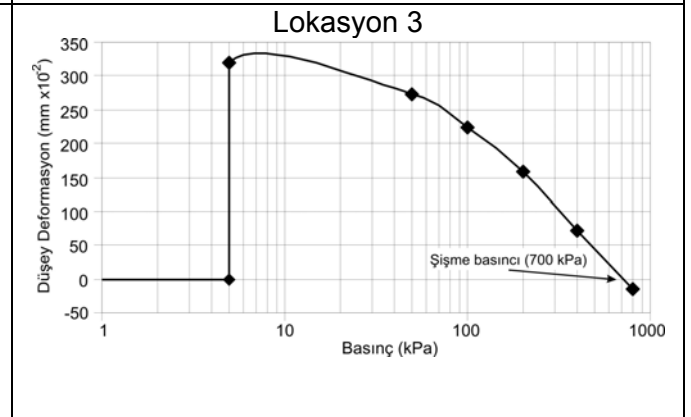
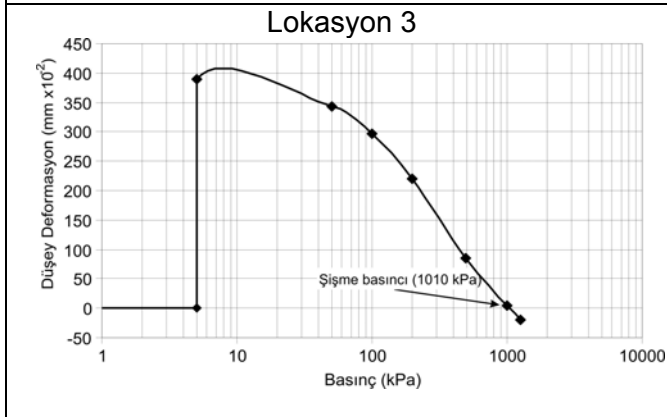
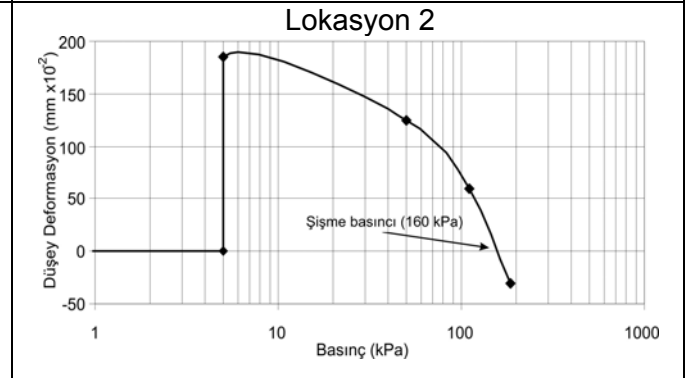
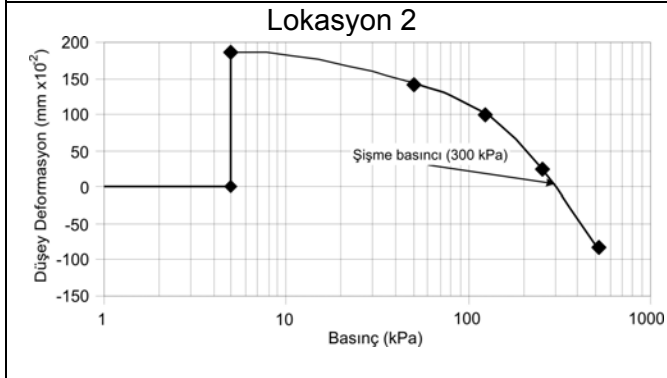
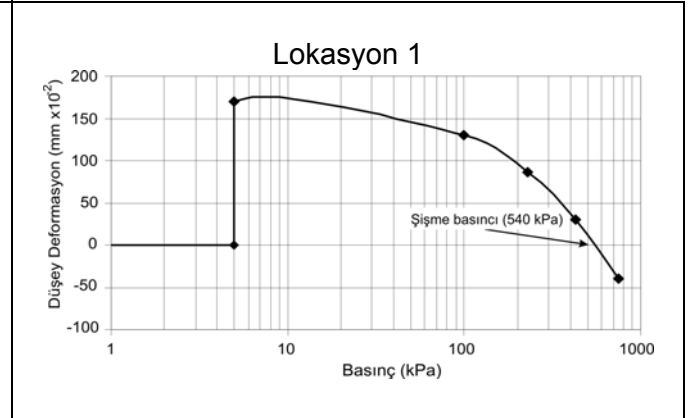
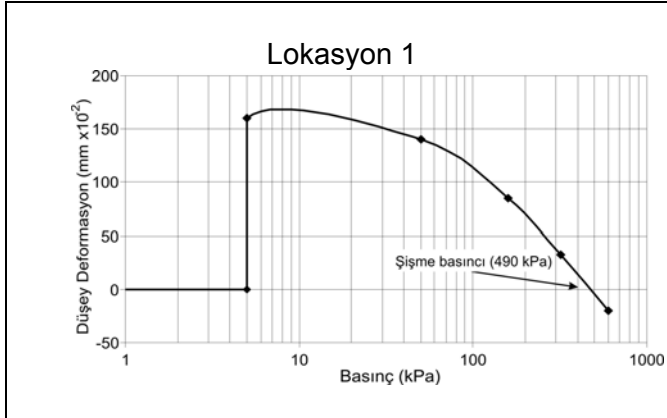
Avşar, E., Ulusay, R., and Ergüler, Z.A., 2005. Swelling properties of Ankara (Turkey) clay with carbonate concretions. Environmental and Engineering Geosciences, 11 (1), 73-93.

**EKLER**

EK 1. Klasik odometre deneyine tabi tutulan örselenmemiş yönlü örneklerin “düşey deformasyon-basınç” grafikleri.

Düşey yönde alınan örnekler

Yanal yönde alınan örnekler

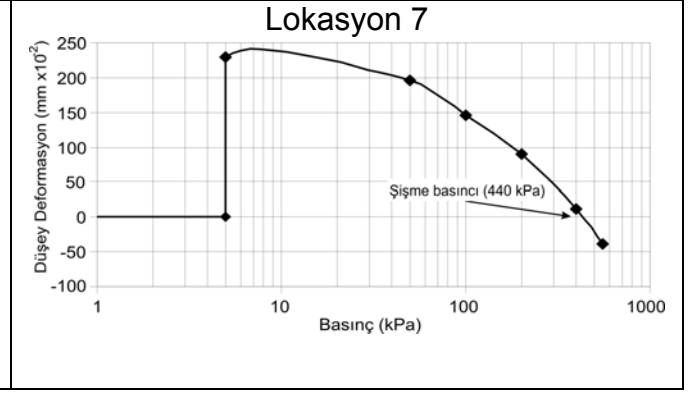
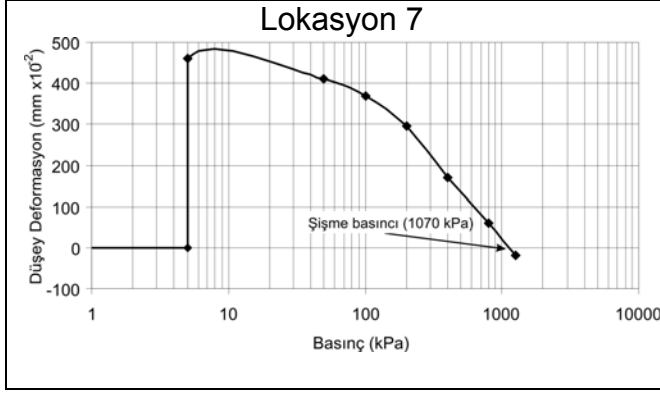
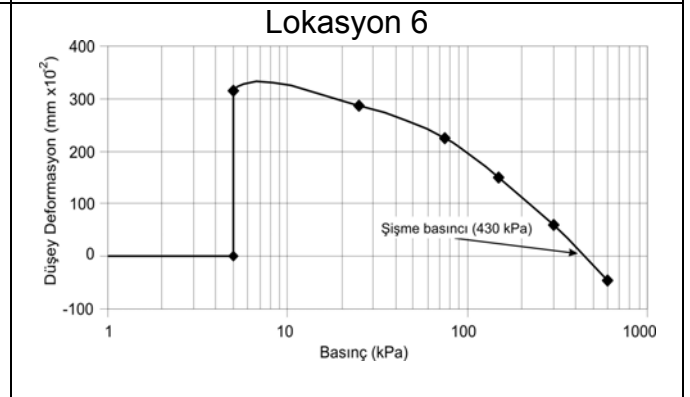
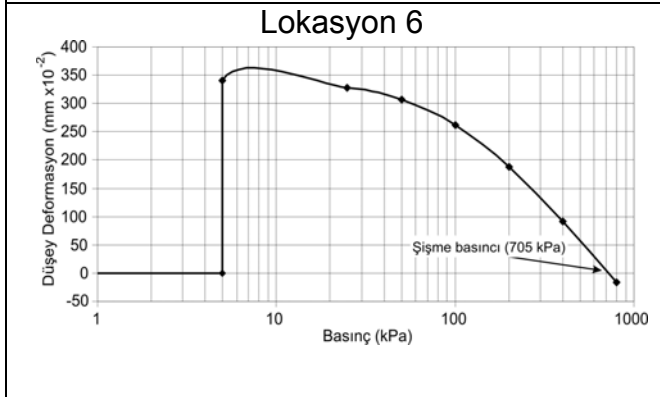
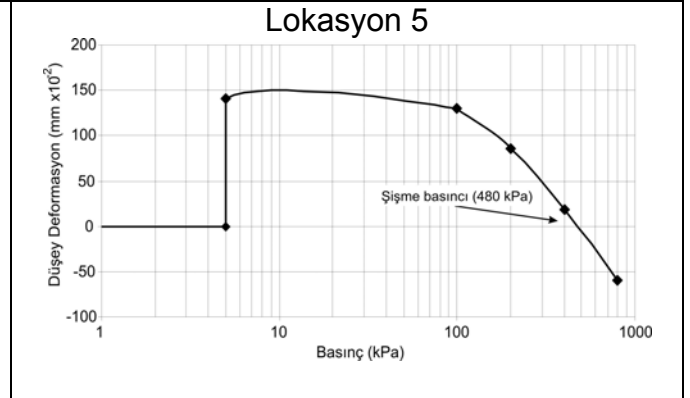
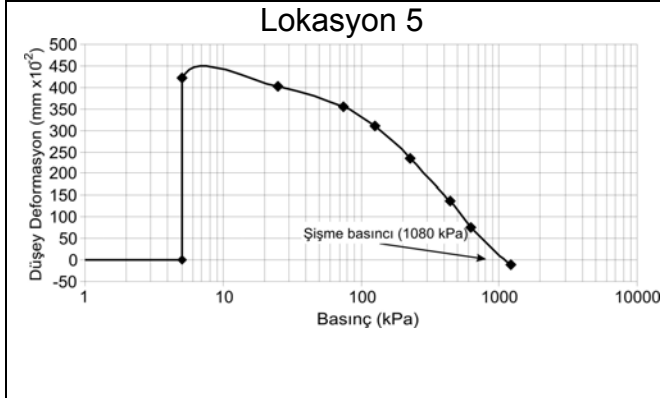




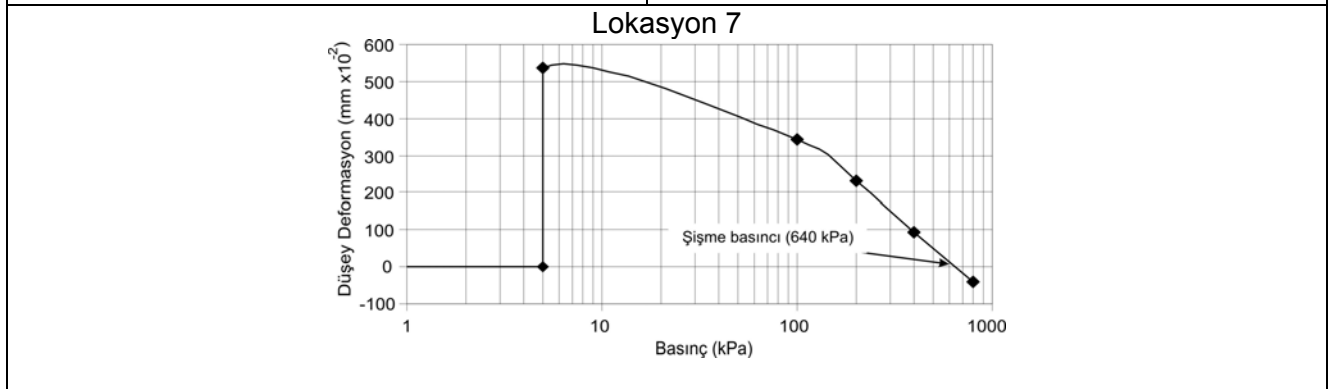
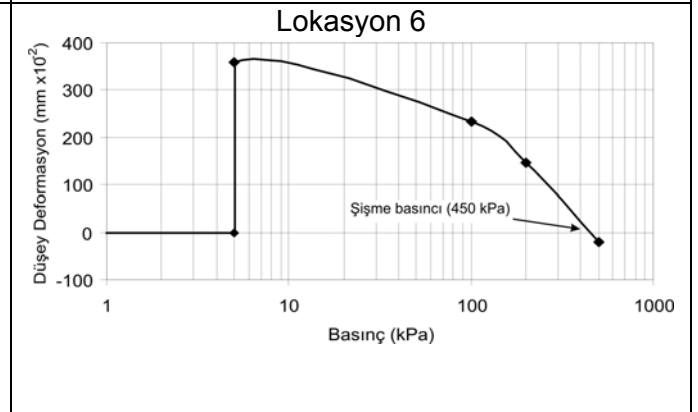
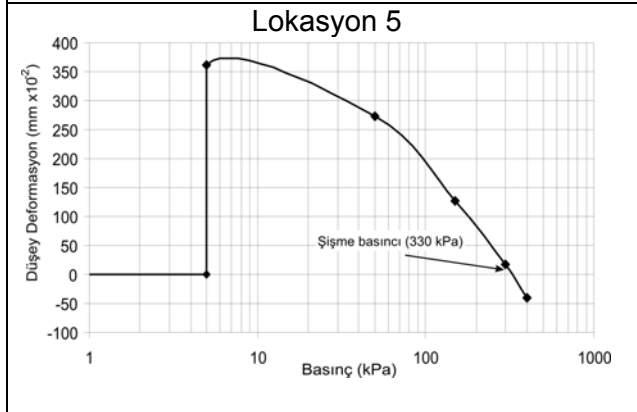
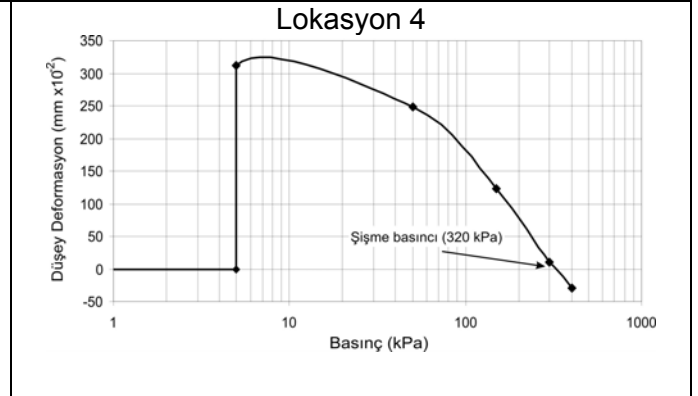
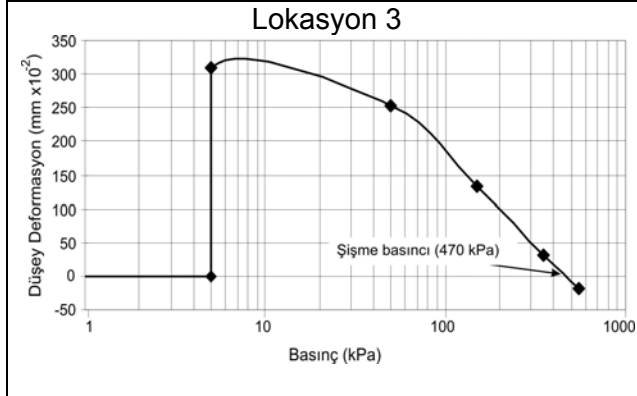
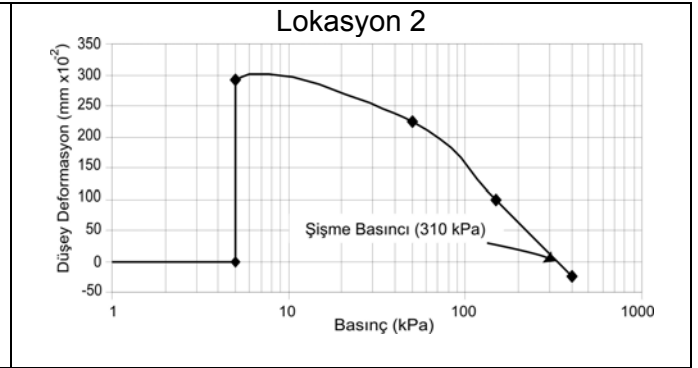
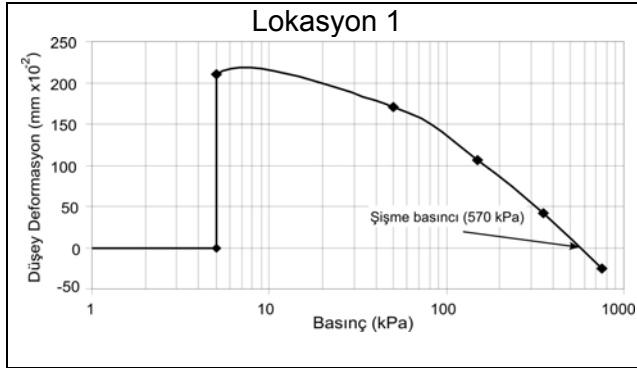
EK 1. Devam ediyor.

### Düsey yönde alınan örnekler

### Yanal yönde alınan örnekler

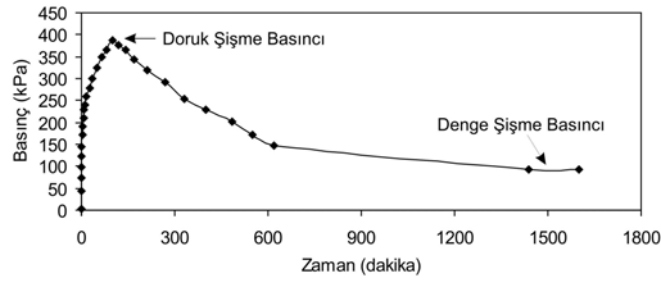
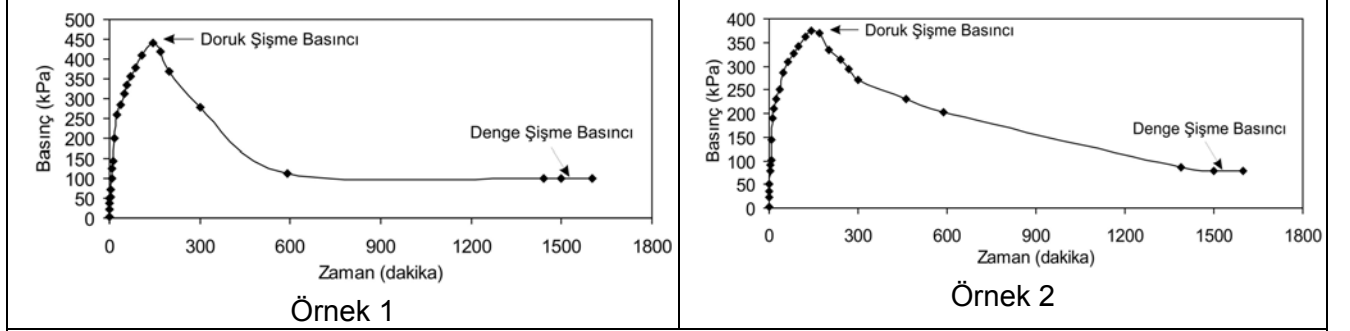


EK 2. Klasik odometre deneyine tabi tutulan örselenmiş örneklerin “düşey deformasyon-basınç” grafikleri.

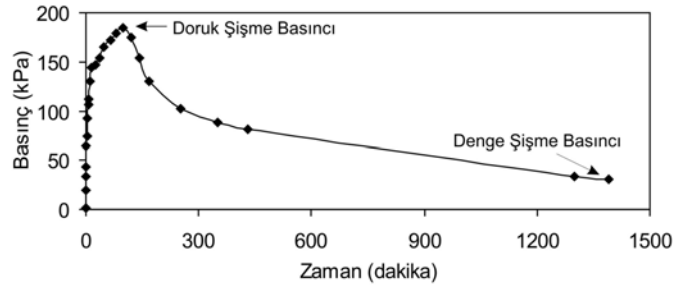
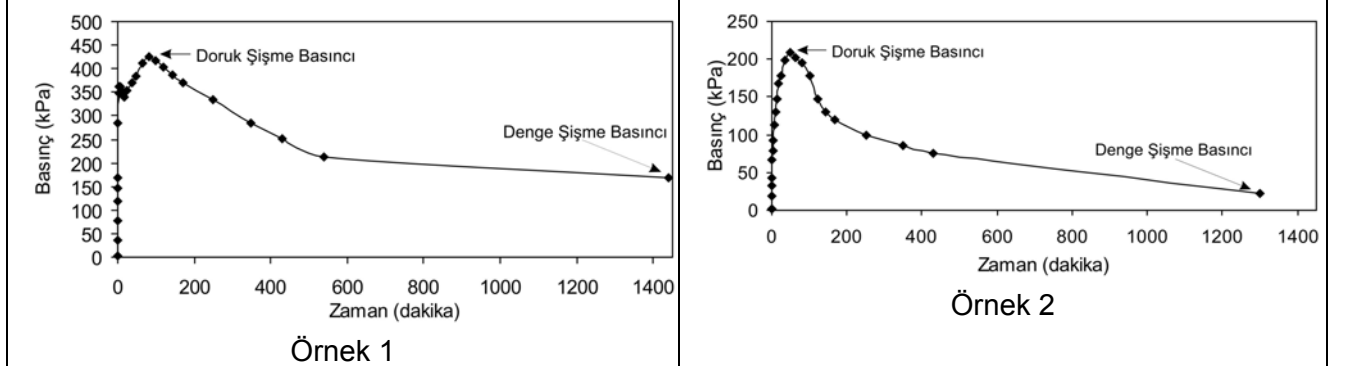


EK 3. İnce çepirli odometre deneyine tabi tutulan tüm örneklerin “yanal basınç- zaman” grafikleri.

Lokasyon 1

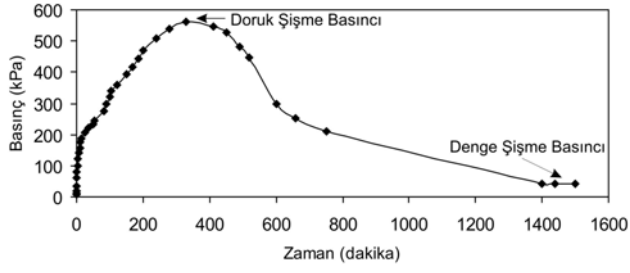


Lokasyon 2

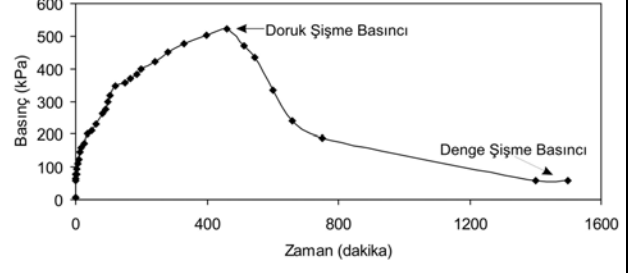


EK 3. Devam ediyor.

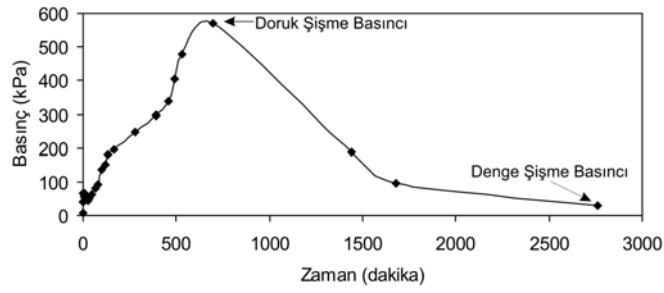
### Lokasyon 3



Örnek 1

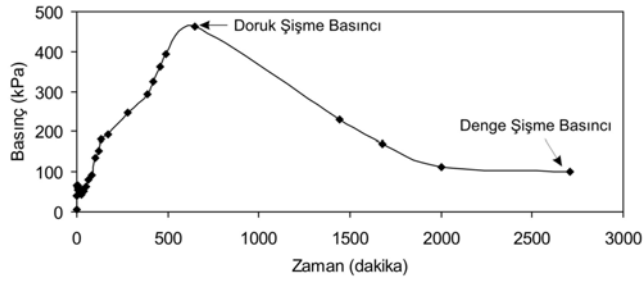


Örnek 2

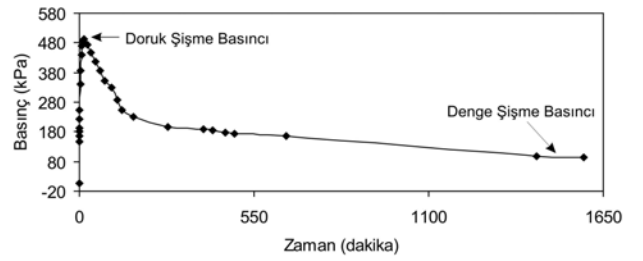


Örnek 3

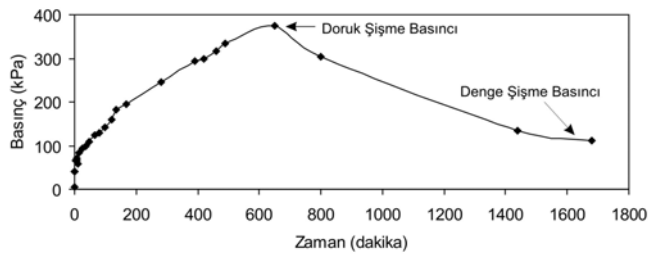
### Lokasyon 4



Örnek 1



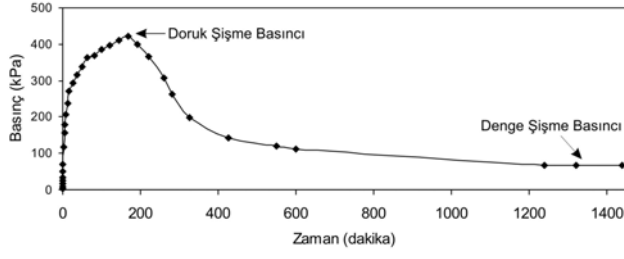
Örnek 2



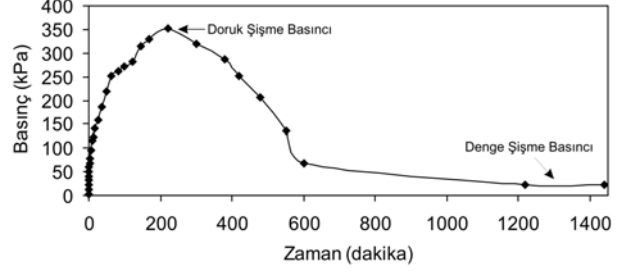
Örnek 3

### EK 3. Devam ediyor

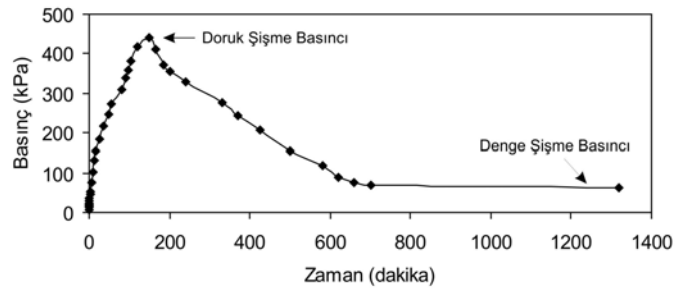
#### Lokasyon 5



Örnek 1

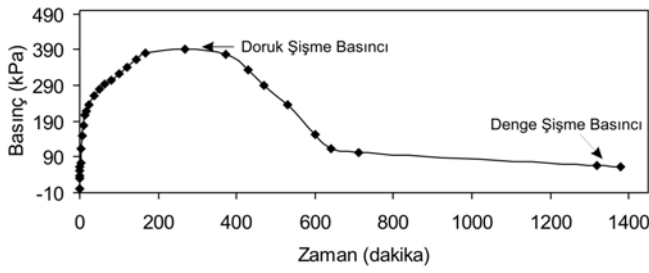


Örnek 2

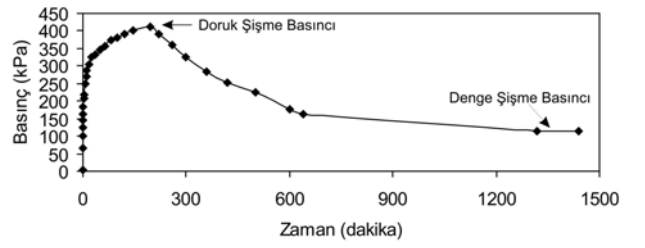


Örnek 3

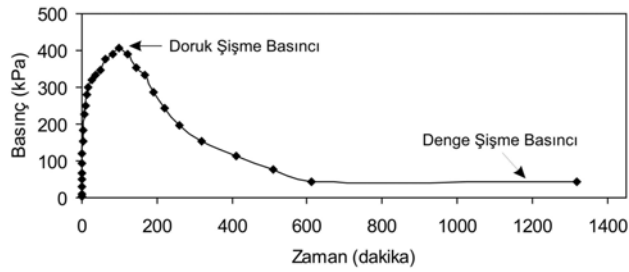
#### Lokasyon 6



Örnek 1



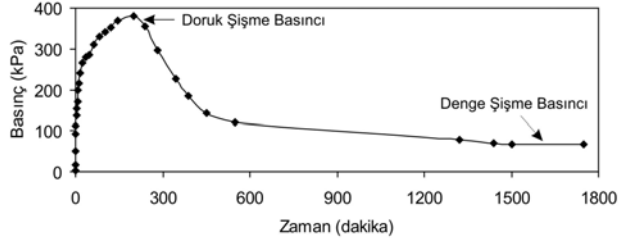
Örnek 2



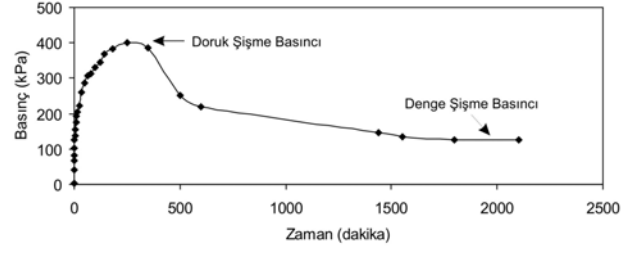
Örnek 3

EK 3. Devam ediyor.

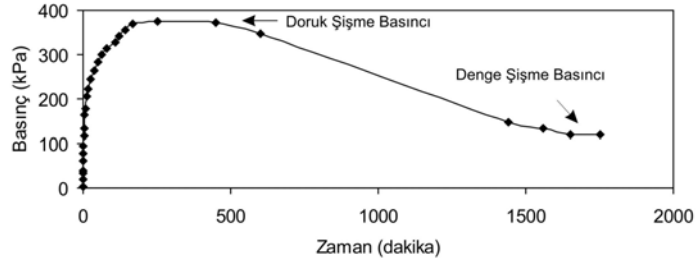
### Lokasyon 7



Örnek 1



Örnek 2



Örnek 3