

47019

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NORMAL KONSOLİDE KİLLERDE  
GERİLME BOŞALMASININ GEOTEKNİK  
PARAMETRELERE ETKİLERİ

İnş.Müh. Havvanur DEMİR (KILIÇ)

F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında Hazırlanan  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Sönmez YILDIRIM

YÜKSEKÖĞRETİM KURUMU  
T.C. ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MANTASYON MERKEZİ

İstanbul, 1995

## ÖNSÖZ

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin, araziden numune alınarak laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Araziden numune alma işlemi sırasında ve sonrasında kaçınılmaz bir etki olarak karşılaşılan “gerilme örselenmesi” nedeniyle arazideki zemin davranışı ile laboratuvara taşınan numunelerin davranışı arasında büyük farklar olmaktadır. Bu nedenle zeminlerin mühendislik özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenirken arazideki zemin davranışı laboratuvarda örneklenmelidir.

Gerilme boşalmasının geoteknik parametreler üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada; laboratuvarda, çamur konsolidemetre aygıtında normal konsolide olarak hazırlanan gerilme tarihçesi belirli homojen numuneler kullanılmıştır. Gerilme boşalmasının drenajsız zemin davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek ve arazideki zemin davranışını laboratuvarda örnekleyebilmek için tekrar konsolidasyon yönteminin uygulandığı III seri üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

Çalışmalarımız sırasında teknik ve idari konulardaki yardımlarını esirgemeyen proje danışmanım Doç.Dr. Sayın Sönmez YILDIRIM’a, değerli ilgileri nedeniyle Prof.Dr. Sayın İ. Kutay ÖZAYDIN’a, laboratuvar çalışmalarına katkıları nedeniyle Arş.Gör. Sayın M. Şükrü ÖZÇOBAN’a, Arş.Gör. Sayın Mehmet BERİLGİN’e, Arş.Gör. Sayın Cem AKGÜNER’e, Eşim Sezgin KILIÇ’a, laboratuvar görevlileri teknisyen Erhan EROL’a ve Turan ANDIÇ’e, ayrıca konsolidemetrenin imalatını gerçekleştiren Doğu İnşaat Gurubuna ve emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

## **İÇİNDEKİLER**

ÖZET.....	XI
SUMMARY.....	XII
BÖLÜM.....	1
1. GİRİŞ.....	1
2. Gerilme Boşalmasının Geoteknik Parametreler Üzerindeki Etkileri Konusunda Daha Önce Yapılmış Bazı Çalışmalar .....	3
BÖLÜM2.....	6
2. Suya Doygun Örselenmemiş Normal Konsolide Kil Numunelerinin Davranışını Etkileyen Faktörler.....	6
2.1. Zemin Anizotropisi.....	6
2.2. Gerilme Tarihçesi.....	8
2.2.1. $K_0$ 'ın Tahmini .....	8
2.3. Numune Örselenmesi.....	9
2.3.1. Fiziksel Örselenme.....	10
2.3.2. Gerilme Örselenmesi (Gerilme Boşalması).....	13
BÖLÜM 3.....	15
3. Zeminlerin Kayma Mukavemeti.....	15
3.1. Kayma Mukavemeti Parametreleri.....	15
3.2. Kayma Mukavemetinin Üç Eksenli Deneyle Belirlenmesi.....	17
3.2.1. Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) Deneyi.....	19
3.2.2. Konsolidasyonlu - Drenajsız (CU) Üç Eksenli Deneyi .....	21
3.2.3. Konsolidasyonlu- Drenajlı (CD) Deneyi.....	23
3.3. Drenajsız Kayma Mukavemeti.....	24
3.4. Gerilme İzleri.....	25
3.5. Boşluk Suyu Basıncı Katsayıları.....	29
BÖLÜM 4.....	31
4. Gerilme Boşalmasının Geoteknik Parametrelere Etkilerinin Belirlenmesi.....	31
4.1. Arazi Gerilmeleri ve Boşluk Suyu Basıncındaki Değişim.....	31
4.1.1. Suya Doygun Killerden Alınan Örselenmemiş Numunelerde Gerilme Durumu.....	32

4.2. Drenajsız Kayma Mukavemetine Etkileri.....	34
4.2.1. Arazide Suya Doymun Normal Konsolide Killerin Drenajsız Kayma Mukavemeti.....	34
4.2.2. Suya Doymun Örselenmemiş Normal Konsolide Kil Numunelerinin Drenajsız Kayma Mukavemeti.....	36
4.3. Gerilme Boşalmasının Drenajsız Elastisite Modülüne Etkileri.....	39
<b>BÖLÜM 5.....</b>	<b>43</b>
5. Kullanılan Numune Özellikleri ve Deney Teknikleri.....	43
5.1. Deney Numuneleri .....	43
5.2. Deney Aygıtları.....	44
5.2.1. Konsolidemetre Aygıtı.....	44
5.2.2. Konsolide Edilecek Numunenin Hazırlanması ve Konsolidemetreye Yerleştirilmesi.....	49
5.2.3. Konsolidemetrede Numunenin Konsolidasyonu, Çıkarılması ve Saklanması.....	50
5.2.4. Üç Eksenli Deney İçin Numune Hazırlama.....	51
5.3.1. Üç Eksenli (Boşluk Suyu Basıncı Ölçümlü) Deney Aygıtı.....	54
5.3.1.1. Deneylerde Boşluk Suyu Basıncı Ölçümü.....	55
5.3.2. Üç Eksenli Basınç Deneylerinin Değerlendirilmesi.....	55
5.3.3. Üç Eksenli Deneylerin Yapılması .....	56
5.3.4. Anizotropik Konsolidasyon Yöntemi.....	57
5.4.1. Arazideki Göçme Durumunu Örnekleyen (I. Seri) Üç Eksenli Deneyler.....	59
5.4.1.1. Gerilme Boşalması Anındaki Boşluk Suyu Basıncının Belirlenmesi.....	60
5.4.2. Gerilme Boşalmasını Örnekleyen (II. Seri) Üç Eksenli Deneyler.....	60
5.4.3. Oktahedral Gerilmede İzotropik Tekrar Konsolide (III. Seri) Üç Eksenli Deneyler.....	61
<b>BÖLÜM 6.....</b>	<b>62</b>
6. Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	62
6.1. Arazi Numunelerinin Davranışı (I. Seri Deneyler).....	63
6.2. Laboratuvar Numunelerinin Davranışı (II. Seri Deneyler).....	65

6.3. Arazi ve Laboratuvar Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	68
6.3.1. Gerilme - Birim Deformasyon Davranışları.....	68
6.3.2. Drenajsız Kayma Mukavemeti.....	69
6.3.3. Boşluk Suyu Basınçları.....	70
6.3.4. Drenajsız Elastisite Modülü.....	72
6.3.5. İçsel Sürtünme Açısı.....	73
6.3.6. Gerilme İzleri.....	74
6.4. Oktahedral Gerilmede İzotropik Tekrar Konsolidasyon Yöntemi (III. Seri Deneyler).....	76
BÖLÜM 7.....	80
7. Sonuçlar Ve Öneriler.....	80
7.1. Çalışmada Elde Edilen Genel Sonuçlar.....	81
7.2. İlerde Yürütülecek Çalışmalar İçin Öneriler.....	84
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	92

## NOTASYON

$A$	Boşluk suyu basıncı katsayısı
$A'$	Düzeltilmiş alan
$A_f$	Göçme anındaki boşluk suyu basıncı katsayısı
$A_0$	Numune başlangıç alanı
$A_R$	Alan oranı
$A_{ff}$	Arazi zemin elementinde göçme anındaki boşluk suyu basıncı katsayısı
$A_{fs}$	Örselenmemiş numunede göçme anındaki boşluk suyu basıncı katsayısı
$A_u$	Boşaltma anındaki boşluk suyu basıncı
$a$	Düzeltilmiş kayma mukavemeti parametresi
$B$	Boşluk suyu basıncı katsayısı
$B_u$	Boşaltma anındaki boşluk suyu basıncı
$C_i$	Numune alıcıda iç çap oranı
$C_s$	Zemin danelerinin sıkışabilirliği
$c$	Kohezyon
$c'$	Efektif kohezyon
$c_d$	Drenajlı halde konsolidasyon
$c_u$	Toplam gerilmelere göre drenajsız kayma mukavemeti parametresi
$c_v$	Zemin boşluklarının sıkışabilirliği
$c_{cu}$	Konsolidasyonlu drenajsız deneyde toplam gerilmelere göre kohezyon
$c_{uh}$	Yatay yöndeki drenajsız mukavemet
$c_{uv}$	Düşey yöndeki drenajsız mukavemet
$c_{u\alpha}$	$\alpha$ açısı ile normal gerilme altında drenajsız kayma mukavemeti
$D_i$	İç çap
$D_0$	Dış çap
$E_i$	Tanjant modülü
$E_s$	Secant modülü
$E_u$	Drenajsız elastisite modülü
$e$	Boşluk oranı
$H$	Arazide tabaka kalınlığı
$H_w$	Arazide su yükseldiği tabaka kalınlığı

$I_L$	Likitlik indeksi
$I_p$	Plastisite indeksi
$K$	Göçme çizgisi eğimi
$K_0$	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
$\Delta L$	Numune aksenal deformasyonu
$L_0$	Başlangıç numune boyu
$n$	Porozite
OCR	Aşırı konsolidasyon oranı
$P$	Yük
$p$	Gerilme invaryantı
$p'$	Yatay gerilme izi
$p_0'$	Jeolojik efektif gerilme
$q$	Gerilme invaryantı
$q'$	Düşey gerilme izi
$R$	Anizotropi oranı
$u$	Boşluk suyu basıncı
$u_0$	Başlangıç boşluk suyu basıncı
$\Delta u$	Gerilme boşalmasında boşluk suyu basıncındaki değişim
$U_R$	Kalıcı boşluk suyu basıncı değeri
$U_{Ri}$	Boşaltma anındaki boşluk suyu basıncı değeri
$u_f$	Göçme anındaki boşluk suyu basıncı
$V$	Hacim
$\Delta V_v$	Zemin boşluk hacmindeki değişim
$\Delta V_s$	Zemin dane hacmindeki değişim
$V_v$	Boşluk hacmi
$w$	Su muhtevası
$w_L$	Likit limit
$w_0$	Başlangıç su muhtevası
$w_p$	Plastik limit
$\alpha'$	Düzeltilmiş kayma mukavemeti parametresi
$\epsilon$	Birim deformasyon

$\phi$	Kayma mukavemeti parametresi
$\phi'$	Efektif gerilmelere göre drenajlı kayma mukavemeti parametresi
$\phi_d$	Konsolidasyonlu-drenajlı deneyden elde edilen içsel sürtünme açısı
$\phi_u$	Toplam gerilmelere göre drenajsız kayma mukavemeti parametresi
$\phi_{cu}$	Konsolidasyonlu-drenajsız deneyde toplam gerilmelere göre belirlenen içsel sürtünme açısı
$\gamma$	Birim hacim ağırlık
$\gamma_s$	Dane birim hacim ağırlığı
$\gamma_w$	Suyun birim hacim ağırlığı
$\sigma$	Toplam normal gerilme
$\sigma_h$	Toplam yanıl gerilme
$\sigma_h'$	Efektif yanıl gerilme
$\sigma_v, \sigma_v'$	Toplam ve efektif düşey gerilme
$\sigma_0'$	Gerilme boşalmasından sonra izotropik efektif gerilme
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Toplam asal gerilmeler
$\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$	Efektif asal gerilmeler
$\Delta\sigma_1$	Büyük asal gerilmedeki değişim
$\Delta\sigma_3$	Küçük asal gerilmedeki değişim
$\tau$	Kayma gerilmesi
$\tau_f$	Kayma mukavemeti



## **ŞEKİL LİSTESİ**

Şekil 2.1. Anizotrop Zeminler İçin Drenajsız Kayma Mukavemeti.....	7
Şekil 3.1. Kayma Mukavemeti Parametreleri .....	17
Şekil 3.2. Konsolidasyonsuz - Drenajsız Deneyden Elde Edilen Toplam Gerilme Mohr Daireleri ve Göçme Zarfı.....	20
Şekil 3.3. Konsolidasyonsuz - Drenajsız Deneylerden Belirlenen Tipik Gerilme Birim Deformasyon Eğrileri.....	21
Şekil 3.4. Normal Konsolide Zeminlerde Konsolidasyonlu - Drenajsız Deneylerde Toplam ve Efektif Göçme Zarfları.....	22
Şekil 3.5. Normal Konsolide Zeminlerde Konsolidasyonlu - Drenajsız Gerilme Birim Deformasyon, Boşluk Suyu Basıncı Davranışı.....	23
Şekil 3.6. CU Deneyinde Konsolidasyon Basıncı ile Kayma Mukavemeti Değişimi.....	24
Şekil 3.7. Normal Konsolide Kilde Konsolidasyonlu - Drenajsız Deneyden Elde Edilen Gerilme İzleri.....	27
Şekil 3.8. Gerilme Durumunun $q'$ ve $p'$ Koordinat Sisteminde Gösterilişi.....	28
Şekil 3.9. Gerilme Boşalması Durumunda Gerilme İzindeki Değişim.....	29
Şekil 3.10. Doygunluk Derecesi İle $B$ Arasındaki İlişki.....	30
Şekil 4.1. Arazide Bir Zemin Elementindeki Gerilme Durumu.....	31
Şekil 4.2. Arazide Suya Doygun Örselenmemiş Bir Zemin Elementinde Numune Alınmadan Önceki ve Numune Alındıktan Sonraki Durum.....	32
Şekil 4.3. Arazide ve Örselenmemiş Numunede Gerilmelerin Başlangıç Durumu.....	34
Şekil 4.4. Arazi Zemin Elementinde Başlangıç ve Göçme Anındaki Gerilme Durumu.....	35
Şekil 4.5. Suya Doygun Normal Konsolide Örselenmemiş Bir Kil Numunesinde Başlangıç ve Göçme Anındaki Efektif Gerilmeler.....	37
Şekil 4.6. Elastisite Modüllerinin Tanımlanması.....	40
Şekil 5.1. Konsolidemetre .....	45
Şekil 5.2. Konsolidemetre Kısımları.....	46
Şekil 5.3. Konsolidemetrede Poroz Taşların Konumu.....	47
Şekil 5.4. Konsolidemetrenin Drenaj Bağlantıları.....	48
Şekil 5.5. Blok Numune.....	50

Şekil 5.6. Üç Eksenli Deneyler İçin Blok Numunenin Bölünmesi.....	51
Şekil 5.7. Numunenin Drenajsız Koşullarda Desikatörde Bekletilmesi.....	52
Şekil 5.8. Numune Traşlama Aygıtı.....	52
Şekil 5.9. Üç Eksenli Hücrede Drenaj ve Boşluk Suyu Basıncı Ölçüm Vanaları.....	53
Şekil 5.10. Üç Eksenli Deney Aygıtı ve Ölçüm Sistemleri.....	54
Şekil 5.11. Anizotropik Konsolidasyon İçin Ölü Yük Askı Sistemi.....	58
Şekil 5.12. Plastisite İndisine Bağlı Olarak $\phi$ 'nün Tahmini.....	59
Şekil 6.1. İstanbul Yeşil Kilinde 200 kPa.lık Basınç Kademesindeki Oturma - t Eğrisi.....	62
Şekil 6.2a. İstanbul Yeşil Kili Arazi Numunesi Gerilme - Birim Deformasyon - Boşluk Suyu Basıncı .....	63
Şekil 6.2b. Kaolen Arazi Numunesi Gerilme - Birim Deformasyon - Boşluk Suyu Basıncı .....	64
Şekil 6.3. Arazi Numunelerinde $c_{ui}$ ile $\sigma_{vc}$ ' Arasındaki İlişki.....	64
Şekil 6.4. Arazi Numunelerinde Drenajsız Kayma Mukavemeti ile Su Muhtevası Arasındaki İlişki.....	65
Şekil 6.5a. İstanbul Yeşil Kili Laboratuvar Numunesi Gerilme - Birim Deformasyon Boşluk Suyu Basıncı Değişimi.....	66
Şekil 6.5b. Kaolen Laboratuvar Numunesi Gerilme - Birim Deformasyon Boşluk Suyu Basıncı Değişimi.....	67
Şekil 6.6. Laboratuvar Numunelerinde Kalıcı Boşluk Suyu Basıncı $u_R$ 'nin Belirlenmesi.....	68
Şekil 6.7 $c_{us}/c_{ui}$ ile Numune Bekletme Süresi Arasındaki İlişki.....	70
Şekil 6.8. Laboratuvar Numunelerinde $A_f$ 'nin Numune Bekletme Süresi ile İlişkisi.....	71
Şekil 6.9. $u_R / u_{Ri}$ (%) ve Numune Bekletme Süresi Arasındaki İlişki.....	72
Şekil 6.10. $E_{unumune} / E_{uarazi}$ (%) ve Numune Bekletme Süresi Arasındaki İlişki.....	73
Şekil 6.11a. İstanbul Yeşil Kilinde Efektif Gerilme İzleri.....	75
Şekil 6.11b. Kaolende Efektif Gerilme İzleri.....	76
Şekil 6.12a. İstanbul Yeşil Kilinde Oktahedral Gerilmede İzotropik Tekrar Konsolidasyon .....	78
Şekil 6.12b. Kaolende Oktahedral Gerilmede İzotropik Tekrar Konsolidasyon.....	78

## **TABLolar**

Tablo 2.1. İçsel Sürtünme Açısına Bağlı $K_0$ Eşitlikleri.....	9
Tablo 3.1. Zemin Kıvamına Göre Killer İçin Kayma Mukavemeti .....	25
Tablo 3.2. Zemin Cinsine Göre $A_f$ 'nin Değişimi .....	30
Tablo 4.1. Bazı zeminlerde arazi deneyleriyle ölçülmüş elastisite modülleri .....	41
Tablo 5.1. Tablo 5.1.Kullanılan zeminlerin özellikleri .....	44
Tablo 6.1a İstanbul yeşil kilinde III seri deneyden belirlenen $\phi'$ değerleri.....	74
Tablo 6.1b Kaolende III seri deneyden belirlenen $\phi'$ değerleri.....	74
Tablo 6.2. İstanbul Yeşil Kilinde Deney Sonuçları.....	79
Tablo 6.3. Kaolende Deney Sonuçları.....	79



## ÖZET

Bu çalışmada araziden numune alınması sırasında kaçınılmaz bir etki olarak meydana gelen gerilme örselenmesi, yani gerilme boşalmasının normal konsolide killerin mühendislik davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma İstanbul yeşil kili ve Kaolen gibi plastisite, likit limit ve geçirgenlik özellikleri birbirinden çok farklı iki numune üzerinde yapılmıştır. Zemin numunelerinde özelliklerin daha kolay kontrol edilebilmesi için laboratuvar, konsolidometrede normal konsolide olarak hazırlanmış homojen, gerilme tarihçesi belirli blok numuneler kullanılmıştır. Bu blok numuneden üç eksenli basınç deneyi için numune hazırlanarak üç seri deney yapılmıştır. I. seri deneylerle arazideki zemin davranışı örneklenmiştir. Bunun için numune  $K_0$  koşullarında konsolide edildikten sonra drenajsız şartlarda yüklenmiş ve bu numunelere "arazi numunesi" adı verilmiştir. Gerilme boşalmasının ve numune bekletme süresinin geoteknik parametrelere etkisinin araştırıldığı II. seri deneylerde 1gün, 7gün ve 28gün bekletilmiş numuneler arazi düzey efektif gerilmesi drenajsız şartlarda hidrostatik olarak etkirken yine drenajsız koşullarda eksenel basınç artırılarak yüklenmiş ve bu numunelere "laboratuvar numunesi" adı verilmiştir. Numunenin konsolidometreden çıkarılması ile deney yapma zamanı arasında geçen süre "numune bekletme süresi" olarak tariflenmiştir. III. seri deneylerde ise gerilme boşalmasına maruz kalmış laboratuvar numunelerinde, laboratuvar deneyleri ile arazideki zemin davranışını örnekleyebilmek için tekrar konsolide etmenin etkisi araştırılmış ve laboratuvar numuneleri izotropik oktahedral gerilmede konsolide edilip drenajsız şartlarda göçmeye ulaşılmıştır. Bu numunelere "tekrar konsolide edilmiş laboratuvar numuneleri" adı verilmiştir.

Arazi numunelerinin ve laboratuvar numunelerinin davranışları karşılaştırılarak, gerilme boşalmasının geoteknik parametrelere olan etkileri belirlenmiştir. Laboratuvar numunelerinde bekletme süresi arttıkça kalıcı boşluk suyu basıncı  $u_R$ 'de, drenajsız kayma mukavemetinde, elastisite modülünde ve boşluk suyu basıncı parametresi  $A_f$ ' de oldukça büyük kayıplar meydana gelmiştir. Böylece arazi zemin davranışının laboratuvar, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deney ile örneklenemediği bu çalışmada da görülmüştür.

Belirli numune bekletme sürelerinde tekrar konsolide edilen laboratuvar numuneleri ile arazi numunelerinin davranışı karşılaştırıldığında, gerilme birim deformasyon, boşluk suyu basıncı değişimi ve elastisite modüllerinin çok farklı olduğu ancak drenajsız kayma mukavemeti ve efektif gerilmelere göre belirlenen  $\phi'$  değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Böylece normal konsolide killi zeminlerde, gerilme örselenmesinin etkisini gidermek için numunelerin tekrar konsolide edilmesinin, efektif gerilmeler cinsinden içsel sürtünme açısını ve drenajsız kayma mukavemetini çok fazla etkilemediği görülmüştür.

## ***SUMMARY***

This study investigates the effect of stress disturbance, in other words the stress relief on the engineering behavior of normally consolidated clays that occurs inevitably during sampling in the field. The study is conducted on Istanbul “green” clay and on Kaolinite, which vary greatly from one another in plasticity, liquid limit and permeability characteristics. In the laboratory normally consolidated, homogeneous block samples of known stress history are prepared in the consolidometer in order to obtain a better control of the properties of soil samples. Three series of triaxial tests are conducted on samples from these block samples. The soil behavior in the field is modeled in the first series of tests. The  $K_0$  consolidated samples are loaded under undrained conditions for this purpose and these samples are named as “field samples”. In the second series of tests the effect of stress relief and sample age on geotechnical properties is investigated. Therefore, 1, 7 and 28 day samples that are hydrostatically under field vertical effective pressure without drainage, are loaded again under undrained conditions by increasing the axial pressure. Such samples are called “laboratory samples”. The time difference in between the time the sample was taken out of the consolidometer and the tests were conducted is defined as the “sample age”. In the third series of tests the effect of reconsolidation on laboratory samples is investigated to simulate the laboratory tests and soil behavior in-situ. Laboratory samples are consolidated under isotropic octahedral stress at undrained conditions until the failure is reached. These samples are referred to as “reconsolidated laboratory samples”.

The behavior of field and laboratory samples are compared to determine the effect of stress relief on geotechnical parameters. With laboratory samples significant losses in residual pore pressure  $u_R$ , undrained shear strength, modulus of elasticity, and pore pressure parameter  $A_f$  are encountered with increasing sample age. It is concluded as in previous studies, that the in-situ soil behavior can not be modeled by laboratory unconsolidated undrained triaxial tests.

It is determined that the stress - strain, pore - water pressure changes and the modulus of elasticity varied greatly comparing the behavior of reconsolidated laboratory samples at a certain sample age and the field samples. Nevertheless, the  $\phi'$  values obtained by undrained shear strength and the effective stresses are found to be at a close range. Finally, it is concluded that the reconsolidation method in order to prevent the stress disturbance is not effective for the determination of the internal friction angle and the undrained shear strength at effective stresses.

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan stabilite problemlerinin çözümü, arazideki zeminin gerilme birim deformasyon, mukavemet özelliklerinin doğru tahminine bağlıdır. Bu nedenle zeminlerin davranışını gerçekçi olarak tahmin edebilmek geoteknik mühendisliği biliminde çok önemlidir. Pratikte birçok geoteknik problemin araştırılmasına araziden numune alma ile başlanır ve bu numuneler laboratuvara taşınarak laboratuvar deneyleri yapılır. Numune alma zemin kitlesi üzerinde varolan jeolojik gerilmeleri ortadan kaldırmak anlamına gelmektedir. Oysa tabiatta gerilmelerin değişimi çok farklıdır, jeolojik gerilmeler etkinken sürşarj yükü ile oluşan ilave gerilmeler altında göçmeye ulaşılır. Bu nedenle arazideki zemin ile laboratuvara taşınan numunelerin mühendislik davranışı birbirinden farklı olmaktadır. Doğada bulunduğu derinliğe bağlı olarak anizotropik gerilme sisteminin etkisinde olan zeminden numune alındığında gerilme sistemi değişmekte ve anizotrop gerilmelerin yerini, yükün kaldırılması ile zemin boşluklarında gelişen negatif boşluk suyu basıncına eşit hidrostatik efektif gerilme sistemi almaktadır. Bu nedenle laboratuvara taşınarak mühendislik özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmeye çalışılan numunelerde, arazideki zemin kitlesi üzerinde etkili gerilme sisteminin laboratuvarda modellenmesi gerekmektedir.

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için birçok laboratuvar deney yöntemi vardır. Bunlardan son yıllarda en çok kullanılanları kesme kutusu ve üç eksenli deney teknikleridir. Arazideki zemini örnekleyen örselenmemiş numune “Kesme kutusu” deney aletinde, genellikle doğada etkisinde kaldığı düşey jeolojik basınç altında iken yatay kesme kuvveti uygulanarak kesilir ve zeminin kayma mukavemeti belirlenir. “Üç eksenli deney” tekniğinde ise örselenmemiş numuneye çeşitli drenaj şartlarında aksenal yük uygulanarak göçmeye ulaşılır ve kayma mukavemeti parametreleri bulunabilir. Bu deneylerde drenaj ve yükleme durumları probleme göre seçilebilir ve gerilme veya şekil değiştirme hızı kontrol edilebilir.

Araziden numune alınarak gerçekleştirilen bütün laboratuvar deneylerinde numune örselenmesinin etkileri görülür. Numune alınması, taşınması ve deney için

hazırlanması sırasında fiziksel örselenme ve arazide numune üzerindeki düşey yükün kaldırılması ile zeminde meydana gelen gerilme boşalması (gerilme örselenmesi) diye iki tür örselenmeden sözedilebilir. Zeminlerin fiziksel örselenmesi; zeminin hassaslığına, cinsine, numune alma ve taşıma sırasındaki tekniklerine bağlıdır. Bu etkiler mümkün mertebe azaltılarak fiziksel örselenmenin etkilerinden kaçınılabılır. Fakat numune arazideki yerinden alındığında gerilme boşalmasının etkilerinden kaçınılamamaktadır. Laboratuvarda mukavemet ve deformasyon özelliklerinin saptanması araziden örselenmemiş numune alınarak gerçekleştirilebilir. Oysaki gerilme birim deformasyon ve mukavemet özelliklerinin numune örselenmesinden oldukça fazla etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle numune örselenmesinin etkilerini azaltmak için çeşitli laboratuvar yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin dezavantajları ise genellikle sınırlı deneysel çalışmalara bağlı olarak belirli bir zemin tipi için geliştirilmiş olmalarıdır.

Homojen olmayan zeminlerde numune almanın neden olduğu değişikliklerin, killi zeminlerin mühendislik özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle laboratuvarda çamur konsolidometrede gerilme tarihçesi belirli homojen numuneler hazırlanarak gerilme boşalmasının etkilerini ve arazideki göçme durumunu örnekleyebilmek için iki farklı düşey efektif gerilmede numune hazırlanmıştır. Konsolidometrede tek boyutlu konsolidasyon koşullarında belirli artan düşey efektif gerilme kademelerinde, konsolidasyon tamamladıktan sonra blok numune üzerindeki basınç kaldırılarak gerilme boşalmasının örneklendiği laboratuvar numunesi elde edilmiştir. Bu blok numuneden üç eksenliye numune hazırlanarak normal konsolide zeminlerde gerilme boşalmasının ve numune bekletme süresinin drenajsız zemin parametrelerine etkileri incelenmiştir. Arazideki zemin davranışını laboratuvarda örneklemek için ise, konsolidometrede elle tutulabilir kıvamda blok numune hazırlanarak, buradan üç eksenliye numune aktarılmış ve numune arazi gerilmelerinde anizotropik olarak konsolide edilerek drenajsız şartlarda göçmeye ulaşılmıştır. Arazideki zemin davranışını laboratuvarda örnekleyebilmek için oktahedral gerilmede izotropik tekrar konsolidasyon yöntemi incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan numunelerde fiziksel örselenme olmadığı, numunelerin sadece gerilme örselenmesine maruz kaldığı kabul edilmiştir. Deney numuneleri drenajsız koşullarda bekletilmiştir.

## ***2. Gerilme Boşalmasının Geoteknik Parametreler Üzerindeki Etkileri Hakkında Daha Önce Yapılmış Bazı Çalışmalar***

Numune alma tekniklerindeki gelişmeler ve gösterilen özene karşın gerilme boşalmasının zemin davranışı üzerindeki etkilerinden kaçınılamamaktadır. Bu nedenle arazideki zemin davranışını laboratuvarında örnekleyebilmek için 1960'lı yıllardan beri birçok araştırmacının yaptığı çalışmalarda, laboratuvar deneyleriyle gerilme boşalmasının etkilerini azaltabilmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Skempton ve Sowa (1963), Ladd ve Bailey (1964), Noorany ve Seed (1965), Davis ve Paulos (1967) tarafından gerilme boşalmasının drenajsız zemin davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Fakat bu çalışmalarda gerilme boşalmasının örneklendiği numunelerde sadece deviator gerilme bileşeni kaldırılmış, hidrostatik gerilme bileşeni kaldırılmamış ve numunede gerilme boşalması sonucu gelişen negatif boşluk suyu basınçlarının getirdiği problemler incelenmemiştir.

Ladd ve Lambe (1963) tarafından yapılan deneysel çalışmada, gerilme boşalması sonucu olarak, yüksüz örselenmemiş killerde negatif boşluk suyu basıncının tamamen muhafaza edildiğini açıklamışlar ve ölçülen negatif boşluk suyu basıncı kaldırılan gerilme miktarından daha az ise bu değişimin kil parçacık yapısının örselenmesi sonucu meydana geldiğini, ölçülen ve olması gereken boşluk suyu basıncı oranının kilin örselenme derecesinin bir ölçüsü olduğunu belirtmişlerdir.

Davis ve Paulos (1967) tarafından yapılan deneysel çalışmada gerilme boşalmasının kaolen numunelerinin drenajsız kayma mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Anizotropik konsolidasyon koşullarında yaptıkları üç eksenli deney sonuçlarına göre arazideki göçme koşullarını örnekleyen numunelerin drenajsız mukavemetinin, araziden numune alınarak gerilme boşalmasının etkilerini örnekleyen numunelerin mukavemetinden %18 daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Bu sonuçlar sadece 6 adet deneyden sonra elde edildiği ve deneylerdeki bazı belirsizlikler nedeniyle genel bir sonuç olarak değerlendirilmemiştir.

Kallstenius (1971), Berre ve Bjerium (1973) ve çalışma arkadaşları, laboratuvarında yapay olarak konsolide edilmiş blok numunelerin, konsolidemetreden çıkarılması ile



deney yapma zamanı arasında geçen zaman arttıkça drenajsız kayma mukavemetinin azaldığını açıklamışlardır.

Kirkpatrick (1974), Kirkpatrick ve Rennie (1975) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, laboratuvarında hazırlanmış yapay konsolide blok numuneler kullanılarak gerilme boşalmasının kil numunelerin mühendislik özelliklerini etkilediği ve normal konsolide killer için laboratuvarında ölçülen konsolidasyonsuz drenajsız davranışın arazideki göçme durumunu örneklemediğini belirtmişlerdir. Kirkpatrick ve Rennie (1975) tarafından yapılan deneysel çalışma, göreceli olarak sığ derinliklerden çıkarılan kil numuneler için kesin olarak doğruluk kazanmıştır. Numune bekletme süresince negatif boşluk suyu basıncı dağılımındaki değişim nedeninin tam olarak anlaşılmasına rağmen, fiziksel örselenmeye bağlı olmaksızın zeminin permeabilite ve konsolidasyon katsayılarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bununla beraber Davis ve Paulos (1967) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre elde edilen mukavemet kayıplarından çok daha fazla kayıplar meydana geldiğini ve bu kayıpların numune bekletme süresi arttıkça arttığını belirtmişlerdir.

Bunlardan başka yapılan bazı deneysel çalışmalara göre, laboratuvara taşınan örselenmemiş numunelerde gerilme boşalmasının etkilerini azaltmak için önerilen teknikler şunlardır;

1. Schmertman (1956), Ladd ve Lambe (1963) tarafından arazideki düşey efektif gerilmede numunenin izotropik tekrar konsolidasyonu,
2. Raymond ve diğerleri (1971) tarafından yapılan deneysel çalışmalara göre arazi düşey efektif gerilmesinin %50 veya %75'i değerinde numunenin izotropik tekrar konsolidasyonu,
3. Davis ve Paulos (1967), Bjerrum (1973) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre numunenin laboratuvarında arazi gerilmeleri altında anizotropik konsolidasyonu,
4. Ladd ve Foott (1974) tarafından SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties) yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde numune arazi ön konsolidasyon basıncının en az iki, ideal olarak ise dört katı bir basınç altında izotropik olarak konsolide edilir. Bu basınçta konsolidasyon tamamlandıktan sonra gerilme arazi

gerilme seviyesine kadar boşaltıldıktan sonra bu gerilme altında drenajsız koşullarda numunede göçmeye ulaşılır. Gerilme tarihçesi içinde etkisinde kaldığı max. gerilmenin birkaç katı bir gerilmede iç yapıda oluşabilecek değışiklikler nedeniyle numunenin mühendislik özelliklerinde değışeceği düşünölmelidir. Normal konsolide zemin numunesi SHANSEP yöntemindeki gibi bir uygulamayla aşırı konsolide bir hale geçecektir. Bu yöntemin numunenin mukavemet, boşluk suyu basıncı değışimi gibi özelliklerine etkisi kaçınılmazdır.



## ***BÖLÜM 2***

### ***2. SUYA DOYGUN ÖRSELENMEMİŞ NORMAL KONSOLİDE KİL NUMUNELERİNİN DAVRANIŞINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER***

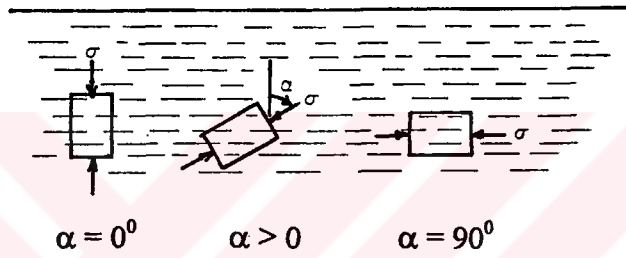
Zeminlerin davranışını gerçekçi olarak tahmin edebilmek geoteknik mühendisliği bilimi için çok önemlidir. Yakın zamana kadar zemin davranışının lineer ve elastik olduğu kabul edilmiştir, oysa arazide zeminler anizotrop gerilmelerin etkisi altındadır ve göçme durumunda zemin direnci, içsel sürtünme açısı ve zemin deneleri arasındaki kohezyon ile ifade edilir. Zeminin kohezyonu ve içsel sürtünme açısı bir zemin sabiti değildir, zeminin gerilme tarihçesi, drenaj koşulları ve zemin yapısının örselenmesi gibi koşullara bağlı olarak değişmektedir.

#### ***2.1. Zemin Anizotropisi***

Zeminlerde iki türlü anizotropi olduğu söylenebilir; geometrik anizotropi ve gerilme anizotropisi. Tabiatta, zemin danelerinin doğal olarak çökmesi sonucunda oluşan zemin kitleleri izotrop ve homojen değildir. Genellikle doğada zeminler tabakalı yapılardır, farklı boyutlardaki danelerin dağılımından oluşurlar ve yatay tabakalar halinde depolanmaları sonucunda anizotrop özellikler gösterirler. Mitchell (1976), tarafından tek boyutlu çökme ve bunu izleyen yükleme sırasında kil parçacıklarının yerleşiminin plakalar halinde olduğu açıklanmıştır. Zeminlerin bu parçacık yerleşiminden dolayı düşey yöndeki özellikleri ile yatay yöndeki özellikleri birbirinden farklı olmaktadır. Tabiatta jeolojik yükün artışı devam ettikçe düşey gerilmelerin artışından dolayı zemin parçacıkları daha iyi yerleşerek düşey yönde daha sıkı bir yapı oluşmaktadır. Geniş bir alanda yatay yönde hiçbir sıkışma ve genişlemenin meydana gelmeyeceği kabul edilirse geometrik anizotropi ve gerilme tarihçesinin kombinasyonu sonucu gerilme anizotropisi oluşacaktır. Parçacık yerleşimine bağlı olarak değişen geometrik anizotropinin ölçülmesi zordur. Fakat yatayla çeşitli açılar yapan yönlerde alınan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajsız ve konsolidasyonsuz drenajsız laboratuvar deneyleri ile zemin anizotropisi açıklanabilmiştir. Duncan ve Seed (1966a) tarafından yatay ve düşey yönlerde alınan

zemin örnekleri üzerinde yapılan bir seri üç eksenli deney sonucunda, yatay yönde alınan numunenin drenajsız kayma mukavemetinin ( $c_{uh}$ ), düşey yönde alınan numunenin drenajsız kayma mukavemetinden ( $c_{uv}$ ), %10 daha küçük olduğunu belirtmişlerdir.

Bütün doğal zeminler izotrop ve homojen olmayan davranış gösterdiği için araziden alınan numunenin çeşitli yönlerdeki mukavemet ve elastisite özelliklerinin farklı olduğu bilinmektedir. Young ve Sivestri (1979), Law ve Lo (1976), Arthur ve Manzies (1972), Yamada ve Ishihara (1979) tarafından bu farklılığın büyüklüğü araştırılmıştır. Şekil 2.1'de gerilmenin çeşitli açılarla etkimesi sonucu mukavemetteki değişim ve anizotropinin etkileri gösterilmektedir (Bowles 1988).



Şekil 2.1 Anizotrop zeminler için drenajsız kayma mukavemeti.

Anizotropi oranı  $R$ ,

$$R = c_{uv} / c_{uh} \quad (2.1)$$

olarak tariflenmiştir.

$c_{uv}$  = Düşey yöndeki drenajsız kayma mukavemeti,

$c_{uh}$  = Yatay yöndeki drenajsız kayma mukavemeti,

$c_{u\alpha}$  =  $\alpha$  açısı ile etkili normal gerilme altında drenajsız kayma mukavemeti

$$c_{u\alpha} = c_{uh} [ 1 + (R - 1) \cos^2 \alpha ] \quad (2.2)$$

ifadesi ile belirtilmiştir.

Homojen olmayan çökellerin birikmesi sırasında kütlelerin karışması veya farklı malzemelerin tabakalanması sonucu derinlikle zemin yoğunluğu ve gerilmeler artar, sonuçta gerilme-şekil değiştirme modülünde de derinlikle lineer olmayan bir artış olduğu gözlemlenebilir.

## **2.2. Gerilme Tarihçesi**

Doğada zeminler çökmesi sırasında  $K_0$  koşullarında (sükunetteki durumda) konsolide olurlar, düşey ve yatay efektif gerilmeler birbirine eşit değildir. Numunenin arazide etkisinde olduğu gerilme durumu, boşluk oranı ve su muhtevası gibi özellikler zemin davranışı üzerinde çok etkilidir. Kayma mukavemeti temel olarak efektif gerilmelere bağlıdır. Ancak efektif gerilmeler de kaymanın gerçekleştiği yerdeki boşluk oranı ile ilişkilidir. Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deneylerde numune izotropik gerilmeler altında, genellikle arazi düşey efektif gerilmesinde ( $\sigma_v'$ ) konsolide edilir. Bu konsolidasyon sonucu numunenin boşluk oranı arazidekinden daha küçük olur. Bu nedenle elde edilen drenajsız kayma mukavemeti de arazidekinden daha büyük olacaktır. Numune örselenmesinden çok etkilenen normal konsolide killerde, araziden numune almadan önce numunenin etkisinde olduğu gerilmeler altında konsolide edilmesi önerilmektedir.

Zeminler homojen ve izotrop malzemeler olmadıklarından düşey ve yatay jeolojik efektif gerilmeler birbirinden farklıdır ( $K_0 \neq 1$ ) ve  $K_0$ 'ın değeri gerilme tarihçesinden çok etkilenir.

### **2.2.1. $K_0$ 'ın Tahmini**

Zeminlerde sükunetteki toprak basıncı herhangi bir yapım nedeni ile zemine ek gerilme aktarılmadan önce ki basınçlardır. Bu durumda yanal efektif gerilme düşey efektif gerilme ile ilişkilidir ve sükunetteki yanal toprak basıncı denilen  $K_0$ 'ın değeri  $K_0 = \sigma_h' / \sigma_v'$  olarak tanımlanır. Sükunetteki durumda zemin göçme halinde değildir (elastik denge durumu). Örselenmemiş numune almanın ve yanal şekil değiştirmeye izin verilmeden yapılacak ölçümlerin zorluklarından dolayı  $K_0$ 'ın laboratuvar deneyleriyle de tahmini

oldukça zordur. Ancak koni penetrometre, presyometre ve dilatometre gibi deney aletleri ile arazide yanal gerilmeler ölçülebilir. Laboratuvar ve arazi ölçümlerindeki zorluklardan dolayı  $K_0$ 'ın tahmini için zeminin içsel sürtünme açısı ( $\phi$ )'ye bağlı olarak ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1.  $K_0$ 'ın İçsel Sürtünme Açısına Bağlı Olarak Tahmini

$K_0$ Eşitlikleri	Zemin Türü	Referans
$K_0=1-\sin\phi$	Granüler	Jaky (1948)
$K_0=0.19+0.233 \log I_p$	Normal K.Kohezyonlu	Alpan (1967)
$K_0=\tan^2[45^\circ-1.15(\phi'-9)/2]$	Normal K.Kohezyonlu	Rowe(1957), Abdelhamit ve Krizek (1976)
$K_0=1-\sin(1.2 \phi')OCR^{\sin 1.2\phi'}$	Aşırı K.Kohezyonlu	Schmidt (1967)
$K_0=0.95 -\sin\phi'$	Normal K.Kohezyonlu	Brooker ve Ireland (1965)

### 2.3. Numune Örselenmesi

Geoteknik parametreler ya direkt olarak arazide yerinde yapılan deneylerden yada araziden numune alınarak laboratuvarda yapılan deney sonuçlarından elde edilmektedir. Arazi deneylerinde düşey yönde değişen zemin özellikleri hakkında detaylı tanımlamalar sağlanabilmesine rağmen karmaşık sınır koşulları, zemin içinde önemli gerilme değişimleri (veya şekil değiştirme) ve drenaj koşullarının kontrol edilememesi gibi hususlardan deney sonuçlarının yorumu zordur ve parametrelerin tahmininde deneyim gerektirmektedir. Araziden numune alınarak laboratuvar deneyleri ile zeminlerin mühendislik özelliklerinin tahmini hala çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak laboratuvarda üç eksenli deneyler, basit veya direkt kesme deneyleri tercih edilir. Bu deneylerde drenaj ve yükleme koşulları probleme göre seçilebilir ve yükleme oranı veya şekil değiştirme hızı kontrol edilebilir. Laboratuvar deneylerinin en kısıtlayıcı yönü ise numune alma sırasında ve sonrasında numunelerin örselenmesi ve kaçınılmaz etki olarak gerilme boşalmasının meydana gelmesidir. Modern numune alma tekniklerin geliştirilmesi

sonucu fiziksel örselenmenin olmadığı kabul edilse bile zeminin atmosfere açılması ile numune üzerine etkileyen dış gerilmelerin azalması sonucu, zemin numunesi üzerinde etkili gerilme sistemi değişir ve zemin yapısında örselenmeler meydana gelir.

### **2.3.1. Fiziksel Örselenme**

Numune alınması sırasında oluşan fiziksel örselenmenin nedenlerini şöyle açıklayabiliriz,

1. Sondaj kuyusunun açılması sırasında, su seviyesinin yeraltı su seviyesi (YASS) altına düşmesi sonucu zemin içinden sondaj çukuruna doğru su akışı olursa sondaj kuyusu tabanındaki kabarmaya bağlı örselenme,
2. Numune alıcının zemine itilmesi sırasında örselenme,
3. Numunenin laboratuvara taşınması sırasında örselenme,
4. Numunenin saklanması sırasında örselenme,
5. Numunenin deney için hazırlanması sırasında örselenme,

#### **1. Sondaj kuyusunun açılması sırasında örselenme**

Örselenmemiş numune pistonlu numune alıcılar veya şelbi tüpü ile alınır. Örselenmenin etkilerini azaltmak için numune alma işlemi sondaj kuyusunun tabanında yapılır ve bu işlem sırasında hidrostatik yük dengesinin bozulması nedeniyle zemin örselenebilir. Sondaj kuyusunun açılması sırasındaki zemin örselenmesi, kuyunun açılması sırasında sondaj çamuru kullanılarak stabilizasyon sağlanırsa azaltılabilir. Çok yumuşak zeminlerde kuyu içindeki su seviyesi çok düşük olursa kuyu tabanında kabarma veya kaynama oluşabilir.

#### **2. Numune Alma Sırasında Örselenme**

Numune alıcının zemine itilmesi sırasında zemin ile numune alıcının duvarları arasındaki sürtünme numunenin kalitesini etkiler. Bu konu üzerinde yapılan bazı çalışmalardan, Kallstenius (1963) tarafından yapılan araştırmaya göre yumuşak killerin drenajsız kayma mukavemeti üzerinde özellikle bu etkinin oldukça fazla etkili olduğu vurgulanmıştır. Numune alma sırasında penetrasyon hızının en az 0.1 mm/dak. olması

önerilmektedir. Penetrasyon hızı azaldıkça zemin ile numune alıcı arasındaki sürtünmenin artması ile örselenmenin miktarının da artacağı ileri sürülmektedir. Numune alıcı iç yüzeyi ile zemin arasındaki büyük açıklık ise numunenin yanal genişlemesini artırır ve zeminin kayma mukavemetinin azalmasına neden olur.

Schjetne (1971) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, numune alıcı zemine itildiğinde başlangıç boşluk suyu basıncının 1.5 - 2 katı artık boşluk suyu basınçları meydana geldiği ve numune alıcı zeminden çıkarıldığında da negatif boşluk suyu basıncı olduğu, bunun değerinin de başlangıçtaki jeolojik efektif gerilmenin %20'si kadar olduğu ölçülmüştür. Fakat numune alma işleminden birkaç saat sonra drenajlı durumda boşluk suyu basıncının sıfıra düştüğü gözlemlenmiştir. Bjerrum (1973) araştırma yaptığı bazı killer üzerinde bir numunenin dış 5mm'lik çapı ile numune merkezinin su muhtevası arasında %3-4'lük bir fark oluştuğunu göstermiştir.

Numune, numune alıcı içine girerken cidarlarda sürtünme yapar. Bu sürtünmeyi engellemek için numune alıcıların ağızları küçültülmüştür. Diğer taraftan içeri giren numunenin etrafından kuvvet kalktığından numune içerde genişler ve bu genişlemeden dolayı örselenebilir. Bu etkiyi azaltmak için numune alıcılarda iç çap oranı ( $C_i$ ) tariflenmiştir,

$$C_i = [ ( D_{i_{max}} - D_{i_{min}} ) / ( D_{i_{max}} ) ] \times 100 \quad (2.3)$$

$D_{i_{max}}$  = Numune alıcı iç çapı

$D_{i_{min}}$  = Küçültülmüş numune alıcı ağız iç çapı

Numune alıcılarda bu oranın  $C_i \cong \%0.5-1$  olması uygun görülmüştür.  $C_i$ , %1 - %3'ten büyük olursa numune şişme eğilimi gösterir ve fisürlerin açılma olasılığı artar. Numune alma sırasında zeminin hacimsel şekil değiştirmesi, alan oranı  $A_R$  ile orantılıdır,

$$A_R = [ ( D_o^2 - D_i^2 ) / D_i^2 ] \times 100 \quad (2.4)$$

$D_o$  = Numune alıcı dış çapı



$D_i$  = Numune alıcı iç çapı

$A_R \leq \%10$  ise alınan numuneler örselenmemiş olarak kabul edilebilir.

### 3. Taşıma sırasında örselenme

Numunenin taşınması sırasında ani yükler ve titreşimlerin etkisiyle fiziksel örselenme oluşabilir. Kallstenus (1971) tarafından yapılan çalışmada titreşim ve çarpmalar nedeni ile kayma mukavemetinde meydana gelen kayıpların (düşen koni deneyi ile ölçüldüğünde) numunenin likitlik indisi attıkça arttığı ve max. kayıpların kayma mukavemetinin %30'una kadar ulaşabileceğini belirlemiştir.

### 4. Numunenin bekletilmesi sonucu örselenme

Yumuşak killerde numune bekleme süresine bağlı olarak artan mukavemet kayıpları, başlangıç boşluk suyu basıncının azalması ile açıklanabilir. Bu mukavemet kaybı düşük plastisiteli killerde yüksek plastisiteli killere göre daha fazla olur, çünkü plastisite indeksi ve likit limit arttıkça sıkışabilirlik daha fazladır. Numunede örselenmiş dış zondan numune merkezine doğru boşluk suyu akışı nedeniyle su muhtevası değişimi düşük plastisiteli killerin mühendislik davranışı üzerinde oldukça fazla etkilidir. Jerbo ve diğerleri (1961), numune bekletme sırasında yumuşak killerin hassaslığının azaldığını, bu durumun bakteriler ve kimyasal değişimler sonucu meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Bekletme sırasında sıcaklığın etkileri Kallstenus (1971) tarafından araştırılmış ve yumuşak killerin drenajsız kayma mukavemeti üzerinde bu etkinin ihmal edilebileceği belirtilmiştir. Ancak numune bekletme süresine bağlı olarak oluşan örselenme etkisinin mukavemet kaybına yol açmasından kaçınmak için numunelerin arazideki sıcaklığa ve nemliliğe denk bir ortamda saklanması önermişlerdir.

### 5. Numune Hazırlama Sırasında Örselenme

Sone ve diğerleri (1971) tarafından 140 adet siltli kil numune üzerinde yapılan deneysel çalışma ile numune hazırlama sırasında örselenme araştırılmıştır. Buna göre numuneyi tüp numune alıcı içinden çıkarmak için gereken kuvvetin, numunenin serbest basınç mukavemeti değerinden daha büyük olduğunu belirterek 10 - 20 cm'lik bir numunenin tüpten çıkarılması sırasında drenajsız kayma mukavemetinin %20 - %10 oranında

azaldığını ve numuneyi çıkarma sırasındaki max. şekil değiştirmenin yaklaşık olarak göçme birim deformasyon değerine eşit olduğunu belirtmişlerdir.

Shackel (1971) tarafından yapılan çalışmaya göre numune çıkarma kuvvetinin tüp ile numune arasındaki aralık arttıkça azaldığı, numune alıcının boy/çap oranı 14'ü aştığı zaman örselenme miktarında artacağı belirtilmiştir.

### **2.3.2. Gerilme Örselenmesi (Gerilme Boşalması)**

Araziden numune alındığında oluşan fiziksel örselenmeyle birlikte üzerinden düşey yükün kaldırılması ile zeminde gerilme boşalması meydana gelir. Zemin üzerinde etkili anizotropik gerilme sisteminin yerini gerilmenin kaldırılması ile zemin boşluklarında gelişen negatif boşluk suyu basıncı alır. Buna göre zemin numunesi zemin kitlesi içinden çıkarılıp atmosfer basıncına açıldığı zaman, zemin elementi üzerinde etkili orjinal dış gerilmeler numunenin yüzündeki kapiler çekme kuvvetleri ile yer değiştirir. Araziden alınmış zemin numunesi üzerine etkileyen kapiler kuvvetlerin güvenilir olarak direkt ölçümü henüz yapılamamıştır. Fakat efektif gerilmelere bağlı zemin birim deformasyonlarından sonra hacim ve boşluk oranının sabit kaldığı ve oluşan kapiler kuvvetlerin ortalama efektif gerilmeye yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilmiştir. Aslında orjinal efektif gerilmeler ve kapiler kuvvetler arasındaki değişim oranı geniş bir aralıkta değişiyor olabilir. Bu değişim miktarını Hvorslev (1962) şu hipotezle açıklamaya çalışmıştır. Arazideki zemin üzerindeki etkili gerilmeler zemin danelerinin elastik deformasyonuna neden olur ve bu elastik enerji zemin kütlesi içinde depolanır. Zeminin atmosfere açılmasıyla toplam gerilmelerin azalması ilk önce boşluk suyu basıncının azalmasına neden olur. Numune hacminde çok az değişim meydana gelir ve suyun sıkışabilirliği zemin danelerinin sıkışabilirliğinden daha fazla olduğundan boşluk oranı (e) artabilir. Boşluk oranındaki bu değişim suyun sıkışabilirliğine oranla çok küçüktür. Ancak mevcut gerilmenin boşalmasıyla sıkışabilirlik hızla artacak ve negatif boşluk suyu basıncı gelişecektir. Boşluk oranındaki küçük bir artışla dahi zeminde depolanan elastik enerjinin önemli bir bölümü tahliye edilebilir. Böylece elastik enerjinin kalkmasından dolayı zemin boşluklarına havanın girmesine izin verilmeden veya su muhtevasında artış olmadan

zeminde genişleme eğilimi görülebilir. Bu etki sonucunda zemin özelliklerine, gerilme tarihçesine ve etkili gerilme sistemine bağlı olarak zemin elementi üzerinde hidrostatik efektif gerilmeler gelişir.

Derinlerden alınan numuneler zemin yüzüne getirildiğinde boşluk suyunun hacimsel genişlemesi normal olarak mukavemet ve deformasyon özellikleri üzerinde etkili olmaz. Noorany ve Seed (1965) tarafından yapılan bir çalışmada 3.7 m. derinlikten alınarak zemin yüzüne getirilen bir numunede hacimsel genişleme %1.6 iken 130 m. derinlikten alınan bir numunede yaklaşık olarak %0.06 olduğunu ölçmüşler. Ancak hava ve gazlar boşluk suyunda çözündüğünde numune alma derinliği 20 m. den daha az olsa da zeminlerin mühendislik davranışı üzerinde büyük etkisi olduğunu bu nedenle gerilme örselenmesi sonucu laboratuvar numunelerinin mukavemetinin ve elastisite modülü ( $E_s$ )'in azaldığı belirtilmiştir.



## **BÖLÜM 3**

### **3. ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ**

Zemin mekaniğinde karşılaşılan bütün stabilite problemlerinin analizi kayma mukavemetinin bilinmesine bağlıdır. Zeminin etkisinde kaldığı gerilmeler altında davranışının incelenmesi, karşılaşılan problemlerin çözülmesinde kolaylık sağlayacaktır. Bir zeminin taşıma gücü kayma mukavemeti ile çok ilgilidir. Zemine uygulanan yükler etkisinde, zemini oluşturan danecikler birbirlerine göre hareket etmeye başlar ve bir kayma düzlemi oluştururlar. Bu hareket sonucu plastik konuma ulaşıncaya zemin artık ilave bir yük taşıyamaz ve göçme meydana gelir.

Bir zemine etkiyen normal gerilme zemin danecikleri ve daneler arasındaki boşluklarda yer alan su tarafından taşınmaktadır. Zemin iskeleti tarafından taşınan gerilmeye ‘Efektif Gerilme’, suyun taşıdığı gerilmeye de ‘Boşluk Suyu Basıncı veya Nötr Gerilme’ denir. Bu iki basıncın toplamı da zemindeki ‘Toplam Gerilmeyi’ ifade eder. Terzaghi (1936), kayma mukavemeti yük altındaki hacim değişimi gibi problemlerin efektif gerilmeyle ilgili olduğunu göstermiştir.

Daneciklerin oluşturduğu iskeletin mekanik davranışı incelenirken zeminin elastik-plastik, izotrop ve sürekli bir ortam olduğu kabul edilir. Böyle bir ortamda kırılma herhangi bir gerilme düzleminde geçerli olabilir.

#### **3.1. Kayma Mukavemeti Parametreleri**

Zeminin bir noktasındaki efektif gerilme durumu  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_2'$ ,  $\sigma_3'$  asal efektif gerilmeleri ile tanımlanmaktadır. Zemin mekaniğinde geliştirilen çeşitli kırılma hipotezlerinden Mohr-Coulomb genel kayma hipotezine göre bir zeminin kayma mukavemeti, kayma düzlemine etkiyen normal gerilme ile orantılı ve zemin danecikleri arasındaki sürtünmeye bağlı bir terim ile yapısal özelliklere ve su muhtevasına bağlı bir kohezyon teriminden meydana gelmektedir. Buna göre zeminin göçme anındaki kayma mukavemeti ,

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

bağıntısı ile bulunabilmektedir.

$\tau_f$  = Göze alınan düzlemde doğacak kayma mukavemeti veya düzlemin taşıyabileceği

max. kayma gerilmesi,

$\sigma$  = Kayma düzlemine etkiyen normal gerilme,

$c$  = Zeminin kohezyonu,

$\phi$  = İçsel sürtünme açısını (kayma mukavemeti açısı)

göstermektedir.

Denklemdaki  $c$  ve  $\phi$ 'ye kayma mukavemeti parametreleri denir. Mohr-Coulomb denkleminde verilen bu katsayıların değeri deney şartlarına, zeminin doğada etkisinde kaldığı gerilme durumuna ve özellikle drenaj şartlarına göre değişir.

Kayma mukavemeti parametreleri toplam gerilmeler cinsinden ifade edildiğinde  $c, \phi$  ile gösterilir. Toplam gerilme, zemin iskeleti ve boşluklardaki su tarafından taşınan gerilmelerin toplamı olduğuna göre  $\sigma'$  efektif gerilme,  $u$  boşluk suyu basıncı olmak üzere

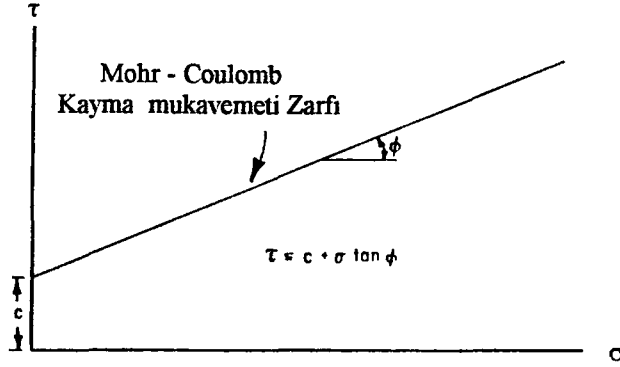
$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.2)$$

yazılabilir. Mohr-Coulomb denklemi efektif gerilmeler cinsinden,

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Toplam gerilmelere göre bulunan  $c$ ,  $\phi$  ve efektif gerilmelere göre bulunan  $c'$ ,  $\phi'$  kayma mukavemeti parametreleri, bağlı olduğu gerilme ve drenaj koşulları altında sabit olduğundan Mohr-Coulomb denklemi  $\sigma$ ,  $\tau$  eksen takımında bir doğru gösterir. Bu doğru üç eksenli deney sonuçlarına göre çizilen Mohr dairelerinin ortak teğetidir ve kırılma (göçme) zarfı adını alır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kayma mukavemeti parametreleri

Kayma mukavemeti parametreleri, genellikle drenaj şartlarının kontrol edilebileceği üç eksenli deneylerden bulunabilir. Aynı zemin için drenaj ve yükleme şartlarına bağlı olarak kayma mukavemeti denklemi toplam gerilmeler cinsinden şöyle ifade edilebilir,

Konsolidasyonsuz - Drenajsız (UU) üç eksenli deneylerde ,  $\tau_f = c_u + \sigma \tan \phi_u$

Konsolidasyonlu - drenajsız (CU) üç eksenli deneylerde ,  $\tau_f = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu}$

Konsolidasyonlu - Drenajlı (CD) üç eksenli deneylerde ,  $\tau_f = c_d + \sigma \tan \phi_d$

Konsolidasyonsuz - drenajsız ve konsolidasyonlu - drenajlı deneylerde boşluk basıncının ölçülmüş olması halinde Mohr-Coulomb eşitliği efektif gerilmelere göre,

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Drenajlı deneyde ise boşluk basıncı her durumda sıfır olduğundan eşitlik aynı zamanda efektif gerilmeler cinsinden yazılmış olmaktadır.

### 3.2 Kayma Mukavemetinin Üç Eksenli Deneylerle Belirlenmesi

Bilindiği gibi kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerinin laboratuvar deneyleri ile saptanması sık başvurulan bir tekniktir. Araziden örselenmemiş

olarak alınan zemin numunelerinin kayma mukavemetini bulmak için kullanılan laboratuvar tekniklerinden en yaygın olanı üç eksenli deneylerdir. Deneyin en büyük avantajı drenaj ve yükleme koşullarının kontrol edilebilmesi ve deney yönteminin bir parçası olarak boşluk suyu basıncı ölçümlerinin yapılabilmesidir.

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin deneysel olarak saptanmasında dikkat edilmesi gereken en temel kural, deney koşulları ile arazi koşulları arasında mümkün olduğunca en yüksek benzeşimi sağlayarak arazideki zemin davranışının laboratuvar deneylerinde örneklenebilmesidir.

Laboratuvar üç eksenli deneylerinde;

- Zemin numunesi arazi gerilmeleri altında konsolide edilebilmekte veya suya doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir.
- Yanal ve eksenel gerilmeler uygulamak suretiyle arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler yapılabilmektedir.
- Eksenel yüklemeler sırasında drenajlı veya drenajsız koşullar kontrol edilebilmektedir.
- Drenajsız yüklemelerde numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışları drenajlı deneyde ise numunede meydana gelen hacim değişimi artışları ölçülebilmektedir.

Üç eksenli basınç deneyi genelde iki aşamadan oluşmaktadır;

1.Aşama: Zemin numunesi üzerine arazide yüklenmeden önce etkiyen gerilmelerin hücre basıncı vasıtası ile yüklenmesi. Bu aşamada drenaja izin verilirse numune konsolide edilmektedir.

2.Aşama: Eksenel basınç uygulanması. Bu aşama drenajlı veya drenajsız olarak gerçekleştirilebilir ve drenajsız yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçları ölçülerek boşluk suyu basıncı tepkileri saptanabilir (Özaydın1989). Başlıca üç deney türü aşağıda açıklanmaktadır.

### 3.2.1. Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) Deneyi

Suya doymun kohezyonlu örselenmemiş veya yoğrulmuş numuneler üzerinde laboratuvarında yapılan bu tür deneylerde, numune drenajsız koşulda hidrostatik gerilmeler etkisinde kaldıktan sonra, aksenal basınç uygulaması aşamasında drenajsız olarak aksenal gerilme artırılarak göçmeye ulaşılır. Suya doymun killerde drenajsız şartlarda uygulanan hücre basıncında efektif gerilmeler değişmeden kalır ve uygulanan hücre basıncına eşit bir boşluk suyu basıncı doğar. Hacmi  $V$ , porozitesi  $n$  ve başlangıç boşluk suyu basıncı  $u_0$  olan suya doymun bir zemin elementini gözönüne alalım. Zemin elementinde  $\Delta\sigma_3$  kadarlık bir toplam gerilme artışı meydana gelirse bu gerilme artışına karşılık boşluk suyu basıncında da  $\Delta u_3$  kadar bir artış meydana gelecektir. Eğer zemin daneleri sıkışmaz kabul edilirse ve drenaja izin verilmezse zemin dane hacmindeki değişim ile boşluk hacmindeki değişim birbirine eşit olacaktır.

$$\Delta V_s = C_s V (\Delta\sigma_3 - \Delta u_3) \quad (3.5a)$$

$$\Delta V_v = C_v n V \Delta u_3 \quad (3.5b)$$

$$C_s V (\Delta\sigma_3 - \Delta u_3) = C_v n V \Delta u_3 \quad (3.5c)$$

$\Delta\sigma_3 - \Delta u_3$  = Herbir yönde efektif gerilmedeki artış

$C_s$  = zemin danelerinin sıkışma katsayısı

$C_v$  = boşluk için sıkışma katsayısı

$\Delta V_s$  = zeminin dane hacmindeki değişim

$\Delta V_v$  = zeminin boşluk hacmindeki değişim

Örselenmemiş suya doymun aynı deney numunelerinde, sırasıyla farklı hücre basınçları uygulanarak deney tekrarlandığında, efektif gerilmenin sabit kaldığı ve uygulanan hidrostatik hücre basıncına denk bir boşluk suyu basıncı oluşacağı (3.5) denklemlerinde açıklandığı gibi görülmektedir (Craig 1983). Drenajsız aksenal yükleme aşamasında uygulanan deviator gerilmeden dolayı boşluk suyu basıncı  $\Delta u_d$  gelişecektir. Böylece deviator gerilme aşamasının herhangi bir anında numunedeki toplam boşluk

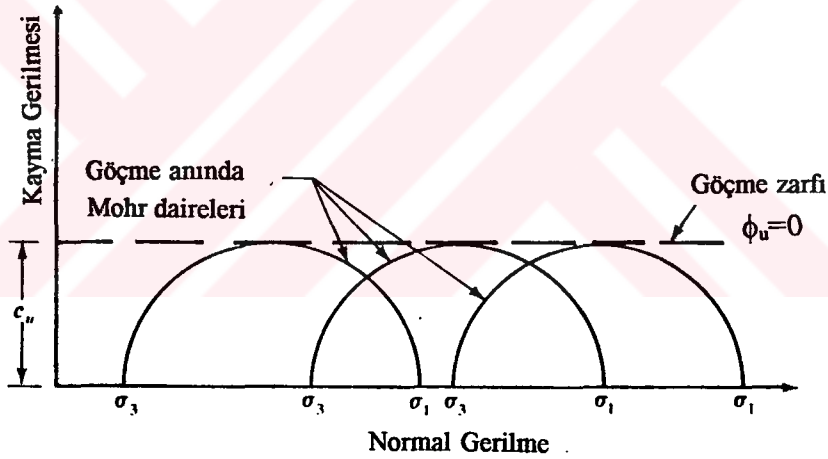


suyu basıncı  $u = \Delta u_3 + \Delta u_d$  kadar olacaktır. Suyu doymun zemin numunelerinde yapılan deneylere ait Mohr daireleri çizildiğinde Şekil 3.2 'de göçme zarfının yatay bir doğru olduğu görülebilir ve göçme anındaki boşluk suyu basınçları ölçüldüğünde tek bir efektif gerilme dairesi elde edilir. Ancak bir efektif gerilme dairesi elde edilebildiğinden, efektif kırılma zarfını belirleme olanağı yoktur. Yani kırılma anındaki deviator gerilme hücre basıncına ( $\sigma_3$ ' izotropik gerilme) bağlı değildir. Toplam gerilmelere göre yapılan stabilite analizlerinde kullanılan ve zeminin görünen kohezyonu ile gösterilen kayma mukavemeti,

$$\tau_f = c_u = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (3.6)$$

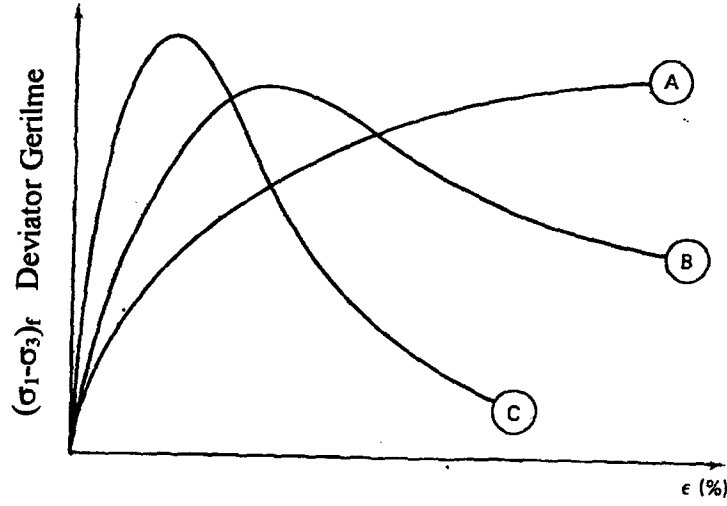
şeklinde ifade edilir.

$\Delta \sigma = (\sigma_1 - \sigma_3)$  gerilmesi uygulanan hücre basıncından bağımsız olduğundan bu deney şekline  $\phi_u = 0$  analizi (Skempton, 1948) denir.



Şekil 3.2 Konsolidasyonsuz drenajsız deneyden elde edilen toplam gerilme Mohr daireleri ve göçme zarfı.

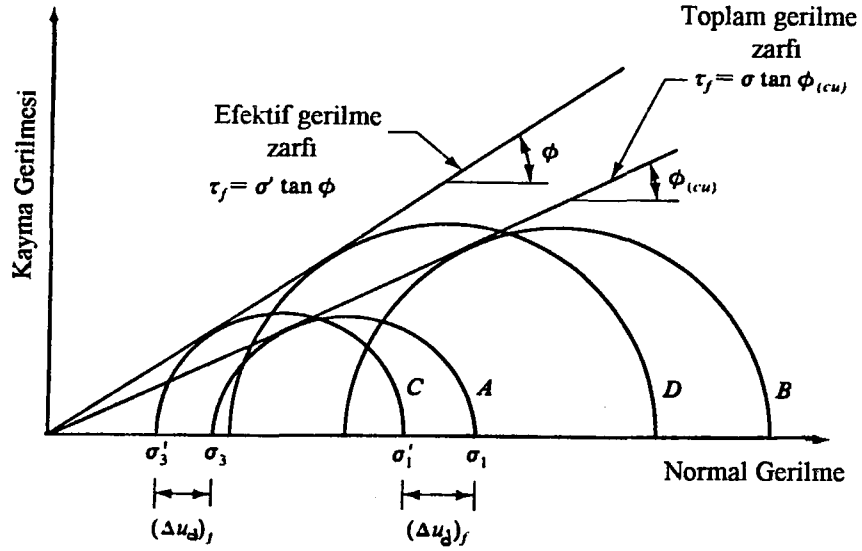
Şekil 3.3.'da konsolidasyonsuz -drenajsız üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme - birim deformasyon eğrileri gösterilmiştir. Burada (A) eğrisi yoğrulmuş ve bazı sıkıştırılmış zeminlerden, (B) orta hassaslıktaki örselenmemiş zeminlerden, (C) çok hassas örselenmemiş zeminlerden elde edilmiştir (Holtz & Kovacs 1981).



Şekil 3.3. Konsolidasyonsuz - Drenajsız deneylerden belirlenen tipik gerilme-birim deformasyon eğrileri

### 3.2.2. Konsolidasyonlu - Drenajsız (CU) Üç Eksenli Deneyi

Konsolidasyonlu - drenajsız deneylerde konsolidasyon basıncı izotropik veya anizotropik olabilir. Standart deneylerde suya doymun numune,  $\sigma_3$  izotropik gerilmesi altında konsolide edildikten sonra ( $u=B\Delta\sigma_3=0$ ), drenajsız şartlarda eksenel yük artırılarak göçmeye ulaşılır. Eksenel yükleme aşamasında boşluk suyu basınçları ölçülürse toplam ve efektif gerilmeler cinsinden kayma mukavemeti parametreleri belirlenebilir. Normal konsolide killerde, boşluk suyu basıncı şekil değiştirmeye artar. Şekil 3.4 'de tipik bir konsolidasyonlu drenajsız deneyden elde edilen Mohr daireleri görülmektedir. A ve B iki deneyden elde edilen toplam gerilme Mohr daireleri, C ve D'de efektif gerilme Mohr daireleridir. Oluşan boşluk suyu basıncının büyüklüğüne bağlı olarak toplam ve efektif gerilmeler cinsinden bulunan kayma mukavemeti parametreleri birbirinden farklıdır (Das 1990). Konsolidasyonsuz - drenajsız deneylerden bulunan kayma mukavemeti parametreleri  $c_{cu}$  ve  $\phi_{cu}$  pratikte problemlerin çözümünde genellikle kullanılmazlar. Fakat deney sırasında boşluk suyu basıncı ölçümü yapılırsa elde edilecek efektif kayma mukavemeti parametreleri  $c'$  ve  $\phi'$  değerleri geoteknik problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.

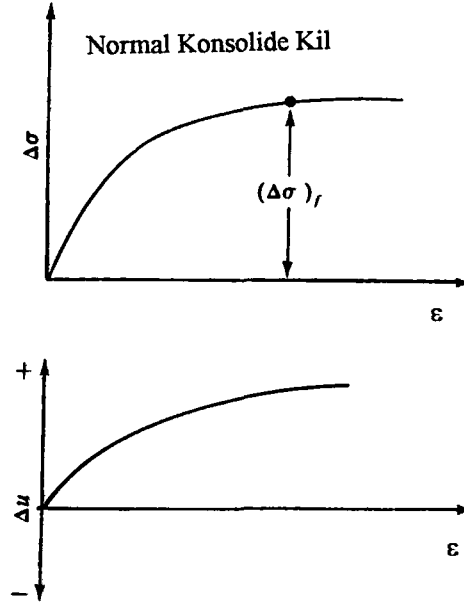


Şekil 3.4 Normal konsolide zeminlerde konsolidasyonlu-drenajsız deneylerde toplam ve efektif gerilme göçme zarfları

Normal konsolide kohezyonlu zeminlerde yapılan konsolidasyonlu - drenajsız deneylerde zeminin kohezyonsuz bir malzeme gibi davrandığı gözlenmiştir, boşluk oranının değişmesine bağlı olarak zeminin kayma mukavemeti de değişir. Bu deneyler sonucunda kayma mukavemeti normal konsolide killerde efektif parametrelere göre,

$$\tau = \sigma' \tan \phi' \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Normal konsolide suya doymuş zeminlerde, konsolidasyonlu drenajsız deneylerden elde edilen tipik gerilme birim deformasyon, boşluksuyu basıncı davranışı Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



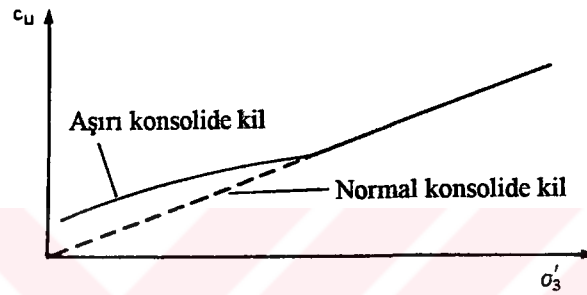
Şekil 3.5. Normal konsolide zeminlerde konsolidasyonlu drenajsız gerilme birim deformasyon, boşluk suyu basıncı davranışı

### 3.2.3. Konsolidasyonlu - Drenajlı (CD) Deneyi

Konsolidasyonlu - Drenajsız deneylerde olduğu gibi konsolide edilen suya doymun numunede konsolidasyon sonunda ( $u=0$ ), ve numune hacmindeki değişim drene olan boşluk suyu basıncı hacminden saptanabilir. Eksenel yükleme aşamasında drenajlı şartlarda boşluk suyu basıncı oluşmasına izin verilmeyecek ( $\Delta u_d=0$ ) bir yükleme hızında eksenel gerilme arttırılarak numunede göçmeye ulaşılır. Deney sırasında boşluk suyu basıncı oluşumuna izin verilmediğinden göçme anındaki toplam ve efektif gerilmeler  $\sigma_3=\sigma_3'$  ve  $\sigma_1=\sigma_1'$  birbirine eşit olacaktır. Suya doymun normal konsolide zeminler, konsolidasyonlu deneylerde kohezyonsuz bir malzeme gibi davrandığından  $c_d = 0$  olur ve kırılma zarfı, başlangıçtan geçen bir doğru şeklindedir. Normal konsolide killerde ve kumlarda kırılma anındaki hacim değişimi yaklaşık olarak sıfır kabul edildiğinden ve suya doymun zeminlerde yapılan drenajsız deneylerde de bütün deney boyunca hacim değişimi olmasına izin verilmediğinden normal konsolide killer için  $c' \cong c_d$  ve  $\phi' \cong \phi_d$  olduğu gösterilebilir.

### 3.3. Drenajsız Kayma Mukavemeti

Bilindiği gibi arazideki drenajsız mukavemet anizotropiktir, yani arazideki büyük asal gerilmenin yönü yada diğer bir deyimle kırma için uygulanan doğrultusuna bağlıdır. Normal konsolide killer için drenajsız mukavemet genellikle derinlikle artan düşey efektif gerilme ile doğrusal olarak artar. Bu durum konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli deneylerde  $\sigma_3'$  ve  $c_u$ 'nun değişimi ile karşılaştırılabilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. CU deneyinde konsolidasyon basıncı ile kayma mukavemeti değişimi

Normal konsolide killerde, drenajsız kayma mukavemeti konsolidasyon basıncına göre normalize edildiğinde her zemin tipinde sabit bir değer elde edilir.  $c_u/\sigma_v'$  ve plastisite indisi  $I_p$  arasındaki ilişki normal konsolide killer için Skempton (1957) tarafından ,

$$c_u / \sigma_v' = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (3.8)$$

eşitliği ile önerilmektedir.

Konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli deneyde killerin drenajsız mukavemeti konsolidasyon basıncı (konsolide edildiği izotropik basınç)  $\sigma_3'$  nün bir fonksiyonudur. İzotropik konsolidasyon basıncı deneyin drenajsız bölümünde kilin kayma mukavemeti üzerinde etkili değildir. Normal konsolide killerde  $c_u$  ile  $\sigma_3$  arasındaki ilişki Şekil 3.6 'daki gibi doğrusaldır ve başlangıçtan geçer. Aşırı konsolide zeminlerde ise bu ilişki doğrusal değildir.

Konsolidasyonsuz - drenajsız ve konsolidasyonlu - drenajsız üç eksenli deneylerde drenajsız yükleme aşamasında boşluk suyu basıncı ölçülmediğinde yükleme genellikle hızlı olarak gerçekleştirilir. Ancak göçme zamanı artarsa kayma mukavemeti oldukça azalır. Bu azalma killerin plastisitesi arttıkça daha da fazlaşır. Drenajsız yükleme aşamasında boşluk suyu basıncı ölçümü yapılan CU ve UU deneylerinde ise yükleme genellikle daha yavaş olarak yapılır ve boşluk suyu basıncındaki değişim ölçülebilir. Herbir deneyde maximum deviator gerilmeye ulaşıp artan gerilmeye karşın deviator gerilmede azalma meydana gelinceye veya %20 birim deformasyona kadar eksenel yüklemeye devam edilir. Drenajsız koşullar altında suya doymun zeminlerin toplam gerilmelere göre kayma mukavemeti bulunurken boşluk oranı sabit kalır, böylece  $c_u$  değeri suya doymun killerde belirli bir boşluk oranındaki mukavemettir. Tablo 3.1.'de zemin kıvamına göre killer için kayma mukavemeti değerleri belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Zemin kıvamına göre killer için kayma mukavemeti

Zemin Kıvamı	Drenajsız Kayma Mukavemeti (kN/m <sup>2</sup> )
Çok katı veya sert	>150
Katı	75-150
Orta katı	40-75
Yumuşak	20-40
Çok yumuşak	< 20

#### 3.4. Gerilme İzleri

Mohr gerilme dairesi, denge durumundaki her hangi bir noktada etkiyen gerilme durumunu grafiksel olarak gösteren yararlı bir araçtır ancak bazen gerilmeleri koordinatları  $1/2(\sigma_1' - \sigma_3')$ ,  $1/2(\sigma_1' + \sigma_3')$  veya  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_3'$  olan bir gerilme noktası ile göstermek daha kullanışlı olmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde birçok durumda deney numunesinde veya arazi zemin elementinde, yükleme veya boşaltma sırasındaki gerilme durumu görülmek istenir. Mohr daireleri serisi ile gerilmelerin durumu gösterilebilir

ancak sadece gerilme noktalarını göstermek daha kolaydır ve bu gerilme noktalarının oluşturduğu hatta “gerilme izi” adı verilir.

Üç eksenli deneylerde kırılma anında elde edilen  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  deviator gerilmesi  $\tau/\sigma$  eksen takımında Mohr dairesinin, bir  $\sigma_3$  hücre basıncındaki çapını vermektedir. Deney sonuçları,

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (3.9)$$

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 \quad (3.10)$$

eksen takımında gösterildiğinde p ve q eşitlikleri ile bulunan gerilme izine toplam gerilme izi (T.G.İ.) denir ve yatayla 45°'lik açı yapar. T.G.İ. farklı hücre basıncı değerlerinde de yatayla aynı açığı yapan doğrudur. Boşluk suyu basınçlarının ölçüldüğü deneylerde efektif gerilme izi (E.G.İ.) de çizilebilir. Bu durumda ,

$$q' = (\sigma_1' - \sigma_3') / 2 \quad (3.11)$$

$$p' = (\sigma_1' + \sigma_3') / 2 \quad (3.12)$$

Şekil 3.7 'de normal konsolide bir kilde yapılan konsolidasyonlu drenajsız deneyden elde edilen gerilme izleri görülmektedir.

Eksenel simetri durumunda ( $\sigma_2' = \sigma_3'$ ),

$$q = q' = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.13)$$

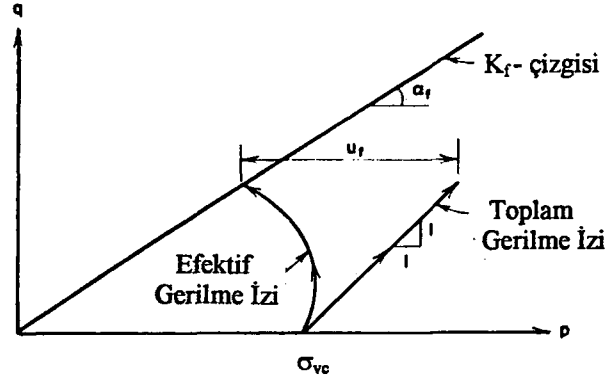
$$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 2, \quad p' = [(\sigma_1 + 2\sigma_3) / 2] - u \quad (3.14)$$

olacak şekilde oktahedral gerilmeler hesaplandığında T.G.İ. yatayla 1:3 eğim yapar.

Geoteknik mühendisliğinde genellikle zeminlerin göçme anındaki durumlarıyla ilgilendiğinden, Mohr-Coulomb göçme zarfı ile  $K_f$  göçme çizgisi arasındaki ilişki belirlenebilir. Şekil 3.8.'de p' ve q' eksen takımında gösterilen gerilme durumu görülmektedir. Burada  $K_f$  çizgisinin denklemi,

$$1/2(\sigma_1' - \sigma_3') = a' + 1/2(\sigma_1' + \sigma_3') \tan \alpha' \quad (3.15)$$

eşitliği ile ifade edilir.



Şekil 3.7. Normal konsolide kilde konsolidasyonlu drenajsız deneyden elde edilen gerilme izleri.

$a'$  ve  $\alpha'$  düzeltilmiş kırılma zarfı parametreleridir. Böylece  $q'$  ve  $p'$  diyagramından kayma mukavemeti parametreleri  $c'$  ve  $\phi'$  de hesaplanabilir. Burada,

$$c' = a' / \cos \phi' \quad (3.16)$$

$$\phi' = \sin^{-1}(\tan \alpha') \quad (3.17)$$

olduğu gösterilebilir. Gerilme noktasından  $45^\circ$ 'lik açı ile çizilen doğrunun yatayı kestiği noktalar  $\sigma_1'$  ve  $\sigma_3'$  nü vermektedir. Normal konsolide killerde  $c' = 0$  olacağından  $\sin \phi' = \tan \alpha'$  olmaktadır (Şekil 3.8).

Benzer şekilde üç eksenli deney sonuçlarında efektif büyük asal gerilme, efektif küçük asal gerilmeye karşılık çizildiğinde uzay diagonalı  $\sigma_2' = \sigma_3'$  nü temsil eder ve yatayla  $45^\circ$ 'lik açı yapar. Efektif gerilme göçme zarfının denklemi,

$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2 [45 + (\phi / 2)] + 2c \tan [45 + (\phi / 2)]$$



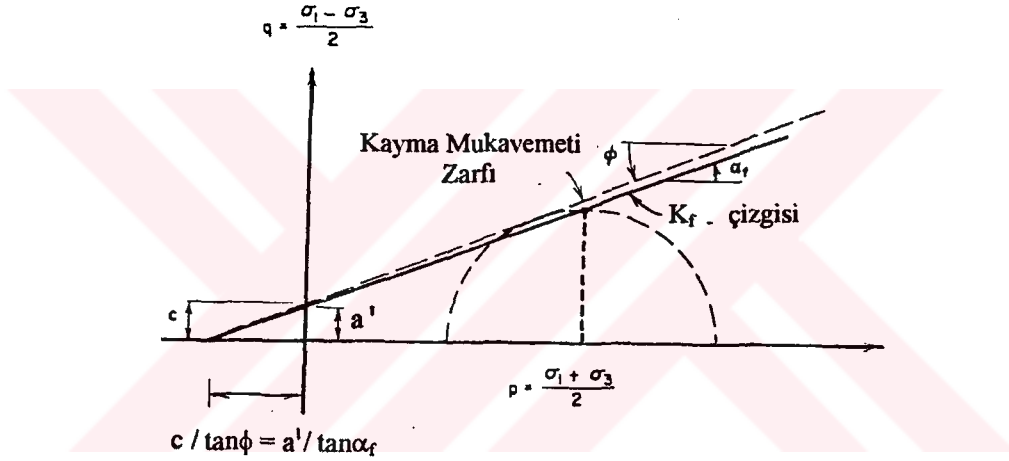
$$\sigma_1' = \sigma_3'(\tan\alpha') + a' \quad (3.18)$$

ile ifade edilir ve

$$\tan\alpha' = \tan^2[45 + (\phi / 2)] \quad (3.19)$$

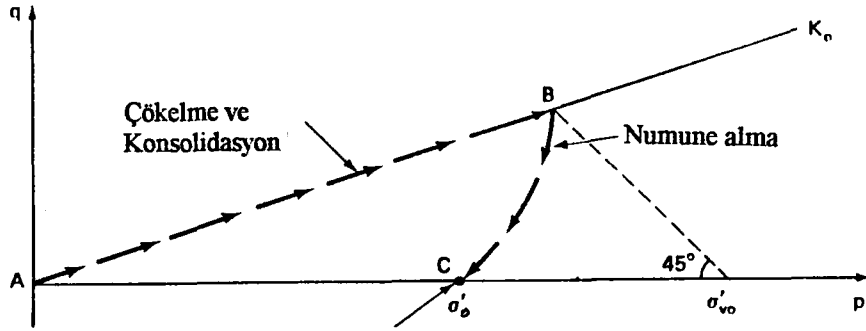
$$a' = 2c \tan [45 + (\phi / 2)] \quad (3.20)$$

olarak yazılır.  $\sigma_1'$  ve  $\sigma_3'$  'ne karşı çizildiğinde göçme zarfı yatayla  $\alpha'$  açısını yapar (Das 1990).



Şekil 3.8 Gerilme durumunun  $q'$  ve  $p'$  koordinat sisteminde gösterilişi

Zemin numunesi arazideki yerinden çıkarıldığında, üzerindeki düşey efektif gerilme  $\sigma_{vo}$  kaldırıldığından gerilme boşalması meydana gelir bu durumda gerilme izi Şekil 3.9'da gösterildiği gibi BC çizgisi boyunca devam eder (Holtz & Kovacs 1981).



Şekil 3.9. Gerilme boşalması durumunda gerilme izindeki değişim

### 3.5. Boşluk Suyu Basıncı Katsayıları

Boşluk suyu basıncı katsayıları, drenajsız koşullar altında toplam gerilme değişiminden dolayı boşluk suyu basıncındaki değişimi açıklamak için kullanılmıştır. Boşluk suyu basıncı katsayıları, laboratuvar deneyleri ile arazideki gerilme durumu örneklenerek tahmin edilebilmektedir. Konsolidasyonlu - drenajsız deneylerde oluşan boşluk suyu basıncındaki değişime Skempton (1954)'e göre;

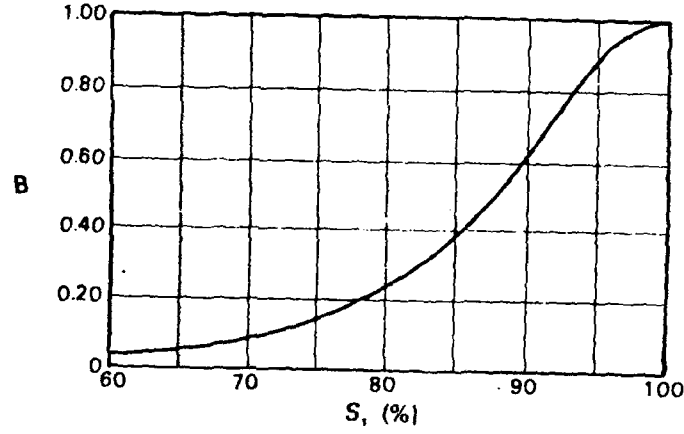
$$\Delta u = B[ \Delta \sigma_3 + A( \Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 ) ] \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Burada, A ve B boşluk suyu basıncı katsayıları  $\Delta \sigma'$ 'lar ise asal gerilmelerdeki değişimleri ifade eder. B zeminin suya doygunluğuna bağlıdır ve suya doygunluk derecesi  $S = \%100$  olan zeminlerde  $B = 1$  değerini alırken, kısmen suya doygun ( $S < \%100$ ) zeminlerde  $B < 1$  olmaktadır. B değeri üç eksenli deneylerde, hidrostatik yükleme aşamasında numunede drenajsız durumda hidrostatik basınç altında meydana gelen boşluk suyu basıncı artışları ölçülerek bulunabilir. Meydana gelen boşluk suyu basıncı artışının ( $\Delta u_3$ ) uygulanan hidrostatik basınca ( $\Delta \sigma_3$ ) oranı Skempton (1954), tarafından

$$B = \Delta u_3 / \Delta \sigma_3 \quad (3.22)$$

olarak tariflenmektedir. Şekil 3.10 'da doygunluk derecesi ile  $B$  arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Doygunluk derecesi ile  $B$  arasındaki ilişki

Drenajsız deneylerde, eksenel yükleme sırasında zeminin boşluk suyu basıncında meydana gelen değişimler ikinci bir boşluk suyu basıncı parametresinin tanımlanmasında kullanılmaktadır (Skempton, 1954).

$$A = \Delta u_d / [(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) B] \quad (3.23)$$

$A$  parametresinin değeri zeminin gerilme tarihçesine ve etkili gerilme seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Kırılma sırasında  $A$ 'nın değeri  $A_f$  olarak tariflenmiş olup zemin cinslerine göre  $A_f$  şu değerleri almaktadır.

Tablo 3.2. Zemin cinsine göre  $A_f$ 'in değişimi

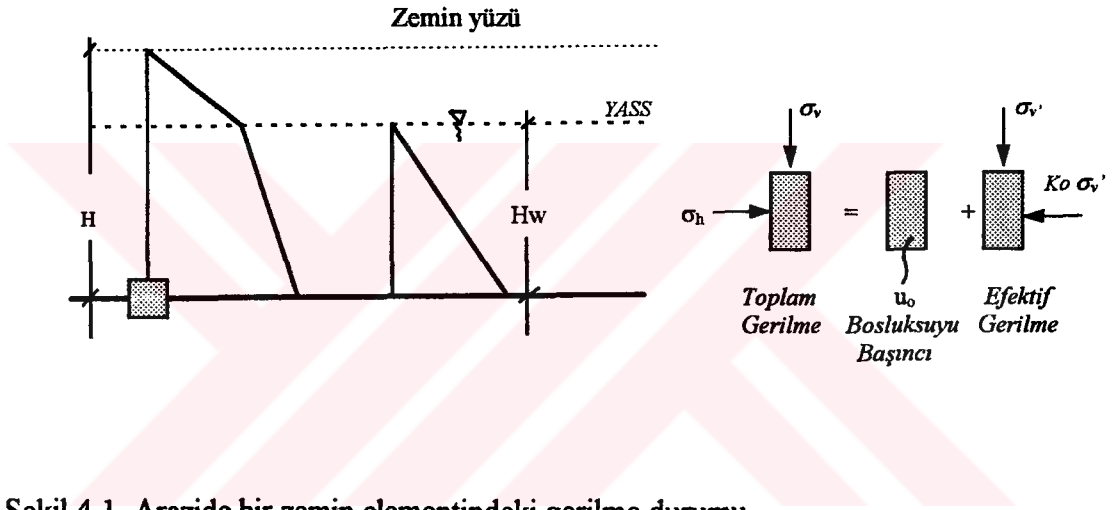
Zemin Cinsi	$A_f$ Katsayıları
Çok hassas killer	$1.5 > A_f > 1$
Normal konsolide killer	$1 > A_f > 0.5$
Aşırı konsolide killer	$0.5 > A_f > 0$
Çok aşırı konsolide killer	$0 > A_f > -0.5$

## BÖLÜM 4

### 4. GERİLME BOŞALMASININ GEOTEKNİK PARAMETRELERE ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

#### 4.1. Arazi Gerilmeleri ve Boşluk Suyu Basıncındaki Değişim

Şekil 4.1 'deki H derinliğinde ve  $\gamma$  birim hacim ağırlığında bir arazi zemin elementindeki toplam ve efektif gerilmelere göre gerilme durumunu inceleyelim,



Şekil 4.1 Arazide bir zemin elementindeki gerilme durumu

Şekil 4.1 'deki arazi zemin elementinde zeminin kendi ağırlığından dolayı oluşan toplam ve efektif gerilmeler aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$\sigma_v = \gamma.H \quad (4.1)$$

$\sigma_v$  = Toplam düşey gerilme

$$\sigma_h = K_0.\sigma_v' + u_0 \quad (4.2)$$

$\sigma_h$  = Toplam yanal gerilme

$u_0$  = Başlangıç boşluk suyu basıncı

$$\sigma_v' = \sigma_v - u_0 \quad (4.3)$$

$\sigma_v'$  = Düşey efektif gerilme

$$\sigma_h' = K_0 \sigma_v' = \sigma_h - u_0 \quad (4.4)$$

$$u_0 = \gamma_w \cdot H_w \quad (4.5)$$

$\sigma_h'$  = Yanal efektif gerilme

$H_w$  = Y.A.S.S. yüksekliği

$\gamma_w$  = Suyun birim hacim ağırlığı

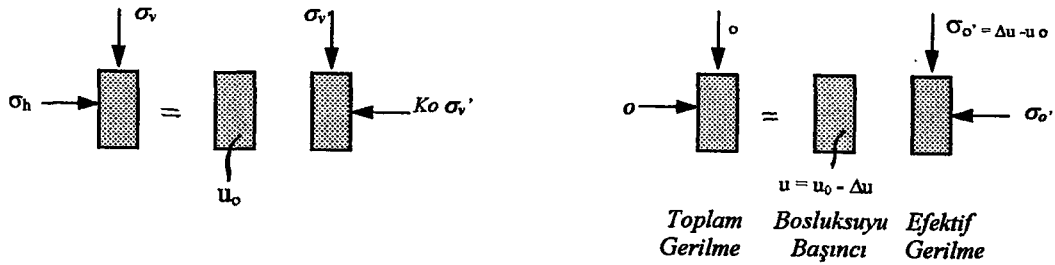
$K_0$  = Sükunetteki toprak basıncı katsayısı

#### 4.1.1. Suyu Doymun Killerden Alınan Örselenmemiş Numunelerde Gerilme Durumu

Bir zemin numunesi arazideki yerinden çıkarıldığında üzerine etkiyen toplam dış gerilmeler boşaltılmış olur ve zeminde şişme eğilimi gözlenir. Şişme eğilimi negatif boşluk suyu basıncını doğurur ve zeminde kabarma engellenir. Örselenmemiş kil numunelerinde gerilme durumunu değerlendirmek için çeşitli kabuller yapılmaktadır,

a) Numune alma işleminde fiziksel örselenme olmadığı

b) Gerilme boşalması durumunda oluşan çekme gerilmelerinin boşluk suyu tarafından taşındığı



a) numune almadan önce

b) numune aldıktan sonra

Şekil 4.2 Arazide suya doymun örselenmemiş bir zemin elementinde numune almadan önceki ve numune alındıktan sonraki durum.

Numune alma sonucunda oluşan gerilme boşalması sonucu boşluk suyu basıncında azalma meydana gelmektedir. Böylece örselenmemiş numunedeki boşluk suyu basıncı,

$$u = u_0 - \Delta u \quad (4.6)$$

olmaktadır.

$\Delta u$  = Gerilme boşalması nedeniyle boşluk suyu basıncında meydana gelen değişimdir.

Şekil 4.2b'den de görüldüğü gibi zemin elementi üzerine etkiyen toplam gerilmenin sıfır olması nedeniyle boşluk suyu basıncı her yönde hidrostatik olarak etkir. Böylece örselenmemiş numune üzerine etkiyen efektif gerilme ( $u_{Ri} = \sigma_0'$ ) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$u_{Ri} = \sigma_0' = \Delta u - u_0 \quad (4.7)$$

Hidrostatik efektif gerilmenin şiddetini hesaplamak için  $\Delta u$ ' yu hesaplamak gerekir. Bir zemin elementinde büyük asal gerilmede meydana gelen değişim  $\Delta \sigma_1$ , küçük asal gerilmede meydana gelen değişim  $\Delta \sigma_3$  ve gerilme boşalması sırasındaki boşluk suyu basıncı katsayıları  $A_u$  ve  $B_u$  ise boşluk suyu basıncındaki değişim  $\Delta u$  Skempton eşitliği (3.22) ile bulunabilir. Normal konsolide zeminler için  $K_0 < 1$  ve suya doymun zeminler için  $B_u = 1$  alınırsa, boşluk suyu basıncındaki değişim aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

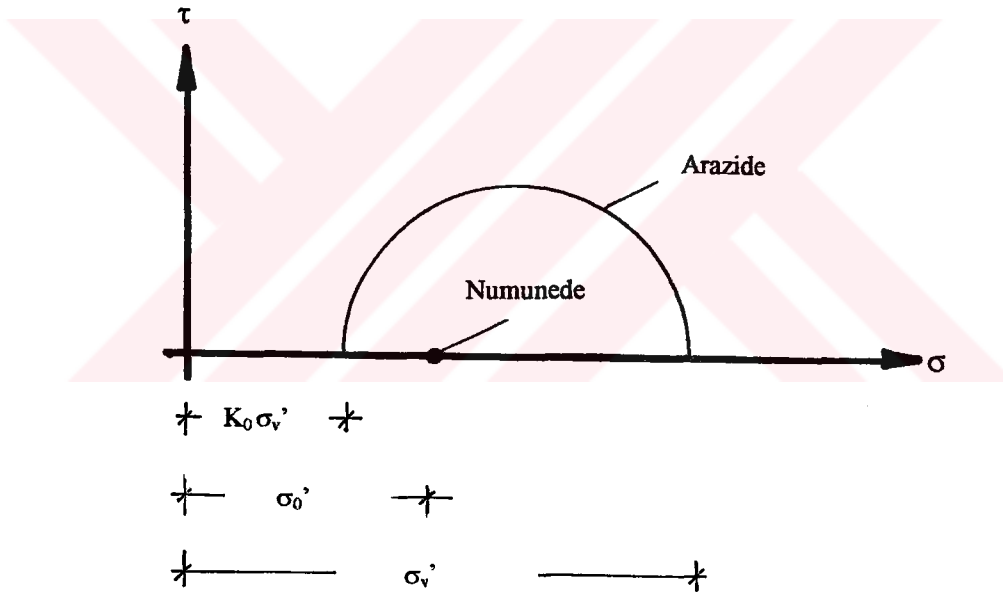
$$\Delta u = \sigma_h + A_u(\sigma_v - \sigma_h) \quad (4.8)$$

ve (4.8) eşitliği (4.7) eşitliğinde yerine yazılarak (4.9) eşitliği elde edilmektedir.

$$u_{Ri} = \sigma_0' = \sigma_v' [K_0 + A_u (1 - K_0)] \quad (4.9)$$

#### 4.2. Drenajsız Kayma Mukavemetine Etkileri

Gerilme boşalmasından sonra suya doygun örselenmemiş normal konsolide numunelerde su muhtevasının değişmeden kaldığı kabul edilse bile, numune üzerinde etkili gerilme sistemi değişmektedir. Anizotropik olarak etkiyen arazi gerilmeleri izotropik efektif gerilmeye dönüşür ve bu gerilme arazide etkili düşey efektif gerilmeden küçüktür. Bu gerilme transferi net hacim değişimine sebep olmaz ve örselenmemiş numunenin su muhtevası değişmeden kalırsa arazi zemin elementi ile laboratuvar deneyindeki göçme durumu karşılaştırıldığında başlangıçtaki efektif gerilmelerin farklı olması nedeniyle drenajsız kayma mukavemetinin aynı olmadığı belirlenebilir. Şekil 4.3'de arazide ve örselenmemiş numunede efektif gerilmelerin başlangıç durumları karşılaştırılmıştır.

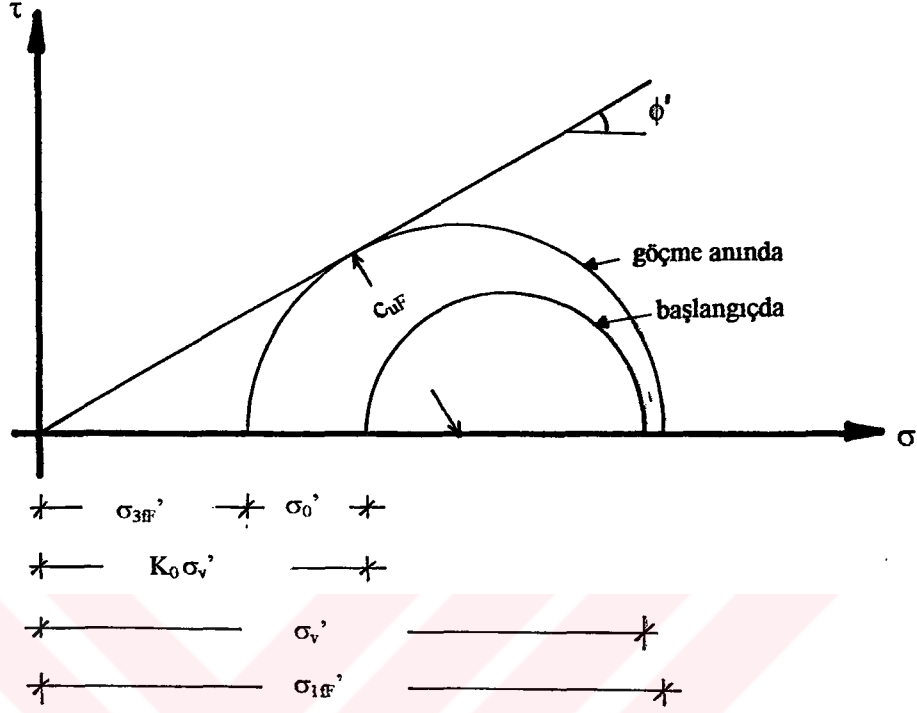


Şekil 4.3. Arazide ve örselenmemiş numunede gerilmelerin başlangıç durumu

##### 4.2.1. Arazide Suya Doygun Normal Konsolide Killerin Drenajsız Kayma Mukavemeti

Arazi zemin elementinde başlangıç ve göçme anındaki gerilme durumu Şekil 4.4 'de gösterilmiştir. Arazide göçme anındaki drenajsız mukavemet  $c_{uF}$  , ile gösterilmiştir,

burada alt indis  $F$  ve  $f$  sırasıyla araziye ve göçme anını örneklemektedir. Örneğin  $(\sigma_{3fF})$  arazide göçme anındaki efektif küçük asal gerilme değerini ifade etmektedir.



Şekil 4.4 Arazi zemin elementinde başlangış ve göçme anındaki gerilme durumu

Arazide normal konsolide suya doymun bir zeminde göçme anındaki drenajsız kayma mukavemeti Şekil 4.4 'den de görüldüğü gibi aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir,

$$c_{uF} = (\sigma_{3fF}' + c_{uF}) \cdot \sin\phi \quad (4.10a)$$

$$c_{uF} = 1/2(\sigma_1 - \sigma_3)_{fF} = 1/2 (\sigma_1' - \sigma_3')_{fF} \quad (4.10b)$$

$$c_{uF} = (\sigma_{3fF}' \sin\phi) / (1 - \sin\phi) \quad (4.10c)$$

Arazide göçme anındaki küçük asal gerilme aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir,

$$\sigma_{3fF}' = K_0 \sigma_v' + \Delta\sigma_3 - \Delta u \quad (4.11a)$$

ve suya doymun zeminlerde ( $B=1$ ) alınırsa,



$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A_{ff}(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)_F \quad (4.11b)$$

yazılabilir.

$A_{ff}$  = Arazi de göçme anındaki boşluk suyu basıncı katsayısı

(4.11b) eşitliği (4.11a) eşitliğinde yerine yazılırsa, (4.11c) eşitliği elde edilmektedir.

$$\sigma_3'_{ff} = K_0 \cdot \sigma_v' - A_{ff} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)_F \quad (4.11c)$$

$(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)_F$ 'i hesaplamak için, Şekil 4.5 'den aşağıdaki eşitlik yazılabilir,

$$(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)_F = 2c_{uf} - (1 - K_0) \sigma_v' \quad (4.12)$$

ve sonuçta (4.13) eşitliği yazılarak, arazi düşey efektif gerilmesinde normalize edilirse (4.14) eşitliği elde edilerek,

$$c_{uf} = \sigma_v' \sin \phi [ K_0 + A_{ff} (1 - K_0) ] / [ 1 + (2.A_{ff} - 1). \sin \phi ] \quad (4.13)$$

$$c_{uf} / \sigma_v' = \sin \phi [ K_0 + A_{ff} (1 - K_0) ] / [ 1 + (2.A_{ff} - 1). \sin \phi ] \quad (4.14)$$

arazide göçme anındaki boşluk suyu basıncı katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$A_{ff} = \Delta u_d / \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4.15)$$

#### **4.2.2.Suya Doygun Örselenmemiş Normal Konsolide Kil Numunelerin Drenajsız Kayma Mukavemeti**

Laboratuvar numunesinin drenajsız kayma mukavemeti  $c_{us}$  ile gösterilmiştir. İfadelerdeki alt indis s ve f sırasıyla laboratuvar numunesini ve göçme anını örneklemektedir.

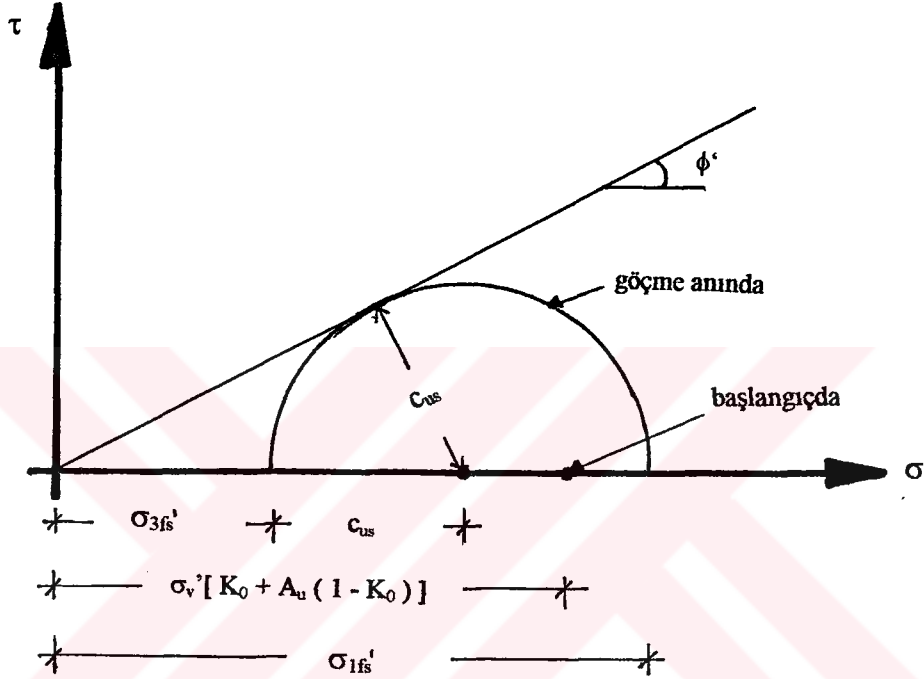
Şekil 4.5'de görüldüğü gibi laboratuvar numunesinin drenajsız kayma mukavemeti aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir,

$$c_{us} = (\sigma_{3fs}' + c_{us}) \sin \phi \quad (4.16a)$$

$$c_{us} = \sigma_{3fs}' \sin \phi / (1 - \sin \phi) \quad (4.16b)$$

Şekil 4.5'den göçme anındaki küçük asal gerilmenin değeri yazılarak,

$$\sigma_{3fs}' = \sigma_0' + \Delta \sigma_3 - \Delta u \quad (4.17a)$$



Şekil 4.5 Suya doymun normal konsolide örülenmemiş bir kil numunesinde başlangıç ve göçme anındaki efektif gerilmeler

(4.17a) eşitliği elde edilir ve (4.9) eşitliğinde (4.17a) 'yı yerine yazarsak,

$$\sigma_{3fs}' = \sigma_v' [K_0 + A_u (1 - K_0)] + \Delta \sigma_3 - \Delta u \quad (4.17b)$$

eşitliği elde edilerek ve  $\Delta u = \Delta \sigma_3 + A_{fs} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)_{fs}$  eşitliği (4.17b) eşitliğinde yerine yazılarak,

$$\sigma_{3fs}' = \sigma_v' [K_0 + A_u (1 - K_0)] - A_{fs} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)_{fs} \quad (4.17c)$$

eşitliği elde edilebilir ve buradan laboratuvar numunesinin drenajsız kayma mukavemeti aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$c_{us} = 1/2(\sigma_1 - \sigma_3) = 1/2[ (\sigma_0' + \Delta\sigma_1 - \Delta u) - (\sigma_0' + \Delta\sigma_3 - \Delta u) ] \quad (4.18a)$$

$$2 c_{us} = (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)_{fs} \quad (4.18b)$$

(4.17c) eşitliğinde (4.18b) yerine yazılırsa laboratuvar numunesinin drenajsız kayma mukavemeti aşağıdaki eşitliklerle elde edilebilir,

$$c_{us} = \sigma_v' \sin\phi [ K_0 + A_u(1 - K_0) ] / [1 + (2A_{fs} - 1) \sin\phi] \quad (4.19a)$$

$$c_{us} / \sigma_v' = \sin\phi [ K_0 + A_u(1 - K_0) ] / [1 + (A_{fs} - 1) \sin\phi] \quad (4.19b)$$

$$c_{us} = 1/2(\sigma_1' - \sigma_3')_{fs} \quad (4.19c)$$

ve gerilme boşalmasına maruz kalmış laboratuvar numunesinde göçme anındaki boşluk suyu basıncı katsayısı  $A_{fs}$  aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir,

$$A_{fs} = \Delta u_d / (\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (4.20)$$

(4.19a) eşitliğinde görüldüğü gibi normal konsolide suya doygun örselenmemiş kil numunesinin drenajsız kayma mukavemeti, araziden numune almadan önceki efektif gerilmelere ( $\sigma_v'$ ,  $K_0$ ) göre kayma mukavemeti parametrelerine bağlıdır. Boşluk suyu basıncı katsayısı  $A_{fs}$ , zeminin gerilme tarihçesine ve doku yapısına göre değişir ve  $A_u$  ise numunenin arazideki yerinden çıkarılması sırasındaki gerilme değişiminin etkilerini temsil eder. Yukarıda ki ifadelerden de görüldüğü gibi arazideki gerilme durumunda elde edilen drenajsız kayma mukavemetiyle laboratuvar deneylerinden ölçülen drenajsız mukavemeti aynı değildir. Bu farklılığın birçok sebebi vardır,

1. Arazideki ve laboratuvardaki göçme düzlemi arasındaki farklar. Genellikle arazideki deformasyonlar düzlemsel şekil değiştirme durumunda meydana gelir, laboratuvar deneylerinde ise eksenal simetrik şekil değiştirmelerle oluşur.
2. Arazideki göçme düzleminin yönelimi, laboratuvar deney numunelerinininkinden farklıdır.
3. Araziden numune alma ve laboratuvar deney aletine aktarılmasına kadar numunede meydana gelen değişimler.
  - a) Gerilme boşalması nedeniyle efektif gerilmede meydana gelen değişiklikler. Bu değişimlerin numune alınması sırasında gösterilecek özenle alakası yoktur. Arazide yerinden çıkarılan her numunede bu değişimler kaçınılmazdır.
  - b) Numune alma, taşıma, saklama ve deney için hazırlama sırasında oluşan fiziksel örselenmeler (Noorany & Seed 1965).

#### ***4.3. Gerilme Boşalmasının Drenajsız Elastisite Modülüne Etkileri***

Bütün zeminler lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı gösterirler. Sadece başlangıç noktası yakınındaki dar bir bölgede lineer davranırlar ve bu kısmın eğimi de zeminlerin başlangıç tanjant modülü ( $E_t$ ) diye anılır. Başlangıç tanjant modülü çok küçük birim deformasyon aralıklarında ölçüldüğü için bu aşamada drenajsız yükleme durumunda bile artık boşluk suyu basıncı oluşmaz. Bu nedenle  $E_t$  'deki değişim zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışının numune örselenmesinden etkilendiğini gösterir. Zeminler başlangıç noktası yakınlarında ki dar bir bölge dışında doğrusal olmayan davranış gösterdiği için başlangıç ile maximum gerilmenin yarısından geçen doğrunun eğimi de Secant modülü ( $E_s$ ) diye tanımlanır. Drenajsız deneylerden hesaplanan elastisite modülünü belirtmek için ise alt indis "u" kullanılır ve ( $E_u$ ) ile gösterilmektedir. Şekil 4 .6'da gerilme - birim deformasyon eğrisinde başlangıç tanjant modülü ve secant modülünün tanımlanması görülmektedir.

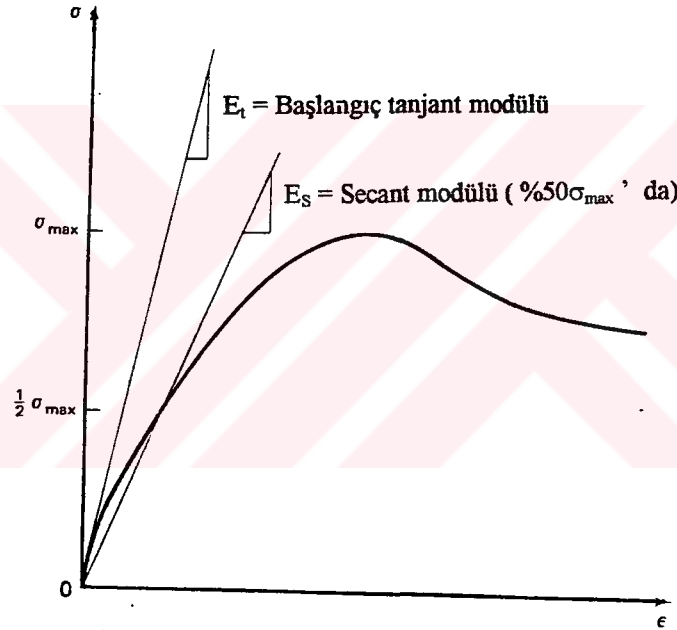
Drenajsız elastisite modülü değeri genellikle;

- Hücre basıncına bağlı olarak değişir (serbest basınç deneyinde minimum değerini alır,  $\sigma_3 = 0$ ).
- Aşırı konsolidasyon oranı (OCR) arttıkça genellikle  $E_u$  artar.

- Daha küçük su muhtevası değerlerinde  $E_u$  daha büyük, daha büyük su muhtevası değerlerinde ise daha küçüktür.

- Numunenin fiziksel örselenmesi ve gerilme örselenmesi sebebi ile  $E_u$  genellikle azalır.

Hassaslığı yüksek yumuşak normal konsolide killerin maximum yapısal direncinin mobilize olması için gereken aksel deformasyon çok küçüktür (yaklaşık olarak %0.3'tür). Üç eksenli deneylerde numune alma metodu ve deney yöntemi aşırı konsolide zeminlerin kayma mukavemeti üzerinde çok etkili olmasa bile tanjant modülü üzerinde çok etkilidir. Örselenmenin artması ile genel olarak göçme şekil değiştirmesi oranı artar. Çok örselenmiş numuneler için genellikle göçme yükünün yarısındaki şekil değiştirme oranı %1 iken göçme şekil değiştirmesi %10 veya daha fazla mertebelere ulaşabilir.



Şekil 4.6. Elastisite Modüllerinin tanımlanması

David ve Paulos (1967) tarafından yapılan deneysel çalışmada, arazideki zemin davranışının gösterdiği drenajsız modülün tespiti için örselenmemiş üç eksenli numunesi arazi efektif gerilmeleri altında  $K_0$  koşullarında konsolide edilerek numuneyi arazideki başlangıç durumuna getirip drenajsız şartlarda kırmışlardır. Benzer bir çalışma olarak yine Simons ve Som (1970) tarafından yapılan iki deneysel çalışmada araziden alınan örselenmemiş numuneleri önce laboratuvarında  $K_0$  koşullarında arazi gerilmeleri altında

konsolide edilip başlangıç gerilme durumuna getirerek, daha sonrada arazi düşey efektif gerilmesinde izotropik olarak konsolide ettikten sonra kırmışlardır. Her iki çalışma sonucunda numuneyi  $K_0$  koşullarında konsolide ederek başlangıç gerilme durumunu örnekleyerek ölçülen elastisite modülünün geleneksel üç eksenli deneylerden elde edilen elastisite modülünden çok daha büyük olduğu belirlenmiştir. Simons (1957), Raymond ve diğerleri (1971), tarafından yapılan çalışmalara göre numune örselenmesinin ve gerilme boşalması etkisinin zeminlerin elastisite modülü üzerinde çok etkili olduğu ve bu gerilme örselenmesinin etkilerinin azaltılabilmesi için numunelerin arazi gerilmelerinde tekrar konsolide edilerek bu etkinin kısmende olsa giderilebileceğini belirtmişlerdir. Ladd (1977), fazla örselenmiş hassas killerin tekrar konsolidasyondan sonra su muhtevasının değişebileceğini ve daha katı bir kıvama sahip olarak, elastisite modülünün gerçek değerinden daha fazla hesaplanabileceğini vurgulamıştır.

Laboratuvar deney sonuçlarından elastisite modülünün tahminindeki zorluklardan dolayı, bazı zemin türlerinde arazi deneyleriyle ölçülmüş elastisite modülünün değişim aralığı Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Bazı zeminlerde arazi deneyleriyle ölçülmüş elastisite modülleri

Zemin Türü	$E_s$ (Mpa)
Çok yumuşak kil	2 - 15
Yumuşak kil	5 - 25
Orta yumuşak kil	15 - 50
Sert kil	50 - 100
Kumlu kil	25 - 250
Silt	2 - 20

$E_w/c_u$  oranı zemin türlerine göre oldukça farklı değerler almaktadır. Ladd (1964), Bjerrum (1972), tarafından yapılan çalışmalarda kayma gerilmesi seviyesinin  $E_u'$  yu oldukça fazla etkilediği,  $E_w/c_u$  oranlarının küçük değerlerinin yüksek plastisiteli killerde yüksek kayma gerilmesi seviyelerinde, küçük değerlerinin ise düşük plastisiteli killerde küçük kayma gerilmesi seviyelerinde elde edildiğini belirtmişlerdir. Laboratuvar deneyleri

ile belirlenen  $E_u$  değerinin az tahmininde, üç eksenli deneyler için örselenmemiş numune alımı sırasındaki fiziksel örselenme ve gerilme örselenmesi etkilerinden başka deney sırasında eksenel birim deformasyonun sağlıklı ölçümü gibi hususlarda çok etkilidir.



## **BÖLÜM 5**

### **5. KULLANILAN NUMUNE ÖZELLİKLERİ VE DENEY TEKNİKLERİ**

Geoteknik problemlerin araştırmasına pratikte araziden numune alma ile başlanır. Bu numuneler laboratuvara taşınarak laboratuvar deneyleri yapılır, fakat numune alma sonucu iki önemli problemle karşılaşmaktadır, bunlar fiziksel örselenme ve gerilme örselenmesidir. Bu çalışmanın amacında gerilme örselenmesinin (gerilme boşalması) geoteknik parametreler üzerindeki etkileri ve bu etkilerin belirlenerek azaltılması için yöntem önermektedir. Bu amaçla, konsolidometre aleti kullanılarak gerilme tarihçesi belirli homojen numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde III seri üç eksenli basınç deneyi uygulanarak gerilme boşalmasının geoteknik parametreler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Arazideki zemin davranışını laboratuvar deneyleri ile örnekleyebilmek için numunenin üç eksenli deney aygıtında oktahedral izotropik gerilme altında tekrar konsolidasyonu denenmiştir. Deney numunelerinin gerilme tarihçesi bilindiğinden, üç seri üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından gerilme örselenmesinin numunelerin mühendislik davranışları üzerindeki etkileri saptanmıştır.

#### **5.1. Deney Numuneleri**

Çalışma likit ve plastik limit özellikleri birbirinden çok farklı iki numune üzerinde yapılmıştır. Birisi İstanbul ve tüm Trakya bölgesinde sıkça rastlanan , aşırı konsolide olduğu bilinen ve kuru iken çok sert, bünyesine su aldığı anda ise çok çabuk yumuşayan şişme potansiyeli yüksek, yeşil renkli olan İstanbul yeşil kili olup Lüleburgaz bölgesinden getirilmiştir. Eskişehir kaoleni adı verilen diğer numune ise, Eskişehir kaolen yataklarından çıkarılmış, porselen imalatında kullanılan pembe renkli bir numunedir. Yıldız porselen fabrikasından sağlanmıştır.

Her iki malzeme ıslak analiz ile 40 Nolu elekten geçirilip içlerindeki kum v.s. gibi malzemelerden arındırılarak kurutulup deneylerde kullanılabilir hale getirilmiştir.

Zeminlerin endeks özelliklerini belirlemek amacıyla kıvam limitleri, dane birim hacim ağırlığı ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma



sistemine göre her iki numunede CH ( yüksek plastisiteli killler ) grubundadır. Deney sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.1.Kullanılan zeminlerin özellikleri

Numune Adı	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	G <sub>s</sub>	k (cm / s)	c <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> / s)	Hidrometre		Zemin Sınıfı
							Silt %	Kil %	
İstanbul Yeşil Kili	86	34	52	2.71	8.4x10 <sup>-8</sup>	1.3x10 <sup>-4</sup>	75	25	CH
Kaolen	55	29	26	2.69	1.18x10 <sup>-5</sup>	7.64x10 <sup>-4</sup>	45	55	CH

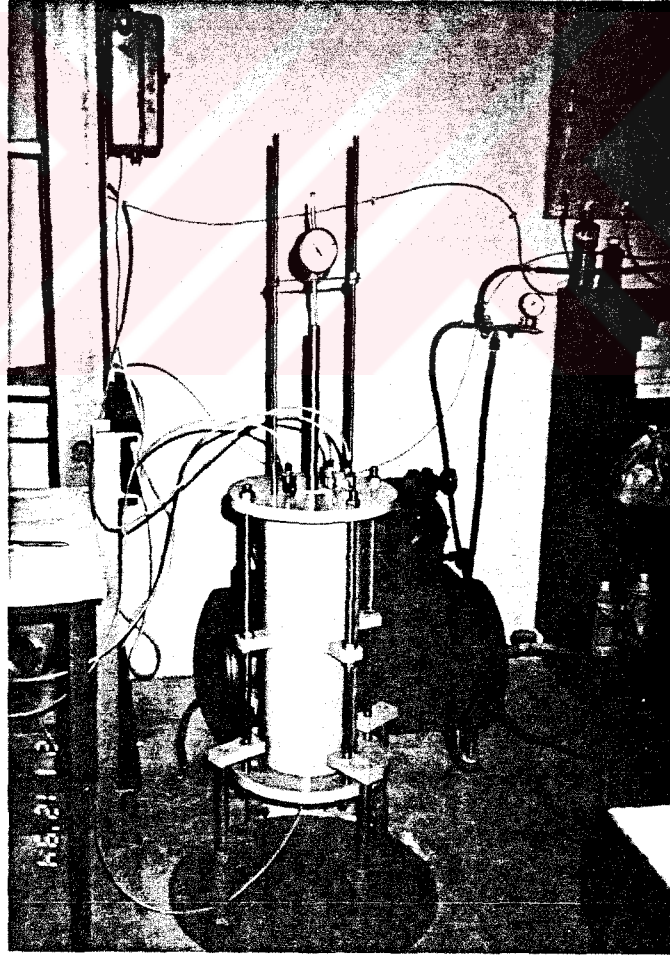
## 5.2. Deney Aygıtları

### 5.2.1. Konsolidometre Aygıtı

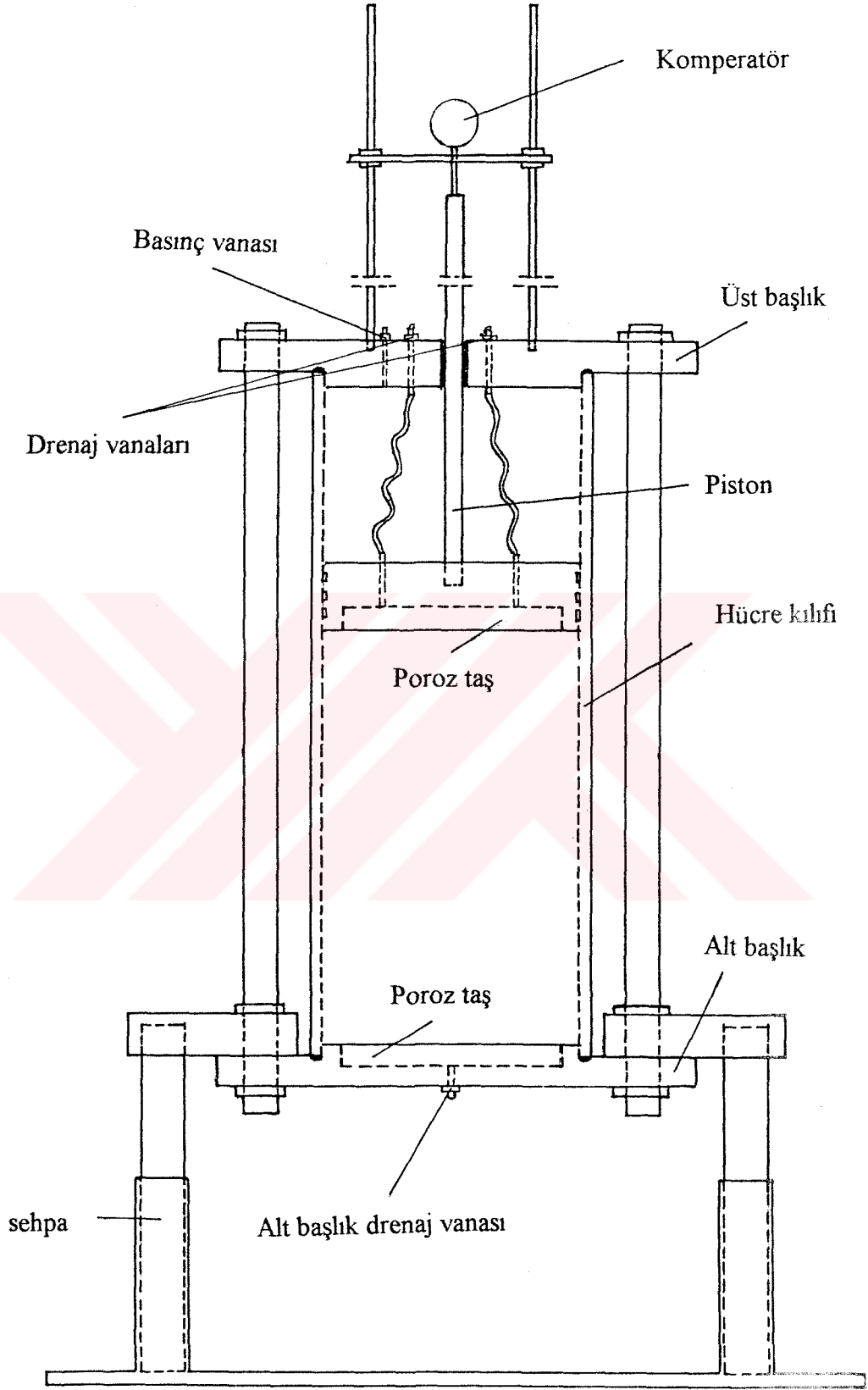
Çamur konsolidometre aygıtının en önemli işlevi, laboratuvarında deneysel çalışmalar için homojen zemin numuneleri hazırlama olanağı sağlamasıdır. Homojen olmayan zeminlerden numune alınmasının neden olduğu değişikliklerin killi zeminlerin mukavemet, birim deformasyon özelliklerine önemli etkilerinin olduğu daha önceden yapılmış birçok araştırma sonuçlarından bilinmektedir. Numune hazırlama işlemi basit, hızlı ve tekrarlanabilir olup doğal olarak çökelmiş zeminlerdekine benzer bir yükleme tarihçesini uygulamaya elverişlidir. Konsolidometrede hazırlanan blok numuneler bilinen bir gerilme deformasyon tarihçesine sahiptir. Numuneler bulamaç haldeki bir çamurun yanal deformasyona izin verilmeksizin konsolide edilmesiyle hazırlandığı için, farklı tipteki gerilme deformasyon tarihçesine sahip olan ve düşük su muhtevalarında yoğunlaşarak hazırlanmış laboratuvar numunelerine göre, doğal olarak çökelmiş ve konsolide olmuş zeminlerle daha iyi benzeşim sağlamaktadır. Ancak laboratuvarında hazırlanmış numunelerin konsolidasyon süresinin binlerce yıl yerine sadece birkaç hafta veya ay olmasından ve doğal zemin numunelerinin içinde bulunduğu kimyasal çevre koşullarının laboratuvarında tam olarak oluşturulamayışından dolayı, doğal numuneler ve

laboratuvarda konsolidometrede hazırlanmış blok numuneler arasında daima farklılıklar olabilir. Bununla beraber, burada anlatılan yöntemler ve aygıtlar, ince daneli zeminlerin mühendislik özellikleri ile ilgili laboratuvar çalışmalarında kullanılacak olan, belirli gerilme - deformasyon tarihçesine sahip homojen deney numuneleri hazırlamaya yönelik olumlu bir aşama olarak düşünülmelidir. Böylece laboratuvarda konsolidometre ile gerilme tarihçesi bilinen numuneler hazırlayarak, kohezyonlu zeminlerin mühendislik özelliklerini ( kayma mukavemeti, gerilme deformasyon ilişkisi, sıkışabilirlik, geçirgenlik ) araştırmak için tasarlanmış bir deney programında bu numuneler güvenle kullanılabilir. Konsolidometrede yapay olarak konsolide edilecek numunelerin doğal zemin özellikleri iyi tanınmalıdır.

Bu çalışmada Northwestern Üniversitesinde geliştirilene benzer olarak imal ettirilen Şekil 5.1' de gösterilen bir konsolidometrede blok numuneler hazırlanmıştır.

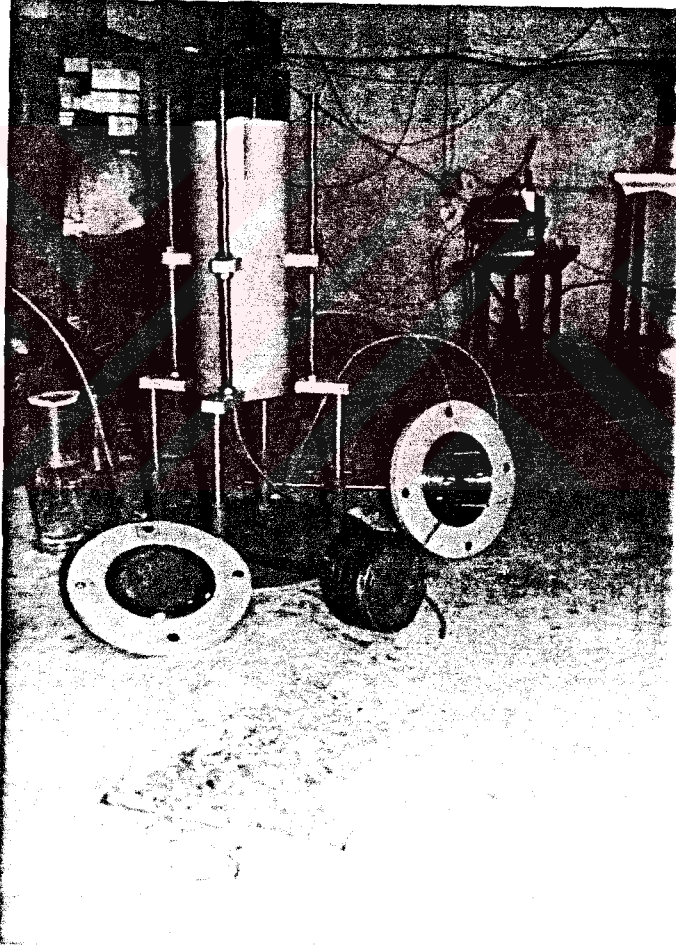


Şekil 5.1 Konsolidometre



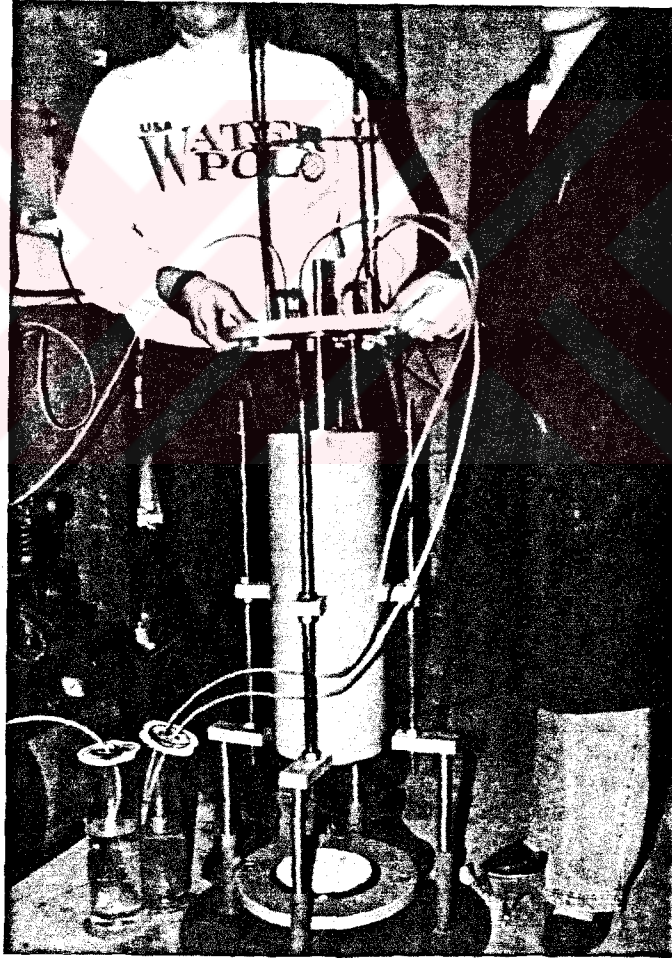
Şekil 5.2.Konsolidemetre Kısımları

Konsolidemetre, paslanmaz çelikten imal edilen 50cm. boyunda, 16cm. iç çapında silindirik hücre, yükleme pistonu ve çelikten yapılmış sehpa, bağlantı elemanları ve alt-üst başlıktan meydana gelmektedir. Konsolidometre kısımları Şekil 5.2 'de gösterilmiştir. Çamur bulamacı ile temas halinde bulunan tüm konsolidometre kısımları (silindirik hücre, alt ve üst başlıklar,yükleme pistonu) paslanmaz çelikten imal edilmiştir.Yükleme pistonunun altında ve alt başlıkda 13cm. çapında ve 1cm. kalınlığında poroz taşlar mevcuttur Şekil 5.3'de poroz taşların alt başlıkdaki ve piston üzerindeki yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 5.3.Konsolidemetrede Poroz Taşların Konumu

Poroz taşlar pistonda ve alt başlıkta yerinde dökme olarak imal edilmiştir. No.40 ve No.200 elekleri arasında kalan podima kumu ile epoksy adlı bir bağlayıcı malzeme hafif nemli bir kıvamda karıştırılarak piston altında ve alt başlıkta poroz taşlar için açılan yerine yerleştirilmiştir. Bir gün bekletilip yeterli derecede sertleştikten sonra kullanılabilir hale gelmiştir. Konsolidometrede sulu kıvamdaki zeminin konsolidasyonu, imal edilen bu poroz taşlar ve alt başlıktan bir, üst başlıktan iki vana vasıtası ile sağlanmıştır. Poroz taşlardan geçen su piston üzerindeki iki su geçiş kanalından üst başlıktaki vanalara, alt başlıkta ise poroz taştan geçerek direkt olarak alt başlık vanasına bağlı tahliye hortumları ile dış toplama kaplarında biriktirilmektedir. Şekil 5.4’de drenaj bağlantıları gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Konsolidometrede Drenaj Bağlantıları

Böylece konsolidasyon alttan ve üstten çift yönlü olarak sağlanmıştır. Yaklaşık olarak 40 kPa değerinde bir basınç pistonun silindir içinde aşağı-yukarı hareketini başlatmak için yeterlidir. Alt ve üst başlıkların ve yükleme piston çubuğunun sızdırmazlığı, sızdırmazlık halkalarıyla, yükleme piston başlığının hücre içinde hareketi sırasındaki sızdırmazlığı ise piston başlığındaki keçeli sistem ile sağlanmıştır.

Konsolidemetrede zeminin konsolidasyonu hücre içindeki pistonun üzerine hava basıncı verilerek pistonun hareketi ile sağlanmıştır. Hava basıncı regülatör kullanılarak istenen basınç seviyesinde sabit tutulmuştur. Hücre içine yerleştirilen bulamaç haldeki numunenin konsolidasyonu sırasındaki deformasyonu Şekil 5.1'de görülmekte olan piston çubuğu üzerine askılarla monte edilmiş bir komperatör ile ölçülmüş, aynı zamanda alt ve üst başlıklardaki drenaj vanalarından çıkan suda büretlerde toplanarak deformasyon miktarları ile karşılaştırılmıştır. Drenaj alt başlıktan ve üst başlıktan olmak üzere çift yönlü olduğundan iki adet büret kullanılmış, büretlerin ağızları çıkan suyun buharlaşmasını önlemek için plastik kapaklarla kapatılmıştır.

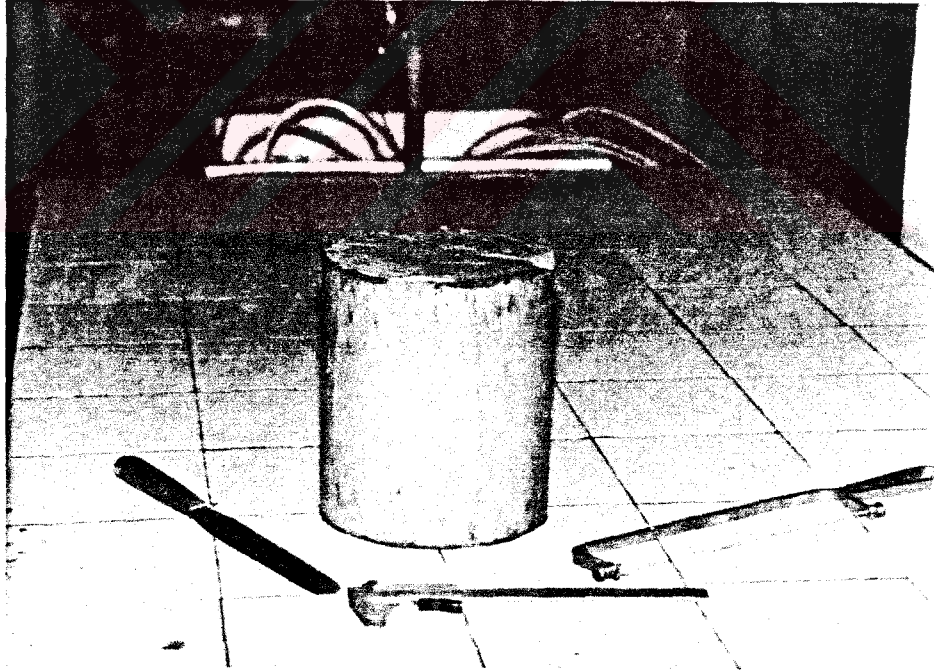
### ***5.2.2. Konsolide Edilecek Numunenin Hazırlanması ve Konsolidemetreye Yerleştirilmesi***

Yıkama ile 40 Nolu elekten geçirilen numune kurutulup likit limitin 2 katı su muhtevasında karıştırılarak bulamaç haline getirilmiştir. Karışım damıtık su ile hazırlanarak önce yarım saat mikserle karıştırılıp dinlendirilmeye bırakılmıştır. Yaklaşık bir aylık bir süre hava ile teması olmayan bir kapta bekletilip, danelerin suya doygun hale gelerek karışımın homojen bir hal alması sağlanmıştır. Bulamaç haldeki karışım konsolidometreye yerleştirilmeden önce yarım saat daha karıştırılarak konsolidasyona hazır hale getirilmiştir. Bulamaç karışım konsolidometreye yerleştirildikten sonra alt başlık üzerindeki ve yükleme pistonu altındaki poroz taşların tıkanmaması için poroz taşlar ile bulamaç arasına 3-4 kat poroz kağıt yerleştirilmiş, ayrıca konsolidometre silindirik hücresinin iç yüzeyleri ve pistonu paslanmaya karşı korumak için bu yüzeyler ince bir yağ ile yağlanmıştır. Bulamaç haldeki karışım konsolidometreye yerleştirildikten sonra yükleme pistonu, piston üzerindeki drenaj kanallarına bağlı hortumların üst başlıkla bağlantısı yapıp üst başlık kapatılmış ve sıkıca vidalanmıştır. Yükleme pistonunun

deformasyonunu ölçecek komparatör piston üzerine monte edilerek, konsolidometre numune hazırlamaya hazır hale getirilmiştir.

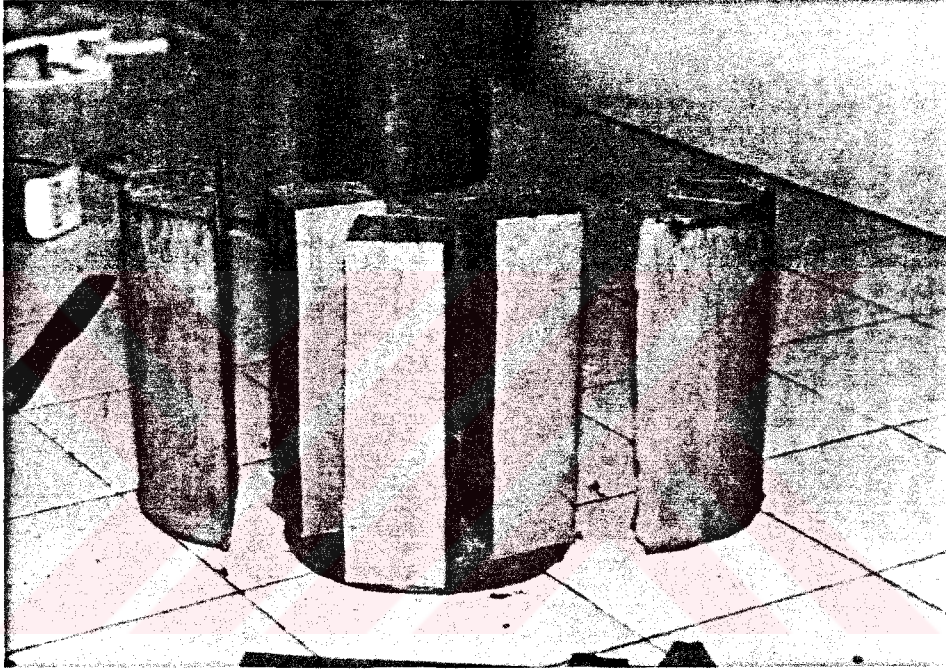
### 5.2.3. Konsolidometrede Numunenin Konsolidasyonu, Çıkarılması ve Saklanması

Çalışmanın amacına uygun olarak yapılacak üç seri üç eksenli basınç deneyleri için konsolidometrede belirli basınç kademelerinde yükleme yapılarak deney numuneleri elde edilmiştir. Konsolidometreye bulamaç haldeki çamur yerleştirilerek numune hazırlamaya uygun hale getirildikten sonra alt ve üst başlıktaki drenaj vanaları açılıp basınç vanasından birinci kademe gerilme uygulanmıştır. Basınç kademeleri; 25, 50, 100, 200, 400 kPa. olarak uygulanmış ve her bir yükleme kademesinde %90 konsolidasyona ulaşıncaya kadar beklenmiştir ve konsolidasyon tamamlandıktan sonra Şekil 5.5 'de gösterilen blok numune elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Blok Numune

Genellikle birinci kademe yükleme 10-15 gün devam etmiş ve toplam konsolidasyon oturmasının %50'si bu aşamada gerçekleşmiştir. Toplam konsolidasyon süresi İstanbul Yeşil kilinde yaklaşık 1ay, Kaolende ise 15 gün sürmüştür. Arazideki göçme durumunu örneklemek için hazırlanacak arazi numunelerinde elle tutulur bir numune elde edebilmek için konsolidemetrede numune 25, 50, 100, 200 kPa.lık gerilmeye kadar yüklendikten sonra numune dışarı alınmıştır. Elde edilen blok numuneler şekil 5.6'daki gibi üç eksenli deney için numune hazırlanabilecek parçalara ayrılmıştır.



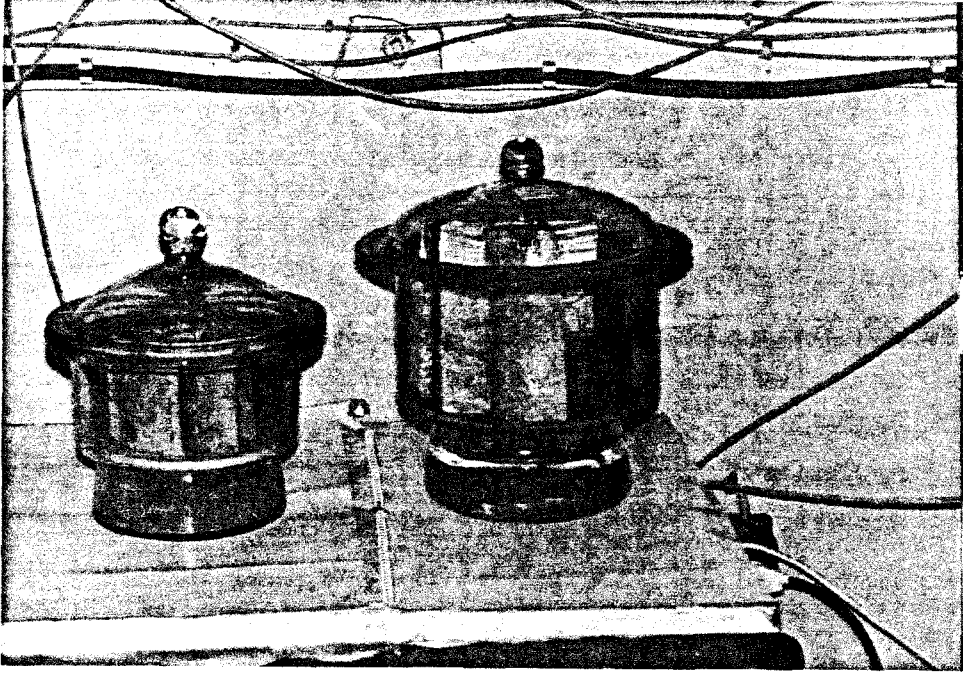
Şekil 5.6. Üç Eksenli Deneyler için Blok Numunenin Bölünmesi

Her bir parça numune geçirimsiz bir kağıtla sarılılarak drenajsız koşullarda desikatörde deney için hazırlanmak üzere bekletilmiştir. Şekil 5.7'de numunelerin desikatörde drenajsız koşullarda saklanması gösterilmiştir.

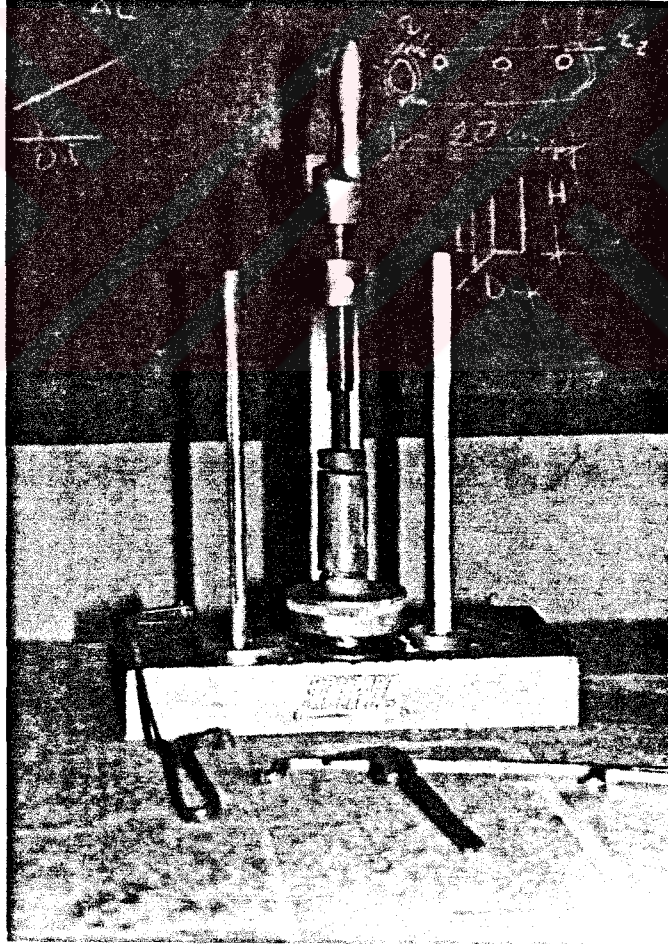
#### 5.2.4. Üç Eksenli Deney İçin Numune Hazırlama

Laboratuvarda konsolidemetrede hazırlanan blok numune üç eksenli deney için numune hazırlanacak parçalara bölünmüş ve bu numuneler çeşitli saklama sürelerinde



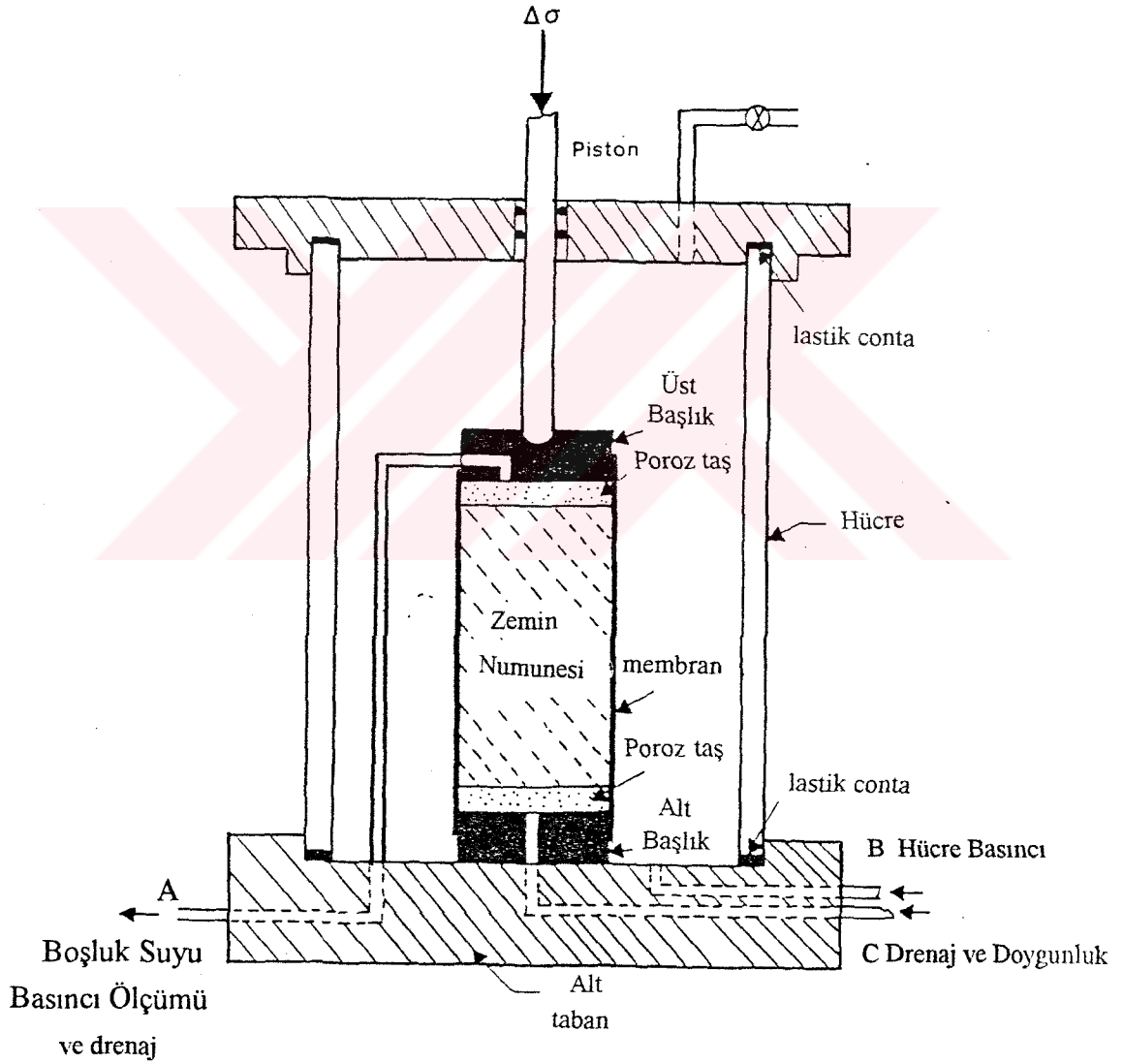


Şekil 5.7. Numunelerin Drenajsız Koşullarda Desikatörde Bekletilmesi



Şekil 5.8. Numune Traşlama Aygıtı

deneye tabi tutulmak üzere desikatörde drenajsız koşullarda saklandıktan sonra Şekil 5.8'de gösterilen numune traşlama aygıtı ile üç eksenli deneylere numune hazırlanmıştır. Numunenin hazırlanması sırasında mümkün olduğunca fiziksel örselenmeye izin verilmeden silindirik olarak hazırlanmıştır. Numune traşlama aygıtına yerleştirilen numune kendi eksenini etrafında döndürülerek traşlama teli ile ince ince tabakalar halinde yontularak 38mm. çapında, 76mm. boyunda standart silindirik üç eksenli numuneleri elde edilmiştir. Traşlama işlemi mümkün olduğunca hızlı olarak gerçekleştirilmiş, traşlama sırasında su muhtevasında değişikliğin en azda tutulmasına özen gösterilmiştir.



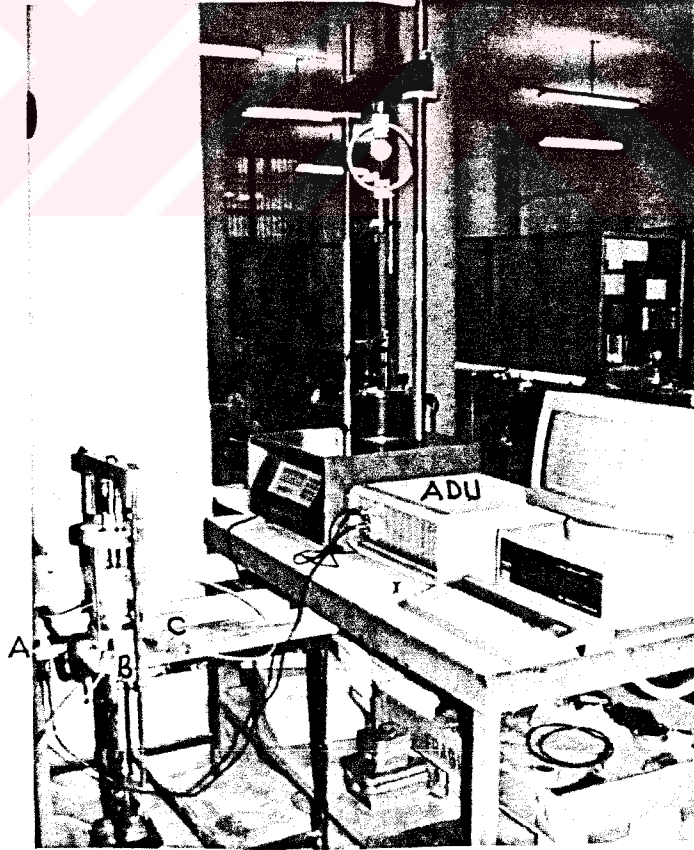
Şekil 5.9. Üç Eksenli Hücrede Drenaj ve Boşluk Suyu Basıncı Ölçüm Vanaları

### 5.3.1. Üç Eksenli (Boşluk Suyu Basıncı Ölçümlü) Deney Aygıtı

- Yükleme hızı kontrollü yükleme tablası
- Üç eksenli hücresi
- Boşluk suyu basıncı, aksenal deformasyon ve aksenal yük ölçerler
- Numuneyi membran içine yerleştirici kılıf, membran, poroz taşlar, lastik halkalar
- Basınç ve yük ölçme aletlerinin ölçümlerini bilgisayara aktaran ADU sistemi ve bilgisayar

Şekil 5.9 'da üç eksenli deney hücresinde drenaj ve boşluk suyu basıncı ölçüm vanaları gösterilmektedir.

Şekil 5.10' da üç eksenli deney aleti ve ölçüm sistemleri görülmektedir. Üç eksenli deneyler; konsolidasyonsuz drenajsız (UU), izotropik konsolide drenajsız (CIU) ve anizotropik konsolide drenajsız (CAU) deneyleri boyunca aksenal yük, deformasyon, boşluk suyu basıncı ölçümleri transdücerler yardımıyla bilgisayara bağlı elektronik bir sistemle ölçülüp kaydedilmiştir.



Şekil 5.10. Üç Eksenli Deney Aygıtı ve Ölçüm Sistemleri

### 5.3.1.1. Deneylerde Boşluk Suyu Basıncı Ölçümü

Anizotropik ve izotropik konsolidasyonlu - drenajsız (CAU, CIU) üç eksenli deneylerde hücre basıncı uygularken Şekil 5.9'daki drenaj vanaları A ve B açık iken drenajlı durumda numunenin konsolidasyonu sağlanır. Bu uygulama sırasında istendiği takdirde A vanasına bağlı basınç ölçerle boşluk suyu basıncı değişimlerinde ölçülebilir. A ve B vanaları açık ve kapalı iken boşluk suyu basıncı sıfır ve değişmiyorsa konsolidasyon tamamlanmıştır. Eksenel yükleme aşamasında A ve B vanaları kapatılır, A vanasına bağlı basınç ölçerden boşluk suyundaki değişim ölçülerek numunede göçme oluncaya kadar eksenel yüklemeye devam edilir. Anizotropik konsolidasyon kısmında arazi düşey efektif gerilmesinin hidrostatik ve eksenel gerilme bileşenleri adım adım artırılarak (her yük kademesinde boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi beklenir) numune anizotropik olarak konsolide edilir. Bu sırada A ve B vanalarından drenaj sağlanır ve numune uygulanan gerilmeler altında konsolide edilir. Herbir yük kademesinde konsolidasyon tamamlandıktan sonra diğer yük bileşeni uygulanarak,  $K_0$  gerilme izine gelinceye kadar adım adım konsolidasyona devam edilir.

Konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) deneylerde ise hücre basıncı uygulaması aşamasında A ve B vanaları kapatılır, fakat A vanasına bağlı basınç ölçerden boşluk suyu basınçları ölçülmüş ve eksenel yükleme aşaması konsolidasyonlu-drenajsız deneydeki gibi gerçekleştirilmiştir.

### 5.3.2. Üç Eksenli Basınç Deneylerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmadaki bütün üç eksenli deney ölçümleri (eksenel yük, deformasyon, boşluk suyu basıncı) yük ve basınç ölçerlerle yapılmıştır. Bu ölçümler üç eksenli deney programı (DS6 DATA)'da değerlendirilmiştir.

Geleneksel üç eksenli deneylerinde aşağıdaki hesap yöntemi izlenmektedir;  
Deformasyon saat okumalarından birim deformasyon hesaplanır;

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (5.1)$$

$\Delta L$  = Eksenel numune deformasyonu

$L_0$  = Başlangıç numune boyu

deformasyon kontrollu deneylerde gerilme hesaplarında düzeltilmiş alan kullanılır;

$$A' = A_0 / (1 - \epsilon) \quad (5.2)$$

$A'$  = Düzeltilmiş alan

$A_0$  = Numune başlangıç alanı

$$\Delta\sigma = P / A' \quad (5.3)$$

$P$  = Uygulanan yük = Yük saat okuması x Yük ring sabiti

hesaplanan eksenel gerilme ( $\Delta\sigma$ ) büyük ve küçük asal gerilme farkıdır ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ). Boşluk suyu basıncı ( $u$ ) ölçüldüğünde efektif asal gerilme değerleri bulunabilir.

### 5.3.3. Üç Eksenli Deneylerin Yapılması

Bu çalışmada laboratuvarında normal konsolide olarak hazırlanan gerilme tarihçesi belirli homojen numuneler üzerinde konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), izotropik konsolide-drenajsız (CIU) ve anizotropik olarak konsolide edilip drenajsız şartlarda kırılan (CAU) üç eksenli deneyleri yapılmıştır. Gerilme boşalmasının örneklendiği konsolidasyonsuz-drenajsız II. seri deneyler ile arazideki göçme durumunun örneklendiği anizotropik konsolide-drenajsız I. seri deney sonuçları, gerilme boşalmasının numunelerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için karşılaştırılmıştır. III. seri deneylerde ise gerilme boşalmasının etkilerini azaltarak, arazideki zemin davranışının laboratuvarında örnekleyebilmek için izotropik tekrar konsolidasyon yöntemi uygulanmıştır.

Laboratuvarında hazırlanan blok numuneden üç eksenli deney için numune hazırlanmış, konsolidasyonlu deneylerde konsolidasyonu hızlandırmak için numunenin çevresine filtre kağıdı sarılmıştır. Numune Şekil 5.9'da gösterilen üç eksenli hücrenin alt

başlığında poroz taş üzerine yerleştirilmiş ve numune membran geçirici kılıf yardımı ile membran içine alınmıştır. Üst başlık altında poroz taş konularak sızdırmazlık için kullanılan lastik halkalarla membran alt ve üst başlıklara tutturulmuştur. Daha sonra hücre kapatılarak su ile doldurulup, sabit basınç kaynağı ile hücreye hidrostatik hücre basıncı uygulanmıştır. Bu aşamada deney türüne göre drenaja izin verilirse numune konsolide edilebilmektedir. Konsolidasyonlu deneylerde drenaj vanaları açık ve kapalı durumda iken boşluk suyu basınçları değişmiyorsa boşluk suyu basıncı sönümlenmiş ve konsolidasyon tamamlanmıştır. Numunelerde konsolidasyon sırasında doygunluk kontrolü yapılmıştır. Başlangıçta numuneye konsolide edilmesi gereken izotropik konsolidasyon basıncından daha az bir basınçta konsolide edilmiş, uygulanan bu basınç altında konsolidasyon tamamlandıktan sonra drenaj vanaları kapatılarak basıncın geri kalan kısımda uygulanmış ve oluşan boşluk suyu basınçları ölçülerek numunenin doygunluk derecesine bağlı B boşluk suyu basıncı parametresi (3.22) eşitliğinden hesaplanmıştır. Suya doygun numunelerde teoride drenaj vanaları kapalı iken hücre basıncındaki artışa karşılık boşluk suyu basıncında eşdeğer bir artış meydana gelmelidir. Uygulanan konsolidasyon basıncındaki artışa karşılık oluşan boşluk suyu basınçları ölçüldükten sonra tekrar drenaj vanaları açılmış ve numunede oluşan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi beklenmiş ve konsolidasyon tamamlandıktan sonra drenajsız yükleme aşamasına geçilmiştir. Tüm üç eksenli deneyler deformasyon kontrollü yapılmış ve aynı seri deneylerde benzer yöntemler uygulanmıştır.

#### **5.3.4. Anizotropik Konsolidasyon Yöntemi**

Doğada zeminler kendi ağırlıkları altında yanal genişleme olmaksızın  $K_0 = \sigma_3' / \sigma_1'$  gerilmeleri altında konsolide olurlar. Arazideki zemin davranışını laboratuvarında üç eksenli deneylerle örneklerken, numune arazide etkili anizotropik gerilmeler altında konsolide edilmelidir. Deney numunesi üç eksenli hücreye yerleştirildikten sonra konsolidasyon basıncının hidrostatik ve deviator gerilme bileşenleri adım adım artırılarak numune anizotropik olarak konsolide edilebilir. Arazi gerilmeleri altında konsolidasyon sırasında deviator gerilmenin uygulanması için en iyi yöntem ölü yük askı sistemi ile eksenel yükün uygulanmasıdır (Şekil 5.11). Üç eksenli sistemin pistonunun üzerine

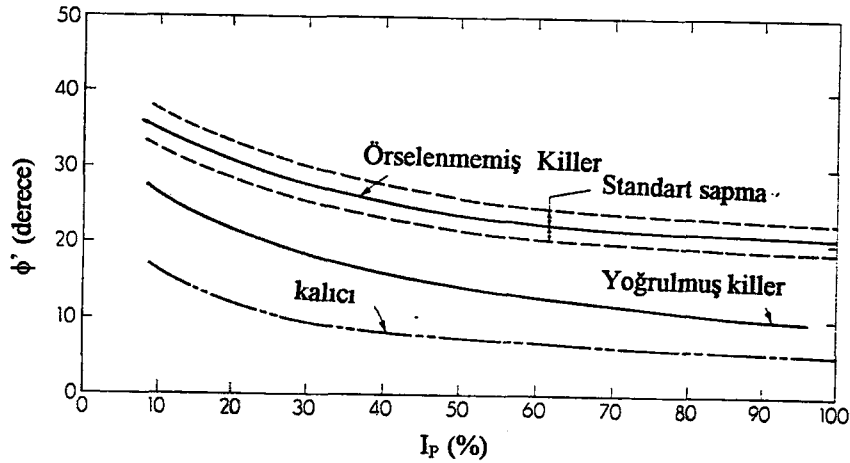
yerleştirilen bir askı sistemine ölü yük asılarak numuneye aksel gerilme uygulanır. Numuneyi  $K_0$  gerilme izine getirmek için uygulanan bu yöntemde hücre basıncı ve aksel yük uygulama adımları arasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi beklenir. Hücre basıncı ve aksel gerilme adım adım artırılarak numune anizotropik olarak konsolide edilebilir, ancak adım adım anizotropik konsolidasyonun çok uzun zaman alması ve zor bir yöntem olması nedeniyle iki adımlı anizotropik konsolidasyon yöntemi geliştirilmiştir. Odeh (1980) tarafından yapılan deneysel çalışmaya göre, iki adımlı anizotropik konsolidasyon ile adım adım anizotropik konsolidasyon deney sonuçları arasında çok büyük farklar olmadığı belirtilmiştir. Bu çalışmada arazideki göçme davranışını örnekleyen arazi numuneleri iki adımlı anizotropik konsolidasyon metodu ile konsolide edilmiştir. Bu yöntemde arazi düşey efektif gerilmesinin izotropik bileşeni tek bir adımda uygulanarak, numune izotropik olarak konsolide edilmiştir. Daha sonra aksel gerilme bileşeni ölü yük askı sistemine adım adım ölü yük asılarak uygulanmış ve numune anizotrop gerilmeler altında başlangıç gerilme durumuna getirilmiştir (her bir yük adımı arasında boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi beklenmiştir). Genellikle izotropik konsolidasyon aşaması 1 gün , aksel gerilme bileşeni ise 5 kademede yüklenerek her bir adım yüklemeye 1 gün beklenmiş ve toplam 5 gün devam etmiştir.



Şekil 5.11 Anizotropik konsolidasyon için ölü yük askı sistemi

#### 5.4.1. Arazideki Göçme Durumunu Örnekleyen (I. Seri) Üç Eksenli Deneyler

Konsolidemetrede  $\sigma_v' = 200$  kPa'lık nihai düşey efektif gerilmede normal konsolide olarak hazırlanan blok numuneden hazırlanarak yapılan I.seri üç eksenli deneylerle arazideki göçme durumu örneklenmiş ve bu numunelere "arazi numunesi" adı verilmiştir. Bu amaçla arazi numunesi üç eksenli hücrede  $K_0$  koşullarında anizotropik olarak konsolide edilerek drenajsız koşullarda göçmeye kadar yüklenmiştir (CAU).  $K_0$  Tablo 2.1. 'de normal konsolide zeminler için verilmiş olan  $K_0 = 0.95 - \sin\phi'$  (Brooker ve Ireland 1965) eşitliğinden  $\phi'$ 'ne bağlı olarak belirlenmiştir. Eşitlikteki  $\phi'$  değeride Ladd ve diğerleri (1977), Bijerrum ve Simons (1960), Kanja ve Wolle(1977), Olsen ve diğerleri (1986) tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, normal konsolide zeminler için  $I_p$  (%) ve  $\phi'$ 'ne bağlı olarak geliştirilen korelasyondan tahmin edilmiştir (Şekil 5.12). İstanbul Yeşil kili için  $\phi' = 17^\circ$  ve Kaolen için  $\phi' = 22^\circ$  olarak belirlenerek, buna göre  $K_0$  değerleri  $K_0 = \sigma_v' / \sigma_h'$  eşitliğinden bulunmuştur. Anizotropik konsolidasyon tamamlandıktan sonra numunenin aksenal yükleme aşamasında yükleme hızı numune saatte %3 deformasyon yapacak şekilde ( yaklaşık olarak 0.038 mm/dak. olarak) seçilmiş ve genellikle deneyler 4-6 saat devam etmiştir. I. seri deneyler arazi numuneleri üzerinde 400, 450, 500 kPa'lık düşey efektif gerilmede ikişer adet olarak uygulanmıştır.



Şekil 5.12. Plastisite İndisine bağlı olarak  $\phi'$  'nün tahmini



#### 5.4.1.1. Gerilme Boşalması Anındaki Boşluk Suyu Basıncının Belirlenmesi

Gerilme boşalması sırasındaki boşluk suyu basıncı değeri ( $u_{Ri}$ )'yi belirleyebilmek için gerilme boşalması anındaki boşluk suyu basıncı katsayıları ( $B_u, A_u$ ) ölçülmüştür. Yukarıda anlatıldığı gibi arazi numunesi arazi gerilmeleri altında üç eksenlide anizotropik olarak konsolide edildikten sonra arazideki gerilme boşalmasını örnekleyecek biçimde önce deviator gerilme bileşeni kaldırılıp boşluk suyu basıncındaki değişim ölçülmüş ve  $A_u$  değeri (3 . 23) eşitliğinden bulunmuştur. Daha sonra hidrostatik gerilme bileşeninin tamamı kaldırılarak yine boşluk suyu basıncındaki değişimler ölçülmüş ve  $B_u$  değeri (3 . 22) eşitliğinden belirlenmiştir.  $A_u$  ve  $B_u$  boşluk suyu basıncı parametreleri tanımlandıktan sonra gerilme boşalması anındaki boşluk suyu basıncı değeri  $u_{Ri}$  aşağıdaki eşitlikle,

$$u_{Ri} = B_u \sigma_3' + A_u (\sigma_1' - \sigma_3') \quad (5 . 4)$$

belirlenmiştir.

#### 5.4.2. Gerilme Boşalmasını Örnekleyen (II. Seri) Üç Eksenli Deneyler

Konsolidometrede  $\sigma_v' = 400$  kPa'lık nihai düşey efektif gerilmeye normal konsolide olarak hazırlanan blok numunelere "laboratuvar numunesi" adı verilmiştir. Bu numuneler 1 gün, 7 gün ve 28 gün bekletildikten sonra konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli deney uygulanmıştır. Numunenin konsolidometreden çıkarılması ile deney yapıncaya kadar geçen zaman "numune bekletme süresi" olarak ifade edilmiştir. Belirli saklama süreleri sonunda deneye tabi tutulan numunedeki kalıcı boşluk suyu basınçlarını ( $u_R$ ) ölçmek için numuneye drenajsız şartlarda arazi düşey efektif gerilmesinin yarısı (200 kPa) hidrostatik olarak uygulanmış ve oluşan boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. Daha sonra hidrostatik basınç arazi düşey efektif gerilmesine ulaşincaya kadar birkaç adımda uygulanmış ve her adımda oluşan boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. Uygulanan hidrostatik gerilmelere karşılık ölçülen boşluk suyu basıncı değerleri işaretlenip elde edilen noktalardan bir doğru geçirildiğinde, bu doğrunun eğimi numunenin doygunluk

derecesini belirtmektedir. Bu elde edilen doğrunun ordinatı kestiği yer ile sıfır noktası arasında okunacak değer belirli numune saklama sürelerinde numunedeki kalıcı boşluk suyu basıncı ( $u_R$ )'yi vermektedir.

II.seri deneylerde arazi düşey efektif gerilmesi drenajsız şartlarda hidrostatik olarak uygulandıktan sonra, yine drenajsız şartlarda aksenal yük artırılarak göçmeye ulaşılmıştır. Deneyin her iki aşamasında boşluk suyu basıncı ölçümü yapılmıştır. Laboratuvar numuneleri saatte %6 deformasyon yapacak yükleme hızında (0.076 mm/dak.) aksenal olarak yüklenmiş ve genellikle deneylerde 1 - 1.5 saatte göçmeye ulaşılmıştır. Herbir bekletme süresinde iki adet deney yapılmıştır.

#### **5.4.3. Oktahedral Gerilmede İzotropik Tekrar Konsolide(III.Seri) Üç Eksenli Deneyler**

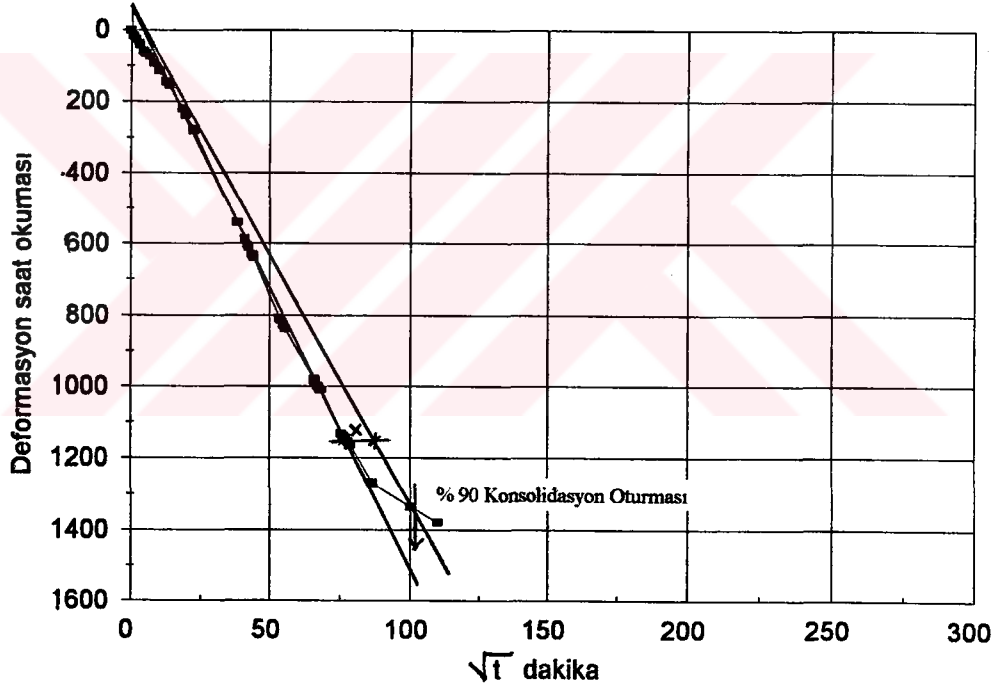
III.seri üç eksenli deneylerde arazideki göçme durumunu laboratuvarında örnekleyebilmek için izotropik oktahedral gerilmede  $\sigma_{vc}'=(\sigma_v+2\sigma_h)/3$  tekrar konsolidasyonun etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla deneylerde II. seri üç eksenli deneylerde kullanılan blok numunelerle benzer koşullarda hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Üç eksenli hücrede tekrar konsolide edilmek üzere desikatörde bekletilen bu numunelere de "tekrar konsolide edilmiş laboratuvar numuneleri" adı verilmiştir. 1 gün, 7 gün, 28 gün bekletilmiş numuneler önce oktahedral gerilmede izotropik olarak konsolide edilerek drenajsız olarak göçmeye ulaşılmıştır (CIU). Deneylerde izotropik konsolidasyon 1 gün sürmüştür. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra drenajsız yükleme aşamasında numune saatte %3 deformasyon yapacak hızda aksenal yüklenmiş ve deney numunesinde göçmeye ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Genellikle deneylerde 5-6 saat kadar bir süre sonunda numunelerde göçmeye ulaşılmıştır.

## BÖLÜM 6

İNŞAAT KÖRRETİM MÜDÜRLÜĞÜ  
KONSOLIDASYON BİRİMİ

### 6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Deneyle, laboratuvarda çamur konsolidemetrede belirli aralıklarla artan basınç kademelerinde normal konsolide olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Laboratuvar numuneleri için son konsolidasyon basıncı 400 kPa. arazi numuneleri için 200 kPa' dır. Laboratuvar numunelerinde bu gerilme ile derinlerden numune alma örneklenmiştir. Konsolidemetrede her bir basınç kademesindeki oturma - $\sqrt{t}$  eğrileri çizilmiştir. Şekil 6.1'de İstanbul yeşil kiline ait 200 kPa.lık basınç altındaki oturma - $\sqrt{t}$  eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 6.1. İstanbul Yeşil kilinde 200 kPa.lık basınç kademesindeki deformasyon - t eğrisi

Konsolidemetrede blok numunenin drenajlı şartlarda konsolidasyonundan sonra drenajsız şartlarda 400 kPa.lık yük kaldırılarak laboratuvarda gerilme boşalmasına maruz kalmış laboratuvar numuneleri elde edilmiştir.

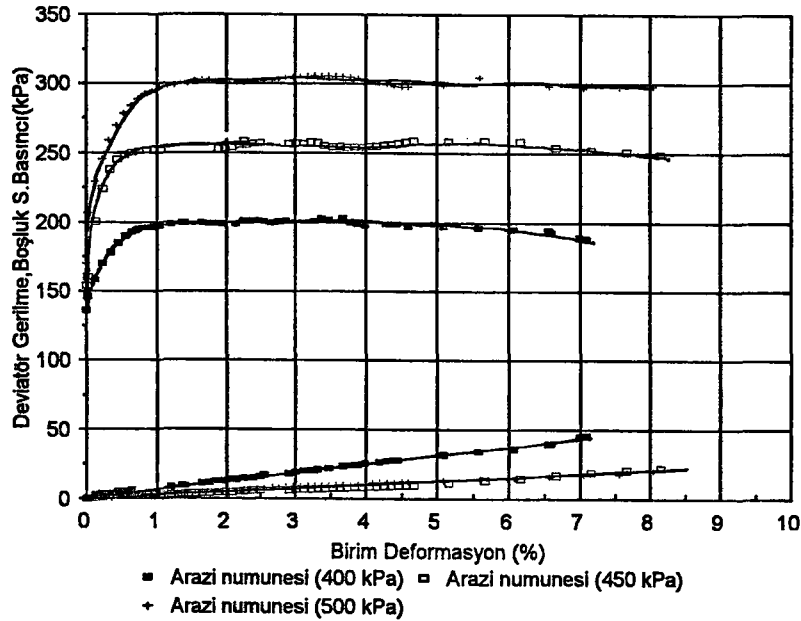
Konsolidemetrede numunenin konsolidasyonu sırasında yanıl gerilmeler ölçülemediğinden  $K_0$  Tablo 2.1'deki (Brooker ve Ireland 1965) eşitliğinden  $\phi'$  ne bağılı

olarak tahmin edilmiştir. İstanbul yeşil kili ve kaolen için  $\phi'$  değerleri Şekil 5.12'deki  $\phi' - I_p$  ilişkisinden belirlenmiştir. Buna göre İstanbul yeşil kilinde  $I_p = \%52$  için  $\phi' = 17^\circ$  ve Kaolende  $I_p = \%26$  için  $\phi' = 22^\circ$  belirlenerek sırasıyla  $K_0$  değerleri 0.66 ve 0.58 olarak bulunmuştur. Arazi numuneleri üç eksenli hücrede sırasıyla 400, 450, 500 kPa.lık düşey efektif gerilmede  $K_0$  koşullarında (CAU) deneyleri yapılmıştır. İstanbul yeşil kilinde ve kaolende herbir basınçta deneyler iki kez tekrarlanmıştır Arazi numunelerinin ve gerilme boşalmasının örneklendiği laboratuvar numunelerinin gerilme - birim deformasyon boşluk suyu basınçları belirlendikten sonra iki seri deney sonuçları karşılaştırılarak gerilme boşalmasının geoteknik parametreler üzerindeki etkileri belirlenmiştir

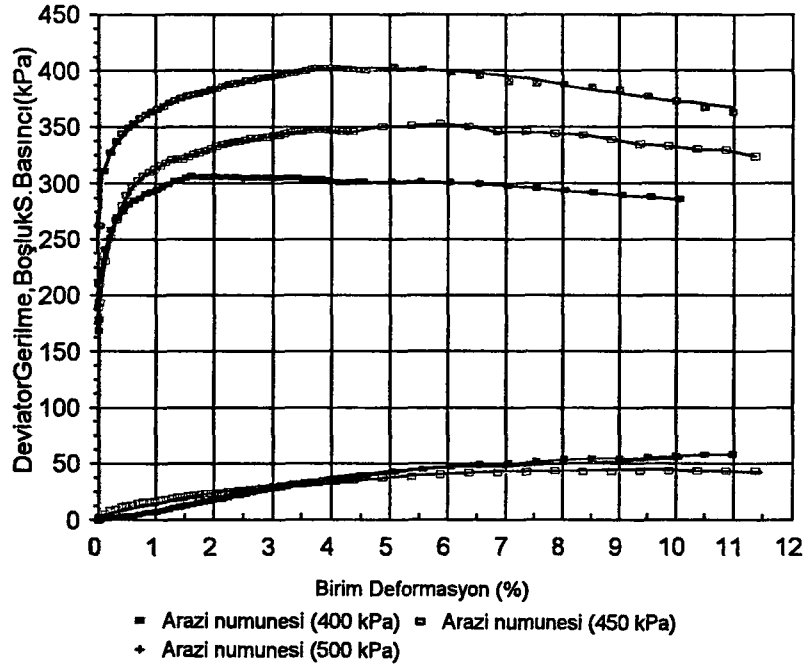
İstanbul yeşil kili ve Kaolen numunelerinde yapılan bu iki seri deney sonuçları karşılaştırıldıktan sonrada arazideki zemin davranışını laboratuvarında örnekleyebilmek için oktahedral izotropik gerilmede tekrar konsolidasyon yöntemi uygulanarak (III. seri deneyler) sonuçlar arazi numunesi deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### 6.1. Arazi Numunelerinin Davranışı (I. Seri Deneyler)

Arazi numunelerinin davranışı anizotropik konsolide - drenajsız (CAU) üç eksenli deneyden belirlenmiştir. Arazi numunelerinin gerilme - birim deformasyon - boşluk suyu basıncı tepkileri Şekil 6.2a ve şekil 6.2b'de gösterilmiştir.



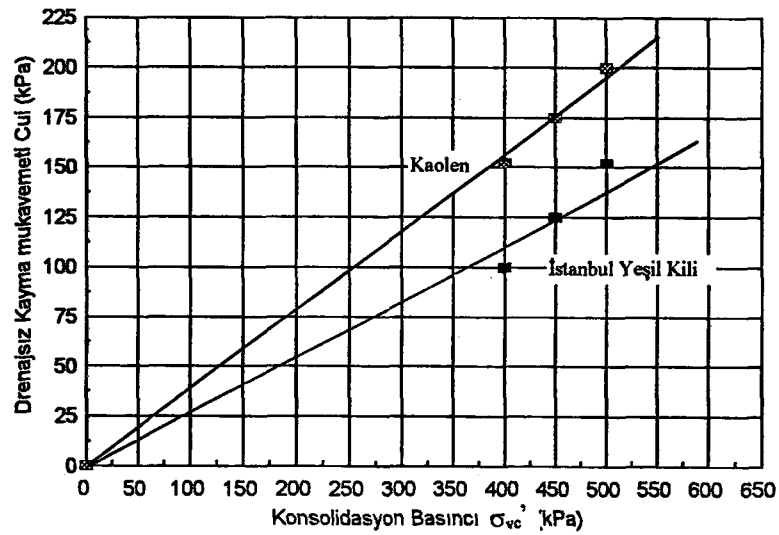
Şekil 6.2a. İstanbul Yeşil kili arazi numunesi gerilme birim deformasyon, boşluk suyu basıncı



Şekil 6.2b Kaolen arazi numunesi gerilme birim deformasyon, boşluk suyu basıncı

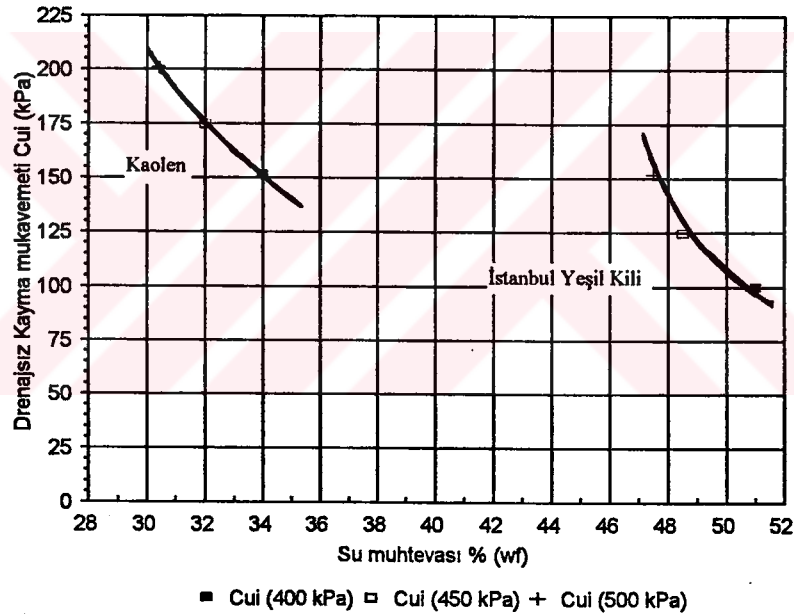
Arazi numunesinin drenajsız kayma mukavemeti  $c_{ui} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{max} / 2$  ile ifade edilmiştir.

Arazi numunelerinde sırasıyla  $\sigma_{vc}' = 400, 450, 500$  kPa da anizotropik konsolidasyondan elde edilen  $c_{ui}$  değerleri düşey konsolidasyon basıncına karşı çizilerek Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Arazi numunelerinde  $c_{ui}$  ile  $\sigma_{vc}'$  arasındaki ilişki

Arazi numunelerinde kayma mukavemeti ile su muhtevası arasındaki ilişki Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Konsolidasyon basıncı arttıkça numunelerin CAU deneyi sonundaki su muhtevası azalarak drenajsız kayma mukavemeti artmıştır. Numunelerde gerilme boşalması anındaki boşluk suyu basıncı  $u_{Ri}$ 'yi belirlemek için  $\sigma_{vc}' = 400$  kPa.lık düşey efektif gerilmelerde anizotropik koşullarda konsolidasyonu tamamlanan arazi numunesinde deviator gerilme bileşeni tamamen kaldırıldıktan sonra hücre basıncının da tamamı kaldırılarak boşluk suyu basıncındaki değişimler ölçülmüştür. Kaldırılan deviator gerilme ve ölçülen boşluk suyu basınçlarından gerilme boşalması anındaki boşluk suyu basıncı  $A_u$  ve  $B_u$  (3.23) ve (3.22) eşitliklerinden hesaplanarak İstanbul yeşil kilinde ve Kaolen numunelerinde sırasıyla  $A_u = 0.18$ ,  $B_u = 0.94$  ve  $A_u = 0.23$ ,  $B_u = 0.92$ 'den  $u_{Ri}$  değeride (5.4) eşitliğinden 271 kPa ve 249 kPa olarak belirlenmiştir.

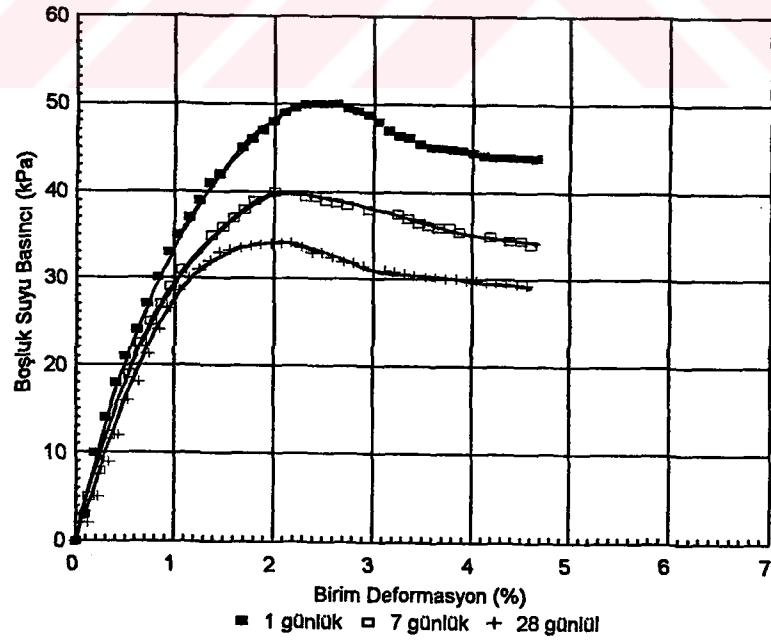
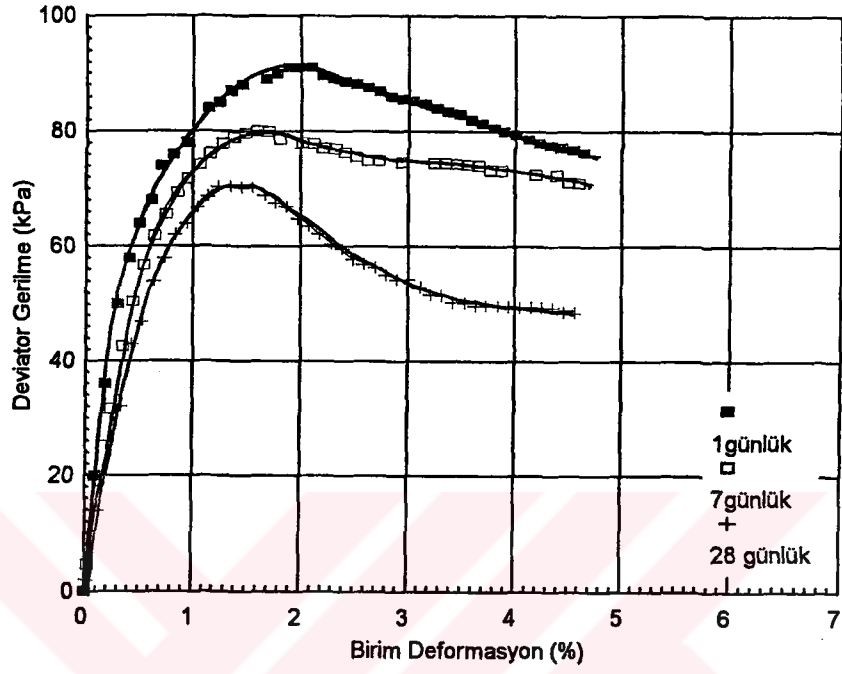


Şekil 6.4. Arazi Numunelerinde Drenajsız Kayma Mukavemeti ile Su Muhtevası Arasındaki İlişki

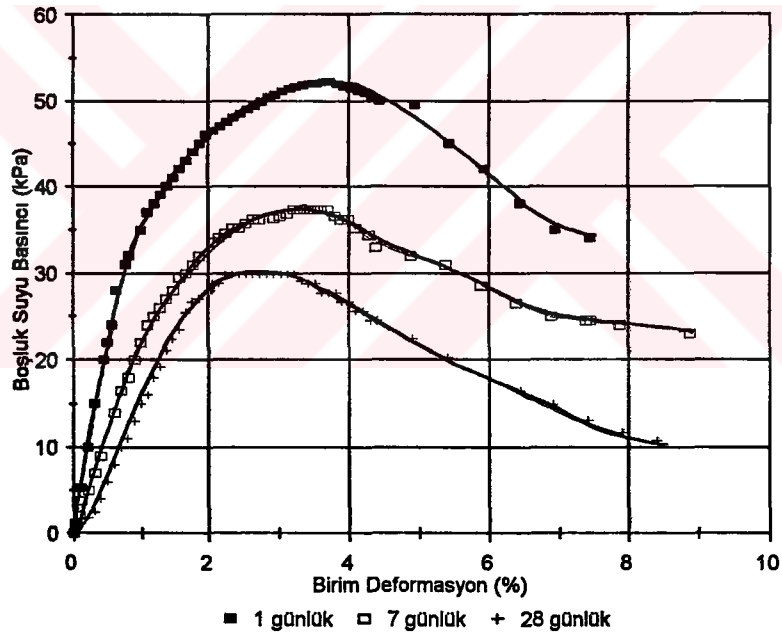
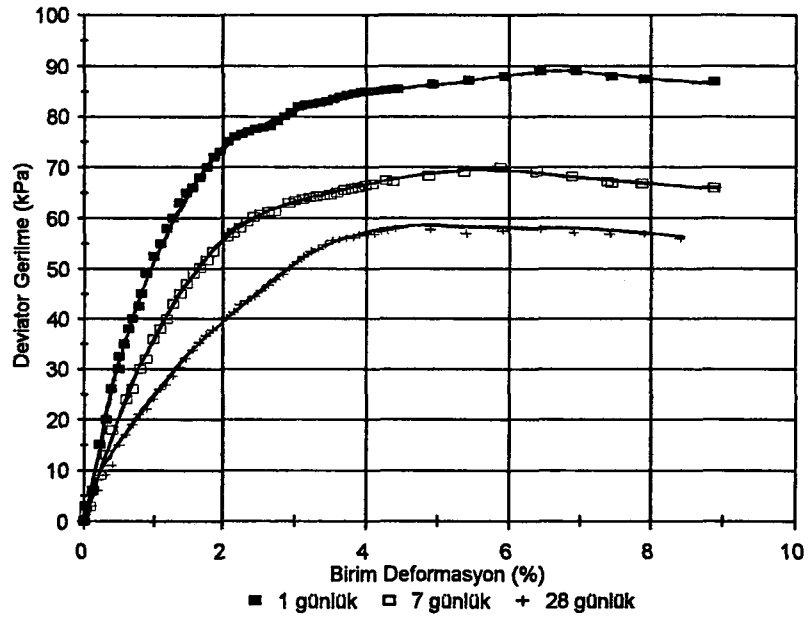
## 6.2. Laboratuvar Numunelerinin Davranışı ( II. Seri Deneyler )

Gerilme boşalmasıyla birlikte numune bekletme süresinin geoteknik parametreler üzerindeki etkisini belirlemek için 1 gün, 7 gün ve 28 gün bekletme süreleri sonunda konsolidasyonsuz - drenajsız (boşluk suyu basıncı ölçümlü) üç eksenli deneyler her bir

bekletme süresinde ikişer kez uygulanmıştır.Şekil 6.5a ve Şekil 6.5b'de İstanbul yeşil kili ve kaolen numunelerinin belirli bekletme süreleri sonunda elde edilen gerilme - birim deformasyon - boşluk suyu basıncı eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 6.5a. İstanbul Yeşil kili laboratuvar numunesi gerilme birim deformasyon , boşluk suyu basıncı değişimi

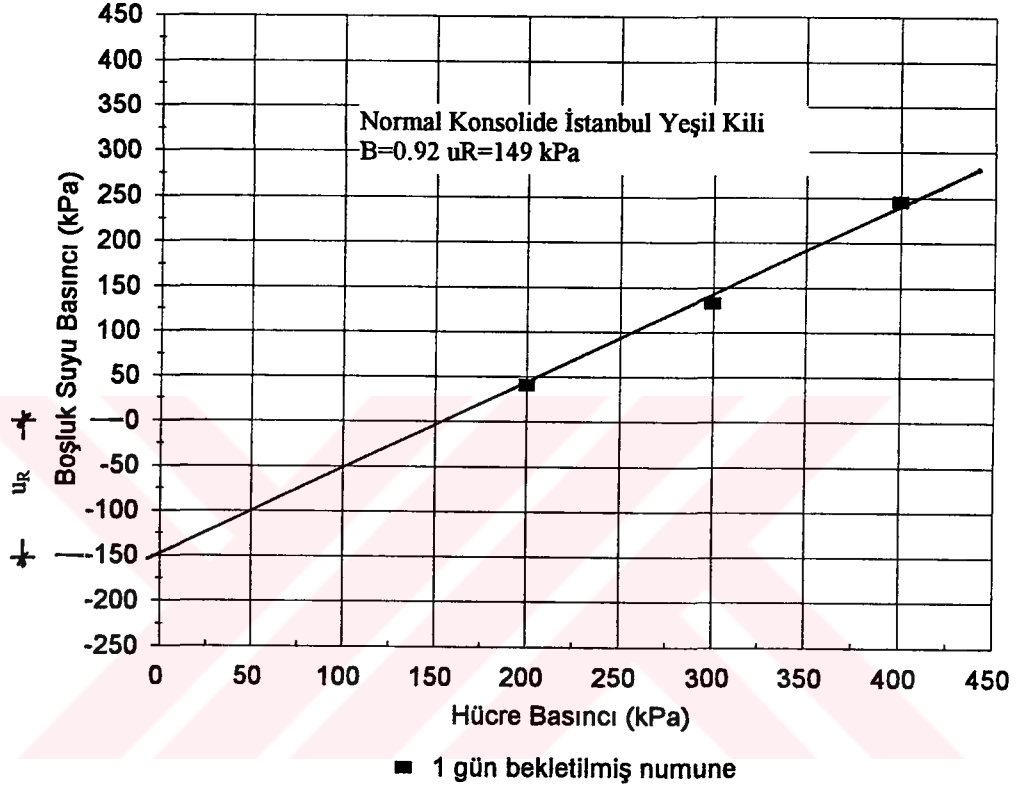


Şekil 6.5b. Kaolen laboratuvar numunesi gerilme birim deformasyon , boşluk suyu basıncı değişimi

Belirli bekletme sürelerinde laboratuvar numunelerinde kalıcı boşluk suyu basıncı ( $u_R$ )'yi belirleyebilmek için konsolidasyonsuz - drenajsız deneylerin I. aşamasında (Drenajsız hücre basıncı uygulaması aşaması) toplam hücre basıncı (400 kPa.) üç aşamada uygulanarak oluşan boşluk suyu basınçları ölçülmüş ve numunelerdeki kalıcı



boşluk suyu basınçları Şekil 6.6'daki gibi belirlenmiştir. Başlangıçta toplam 400 kPa.lık hücre basıncının yarısı uygulanmış ve oluşan boşluk suyu basınçları ölçülmüştür.Daha sonra hücre basınçları 300 ve 400 kPa.la çıkarılmış ve aynı işlem tekrarlanarak boşluk suyu basıncı ölçüm sonuçları hücre basıncına karşılık işaretlenerek kalıcı boşluk suyu basınçları belirlenmiştir.



Şekil 6.6. Laboratuvar numunelerinde kalıcı boşluk suyu basıncı  $u_R$ 'nin belirlenmesi

### 6.3. Arazi ve Laboratuvar Numuneleri Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

#### 6.3.1. Gerilme - Birim Deformasyon Davranışları

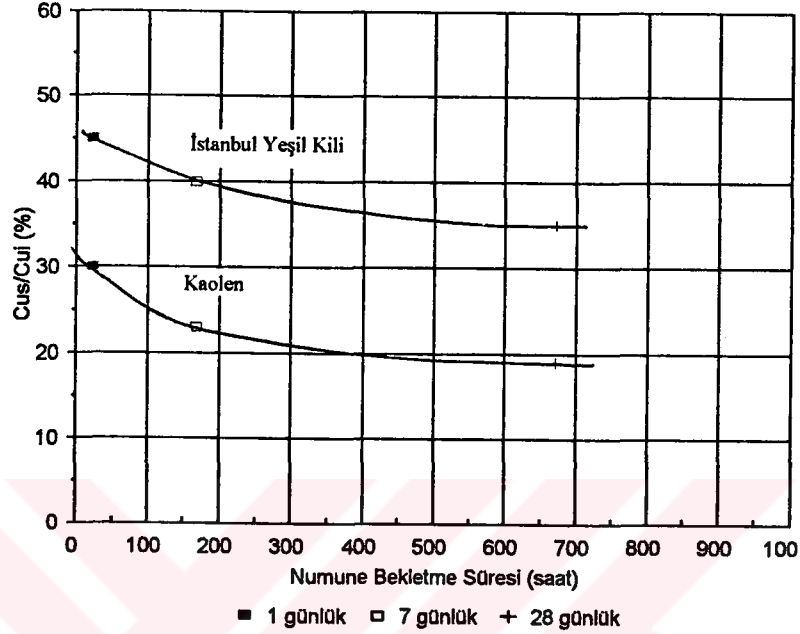
Laboratuvar numunelerinde kalıcı boşluk suyu basınçlarının belirlenmesinden sonra drenajsız yükleme aşamasına geçilerek 1 gün, 7 gün ve 28 gün bekletilmiş numunelerdeki gerilme - birim deformasyon davranışı Şekil 6.5'teki gibi belirlenmiştir. İstanbul yeşil kili ve Kaolen numunelerinde eğrilerin biçimleri birbirinden farklıdır. Artan deviator gerilme seviyelerine karşılık İstanbul yeşil kilinde Kaolene oranla daha az

deformasyonlar oluşmuştur. İstanbul yeşil kilinde max. deviator gerilmeye ulaşıldıktan sonra hızlıca bir düşüş meydana gelmiş, Kaolende ise göçmeden sonra artan birim deformasyona karşılık deviator gerilmede ani azalma gözlenmemiştir. Numunelerdeki göçme birim deformasyon değerleri ( $\epsilon_f$ ) Kaolende %6.5 ~ %4.6 arasında, İstanbul yeşil kilinde ise %2.1 ~ %1.5 arasında değişmiştir. Kaolenin göçme birim deformasyon değeri yaklaşık olarak arazi numunesi göçme birim deformasyon değerinden 4 kat, İstanbul yeşil kilinde ise 2 kat daha büyüktür. Arazi numunelerinde CAU deneyinden sonra elde edilen gerilme - birim deformasyon eğrilerinde (Şekil 6.2), küçük birim deformasyonlarda göçmeye ulaşılmış, göçmeden sonra deviator gerilmede hızlı azalmalar gözlenmemiş ve artan birim deformasyona karşılık deviator gerilmede çok az değişim meydana gelmiştir. Gerilme boşalmasının örneklendiği bu laboratuvar numuneleri ile arazi numunesinin davranışı eğrilerinde görüldüğü gibi birbirinden oldukça farklıdır. Laboratuvar numuneleri gerilme boşalmasına maruz kaldığından numunelerin başlangıç koşulları ve etkili gerilme sistemi değişmiştir.

### 6.3.2 Drenajsız Kayma Mukavemeti

Laboratuvar numunelerinde belirli numune bekletme sürelerinde yapılan konsolidasyonsuz drenajsız deneylerde max. deviator gerilmenin yarısı drenajsız kayma mukavemeti  $c_{us} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  olarak belirtilmiştir. Numuneler 1 gün, 7 gün ve 28 gün bekletildikten sonra yapılan UU deneylerinden elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerleri numune bekletme süresi arttıkça azalmıştır. Drenajsız kayma mukavemetindeki bu azalma İstanbul yeşil kiline göre permeabilitesi daha yüksek olan Kaolende daha fazladır. Çeşitli bekletme sürelerinde UU deneyi uygulanan laboratuvar numunelerinde ölçülen kalıcı boşluk suyu basınçlarında bekletme süresi arttıkça artan kayıplar nedeniyle, numunelerde gerilme boşalmasından sonrada efektif gerilmeler değişmiştir. Numunenin permeabilitesine bağlı olarak efektif gerilmelerdeki azalma nedeniyle drenajsız kayma mukavemetinde azalmalar olmuştur. Laboratuvar numuneleri ile arazi numunelerinin drenajsız kayma mukavemetleri karşılaştırılarak numune bekletme süresine karşılık çizildiğinde Şekil 6.7'deki eğriler elde edilmiştir. İstanbul yeşil kilinde 1 gün bekletilmiş laboratuvar numunesinin drenajsız kayma mukavemetinde arazi numunesinin drenajsız kayma mukavemetine oranla %55,

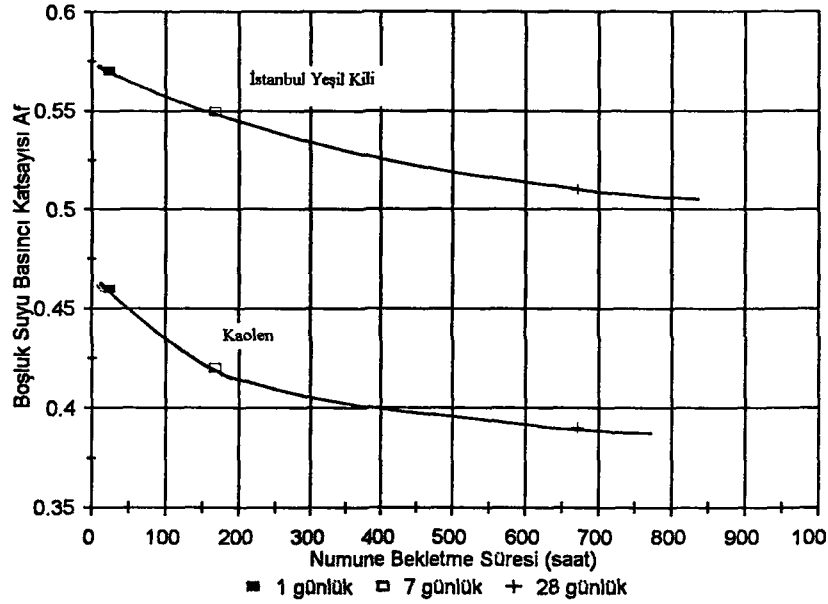
Kaolende ise %70 azalma olmuştur. Numune bekletme süresi arttıkça kayıplarda artmış ve 28 gün bekletilmiş numunelerde kayıplar İstanbul yeşil kilinde %65'e, Kaolende ise %81'e ulaşmıştır.



Şekil 6.7.  $c_{us} / c_{ui}$  (%) ile numune bekletme süresi arasındaki ilişki

### 6.3.3. Boşluk Suyu Basınçları

Arazi numunelerinde drenajsız eksenel yükleme sırasında ölçülen boşluk suyu basınçları Şekil 6.2a ve Şekil 6.2b'de, laboratuvar numunelerinde ölçülen boşluk suyu basınçlarında Şekil 6.5a ve Şekil 6.5b'de gösterilmiştir. İstanbul yeşil kilinde küçük birim deformasyon değerlerinde boşluk suyu basıncı hızla artmış ve max deviator gerilme değerine ulaşıldıktan sonra boşluk suyu basınçlarında azalmalar ölçülmüştür. Kaolende ise küçük birim deformasyon değerlerinde boşluk suyu basınçları hızla artarak max. deviator gerilmeye ulaşılmadan önce boşluk suyu basıncında azalmalar ölçülmüştür. İstanbul yeşil kili ve Kaolen laboratuvar numunelerinde göçme anında deviator gerilmede ölçülen boşluk suyu basıncı değerlerinden göçme anındaki  $A_f$  parametresi (3.23) eşitliğinden hesaplanmış ve  $A_f$ 'nin numune bekletme süresi ile ilişkisi Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

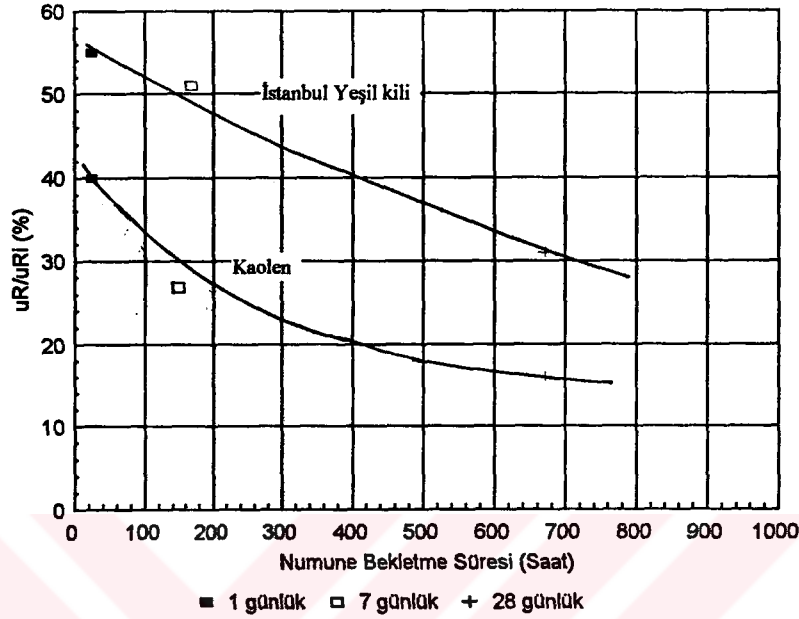


Şekil 6.8. Laboratuvar numunelerinde  $A_f$ 'nin numune bekletme süresi ile ilişkisi

Numune bekletme süresi arttıkça  $A_f$  'de azalmıştır. 28 günlük bekletme süresinden sonra  $A_f$  'deki azalma İstanbul yeşil kilinde %6, Kaolende %7'dir. Arazi numuneleri ve laboratuvar numunelerinde  $A_f$  boşluk suyu basıncı katsayısı karşılaştırıldığında İstanbul yeşil kilinde laboratuvar numunelerinde 0.57 - 0.5 arasında değişirken, arazi numunelerinde 0.16 - 0.04 arasında değerler almıştır. Kaolende ise laboratuvar numunelerinde 0.46 - 0.39, arazi numunesinde 0.20 - 0.11 arasında değişmiştir. Arazide zeminlerde  $K_0$  koşullarında etkili gerilme sistemine ve zemin dokusuna göre değişen  $A_f$ , laboratuvarda hazırlanan blok numunelerde ise numune hazırlama yöntemine bağlı olarak değiştiği Graham ve Lau (1988)'de belirtilmiştir.

Gerilme boşalması anındaki boşluk suyu basıncı ( $u_{Ri}$ ) İstanbul yeşil kilinde 271 kPa., Kaolende ise 249 kPa. olarak ölçülmüştür. Belirli bekletme sürelerinde UU deneyine tabi tutulan laboratuvar numunelerinde belirlenen  $u_R$  (kalıcı boşluk suyu basınçlarının, gerilme boşalması anında ölçülen boşluk suyu basıncı  $u_{Ri}$ 'ye oranları numune bekletme sürelerine karşılık çizildiğinde  $u_R / u_{Ri}$  'nin numune bekletme süresi arttıkça azaldığı Şekil 6.9'da görülmektedir. Bu oran 1 gün bekletilmiş İstanbul yeşil kili ve Kaolende sırasıyla %45 ve %60 iken 28 gün bekletilmiş numunelerde sırasıyla %69 ve

%84'e ulaşmıştır. Numune bekletme süresince kalıcı boşluk suyu basınçları sönümlenmiş ve böylece numunedeki efektif gerilmede zamanla azalmıştır.

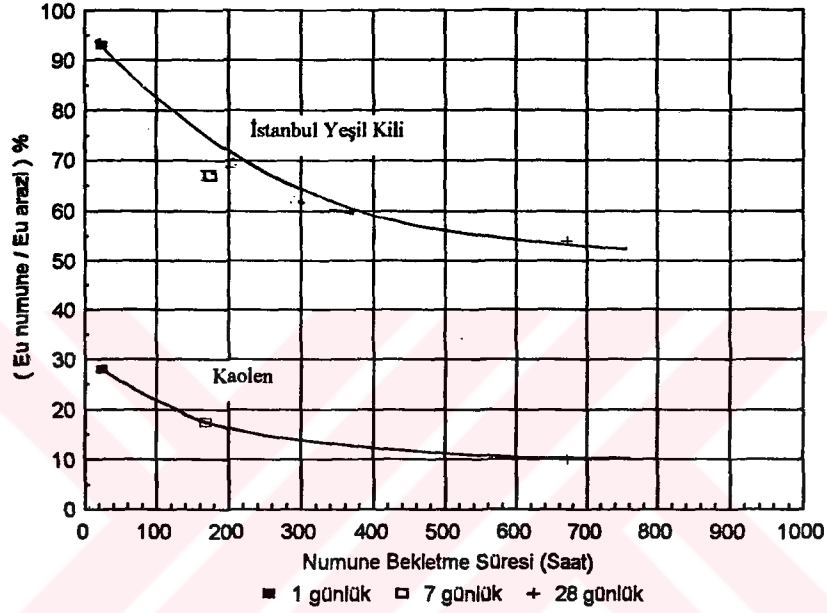


Şekil 6.9.  $u_R / u_{Ri}$  (%) ve numune bekletme süresi arasındaki ilişki

#### 6.3.4. Drenajsız Elastisite Modülü

Elastisite modülü  $E_u$  maximum deviator gerilmenin yarısında hesaplanmıştır.  $E_u$  numune ve  $E_u$  arazi değerleri sırasıyla 1gün, 7 gün ve 28 gün bekletilmiş laboratuvar numunelerinin ve  $\sigma_{vc}' = 400$  kPa'da anizotropik olarak konsolide edilmiş arazi numunelerinin deviator gerilme - birim deformasyon eğrilerinden ölçülmüştür. İstanbul yeşil kilinde laboratuvar ve arazi numunelerinin her ikisinde de göçme birim deformasyon değerleri Kaolenin göçme birim deformasyon değerlerinden küçük olduğundan İstanbul yeşil kilinde laboratuvar numunelerinin elastisite modülleri daha büyük ve arazi numunesinin drenajsız elastisite modülüne daha yakın bir değerdedir. Kaolende ve İstanbul yeşil kilinde ( $E_u$  numune /  $E_u$  arazi) oranı numune bekletme süresine karşılık çizildiğinde numune yaşı arttıkça bu oranın azaldığı Şekil 6.10 da gösterilmiştir. İstanbul yeşil kilinde 1 gün bekletilmiş numunede bu oran %7 iken Kaolende %72, 28günlük

numunelerde İstanbul yeşil kilinde %46, Kaolende ise %90'dır. 1 ve 28 gün bekletilmiş İstanbul yeşil kili ve Kaolen laboratuvar numunelerinin elastisite modülleri arasında sırasıyla 1.7 ve 2.8 kat fark vardır. Kaolen arazi numunesinin elastisite modülü laboratuvar numunelerinin elastisite modüllerinden 3.6 - 10 kat daha büyüktür. Bu oran İstanbul yeşil kilinde 1.07 - 1.84 olarak belirlenmiştir. Kaolende drenajsız mukavemette olduğu gibi elastisite modülünde de azalma İstanbul yeşil kilinden daha fazladır.



Şekil 6.10.  $E_{u\text{numune}} / E_{u\text{arazi}}$  (%) ve numune bekletme süresi arasındaki ilişki

### 6.3.5. İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi'$ )

Arazi numunelerinin anizotropik konsolidasyonu için arazi gerilmeleri belirlenirken  $\phi'$  plastisite indisi  $I_p$ 'ye bağlı olarak Şekil 5.2'den İstanbul yeşil kili için  $17^\circ$  ve kaolen için  $22^\circ$  olarak belirlenmiştir. Yapılan III seri üç eksenli deneylerde göçme anındaki efektif gerilmelere göre belirlenen  $\phi'$  değerleride Tablo 6.1'de belirtilmiştir.

İstanbul yeşil kilinde ve Kaolende arazi numuneleri ve tekrar konsolide edilmiş laboratuvar numunelerinde belirlenen  $\phi'$  değerleri birbirine çok yakın değerler olarak belirlenmiştir. Gerilme örselenmesine maruz kalmış laboratuvar numunelerinde ise her iki

numunede de bekletme sürelerine göre  $\phi'$  de değışimler meydana gelmiştir. Kaolen laboratuvar numunelerinde bu değışimin miktarı İstanbul yeşil kiline göre daha fazladır.

Arazi numuneleri ve tekrar konsolide edilmiş laboratuvar numunelerinde belirlenen  $\phi'$  değerleri karşılaştırıldığında, normal konsolide zeminlerde gerilme örselenmesini gidermek için numunelerin tekrar konsolide edilmesinin, efektif gerilmeler cinsinden içsel sürtünme açısının değerini fazla etkilemediği görülmektedir.

Tablo 6.1a İstanbul yeşil kilinde III seri deneyden belirlenen  $\phi'$  değerleri

	İstanbul Yeşil Kili						
Numune Türü	1 günlük	7 günlük	28 günlük	CAU <sub>400</sub>	CAU <sub>450</sub>	CAU <sub>500</sub>	CIU <sub>(ort)</sub>
$\phi'$ (°)	18.2	16.3	22	16.4	17.5	18.5	15.4

Tablo 6.1b Kaolende III seri deneyden belirlenen  $\phi'$  değerleri

	Kaolen						
Numune Türü	1 günlük	7 günlük	28 günlük	CAU <sub>400</sub>	CAU <sub>450</sub>	CAU <sub>500</sub>	CIU <sub>(ort)</sub>
$\phi'$ (°)	24	29	40	24.5	25	24.2	25

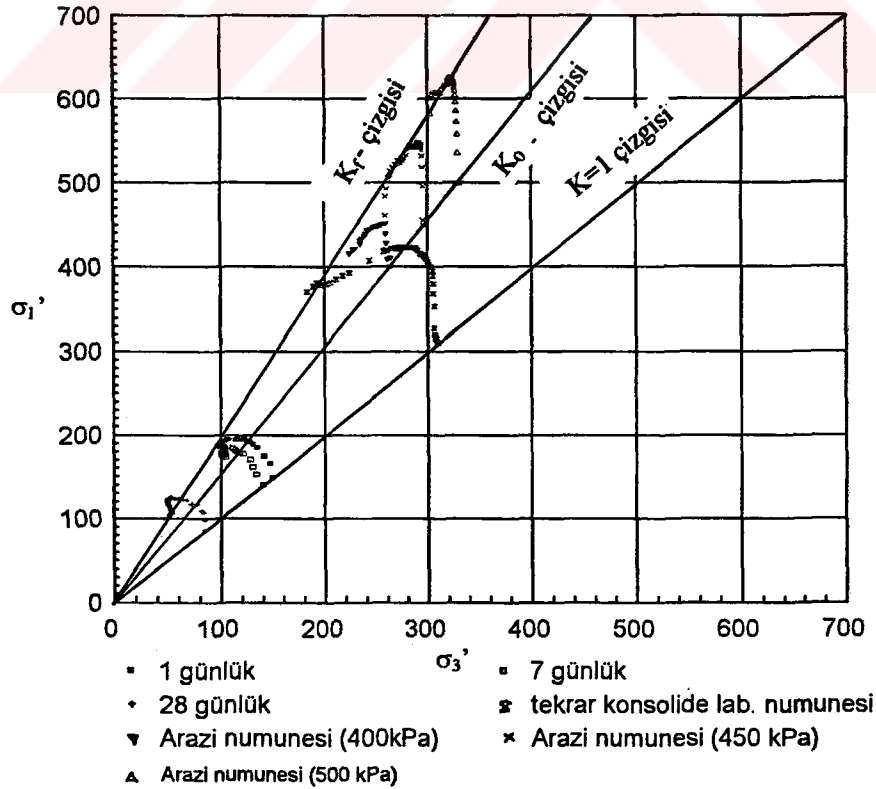
### 6.3.6. Gerilme İzleri

Konsolidasyonsuz - drenajsız deneylerde drenajsız yükleme sırasında boşluk suyu basıncı ölçümleri yapıldığı için efektif gerilmelere göre gerilme izleri çizilebilmiştir. 1 gün, 7 gün ve 28 gün bekletilerek UU deneyine tabi tutulan laboratuvar numuneleri 400, 450, 500 kPa'lık düşey efektif gerilmelerde anizotropik olarak konsolide edilen arazi numuneleri ve oktahedral gerilmede tekrar konsolide edilen laboratuvar numunesine ait

gerilme izleri  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_3'$  eksen takımında Şekil 6.11a ve Şekil 6.11b'de her iki numune için gösterilmiştir.

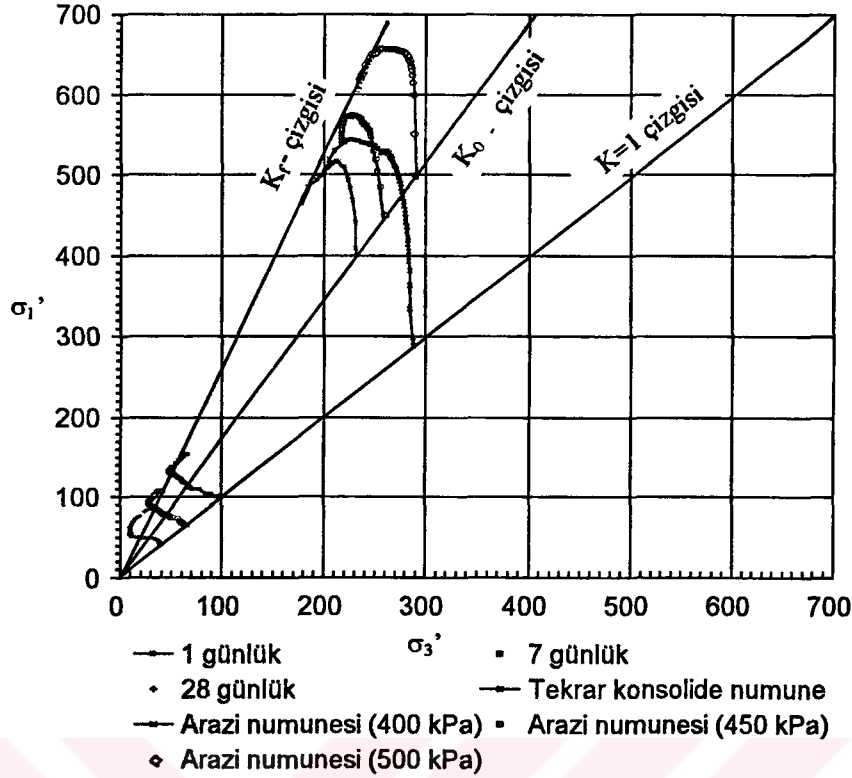
Laboratuvar numunelerinin gerilme izleri diğerlerinden çok farklıdır. Ancak Kaolen numuneleri ile İstanbul yeşil kili laboratuvar numunelerinde efektif gerilme izleride birbirinden çok farklı olarak gelişmiştir. Kaolen laboratuvar numunelerinin gerilme izlerinde göçmeden sonra bir geriye dönüş gözlenmiştir. İki numune arasındaki bu davranış farklılığı drenajsız eksenel yük uygulanması aşamasında gelişen boşluk suyu basıncındaki farklardan dolayıdır. İstanbul yeşil kilinin gerilme - birim deformasyon davranışı incelendiğinde boşluk suyu basınçları göçmeye ulaşıldıktan sonra, Kaolende ise göçmeye ulaşılmadan önce azalmaya başlamıştır. Boşluk suyu basıncındaki bu farklılığa bağlı olarak Kaolen laboratuvar numunelerinin davranışı diğer bütün gerilme izlerinden farklı olmuştur. İstanbul yeşil kilinde  $K_f$  çizgisinin eğimi  $\alpha_f = 16.7^\circ$ , Kaolende ise  $\alpha_f = 22^\circ$ ,  $\alpha' = 0$  olarak ölçülmüştür.

Arazi numuneleri ve tekrar konsolide numunelerde gerilme izlerinin aynı  $K_f$  çizgisine teğet hale geldiklerinin gözlenmesi, normal konsolide olmuş killi zeminlerde gerilme örselenmesini gidermek için numuneleri tekrar konsolide etmenin, efektif gerilmeler cinsinden içsel sürtünme açının değerini fazla etkilemediğini göstermektedir.



Şekil 6.11a. İstanbul Yeşil kilinde efektif gerilme izleri





Şekil 6.11b Kaolende efektif gerilme izleri

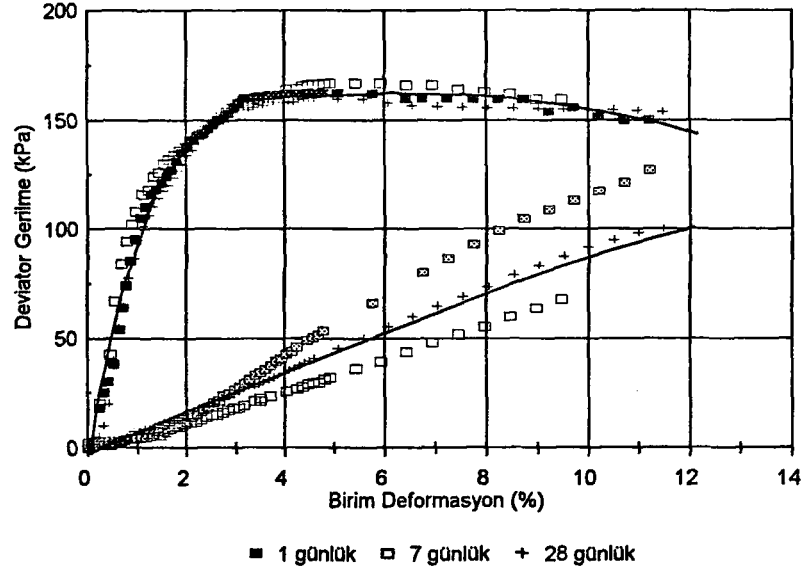
#### 6.4. Oktahedral Gerilmede İzotropik Tekrar Konsolidasyon Yöntemi (III. Seri Deneyler)

Gerilme boşalmasına maruz kalmış laboratuvar numuneleri 1 gün, 7 gün ve 28 gün bekleldikten sonra oktahedral izotropik gerilmede konsolide edildikten sonra drenajsız şartlarda aksenal olarak yüklenmiş (CIU) ve  $\sigma_{vc}' = 400$  kPa'da konsolide edilen arazi numunesi deney sonucu ile karşılaştırılmıştır.

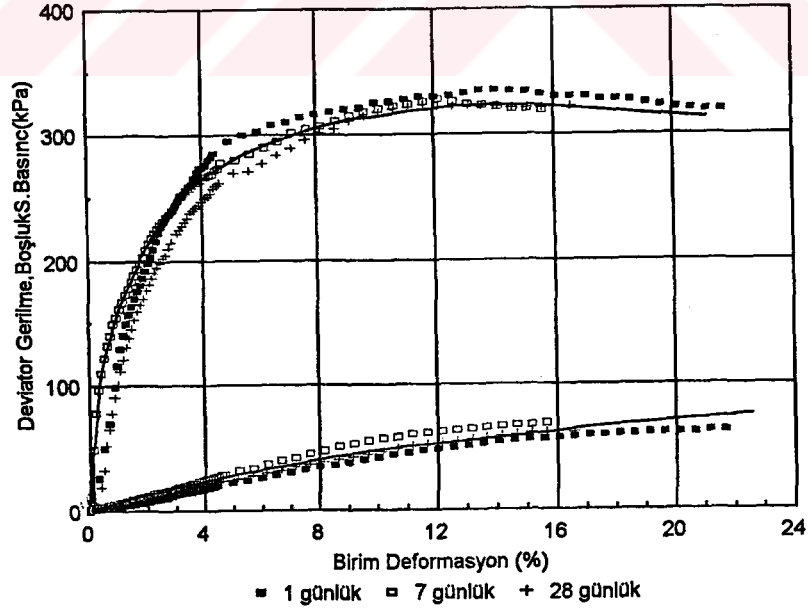
İstanbul yeşil kilinde ve Kaolende sırasıyla konsolidasyon basınçları  $\sigma_{vc}' = 310$  kPa,  $\sigma_{vc}' = 288$  kPa'dır. Belirli bekleme sürelerinde deney uygulandığı için numune bekleme süresinin tekrar konsolide numunelerin davranışı üzerinde etkili olup olmadığı da araştırılmıştır. Genel olarak bekleme sürelerinden sonra uygulanan CIU deneyleri sonucunda numunelerin gerilme birim deformasyon davranışları benzer olarak elde edilmiştir. Şekil 6.12a ve Şekil 6.12b'de CIU deneylerinden elde edilen gerilme - birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı eğrileri gösterilmiştir. Eğrilerden de görüldüğü gibi numune bekleme süresi tekrar konsolide numunelerin davranışı üzerinde çok etkili değildir. Ancak tekrar konsolide edilmiş laboratuvar numuneleri ile arazi numunelerinin

göçme birim deformasyon davranışları karşılaştırıldığında büyük farklılıklar belirlenmiştir. İstanbul yeşil kilinde ve Kaolende arazi numunelerinde %1.2 ve %1.6 iken tekrar konsolide numunelerde ortalama olarak sırasıyla %6 ve %13 olarak ölçülmüştür. İzotropik tekrar konsolide numunelerde göçme artan gerilme seviyesinde büyük şekil değiştirmelere ulaşıldıktan sonra meydana gelmiştir. Boşluk suyu basınçları ise artan gerilme - birim deformasyona karşılık artmış, bu artış göçmeye ulaşıldıktan sonra da devam etmiştir.

1 gün, 7 gün ve 28 gün bekletilerek tekrar konsolide edilen numunelerin davranışları benzer olduğundan ortalama bir drenajsız kayma mukavemeti ( $c_{uR}$ ) tariflenmiştir. Arazi numunelerinin drenajsız kayma mukavemeti ( $c_{ui}$ ) ile karşılaştırıldığında İstanbul yeşil kilinde  $c_{uR} = 85$  kPa,  $c_{ui} = 100$  kPa, Kaolende  $c_{uR} = 165$  kPa.,  $c_{ui} = 152$  kPa. olarak belirlenmiştir. Drenajsız kayma mukavemeti değerleri yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir fakat eğrilerin göçme birim deformasyonları ve elastisite modülleri birbirinden farklıdır. Göçme birim deformasyon değeri İstanbul yeşil kilinde arazi numunesinden %80, Kaolende ise %88 daha büyüktür, elastisite modülü ise arazi numunesinden İstanbul yeşil kilinde %28, Kaolende %53 daha küçüktür. Şekil 6.11a ve Şekil 6.11b'de gösterilen gerilme izlerinden, arazi numuneleri ile izotropik tekrar konsolide numunelerin gerilme izleri karşılaştırıldığında, göçme birim deformasyonlarındaki farklılıklardan dolayı gerilme izlerinin biçimleri farklıdır fakat göçmeden sonra gerilme izlerinin  $K_f$  çizgisine teğet hale geldiği görülmektedir. Gerilme örselenmesine maruz kalmış laboratuvar numuneleri izotropik tekrar konsolide edilerek drenajsız kayma mukavemeti ve efektif gerilmelere göre belirlenen  $\phi'$  değeri yaklaşık olarak örneklenebilmektedir, fakat drenajsız elastisite modülü ve göçme birim deformasyon değerleri için aynı şey geçerli değildir. Tablo 6.2. ve Tablo 6.3.'de III seri deneyden belirlenen sonuçlar verilmektedir.



Şekil 6.12a. İstanbul Yeşil kilinde oktahedral gerilmede izotropik tekrar konsolidasyon



Şekil 6.12b. Kaolende oktahedral gerilmede izotropik tekrar konsolidasyon

Tablo 6.2. İstanbul yeşil kilinde deney sonuçları

Numune Türü	$\epsilon_f$ (%)	$E_s$ (kPa)	$c_{us}$ (kPa)	$c_{ui}$ (kPa)	$u_{Ri}$ (kPa)	$u_R$ (kPa)	$w_f$ (%)	B	$A_f$
1 günlük	2.1	15000	45	-	-	149	68	0.92	0.57
7 günlük	1.7	11000	40	-	-	140	68	0.90	0.55
28 günlük	1.5	8700	35	-	-	86	69	0.93	0.50
CAU <sub>400</sub>	1.2	16000	-	100	271	-	51	0.93	0.16
CAU <sub>450</sub>	1.0	25000	-	125	-	-	48.5	0.96	0.06
CAU <sub>500</sub>	1.7	28000	-	152	-	-	47.5	0.94	0.04
CIU	6.0	11500	-	85	-	-	52	0.92	0.36

Tablo 6.3. Kaolende deney sonuçları

Numune Türü	$\epsilon_f$ (%)	$E_s$ (kPa)	$c_{us}$ (kPa)	$c_{ui}$ (kPa)	$u_{Ri}$ (kPa)	$u_R$ (kPa)	$w_f$ (%)	B	$A_f$
1 günlük	6.5	5600	45	-	-	100	36	0.90	0.46
7 günlük	5.8	3500	35	-	-	65	36	0.94	0.42
28 günlük	4.6	2000	29	-	-	40	37	0.93	0.39
CAU <sub>400</sub>	1.6	20000	-	152	249	-	34	0.91	0.20
CAU <sub>450</sub>	3.5	22000	-	175	-	-	32	0.89	0.12
CAU <sub>500</sub>	4.0	40000	-	200	-	-	30.5	0.91	0.11
CIU <sub>(ort.)</sub>	13	9500	-	165	-	-	33	0.90	0.17

## BÖLÜM 7

### 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada normal konsolide killerde gerilme boşalmasının geoteknik parametrelere etkileri araştırılmıştır. Zemin davranışı üzerinde gerilme tarihçesinin belirsizliğini ortadan kaldırmak için laboratuvarında konsolidemetrede normal konsolide olarak hazırlanmış gerilme tarihçesi belirli, homojen blok numuneler kullanılmıştır. Deneylerde gerilme boşalmasının etkilerinin belirgin bir şekilde gösterebilmek için derinlerden numune almayı örnekleyen bir arazi düşey efektif gerilmesi (400 kPa) seçilerek bu gerilmede blok numuneler hazırlanmıştır. Konsolidemetrede numunenin konsolidasyonu tamamlandıktan sonra üzerindeki mevcut gerilme drenajsız şartlarda kaldırılarak gerilme boşalması örneklenmiştir. Çalışmada numunelerin sadece gerilme örselenmesine maruz kaldığı fiziksel örselenmenin olmadığı kabul edilmiştir.

Gerilme boşalmasının etkilerini belirleyebilmek için çalışmada üç seri üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Gerilme boşalmasının etkileri konsolidasyonsuz - drenajsız deneylerle belirlenip, arazideki zemin davranışını ile karşılaştırabilmek için arazideki zemin davranışını örnekleyen anizotropik konsolide drenajsız deneyler yapılmıştır. Bilinen bir arazi zemin davranışını laboratuvar deneyleri ile tekrar örnekleyebilmek için, bir yöntem olarak oktahedral izotropik gerilmede tekrar konsolidasyon incelenmiştir.

**I.Seri Deneyler:** Arazideki zemin davranışını örneklemek için konsolidemetrede elle tutulabilir bir kıvamda hazırlanan blok numuneden üç eksenliye numune aktarılmış ve numune  $K_0$  koşullarında anizotropik olarak konsolide edildikten sonra drenajsız olarak eksenel basınç artırılarak göçmeye ulaşılmıştır. Üç farklı arazi düşey efektif gerilmesinde (400, 450, 500 kPa ) deney tekrarlanarak arazi numunesinin davranışı incelenmiş ve II. seri deney sonuçları ve tekrar konsolide etmenin etkisinin araştırıldığı III. seri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Konsolidasyon basıncı artırıldıkça numunenin deney sonucu muhtevası azalmış ve drenajsız kayma mukavemeti ( $c_{ui}$ ) ve  $E_{uarazi}$  artmıştır. Arazi numuneleri deney sonuçları Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4'de gösterilmiştir.

**II. Seri Deneyler:** Gerilme boşalması ile numune bekletme süresinin geoteknik parametrelere olan etkisini belirleyebilmek için belirli numune bekletme sürelerinde konsolidasyonsuz drenajsız deneyler uygulanmıştır. Numune bekletme süresi arttıkça drenajsız kayma mukavemeti ( $c_{us}$ ), kalıcı boşluk suyu basıncı ( $u_R$ ), elastisite modülü ( $E_{u \text{ numune}}$ ) ve göçme anında belirlenen boşluk suyu basıncı parametresi  $A_f$ 'de azalma gözlenmiştir. Laboratuvar numunelerinden elde edilen sonuçlar Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10' Şekil 6.12'de gösterilmiş ve arazi numunesi deney sonuçları ile karşılaştırılarak gerilme boşalmasına bağlı olarak parametrelerdeki değişimler ifade edilmiştir.

**III. Seri Deneyler:** Zemin numunesi arazideki yerinden çıkarıldığında gerilme boşalması kaçınılmazdır. Araziden laboratuvara taşınarak laboratuvar deneyleriyle geoteknik parametreler belirlenmek istendiğinde arazideki zemin davranışı laboratuvar deneyleriyle örneklenmelidir. Bu amaçla oktahedral izotropik gerilmelerde tekrar konsolidasyon yöntemi uygulanarak, arazi zemin davranışı ile karşılaştırılmıştır. Belirli bekletme sürelerinde uygulanan izotropik konsolide - drenajsız deneylerde (CIU) numune bekletme süresinin tekrar konsolide numunenin davranışı üzerinde etkili olmadığı belirlenerek drenajsız kayma mukavemeti ve efektif içsel sürtünme açısı  $\phi'$  değerlerinin arazi numunesinden elde edilen değerlere yakın olmasına karşın gerilme - birim deformasyon davranışları ve elastisite modüllerinin oldukça farklı olduğu belirlenmiştir.

### **7.1. Çalışmada Elde Edilen Genel Sonuçlar**

Yapılan III seri deney sonuçları karşılaştırıldığında, arazideki drenajsız zemin davranışının laboratuvarda UU üç eksenli deneyleri ile örneklenemediği bu çalışmada da görülmüştür. Yapılan deneylerde laboratuvar numunelerinin drenajsız kayma mukavemeti, arazi numunesinin drenajsız kayma mukavemetin yarısından daha küçük değerlerde belirlenmiştir. Drenajsız mukavemette ve diğer drenajsız zemin parametrelerinde, numune bekletme süresi arttıkça kayıplarda artmıştır. Numune bekletme süreleri sonucunda laboratuvar numunelerinde yapılan UU deneylerinde ölçülen kalıcı boşluk

suyu basınçları ( $u_R$ ) ile gerilme boşalması anında ölçülen  $u_{Ri}$  değerleri karşılaştırıldığında  $u_R$ 'de zamanla büyük kayıplar meydana geldiği ölçülmüştür. Bu kayıplar nedeniyle drenajsız koşullarda su muhtevasında değişiklik olmadan saklanan numunelerin mukavemetleri ve diğer drenajsız numune özellikleri bekletme süresi arttıkça azalmıştır. Numunelerde bekletme süresi boyunca meydana gelen kayıpların miktarının arazide etkili gerilme sistemine, zeminin permeabilitesine, saklama koşullarına bağlı olduğu Graham ve Lau (1988) 'de belirtilmiştir.

Gerilme boşalmasından sonra numune üzerinde etkili gerilme sistemi değişerek efektif gerilmeler azalmakta ve gerilme boşalmasından sonra numune boşluklarında gelişen negatif boşluksuyu basıncı hidrostatik efektif gerilmelere eşit olmaktadır. Efektif gerilmedeki değişimden dolayı arazi ve laboratuvar numunelerinin başlangıç koşulları farklı olduğundan gerilme boşalmasına maruz kalan laboratuvar numunelerinde hiçbir iyileştirme yapılmadan arazi numunesi davranışının örneklenemeyeceği belirlenmiştir. Graham ve Kwok (1986)'da anizotropik arazi gerilmelerinin kaldırılarak boşaltma anında gelişen boşluk suyu basıncından dolayı yerini izotropik efektif gerilmelere bırakması nedeniyle numunenin doku yapısında değişimler meydana geldiği ve bekletme süresi boyunca negatif boşluk suyu basıncındaki azalmanın devam etmesi nedeniyle drenajsız numune davranışının değiştiğini belirtmiştir. Kirkpatrick ve Khan (1975) tarafından yapılan deneysel çalışmalara göre drenajsız koşullarda saklanan numunelerde bekletme süresince boşluk suyu basınçlarındaki kayıpların nedeni tam olarak anlaşılmasına rağmen kavitasyon ve difüzyon etkileriyle birlikte, negatif boşluk suyu basıncındaki dağılımın permeabilite katsayısından daha çok konsolidasyon katsayısı ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

İstanbul yeşil kilinde laboratuvar numunelerinde gerilme birim deformasyon eğrilerinde numunede göçme meydana geldikten sonra deviator gerilmede hızla azalma gözlenmiş, Kaolen laboratuvar numunelerinde ise göçme İstanbul yeşil kiline göre daha büyük birim deformasyon değerlerinde ve arazi numunesine göre çok büyük birim deformasyonlara ulaşıldıktan sonra meydana gelmiştir. Numune bekletme süresi arttıkça mukavemetteki düşüşle birlikte göçme birim deformasyonunda azalmıştır. Drenajsız kayma mukavemeti ve boşluk suyu basıncındaki kayıplar, permeabilitesi İstanbul yeşil kiline göre daha yüksek olan Kaolende bekletme süresi arttıkça daha da artmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonunda konsolidasyonsuz drenajsız deneylerle arazideki numune davranışının laboratuvarda örneklenemediği görülmektedir. Gerilme boşalmasından sonra 28 gün drenajsız koşullarda bekletilen İstanbul yeşil kilinde ve Kaolen numunelerinde ölçülen değişimlerin miktarı sırasıyla şöyledir; drenajsız kayma mukavemetinde %65 ve %81, kalıcı boşluk suyu basıncında %69 ve %84, elastisite modülünde %46 ve %90 kayıplar meydana gelmiş; boşluk suyu basıncı  $A_f$ 'de %34 ve %19, göçme birim deformasyonunda %0.3 ve %3 artış olmuştur.

Gerilme boşalması anında ölçülen boşluk suyu basıncı parametreleri  $A_u$  ve  $B_u$  İstanbul yeşil kilinde 0.18, 0.94; Kaolende ise 0.23 ve 0.92 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler Kirkpatrick ve Khan (1974), tarafından belirlenenden %10; Graham ve Kwok (1986), tarafından belirlenenden %30 daha küçük ölçülmüştür.

Arazi numunesinin davranışını örneklemek için oktahedral gerilmede izotropik tekrar konsolidasyon yöntemi uygulanmıştır.  $\sigma_{vc}'$  izotropik tekrar konsolidasyon basıncı yaklaşık olarak İstanbul yeşil kilinde  $\sigma_{vc}' = 0.775\sigma_v'$ , Kaolende ise  $\sigma_{vc}' = 0.72\sigma_v'$  değerine karşılık gelmektedir. Belirli bekletme sürelerinde yapılan deney sonuçlarından numune bekletme süresinin, konsolidasyonlu - drenajsız deney sonuçlarına çok fazla etkisi olmadığı elde edilmiştir. Bu yöntem uygulanarak bulunan drenajsız mukavemeti İstanbul yeşil kilinde arazi numunesinden %15 daha az, Kaolende ise %8 daha fazla tahmin edilmiştir. Efektif gerilmelere göre belirlenen içsel sürtünme açısı ise her iki numunede de arazi numunesinden belirlenen değerlere çok yakın elde edilmiştir. İstanbul yeşil kilinde  $\phi'_{CIU} = 15.4^\circ$ ,  $\phi'_{CAU} = 16.4^\circ$  Kaolende ise  $\phi'_{CIU} = 25^\circ$ ,  $\phi'_{CAU} = 24.5^\circ$  dir. Her iki numunede de arazi ve tekrar konsoli laboratuvar numunelerinin göçme birim deformasyonlarındaki farklar nedeniyle gerilme izlerinin biçiminin farklı olmasına karşın gerilme izleri  $K_f$  çizgisine teğet hale gelmiştir.

Normal konsolide killi zeminlerde gerilme örselenmesinin etkisini gidermek için tekrar konsolide etmenin drenajsız kayma mukavemetini ve efektif gerilmeler cinsinden içsel sürtünme açısının değerini çok fazla etkilemediği belirlenmiştir. Fakat arazi numunesi ve izotropik konsolide laboratuvar numunelerinin gerilme birim deformasyon davranışının ve elastisite modüllerinin oldukça farklı olduğu ve izotropik tekrar konsolidasyonla bu parametrelerin örneklenemediği görülmüştür.



Arazideki gerilme koşullarını laboratuvarda örnelemek için kullanılan anizotropik konsolidasyon yönteminin zor ve uzun bir deney programı gerektirmesi nedeniyle pratikte yaygın olarak uygulaması yoktur. Genellikle geoteknik parametreler izotropik konsolidasyon yöntemleri uygulanarak belirlenmektedir. Pratik maksatlı düşünüldüğünde, Trakya ve İstanbul Avrupa yakasında sıkça rastlanan bir zemin cinsi olan İstanbul yeşil kilinde drenajsız kayma mukavemeti ve efektif içsel sürtünme açısı oktahedral gerilmede izotropik tekrar konsolidasyon metodu ile belirlenerek ve drenajsız elastisite modülünde %40 arttırılarak kullanılması önerilebilir.

## ***7.2. İleride Yürütülecek Çalışmalar İçin Öneriler***

1. Laboratuvar konsolidometre aleti laboratuvar araştırma ve deneylerinde kullanılacak olan gerilme tarihçesi belirli numuneler hazırlamak için uygundur. Ancak numunelerin konsolidasyonu sırasında oluşan yanıl gerilmeler ve boşluk suyu basınçları ölçülememekte, konsolidasyon sırasında numunenin doygunluğu hakkında bilgi edinilememekte ve bu nedenlerle elde edilen blok numuneler bazı belirsizlikler içermektedir. Ancak yinede numune hazırlama işleminin basit, ve hızlı tekrarlanabilir olması nedeniyle laboratuvar araştırmaları için doğal zeminlerden daha uygundur.

2. Konsolidimetreden elde edilen blok numuneler belirli bekletme sürelerinde uygulanacak üç eksenli deneyler için drenajsız koşullarda desikatörde bekletilmiştir. 28 günlük bekletme süreleri sonunda numunelerin su muhtevalarında %1~%2'lik artışlar meydana gelmiştir. Bunu engelleyebilmek için numuneler nem odalarında başlangıç su muhtevasını koruyacak şekilde drenajsız koşullarda bekletilmelidir.

3. Blok numuneden üç eksenliye numune hazırlanırken numunenin traşlanması sırasında gösterilen özene karşın fiziksel örselenme meydana gelmektedir. Oysa numunelerde fiziksel örselenme olmadığı, numunelerin sadece gerilme örselenmesine maruz kaldığı kabul edilmiştir. Fiziksel örselenmenin tam giderilmesi bugünkü tekniklerle olası görünmemektedir.

4. Üç eksenli basınç deneylerinde, başlangıçta deney sistemi suya doymun hale getirilmiş, ancak olanaklarımızın sınırlı olması nedeniyle deneylerde havası alınmış su kullanılamamıştır. Bu nedenle boşluk suyu basıncı ölçen basınç ölçerlerde su içindeki havanın sıkışması nedeniyle ölçüm hataları oluşmuş olabilir. Deneylerde membran ve filtre düzeltmesi yapılmamıştır. Bütün deneylerde numunelerde doymunluk kontrolü yapılmış ve genellikle  $B = 0.89 \sim 0.96$  arasında belirlenerek numuneler suya doymun kabul edilmiştir.

5. Bu çalışmada sadece oktahedral izotropik gerilmelerde tekrar konsolidasyon yöntemi incelenmiştir. Aslında birkaç yöntemde (örneğin arazi düşey efektif gerilmesinde, düşey efektif gerilmenin yarısında, arazi gerilmeleri altında anizotropik tekrar konsolidasyon, gerilme boşalması anındaki teorik boşluk suyu basıncı  $\sigma_0' = (-u_{Ri})'$  de izotropik tekrar konsolidasyon uygulanarak arazi numunesi davranışını örnekleyen yöntemlerin etkisini görmek laboratuvar numunesinin araziye en iyi örneklemede hangi yolun seçileceği konusuna farklı bir bakış açısı getirebilir.

**KAYNAKLAR**

1. Abdelhamid, M. S. and Krizek, R. J. (1976), "At Rest Lateral Earth Pressure of a Consolidating Clay." Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT7, pp. 721-738.
2. Alpan, I. (1967), "The Empirical Evaluation of the Coefficients  $K_0$  and  $K_{or}$ ." Soils and Foundations, Vol. 7, 355-358.
3. Arthur, J. R. and Menzies, B. K. (1972). "Inherent Anisotropy in Leda Clay," Proc. Conf. on Numerical Methods in Geomech., ASCE, Vol. 1, pp. 115-128.
4. Berre, T. and Bjerrum, L. (1973). "Shear Strength of Normally Consolidated Clays," 8th ICSMFE, Moscow, Vol.1.1, pp.53-70.
5. Bjerrum, L. (1972). "Embankments on Soft Ground," State - of - the Art Report, Proc. ASCE Spec. Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Lafayette, Vol.II, pp. 1-54.
6. Bjerrum, L. (1973). "Problems of Soil Mechanics and Construction of Soft Clay and Structurally Unstable Soils. Proc. 8th Int. Soil Mech., Moskow 3, pp. 111-159.
7. Bjerrum, L. and Simons, N. E. (1960), " Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clays," 1st PSC, ASCE, pp.711-726.
8. Bowles, J. E. (1988). "Foundation Analysis and Design" Fourth Edition McGraw - Hill Book Company, New York
9. Brooker, E. W., and Ireland, H.O. (1965). "Eart Pressures at Rest Related to Stress History," CGJ, Vol.2, No.1, pp.1-15.

10. Craig, R. F. (1983). "Soil Mechanics" ELBS / Von Nostrand Reinhold (UK) Third Edition.
11. Das, B. M. (1990). "Principles of Geotechnical Engineering" Second Edition, PWS Publishing Company, Boston.
12. Das, B. M. (1990). Principles of Foundation Engineering PWS KENT Publishing Company, Boston.
13. Davis, E. H. and Paulos, H.G. (1967). "Laboratory Investigations of the Effects of Sampling," Civ. Eng. Trans., Inst. of Eng., Australia, Vol.CE9, No.1, pp. 86-94.
14. Duncan, J. M. and Seed, H.B. (1966a). "Anisotropy and Stress Reorientation in Clay," JSMFD, ASCE, Vol.92, No.SM5, pp21-50.
15. Graham, J., Kwok, C. K. & Ambrosie, R. W. (1987). "Stress Release, Undrained Storage, and Reconsolidation in Simulated Underwater Clay " Canadian Geotechnical Journal, 24. pp. 279-288.
16. Graham, J. & Lau, S. L.-K. (1988). "Influence of Stress-Release Disturbance, Storage and Reconsolidation Procedures on The Shear Behaviour of Reconstituted Underwater Clay" Geotechnique38, No.2, 279-300.
17. Holtz, R. D., Kovacs, W. D.(1981). "An Introduction to Geotechnical Engineering" Prentice - Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
18. Hvorslev, M. J. (1962). "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes," United Engineering Center, New York.
19. Jaky, J. (1948). "Pressure in Silos," 2d ICSMFE, Vol.1, pp. 103-107

20. Jerbo, A., Norder, B. and Sandegren, E. (1961), "Some Interesting Geotechnical Observations on Clays From Kromfors," *Jarnvagsteknik*, Vol. 29, No. 4, pp. 89-90.
21. Kallstenius, T. (1963), "Studies on Clay Samples Taken with Standart Piston Sampler." *Proceedings of the Swedish Geotechnical Institute*, No. 21, pp. 207.
22. Kallstenius, T. (1971), "Secondary Mechanical Disturbance." Effects in Cohesive Soil Samples, 4th Asian Conference, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Proceeding of Specialty Session 1, Quality in Soil Sampling*, pp. 30-39.
23. Kanja, M. A., and Wolle, C. M.(1977). "Residual Strength - New Testing and Microstructure, 9th ICSMFE, Vol.1, pp.153-154.
24. Kirkpatrick, W. M. and Rennie, I. A. (1975). "Stress Relief Effects in Deep Sampling Operations," *Proc. Conf. Offshore Engineering, Cardiff*.
25. Kirkpatrick, W. M. & Khan, A. J. (1984). "The Reaction of Clays to Sampling Stress Relief" *Geotechnique* 34 No.1 , pp. 29-42.
26. Kirkpatrick, W. M. (1975). "Discussion to Session on Soil Mechanics of the Sea Bed," *Proc. Conf. Offshore Structures*, pp. 37-39. London: Institution of Civil Engineers.
27. Ladd, C. C., et al. (1977). "Stress-Deformation and Strength Characteristics," *State-of-Art Report, 9th ICSMFE, Vol.2, pp.421-494*.
28. Ladd, C. C. and Lambe, T. W. (1963). "The Strength of Undisturbed Clay Determined from Undrained Tests," *ASTM, STP, No.361, pp.342-371*.

29. Ladd, C. C. and Foott, R. (1974). "New Design Procedure for Stability of Soft Clays," ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 100 No. GT7, pp. 763-786
30. Ladd, C. C. (1964). "Stress - Strain Modulus of Clay in Undrained Shear," JSMFD, ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 103-132.
31. Ladd, C. C. and Bailey, W.A.(1964). Correspondence on "The Behaviour of Saturated Clays During Sampling and Testing," by Skempton and Sowa, Geotechnique 14, No.4, pp. 353- 358.
32. Law, K. T. and Lo, K. Y. (1976). "Analysis of Shear Induced Anisotropy in Leda Clay," Proc. Conf. an Numerical Methods in Geomech.,ASCE, Vol. 1, pp. 329-344.
33. Mitchell, J. K. (1976). "Fundamentals of Soil Behaviour," Wiley, New York.
34. Noorany, I. and Seed, H.B., (1965). "In Situ Strength Characteristics of Soft Clays," JSMFD, ASCE, Vol.91, No.SM2, pp.49-80.
35. Odeh, M. A. (1980). "The Shearing Behaviour of Kaolin and Illite," MSC Thesis, University of Strathclyde.
36. Olsen, H. W., et al. (1986). " Piston Core Properties and Disturbance Effects," JGED, ASCE, Vol.112, No.6, pp.608-625.
37. Özaydın, İ. K. (1989). Zemin Mekanikği , Meya Matbaacılık ve Yayıncılık Ltd. Şti.
38. Raymond, G. P., Tousem, D. L. and Lojkacek, M. J. (1971). "The Effect s of Sampling on the Undrained Soil Properties of the Leda Soil." Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 546-557.

39. Rowe, P. W. (1957). "Cc = 0 Hypothesis for Normally Loaded Clays at Equilibrium," Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech., London, pp. 189-192.
40. Schjetne, K. (1971), "The Measurement of Pore Pressure During Sampling." 4th Asian Conference, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceeding of Specialty Session 1, Quality in Soil Sampling, pp. 12-16.
41. Schmertman, J. H. (1956). Discussion on "Effect of Sample Disturbance on the Strength of a Clay," Trans. ASCE, Vol. 121, pp. 940-950.
42. Shackel, B. (1971). "Some Aspects of Sampling Disturbance Observed Using Nuclear Method," 4th Asian Conference, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceeding of Specialty Session 1, Quality in Soil Sampling, pp. 7-11.
43. Shmidt, B. (1967) "Discussion on Earth Pressure," by E. W. Brooker et al. Can. Geotechnical Journal, No.3, pp. 239-242.
44. Simons, N. E. and Som, N. N. (1970). "The Influence of Lateral Stresses on the Stress Deformation Characteristics of London Clay," Proc. 7th ICSMFE, Mexico, vol. 1, pp. 169-377.
45. Simons, N. E. (1957). Discussion of "Test Requirements for Measuring the Coefficient of Earth Pressure at Rest," Proceedings of the Conference on Earth Pressure Problems, Brussels, Vol.III, pp.50-53.
46. Skempton, A. W. (1948). "A Study of the Immediate Triaxial Test on Cohesive Soils," Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, Vol. 1, pp. 192-196.

47. Skempton, A. W. (1954). "The Pore Pressure Coefficients A and B" *Geotechnique*, Vol. IV , 143 - 147.
48. Skempton, A. W. and Sowa, V. A. (1963). "The Behaviour of Saturated Clays During Sampling and Testing." *Geotechnique*, Vol.13, No.2, pp.269 - 290.
49. Sone, S., Tsuchiya, H. and Saito, Y. (1971). "The Deformation of a Soil Sample During Extrusion From a Sample Tube," 4th Asian Conference, International Society on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceeding of Specialty Session, Quality in Soil Sampling, pp. 3-6.
50. Terzaghi, K. (1936). "Relation Between Soil Mechanics and Foundation Engineering: Presidential Adress," *Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Boston, vol. 3, pp. 13-18.
51. Yamada, Y., and Ishihara, K. (1979). " Anisotropic Deformation Characteristics of Sand under Three Dimensional Stress Conditions," *Soils and Foundation*, Vol.19, No.2, pp.79-94.
52. Young, R.N., and Sivistri, V. (1979). "Anizotropik Behaviour of a Sensitive Clay," *CGJ*, Vol.16, No.2, pp.335-350.



## ÖZGEÇMİŞ

Araştırmacı 04.09.1970 tarihinde Bafra'da doğmuş, ilköğrenimini burada, orta öğrenimini Samsun'da tamamlamıştır.1988 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimine başlamış ve 1992 yılında mezun olarak aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Geoteknik programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Araştırmacı halen Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim dalında Araştırma Görevlisidir.

