

**57508**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HALIÇ KİLİNİN**  
**GEOTEKNİK PARAMETRELERİNİN**  
**BELİRLENMESİ**

**F.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU**  
**DOKÜMAN**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Jeof. Müh. Perihan İPEKOĞLU**

**F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIRIM**

**İSTANBUL, 1996**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma İstanbul için sorun teşkil eden Haliç ve civarının kirlenmesinde çok önemli bir etken olarak gözüken dıpsel birikimlerin geoteknik özelliklerin araştırılmasına yönelik olmuştur.

STFA Temel Araştırma ve Sondaj Ltd. Sti. tarafından Haliç'te denizde ve karada 19 adet zemin etüd sondajları açılmış, sondajlardan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınarak laboratuara teslim edilmiştir. Derinlikleri 10 m ile 25 m. arasında değişen sondajlardan alınan zemin numuneleri üzerinde Haliç tabanından itibaren rastlanılan zemin çökellerinin geoteknik özelliklerini belirlemek üzere bir seri laboratuvar deneyi uygulanmıştır.

Çalışmalar sırasında teknik ve idari konulardaki yardımını esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIRIM'a, değerli ilgileri nedeniyle Prof Dr. Sayın I. Kutay ÖZAYDIN'a, Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM'a, laboratuvar çalışmalarına katkıları nedeniyle Arş. Gör. Sayın Şükrü ÖZÇOBAN'a, Arş. Gör. Sayın Mehmet BERİLGİN'e, Arş. Gör. Havvanur KILIÇ'a, Arş. Gör. Sayın Cem AKGÜNER'e Arş. Gör. Sayın Saadet Arzu KOÇ'a, sonsuz desteklerini gördüğüm aileme, laboratuvar görevlileri teknisyen Erhan EROL'a ve Turan ANDIÇ'e ve emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	XI
SUMMARY.....	XII
BÖLÜM.....	1
1. GİRİŞ.....	1
2. Haliç'te Yapılmış Çalışmalar.....	2
BÖLÜM 2.....	6
2. Haliç ve Çevresinin Mevcut Durumu.....	6
2.1. Haliç ve Çevresinin Topoğrafik Özellikleri.....	6
2.2. Haliç ve Çevresinin Jeolojisi.....	9
2.3. Haliç ve İstanbul Boğazı'nın Oluşumu.....	9
2.4. Haliç Dipsel Modellerinin Birikim Modeli.....	11
2.5. Haliç Deniz Dibi Atıkları.....	12
BÖLÜM 3.....	13
3. Haliç ve Çevresinin Zemin Profili.....	13
3.1. Yeni Galata Köprüsü- Haliç Köprüsü (Feshane-Mezbaha Arası).....	14
3.2. Valide Sultan Köprüsü-Alibey / Kağıthane Dereleri Arası Zemin Enine Kesitleri.....	15
3.2.1. Haliç Köprüsü Enine Kesiti.....	15
3.2.2. Feshane-Mezbaha Arası Enine Kesiti.....	16
3.2.3. Eyüp (Feshane-Mezbaha)-Alibey Deresi Arası Enine Kesitleri.....	16
3.3. Haliç Köprüsü-Alibey / Kağıthane Dereleri Arası Sahil Boyuna Kesitleri.....	17
3.3.1. Kuzey (Doğu) Sahilleri Zemin Kesitleri.....	17
3.3.2. Güney (Batı) Sahilleri Zemin Kesitleri.....	17
BÖLÜM 4.....	23
4. Yumuşak Kohezyonlu Zemin Özellikleri.....	23
4.1. Kohezyonlu Zeminlerin Konsolidasyonu.....	23
4.4.1. Yumuşak Zeminlerin Sıkışabilirlik Parametreleri.....	24

4.2. Kohezyonlu Zeminlerin Kayma Mukavemeti.....	28
4.2.1. Kayma Mukavemetinin Üç Eksenli Deneylele Belirlenmesi.....	30
4.2.2. Yumuşak Kohezyonlu Zeminlerin Kayma Mukavemeti.....	31
<b>BÖLÜM 5.....</b>	<b>35</b>
5. Deneysel Çalışmalar.....	35
5.1. Endeks Özelliklerinin Belirlenmesi.....	35
5.2. Sulu Çamur Konsolidasyonu.....	36
5.2.1. Sulu Çamur Konsolidometre Aygıtı.....	36
5.2.2. Sulu Çamur Konsolidasyonu ile Hazırlanan Blok Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylele.....	40
5.2.2.1. Blok Numuneler Üzerinde Yapılan Veyn Deneylele.....	40
5.2.2.2. Blok Numuneler Üzerinde Yapılan Konsolidasyon Deneylele.....	41
5.2.2.3. Blok Numuneler Üzerinde Yapılan Üç Eksenli Deneylele.....	41
5.3. Tüp Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylele.....	44
<b>BÖLÜM 6.....</b>	<b>45</b>
6.1. Endeks Özellikleri.....	45
6.1.1. Tabii Birim Hacim Ağırlığı.....	45
6.1.2. Tabii Su Muhtevası.....	49
6.1.3. Atterberg Limitleri.....	49
6.1.4. Likitide İndisi.....	53
6.2. Mukavemet Özellikleri.....	53
6.2.1. Drenajlı Kayma Mukavemeti Parametrelele.....	60
6.3. Sıkışabilirlik Parametrelele.....	61
6.3.1. Sıkışma İndisi.....	62
6.3.2. Hacimsal Sıkışma Katsayısı.....	70
6.3.3. Konsolidasyon Katsayısı.....	71
<b>BÖLÜM 7.....</b>	<b>73</b>
7. Sonuçlar ve Öneriler.....	73
7.1. Endeks Özellikleri.....	73
7.2. Mukavemet Parametrelele.....	74

7.3. Sıkışabilirlik Parametreleri.....	76
7.4. Uygulanması Düşünülen Uzaklaştırma Alternatifleri.....	76
KAYNAKLAR.....	78
EKLER.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	97



## NOTASYON

A	Zemin örneğinin alanı
A'	Düzeltilmiş alan
A <sub>0</sub>	Numune başlangıç alanı
A.K.O	Aşırı Konsolidasyon Oranı
a <sub>v</sub>	Sıkışma sayısı
C <sub>C</sub>	Sıkışma indisi
C <sub>r</sub>	Tekrar sıkışma indisi
C <sub>v</sub>	Konsolidasyon katsayısı
C <sub>α</sub>	İkincil konsolidasyon katsayısı
c	Kohezyon
c'	Efektif kohezyon
c <sub>d</sub>	Drenajlı halde kohezyon
c <sub>u</sub>	Drenajsız kayma mukavemeti parametresi
c <sub>cu</sub>	Konsolidasyonlu drenajsız deneyde kohezyon
e	Boşluk oranı
G <sub>s</sub>	Özgül yoğunluk
H <sub>d</sub>	Numune kalınlığı
H <sub>s</sub>	Dane yüksekliği
I <sub>p</sub>	Platisite İndisi
k	Permeabilite
m <sub>v</sub>	Hacimsel sıkışma katsayısı
u	Boşluk suyu basıncı
T	Zaman faktörü
t	zaman
w <sub>L</sub>	Likit limit
w <sub>p</sub>	Plastik limit
φ	İçsel sürtünme açısı
φ'	Efektif gerilmelere göre içsel sürtünme açısı

$\phi_d$	Konsolidasyonlu - drenajlı deneyden elde edilen içsel sürtünme açısı
$\phi_u$	Drenajsız kayma mukavemeti parametresi
$\phi_{cu}$	Konsolidasyonlu - drenajsız deneylerde içsel sürtünme açısı
$\gamma_s$	Dane birim hacim ağırlığı
$\gamma_w$	Suyun birim hacim ağırlığı
$\sigma$	Toplam normal gerilme
$\sigma'$	Efektif gerilme
$\sigma'_p$	Önkonsolidasyon basıncı
$\sigma'_{vo}$	Arazideki efektif düşey basınç
$\tau_f$	Kayma mukavemeti



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	İnceleme Alanının Mevki-Jeoloji Haritası.....	7
Şekil 2.2	İnceleme Alanı Sondaj Vaziyet Planı ve Haliç Batimetrik Haritası.....	8
Şekil 3.1	Alibey-Kağıthane Dereleri-Feshane Mezbaha Arası Haliç Zemin Enine Kesitleri.....	19
Şekil 3.2	Feshane-Mezbaha-Yeni Galata Köprüsü Arası Zemin Enine Kesitleri.....	20
Şekil 3.3	Unkapanı-Perşembe Pazarı-Eminönü-Karaköy Arası Zemin Enine Kesitleri..	21
Şekil 4.1	Ödometre Deneyinde Gözlenen Sıkışma Davranışı.....	23
Şekil 4.2	Hacimsal Sıkışma Katsayısı ( $m_v$ ) ve Sıkışma İndisi ( $C_c$ ) nin Bulunması.....	25
Şekil 4.3	Konsolidasyon Katsayısının ( $C_v$ ) Casagrande Logaritma Zaman Yöntemi ile Saptanması.....	28
Şekil 4.4	Kayma Mukavemeti Parametreleri.....	30
Şekil 4.5	Konsolidasyonsuz Drenajsız Kayma Mukavemeti Zarfı.....	32
Şekil 4.6	Konsolidasyonlu-Drenajsız Durumda Kayma Mukavemeti Zarfları.....	32
Şekil 4.7	Konsolidasyonlu Drenajsız Kayma Mukavemeti.....	33
Şekil 5.1	Sulu Çamur Konsolidasyon Aygıtı.....	38
Şekil 5.2	Sulu Çamur Konsolidasyon Aygıtı Kesiti.....	39
Şekil 5.3	Veyn Deney Aleti.....	41
Şekil 5.4	Numunelerin Drenajsız Durumda Desikatörde Bekletilmesi.....	42
Şekil 5.5	Numune Traşlama Aygıtı.....	43
Şekil 6.1	Tabii Birim Hacim Ağırlığının Derinlikle Değişimi.....	50
Şekil 6.2	Tabii Su Muhtevasının Derinlikle Değişimi.....	51
Şekil 6.3	Atterberg Limitleri ve Tabii Su Mhtevasının Derinlikle Değişimi.....	52
Şekil 6.4	Likitlik İndisinin Derinlikle Değişimi.....	54
Şekil 6.5	Laboratuar Veyn Deneylerinden Belirlenen Drenajsız Kayma Mukavemetinin Derinlikle Değişimi.....	55
Şekil 6.6	Drenajsız Kayma Mukavemetinin Jeolojik Düşey Efektif Gerilmelere Normalize Edilmiş Değerlerinin Plastisite İndisine Göre Değişimi.....	58
Şekil 6.7	Drenajsız Kayma Mukavemetinin Önkonsolidasyon Basıncına Göre	

Normalize Edilmiş Değerlerinin Plastisite İndisine Göre Değişimi.....	59
Şekil 6.8. Konsolidasyonlu Drenajsız Deneylere Göre Normalize Edilmiş Drenajsız Kayma Mukavemetinin Plastisite İndisine Göre Değişimi.....	60
Şekil 6.9. Konsolidasyonlu Drenajsız Deneyle Belirlenen Efektif İçsel Sürtünme Açısının Plastisite İndisine Göre Değişimi.....	61
Şekil 6.10a. Sıkışma İndisinin Likit Limit İle Değişimi.....	66
Şekil 6.10b. Sıkışma İndisinin Plastisite İndisi ile Değişimi.....	67
Şekil 6.11a. Sıkışma İndisinin Başlangıç Boşluk Oranı ile Değişimi.....	68
Şekil 6.11b. Derinlik ile Başlangıç Boşluk Oranlarının Değişimi.....	68
Şekil 6.12. Ödometre Deney Sonuçlarından Elde Edilen $C_a / C_c$ .....	69
Şekil 6.13. Tabii Su Muhtevası ve İkincil Konsolidasyon Katsayısı Arasındaki İlişki... .	70
Şekil 6.14. Hacimsal Sıkışma Katsayısının Konsolidasyon Basıncı ile Değişimi.....	71
Şekil 6.15. Konsolidasyon Katsayısının Konsolidasyon Basıncı ile Değişimi.....	72
Şekil E.1. Blok Numune (AR-10-BD1) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı- Konsolidasyon Basıncı ile Değişimi.....	82
Şekil E.2. Blok Numune (AR-6-BD1) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı- Konsolidasyon Basıncı Değişimi.....	83
Şekil E.3. Tüp Numune (AR-14-U5) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı- Konsolidasyon Basıncı Değişimi.....	84
Şekil E.4. Tüp Numune (AR-17-U2) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı- Konsolidasyon Basıncı Değişimi.....	85
Şekil E.5. Tüp Numune (AR-17-U4) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı- Konsolidasyon Basıncı Değişimi.....	86
Şekil E.6. Tüp Numune (AR-17-U6) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı- Konsolidasyon Basıncı Değişimi.....	87
Şekil E.7. Tüp Numune (AR-17-U6) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı- Konsolidasyon Basıncı Değişimi.....	88
Şekil E.8. Sulu Çamur Konsolidasyon Sırasında Örneklerin Sıkışmasının Zamanla Değişimi.....	89
Şekil E.9. (AR-10-BD1) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim	

Deformasyon ile Değişimi.....	90
Şekil E.10. (AR-6-BD1) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi.....	91
Şekil E.11. (AR-14-U5) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi.....	92
Şekil E.12. (AR-17-U2) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi.....	93
Şekil E.13. (AR-17-U4) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi.....	94
Şekil E.14. (AR-17-U6) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi.....	95
Şekil E.15. (AR-20-U3) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi.....	96

## TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1. Sıkışma İndisi ( $C_c$ )'nin Tipik Değerleri.....	26
Tablo 6.1. Endeks Özellikleri ve Zemin Sınıflandırması.....	46
Tablo 6.2. Üç Eksenli (CU) Deney Sonuçları.....	56
Tablo 6.3. Laboratuvar Veyn Deneyi Sonuçları.....	57
Tablo 6.4. Konsolidasyon Katsayısı ( $C_v$ ), İkincil Konsolidasyon Katsayısı ( $C_\alpha$ ) Hacimsal Sıkışma Katsayısı ( $m_v$ ) ve Sıkışma İndisi ( $c_c$ ) Değerleri.....	63
Tablo 6.5. Dipsel Çamurda Konsolidasyon Öncesi ve Sonrası Bazı Özellikler.....	62



## ÖZET

Haliç deniz tabanında güncel ve hızlı artan bir çökme mevcuttur. Haliç'te genel kirlenme sorununa hızla artan çökmenin yanında çevresel etkilerinde neden olduğu bilinmektedir. Bu çalışma Haliç sularındaki genel kirlenme sorununun kaynağı olan atıklarla karışmış dıpsel çökellerin geoteknik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

Sondajlardan elde edilmiş örselenmiş numuneler üzerinde rutin indeks özellikleri saptanırken, örselenmemiş numuneler üzerinde sıkışabilirlik ve kayma mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Haliç taban çamurunun geoteknik özelliklerini belirlemek için deniz dibinden alınan büyük hacimli temsili numuneler üzerinde arazide depolanacak taranmış zeminin davranışını incelemek için sulu çamur konsolidasyon deneyleri ve bu şekilde hazırlanan blok numuneler üzerinde sıkışabilirlik ve mukavemet deneyleri yapılmıştır. Sulu çamur konsolidasyon cihazında Haliç'ten alınan dıpsel çamur numuneleri konsolide edilerek, bu çökeltilerin gerilme-oturma-zaman ilişkileri belirlenmiştir. Deney sonuçları Haliç dıpsel çökeltilerinin, uygun drenaj koşullarında, uygun süreler içinde, oldukça kalın tabakalar halinde konsolide edilebileceğini göstermiştir.

Haliç'teki kirlenme sorununa büyük katkısı olduğu belirlenen atıkların dıpsel çökeltilerle birleşerek zamana bağlı olarak değişen geoteknik özelliklerinin tanımlanması iki yönden gerekli görülmektedir. Bunlardan birincisi Haliç dıpsel çökeltilerin taranmasında uygulanabilecek yöntemlerin seçilmesi, ikincisi ise taranan malzemenin uzaklaştırılma yolları ile uzaklaştırılan malzemenin ilerde beklenilecek davranışlarının belirlenmesi olmaktadır.

## **SUMMARY**

There exists a young and rapidly growing deposition on the sea bottom of the Golden Horn. It is well known that the deposition as well as the environmental effects cause the general pollution problem. This study was aimed at the determination of the geotechnical parameters of the sea bottom sediments mixed with wastes that are the main source of the pollution.

Routine index properties were found on the disturbed samples obtained from the borings and compressibility and shear strength tests were conducted on the undisturbed samples. Slurry consolidometer tests were conducted on bulk disturbed samples from the sea bottom investigate the behavior of the dredged material to be disposed on the on land and compressibility and strength test are utilized (on block samples prepared by this manner). The stress - settlement - time relationship was also obtained on these samples. Test results have indicated that the Golden Horn sea bottom sediments could be consolidated in thick layers provided the proper drainage conditions and the time exist.

The differing geotechnical properties over time were seen to be important for two reasons. Firstly, to choose the method of dredging and secondly to determine the disposal means and the behavior of the disposed material.

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

Haliç, İstanbul'un sahip olduğu doğal bir ulaşım yolu ve limanıdır. Genel kirlenme sorununa yol açan evsel ve fabrika atıkları Haliç deniz dibi çökelişinin hızlanmasına neden olmuş ve günümüzde Haliç'in büyük bir bölümü dıpsel birikim ile dolmuş bulunmaktadır. Haliç'in bugünkü durumuna belli başlı neden olarak yanlış kullanılması ve gelişmesi gösterilebilir. Endüstriyel tesisler kıyıları işgal etmiş ve bu tesislerin atıkları hiçbir arıtım tesisi olmadan doğrudan Haliç sularına verilmiştir; ayrıca, civardaki arazinin de gereğince kullanılmaması nedeni ile, sürekli bir erozyon sorunu söz konusudur. Bu yüzden Haliç'te mevcut olan dıpsel birikimin uzaklaştırılması sonucu hem deniz ulaşımı söz konusu olacak hem de çevrede yaşayan insanların sağlığını tehdit eden unsur ortadan kalkacaktır.

Haliç'teki kirlenme sorununa büyük katkısı olduğu belirlenen güncel dip çökellerinin geoteknik parametrelerinin belirlenmesi iki yönden gerekli görülmektedir. Bunlardan birincisi dip çökellerinin temizlenmesinde uygulanabilecek yöntemlerin seçilmesi, ikincisi ise temizlenen malzemenin uzaklaştırılma yolları ile uzaklaştırılan malzemenin ilerde beklenilebilecek davranışlarının belirlenmesi olmaktadır.

Dünyanın çeşitli yerlerindeki limanlarda ve haliçlerde uzun zaman zarfında oluşan dıpsel çökeltilerin temizlenmesi için kullanılan en uygun yöntem "tarama" olmaktadır. Suyun dibindeki büyük hacimli zeminin "kepçe", "emici veya kovalı" gemiler ile kazınıp su üstüne çıkartılarak bir noktaya taşınması "tarama" işlemini oluşturmaktadır. Tarama yönteminin seçiminde dıpsel zeminden alınan numuneler üzerinde deneyler yapılarak,

-Endeks özellikleri

-Sıkışabilirlik

-Kayma mukavemeti

gibi geoteknik özelliklerden bazı parametreler elde edilir. "Dane büyüklüğü ve plastisite" tarak ağız sistemine, "kayma mukavemeti" ise tarama sistemine eklenecek kesici unsurların seçimini etkilemektedir.

Zeminlerin geoteknik parametrelerinin belirlenmesi için bir çok laboratuvar deney yöntemi vardır. Geoteknik parametrelerin araştırılmasına araziden numune alma ile başlanır ve bu numuneler laboratuvara taşınarak laboratuvar deneyleri yapılır. Sondajlardan alınan tüp örnekler üzerinde standart ödometre aygıtında, taban çamuru örneklerinde ise özel olarak imal edilmiş bir sulu çamur konsolidasyon aygıtında konsolidasyon deneyleri yapılarak yük altında sıkışma özellikleri araştırılmak suretiyle sulu çamur konsolidasyon aygıtında konsolidasyon sonucu hazırlanan blok numuneler üzerinde, standart ödometre deneyleri yapılmaktadır. Bunun sonucu olarak taranan sulu çamurun karada depolanması durumunda kendi ağırlığı altında konsolide olduktan sonra yük altında sıkışabilirlik özellikleri araştırılır. Konsolidasyon deney sonuçlarından Haliç taban çamurunun sıkışabilirlik parametreleri olan hacimsal sıkışma katsayısı, sıkışma indisi ve konsolidasyon katsayıları belirlenir. Laboratuvarda mukavemet ve deformasyon özelliklerinin saptanması araziden örselenmemiş numune alınarak gerçekleştirilir. Sondajlardan alınan tüp örnekler ve taban çamuru örneklerinin sulu çamur konsolidasyon aygıtında konsolide edilmesi ile elde edilen blok örnekler üzerinde konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yanında laboratuvar veyn deneyleri yapılarak drenajsız ve drenajlı kayma mukavemeti parametreleri belirlenir.

Tarama sonucu alınan Haliç çamurunun ne yapılabileceğine dair getirilen öneriler şunlardır.

- Denize boşaltma (Boğaz, Marmara Denizi, Karadeniz) yüzeyden yada tabana gömme
- Karaya boşaltma (Kemerburgaz'da eski kömür ocağı çukurlarına depolama)
- Park ve rekreasyon alanları oluşturma
- Kıyı şeridi stabilizasyonu ve erozyondan koruma
- İnşaat malzemesi olarak kullanımı
- Dolgu malzemesi olarak kullanımı
- Çöp depolama sahalarının islahı.

## **2. Haliç'te Yapılmış Çalışmalar**

Ord. Prof. Dr. Ing Hamdi Peynircioğlu'nun 60'lı yıllardan başlayarak yayınladığı inceleme ve araştırma sonuçları, Haliç ve çevresinin sakladığı geoteknik sorunlara olduğu kadar jeolojik belirsizliklere de dikkat çekmiştir.

Haliç çevresinde inşa olunan çeşitli yapılar için yürütülen temel etüdü çalışmalarında, bölgedeki zemin tabakalarının geoteknik özellikleri, arazide ve laboratuarda yapılan deneyler ve yerinde yapılan incelemeler ile araştırılmıştır. Bu araştırmaların bir kısmı Peynircioğlu (1961, 1962, 1965, 1973, 1975), Kumbasar ve Ülker (1975), Ülker ve Kip (1976), Toğrol (1975) tarafından yayınlanmıştır.

Kumbasar ve Ülker (1976) Haliç çevresindeki zemin tabakaları için şu ortalama geoteknik özellikleri önermişlerdir.

Oluşumlu	Karasal Oluşumlu	Deniz
Likit Limit	Kahverengi Kil	Gri Kil
Plastik Limit	%47-%55	%60-%82
Plastisite İndisi	%23-%32	%26-%82
Tabii Su Muhtevası	%24	%39
Serbest Basınç Mukavemeti	%31-%36	%45-%71
Drenajsız Kayma Mukavemeti kg/cm <sup>2</sup>	0.60-1.20 kg/cm <sup>2</sup>	0.20-0.90
Konsolidasyon Katsayısı	$4 \times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sn	$7 \times 10^{-5}$ cm <sup>2</sup> /sn
Sıkışma Modülü	35 kg/cm <sup>2</sup>	15 kg/cm <sup>2</sup>
Permeabilite Katsayısı	$2 \times 10^{-8}$ cm/sn	$4 \times 10^{-9}$ cm/s

Ayrıca deneyler sırasında konsolidasyon sonucu kayma mukavemetinde büyük ölçüde artmalar meydana geldiği belirtilmiştir.

Peynircioğlu (1962) Eyüp, Hasköy, Sütluce gibi Haliç'in yukarı kısımlarında kalınlığı 50.0-60.0 m. ye varan koyu gri renkli, organik madde muhtevası yüksek siltli kil tabakalarının likit limitlerinin %38-%96 arasında değiştiği (ortalama %67), plastik limitlerinin %31 civarında bulunduğunu ve likit limiti %50'den fazla olan numuler için ortalama drenajsız kayma mukavemeti olarak  $c = 0.10$  kg/cm<sup>2</sup>

belirlendiğini bildirmiştir. İncelenen numunelerin ödometre deneyleri sonucu bulunan sıkışma indisi  $0.37 \approx 0.78$  arasında kalmakta ve bu değerler likit limit değerlerinden elde olunan amirik değerle de uyum göstermektedir. Haliç Köprüsü sondajlarından alınan numunelerin sıkışma indisinin ise 0.58 ile 1.56 arasında değiştiği yine Toğrol (1975) tarafından bildirilmiştir.

İstanbul Ticaret Sanayi inşaatında (Peynircioğlu, 1973) arsa ve civarının denize doğru hareketini önlemek için Haliç tabanındaki dipsel çamur üzerine ince tabakalar halinde granüler malzeme serilmiş ve böylece çamur tabakasının konsolidasyonu çabuklaştırılarak kayma mukavemetinin artırılması başarı ile sağlanmıştır. Bu deniz altı dolması işlemine başlanılmadan önce sulu dipsel çamurdan alınan numuneler laboratuvarda üzerlerine kum serpilme suretiyle çok düşük basınç seviyelerinden başlanarak ve kademe kademe yüklenerek, konsolide edilmiştir. Bu deneylerde numunelerin sıkışma indisi olarak  $0.01$  ile  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  arasında  $1.5$ ,  $0.1$  ile  $10.0 \text{ kg/cm}^2$  basınç kademeleri arasında  $0.8$  değerleri bulunmuştur. (Peynircioğlu, 1973) Bu konsolidasyon sonucu numunelerin kayma mukavemetinde, su muhtevalarının azalmasına bağlı olarak, önemli ölçüde artmalar meydana geldiği saptanmıştır (Özaydın, 1978).

Özaydın ve Orhon'(1978) un yaptığı bir çalışmada Haliç tabanında yer alan çökeltilerin taranarak uzaklaştırılması yoluna başvurulması halinde, taranan çamurun karada havuzlanarak kurutulması ve böylece dolgu alanları elde olunmasının uygulanabilirliği araştırılmış ve bu seçenek olumlu bir çözüm yolu olarak görülmüştür

İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin Haliç Islah Projesi kapsamında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı tarafından yapılan çalışmada örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri ve deniz tabanından alınan sulu çamur örnekleri üzerinde bir seri laboratuvar deneyi yapılmıştır (Özaydın vd, 1995). Bu çalışmanın amacı Haliç çamurunun taranması ile ortaya çıkacak yeni geometride olası stabilite sorunlarının önceden görülmesi ve geometrinin buna göre saptanması, tarama, uzaklaştırma ve depolama işlerinde kullanılacak yöntemlerin belirlenmesinde birer etken olması beklenen geoteknik parametrelerin saptanması ve depolanmaları halinde, depolandıkları yerlerde stabilite, çökme ve kullanıma hazır hale gelme ile ilgili sorunların çözülmesi için gerekli parametrelerin belirlenmesi amacıyla yöneliktir.

Süspansiyon çamur numuneleri arasından Haliç'teki farklı bölgeleri temsil ettiği düşünilen belirli sayıda örnek üzerinde sulu çamur konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonunda hazırlanmış konsolide blok zemin numuneleri üzerinde ise kayma mukavemeti ve konsolidasyon deneyleri yapılarak taranmış çamurun karada depolanması durumunda konsolide olduktan sonra arazide beklenilebilecek davranışları ile ilgili geoteknik parametreler belirlenmiştir.



## BÖLÜM 2.

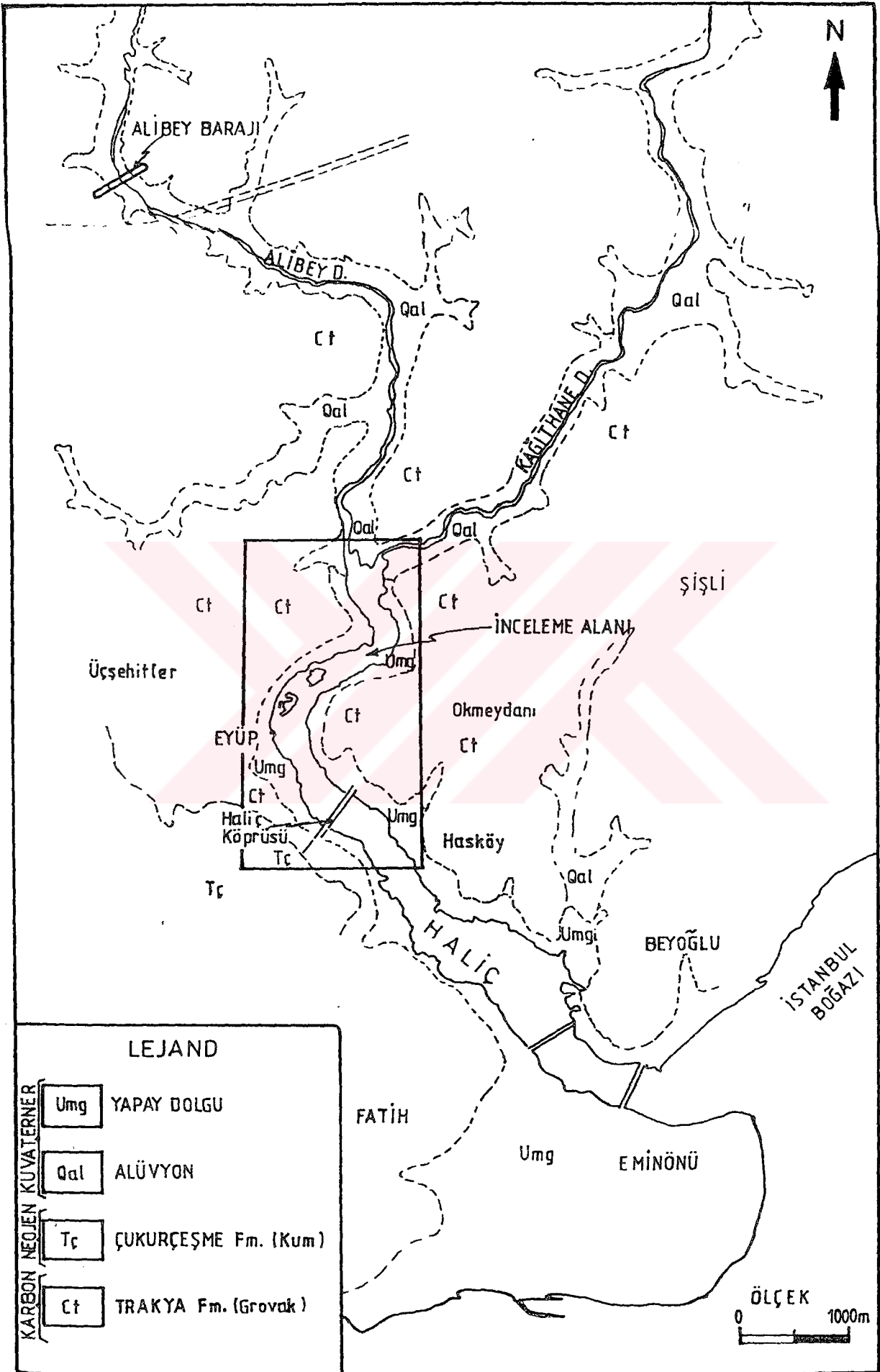
### 2.HALİÇ VE ÇEVRESİNİN MEVCUT DURUMU

Haliç ve çevresinin halihazır durumda, jeolojik ve geoteknik koşulları, bölgenin jeolojik oluşumu ve dipsel çökellerin birikim modeli ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

#### 2.1. Haliç ve Çevresinin Topoğrafik Özellikleri

İstanbul Boğazı'na birleşen Haliç, güney yönde alçalan bir topoğrafyada bulunmaktadır. Bu alçalan topoğrafyaya bağlı olarak Haliç'e güney yönde akan Alibey ve Kağıthane dereleri birleşmektedir. Birleşim noktasından itibaren başlayan ve ortalama 250 m. genişlikteki Haliç denizel ortamı önce güneybatıya, Eyüp civarında güneye ve Eyüp İskelesi Haliç Köprüsü güzergahı boyunca da güneydoğu istikametine gittikçe genişleyerek devam eder. Haliç'in her iki yakasında kıyı çizgisinden itibaren deniz seviyesinden birkaç metre yükseklikte ve yaklaşık 150'şer metreye varan düz bir sahil şeridi yer almaktadır. Alüvyon yada dolgu toprak nedeniyle oluşan bu topoğrafyada (Şekil 2.1) sahil şeridinin bitiminden itibaren her iki yakada kaya ortamının yer alması nedeniyle aniden dikleşen bir morfolojik yapı gözlenmektedir. Bu yapıya bağlı olarak yükseklikleri 50 ile 140 m. arasında değişen tepe ve uzantılar her iki yamaçta yer almaktadır.

Haliç Deniz dibi topoğrafyası 1985 yılında yapılan batimetrik haritaya göre Alibey-Kağıthane derelerinin Haliç'e döküldüğü yerden itibaren güneye doğru gidildikçe yaklaşık Eyüp-Sütlüce vapur iskelelerinin yer aldığı kesimlere kadar su derinliğinin genellikle 1 metreden az, yada çok dar alanlarda yer yer maksimum 2 metreye ulaştığı, dolayısıyla deniz dibi topoğrafyasının yataya yakın konumda olduğu görülmektedir. Alibey-Kağıthane derelerinden başlayıp Haliç Köprüsü ve daha güneyindeki Balat Vapur İskelesi-Taşkızak Tersanesi'ne kadar deniz dibi topoğrafyası (Şekil 2.2) yine çok düşük bir eğimle artmakta, su derinliği Tersane civarında 5 metreye ulaşmaktadır. Balat Vapur İskelesi-Taşkızak Tersanesi'den itibaren ise deniz dibi



Şekil 2.1. İnceleme Alanının Mevki - Jeoloji Haritası



topoğrafyasının hızla değişerek derinleştiği ve buna bağlı olarak su derinliğinin de arttığı görülmektedir.

## 2.2. Haliç ve Çevresinin Jeolojisi

Haliç ve civarında temelde grovak kayaları yer almaktadır. Haliç çevresindeki tepe ve yükseklerde grimsi kahverengi rengeyle karakteristik grovak kayaları (Trakya Formasyonu-Karbonifer) yüzeyleyir. Kumtaşı-sittaşı ve kiltaşından oluşan bu kaya ortamı yer yer bol çatlaklı ayrışık zonları da (Şekil 2.1) içermektedir. Grovak kayaları üzerinde ise direkt olarak güncel çökeller yer almaktadır. Grovak kayaları üzerindeki bu güncel çökeller alüvyon ile yer yer görülen dolgu topraktan oluşmaktadır. Alibey ve Kağıthane derelerinin Haliç'e döküldüğü yerden itibaren bu derelerin taşıdığı ve Haliç dibini oluşturan genç çökeller yer alır. Haliç Köprüsü civarında yer yer 50-60 metreye kadar ulaşan ve grovak üzerinde yer alan bu gevşek çökeller genellikle gri renkli, üst seviyeleri ise son derece yumuşak (likit kıvamda) killerden oluşmaktadır. Bu kiler uzun bir dönemde evsel, endüstriyel ve hayvansal atıklardan dolayı organik nitelik taşımaktadır. Killer yer yer silt ve kum- çakıl merccklerini de içermektedir. Çakıllı düzeyler, daha çok bu genç çökellerin taban seviyelerinde yani ana kayayı oluşturan grovak kayasına yakın, ya da onunla kontakt zonunda daha sık yer almaktadır. Düz topoğrafyayı oluşturan Haliç sahil şeridi ise tüm bu genç çökellerin üzerinde yer alan dolgu topraktan oluşmaktadır.

## 2.3. Haliç ve İstanbul Boğazı'nın Oluşumu

Haliç ve İstanbul Boğazı'nın güneyinde bugüne değin yapılan çok sayıda kara ve deniz sondaj verilerinin detaylı incelenmesi sonucu, Haliç ve Boğaz'ın oluşumları hakkında oldukça açıklayıcı bilgiler elde edilmiştir.

Haliç ve Boğaz'da sahil şeridinde ya da denizde yapılan sondajlardan elde edilen verilere göre, yörenin temelini oluşturan Paleozoyik yaşlı temel kayasını oluşturan grovaklar üzerinde saptanan ilk ortak birim kırıntılı ve çamurlu bir çökel düzeyidir. Kalınlığı birkaç cm'den başlayıp birkaç metreye kadar artan bu kırıntılı

düzy, karasal nitelikte olup bir akarsu ortamında çökeltmiştir. Bu veri, Boğaz'ın ve Haliç'in bugünkü denizel ortamına ulaşmadan önce karasal ortamda dü şük eğimli bir vadide yer alan bir akarsu yatağı olduğunu göstermektedir. Akarsu çökellerinin niteliğine bakılarak, bu ortam Haliç ve Boğaz oluşmadan önce oldukça yayvan bir morfolojik yapıyı yansıtmaktadır. Sondaj verilerine göre bunu izleyen ve daha üstte çökelen istif, karasaldan denizel ortama geçiş birimlerini içermektedir. Denizel bol kavkı içermektedir. Bu düzeylerden elde edilen Mollusca kavkılarında Electron Spin Rezonans (ESR) yöntemi kullanılarak elde edilen yaş değerlerinden, Haliç ve Boğaz'ın günümüzden yaklaşık 7400 yıl önce oluşmaya başladığı (Meriç, 1990) ve denizel etkinin 5700 yıl önce yöreye tamamen egemen olduğu belirlenmiştir. Bu duruma göre Boğaz'ın açılmasından önce Boğaz ve Haliç'in karasal engebesiz bir ortamda yayvan tepeler arasında yer alan bir akarsu vadisi niteliğinde olduğu, bir sonraki evrede ise Boğaz'ın açılmasıyla denizel ortama dönüştüğü fosil türlerinden anlaşılmaktadır. Boğaz'ın ve Haliç'in oluşumunda bölgenin yükselmesiyle akarsularla aşındırılan ortama daha sonraki evrede denizin istilası yanında, farklı kotlara neden olan eski kırık hatları hatları boyunca gelişen genç tektonik hareketler bugünkü morfolojinin oluşmasında en büyük etken olmuştur. Sonuçta, tektonik hareketler kısa bir dönemi kapsayan evrede önemli morfolojik değişimlere neden olmuştur. Kırık hatları Haliç'i sınırlayan her iki yakada birbirlerine paralel kuzeybatı-güneydoğu doğrultuda uzanmaktadır. Bunlara yaklaşık dik gelişen kuzeydoğu-güneybatı doğrultulu faylar ise İstanbul Boğazı'nını bugünkü konumuna ulaşmasına neden olmuşlardır. Kırık hatları genç çökelleri de kesip bunların ani kot değişimine neden olduğu gibi, temel kayalarını oluşturan grovaplarda ezik zonlar oluşturmuşlardır.

Haliç ve İstanbul Boğazı'nın oluşumunda etken olan ve sahil çizgileri boyunca paralel uzanan genç kırık hatları üç önemli topoğrafik düzensizliğe sebep olmuştur. Bunlardan ilki, Haliç Köprüsü güneyinde kuzeydoğu-güneybatı doğrultuda Taşkızak tersanesi-Balat Vapur İskelesi hattı boyunca oluşmuş ani deniz dibi kot değişimi (Şekil2.1), diğerleri ise Karaköy ve Sarayburnu açıklarında yer alıp, aynı doğrultuda uzanan basamak fayların deniz dibi morfolojisinde neden olduğu ani kot değişimleridir. Bu faylar sonuçta Haliç'i asıl bir vadi durumuna getirmiş ve Haliç'te yer alan genç

çökellerin, İstanbul Boğazı güneyinde daha derin kotlarda yer almasına neden olmuştur (Yıldırım, Özaydın, Erguvanlı; 1991,1992).

#### 2.4. Haliç Dipsel Çökellerinin Birikim Modeli

Haliç ve İstanbul Boğazı'nda oluşan Holosen dönemi genç çökelleri, genç tektonik hareketlerin kontrolünde gelişmişlerdir. Benzer litolojilerden oluşan bu çökeller birbirleriyle yanal ve düşey yönde girişimli durumdadır. Ancak alttan üste doğru sakin ortamı temsil eden Haliç dip çökellerinde killi seviyeler egemen iken, Boğaz'da bilhassa üst seviyelere doğru yüksek enerjili ortamı belirten kumlu seviyeler yer almaktadır.

Yer yer kalınlığı 50 metreyi aşan ve egemen litolojisi oluşan Haliç çökellerinin grovaktar ile dokanak zonlarındaki taban kesimlerinde, kalınlığı 2-8.5 m. arasında değişen çakıllı-kumlu düzeylerden oluşumu, fayların da etken olduğu yükselime bağlı olarak yörede hızlı bir aşındırma sonucu erozyon nedeniyle karadan taşınmış iri gerecin çökmesini sağlamıştır. Bölgesel tektonizma sonucu hızlı bir tortullaşma yaşayan ve zamanla dinginleşen Haliç ortamının çakıllı seviyeleri üzerinde, kalınlığı 20-40 m. arasında değişen denizel nitelikli kil tabakaları çökmüştür. Haliç kili olarak adlanan bu kil, koyu gri renkli, yer yer kavkı parçaları ve bitki artıkları içeren, yumuşak-orta katı kıvamda bir siltli kil tabakasıdır. Kil tabakasının üstünde ise deniz tabanını oluşturan yaklaşık 5-7 m. kalınlıkta siyah renkli, organik muhtevası yüksek, çok yumuşak kıvamda bir güncel çamur tabakası yer almaktadır. Bu çamurların içinde ayrıca taşınmış olarak jips kristalleri, akarsu ortamıyla taşınmış bitki parçaları, kömür kırıntıları saptanmıştır. Genellikle iri taneli malzeme içermeyen bu üst-çamur kesiminin, tamamen korunmuş bir ortamda, muhtemelen askıntıdan çökeldiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak; bugüne kadar açılan sondajlardan elde edilen verilerden, Haliç genç çökellerinin fosilli alt seviyelerinin Akdeniz kökenli fosil kırıntılarıyla başladığı, tuz oranı yüksek Akdeniz sularının daha önce açıksu ortamsal özelliği taşıyan Haliç ağzını günümüzden yaklaşık 7400 yıl önce ilk defa etlilemeye başlayarak Haliç içlerine zamanla yavaş yavaş ilerlediği ve denizel bir ortam oluşturduğu anlaşılmaktadır.

## 2.5. Haliç Deniz Dibi Atıkları

Deniz tabanından itibaren Haliç çökellerinin kalınlığı 7-24 m. arasında değişen üst kesimleri kömür kırıntıları, curuf, endüstriyel ve kentsel atıklardan dolayı yoğun bir kirlenmeye maruz kalmıştır. Bu yoğun kirlenmeye en büyük etkenin, 1911 yılında inşa edilen ve kömürle çalışan Silahtarağa Elektrik Santrali'nin, 1983 yılına kadar faaliyetini sürdürmesi olduğu söylenebilir. Santral atıklarının 72 yıl boyunca Haliç'e dökülmesi sonucu normal tortullaşmanın dışında bölgede aşırı derecede birikimler olmuştur. Ayrıca 1923 yılında kurulan Sütlüce Mezbahası, tarihi çok eskiye dayanan tersaneler, Osmanlı dönemine ait çeşitli sanayi kuruluşları ve Cumhuriyet'in ilanından sonra İstanbul'daki sanayinin tümü ile Haliç yöresinde gelişmesi ve buna bağlı olarak çevrede nüfus yoğunluğunun artması, denizel ortamdaki bu kirlenmenin ve aşırı tortullaşmanın başlıca nedenleridir. Haliç çevresi ve ona dökülen derelerin vadilerinde bitki örtüsünün zamanla yok olması erozyonun hızlanmasına yol açmış, ayrıca artan nüfustan kaynaklanan evsel atıklar uzun yıllarherhangi bir arıtma olmaksızın Haliç'e deşarj edilmiştir.

Sonuç olarak, Haliç'in önemli bir kesimi (Alibey-Kağıthane ile Haliç Köprüsü arası) hemen hemen tamamen dolmuş duruma gelmiştir. Üst kesimleri evsel ve endüstriyel atıklarla kirlilik yoğunluğuna ulaşmış Haliç taban çamuru deniz ulaşımına engel olduğu gibi, deniz tabanı kotu Alibey ve Kağıthane dereleri ağız kotunun üstüne çıktığı için bu derelerin akmasını olanaksız hale getirmiş, ayrıca oksijen yetersizliğinden dolayı etrafa yoğun kokular yayan büyük bir çevresel sorun haline gelmiştir.

## BÖLÜM 3

### 3. HALIÇ VE ÇEVRESİNİN ZEMİN PROFİLİ

Haliç ve çevresinin zemin profili genel olarak, zemin yüzünden itibaren aşağıya doğru 3 ayrı istiften oluşmuştur. En üstte yer alan dolgu toprak, dolgu toprağın altında güncel haliç çökelleri ve en altta ise yörenin temelini oluşturan grovak kayalarıdır.

Haliç sahillerine yakın kesimlerde rastlanılan dolgu toprak; çakıl, kum, tuğla, silt ve kil karışımından oluşmaktadır. Bu dolgu toprağın Haliç'in başladığı Alibey ve Kağıthane dereleri civarında 1-2 m. gibi (Şekil 3.2) az bir kalınlıkta olup alüvyon üzerinde yer almakta, güneye Haliç Köprüsü'ne gittikçe kalınlığı artmakta ve yaklaşık 10 metreye ulaşmakta, daha güneye doğru bu kalınlık 40 metreye (Perşembepazarı-Unkapanı civarı) ulaşabilmektedir (Şekil 3.1).

Sahillerde dolgu toprağın altında, Haliç'te deniz tabanından itibaren yer alan güncel haliç çökellerinin kalınlığı mevcut sondaj sonuçlarına göre Haliç'in başladığı kuzey kesimlerde muhtemelen 15 m. civarında olup, güneye doğru gidildikçe bu çökel dizisinin kalınlığı daha da artmaktadır. Haliç Köprüsü'nde ve kuzeyinde daha önce yapılmış sondajlara göre, deniz ortasında yaklaşık 60-70 m. kalınlığa ulaşan Haliç çökellerinin deniz tabanından itibaren ilk 5-7 m. kalınlığındaki çok yumuşak kıvamda olup, deniz bataklığı diye tanımlanabilecek taban çamurunun üst 2-3 metresi hemen likit haldedir. Kil tabakasının kalınlığı sahillere doğru azalmaktadır.

Kil tabakasının altında ise yörenin temelini oluşturan grovak kayası yer almaktadır. Grovak kayasının başladığı kesimden itibaren ilk 0.30-3 m. arasındaki zon, grovağın yer yer görülen ayrılmış kesimlerini oluşturmaktadır. Grovak daha alta doğru ise gittikçe dayanımlı kesimlerden oluşmaktadır. Grovak ile üstünde yer alan killer (Haliç çökelleri ) arasındaki dokanağın ortalama 20° ile 45° arasında değişmekte olduğu Haliç Köprüsü'nün doğu yakasında yaklaşık kıyı çizgisi hattı boyunca uzanan fayın düşey atımı nedeniyle bu eğimin arttığı görülmektedir (Şekil 3.1, Kesit 7-7').

Aşağıdaki paragraflarda, bugüne kadar bölgede açılmış sondaj bulgularının değerlendirilmesi sonucu elde olunan zemin kesitleri, Yeni Galata Köprüsü-Haliç Köprüsü arası kesim için genel hatları ile, inceleme alanını oluşturan Valide Sultan

Köprüsü-Alibey/Kağıthane Dereleri arası bölge için ise daha ayrıntılı olarak kısım kısım sunulmaktadır.

### 3.1 Yeni Galata Köprüsü-Haliç Köprüsü (Feshane-Mezbaha) Arası

Yeni Galata Köprüsü'nden başlayıp, Atatürk Köprüsü'ne kadar devam eden kesimde Haliç deniz derinliği 40 m. civarında olup, fazla değişkenlik göstermeden devam ettiği batimetrik haritadan anlaşılmaktadır (Şekil 2.2 ). Bu güzergah boyunca Haliç deniz dibi yapısı "U" şeklinde yayvan bir vadide yer alıp, sahil kesimlerinde ise aniden dikleşen bir morfolojik yapı göstermektedir.

Gerek Karaköy-Perşembepazarı, gerekse Eminönü-Unkapanı boyunca sahilde ve denizde yapılan sondajlara göre, sahil kesiminde görülen ve denize doğru kısmen uzanan kalın bir dolgu tabakası yer almaktadır. Haliç'in her iki yakasında sahil şeridinde çok yaygınca görülen bu dolgu tabakasının kalınlığı, kıyıda 40 metreye ulaşmaktadır. Dolgu tabakasının altında deniz tabanını oluşturan en üst katman ise Haliç çökellerinin 5-7 m. kalınlıklar arasında değişen organik çamur, daha alt seviyelerde kalınlığı yaklaşık 40 metreye varan Haliç kili olarak adlanan birime geçer. Daha altta ise Haliç çökellerinin tabanını oluşturan ve tabanda 1-10 m. kalınlıklar arasında değişen killi kumlu çakıllı düzeyler yer alır. Bu düzeylerle son bulan Haliç çökellerinin altında grovak kayaları yer alır. Haliç ortasında deniz seviyesinden itibaren yaklaşık 80 m. derinlikte yer alan grovaklar, sahilin her iki yakasına paralel uzanan düşey atımlı faylar nedeniyle yer yer yüzeye çok yakın kotlara çıkmaktadır (Şekil 3.1).

Şekil 3.1'de yer alan kesitlerden görüldüğü üzere Haliç'in her iki yakasında sahil kesiminde en üstte ve yer yer kalınlığı 35 metreye varan yapay dolgu yer almaktadır. Bu dolgu zemini deniz içine uzanmamaktadır. Deniz derinliğinin ortalama 35-40 metreye ulaştığı her iki köprü (Yeni Galata-Atatürk) arasında deniz tabanında Haliç çökellerinin en üst seviyesini oluşturan siyah renkli, pis kokulu, çok yumuşak, organik muhtevası yüksek, güncel çamur tabakası yer almaktadır. 5-7 m. kalınlığındaki bu çamur tabakası altta gri renkli, yumuşak, kavkılı ve 30 m. kalınlıktaki siltli kile geçmektedir. Siltli killerin altında ise genç Haliç çökellerinin genellikle tabanını oluşturan ve 2-8 m. arasında değişen çakıllı siltli kil, killi çakıl yada çakıl

tabakalarıyla son bulmaktadır. Çakıllı düzeyler Haliç tabanını oluşturan bu düzeylerin bilhassa kırmızımsı kahverengi ve birkaç metre kalınlığa ulaşan çakıllı düzeyleri karasal niteliklidir. Bu çökellerin altında görülen ve ana kayayı oluşturan grovaklar, faylar nedeniyle sahil kesimlerinde yüzeye yakın kotlarda yer almaktadır (Şekil 3.1, Kesit 8-8' ve 9-9').

### **3.2. Valide Sultan Köprüsü-Alibey / Kağıthane Dereleri Arası Zemin Enine Kesitleri**

İnceleme alanını oluşturan Haliç Köprüsü güney yakınında yer alan Valide Sultan Köprüsü (eski Galata Köprüsü) ile Haliç'in bitim noktasını oluşturan Alibey ve Kağıthane derelerinin Haliç'e kavuştuğu kesim arasında da genç Haliç çökelleri kesintisiz devam etmektedir. İnceleme alanını oluşturması açısından daha detaylı incelenen bu kesimde ve sahil şeridinde yapılan sondajlardan yararlanılarak elde olunan kesitler ayrı ayrı tanıtılacaktır.

#### **3.2.1. Haliç Köprüsü Enine Kesiti**

Haliç Köprüsü için Halıcıoğlu ve Ayvansaray arasında yapılan deniz sondajlarına göre, bu bölgede birkaç metrelik deniz derinliğinden itibaren 5-7 m. kalınlığa varabilen ve deniz bataklığı diye tanımlanan bir tabaka bulunmaktadır. Bu dıpsel çamurun üst iki metresinin hemen likit halde olduğu saptanmıştır. Kıyı kesimlerinde ise yaklaşık 5 m. derinliğe kadar bir dolgu tabakası mevcuttur. Bu deniz bataklığı ve dolgu tabakasının altında gri, mavi renkli bir kil tabakasına rastlanılmıştır. Kil tabakasının kalınlığı sahile doğru azalmakta ortaya doğru ise 60 metreyi bulmaktadır. Kil tabakasının altında kalınlığı 0.30-3.00 m. arasında değişen ve çakıl, kum ve kil içeren bir ayrılmış grovak tabakası bulunmaktadır. Ayrılmış grovak tabakasının altında ise grovak veya çatlaklı grovak tabakası yer almaktadır. Ancak Haliç'in altında taban kayasını oluşturan grovak tabakasının en kesit boyunca devamlı olmadığı, kil tabakasının yakın olduğu yerde yaklaşık 110 m. genişlikteki bir kısımda 90 m. derinliğe kadar inen sondajlarda grovak tabakasına erişilemediği görülmüştür. Bu

kesimden alınan numunelerin petrografik analizi ve sondaj sonuçları bir fayın var olduğunu göstermiştir (Şekil 3.1).

### 3.2.2. Feshane-Mezbaha Arası Enine Kesiti

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi zemin, yüzeyden itibaren sahil şeridinde kalınlığı 1-4 m. arasında değişen bir dolgu toprak tabakasıyla başlamaktadır. Sahil kesiminde görülen bu dolgu toprağın altında, kalınlığı 11.5 metreye varan çakıllı, orta katı siltli kil-kili silt (CH-OH-MH) yer alır. Haliç’in orta kesimlerine rastlayan (SK2,SK5 ve SK3 sondajlar) kesiminde ise yaklaşık derinliği 2.5 metreye varan denizin tabanından itibaren görülen killi silt düzeyleri altında 20-30 m. kalınlıklar arasında değişen koyu gri-siyah renkli, denizel kavkılı, yer yer çakıllı, çok yumuşak organik siltli kil (MH-OH), daha alta kum mercceklerini içeren 20-40 m. kalınlıkta koyu gri, yeşil renkli orta katı-katı siltli kil-killi silt (CH-MH) düzeyleriyle son bulan Haliç çökelleri altında temel kayasını oluşturan gri renkli grovoklar yer alır. Grovokların ilk birkaç metresi ayrışmış olup, daha alta sağlam, kaya niteliği tanınabilen bol çatlaklı grovoklar ile devam eder.

Bu kesitten anlaşıldığı üzere en üstte sahilde görülen dolgu toprak azalmakta, dolgu toprağın altında yer alan Haliç çökelleri maksimum 68 m. kalınlığa ulaşmakta ve bu derinlikten itibaren grovoklar kesilmektedir.

### 3.2.3. Eyüp (Feshane-Mezbaha)-Alibey Deresi Arası Enine Kesitleri

Haliç’i enine ya da verevine olmak üzere kesen doğrultularda alınmış 5 adet kesit, Haliç’in her iki yakasında karada yapılmış sondajlardan yararlanarak çizilmiştir(Şekil 3.2).

Şekil 3.2’deki şekillerde de görüldüğü gibi, 5-5’ enine kesitinden başlayarak kuzeye 1-1’ kesitine kadar mevcut sondajlara göre önemli özellikler tespit edilmiştir. Haliç Köprüsü civarında 5-6 m. kalınlığındaki dolgu toprak 1-1’ kesitine doğru gittikçe azalarak kalınlığı bir iki metreye kadar düşmektedir. Temel kayasını oluşturan grovoklara kuzeye doğru gittikçe daha üst kotlarda ulaşmakta ve buna bağlı olarak genç Haliç çökelleri kalınlığı giderek azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.2’de, dere

ağzlarıyla Haliç'in birleştiği 1-1' kesitinde de görüldüğü gibi, karasal nitelikli kahverengi, killi, kumlu, çakıllı düzeylerin denizel nitelikli eşdeğerleriyle yanal ve düşey yönde girik olduğu anlaşılmaktadır.

### **3.3. Haliç Köprüsü-Alibey/Kağıthane Dereleri Arası Sahil Boyuna Kesitleri**

Haliç'i tamamen çevreleyecek şekilde ve atık suları toplama gayesiyle İstanbul Kanalizasyon Projesi kapsamında inşa edilen ana kollektörlerin güzergahları boyunca zemini tanımak gayesiyle yapılan sondajların korelasyonu ile elde olunan sahil zemin kesitleri aşağıda sunulmuştur.

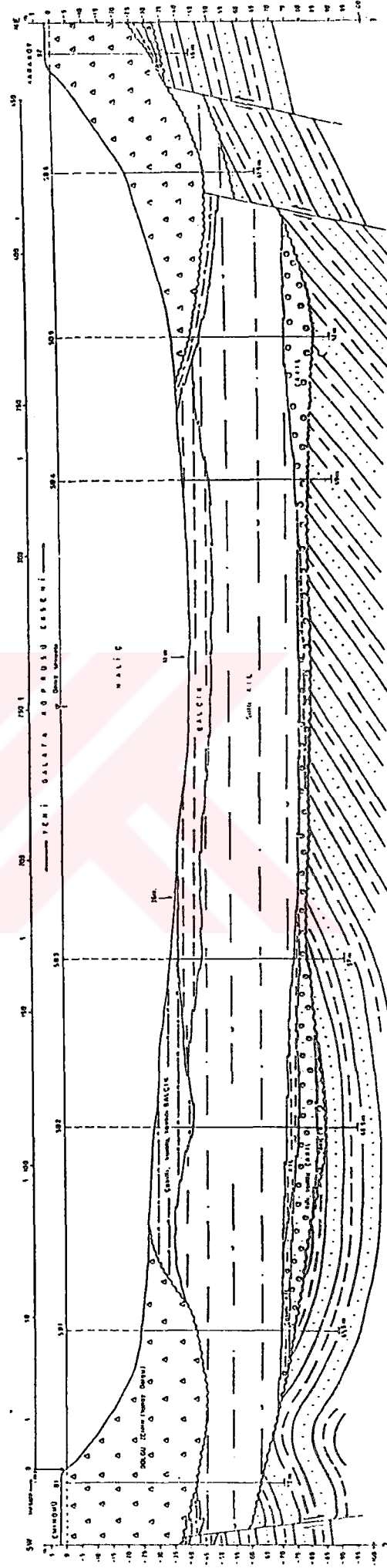
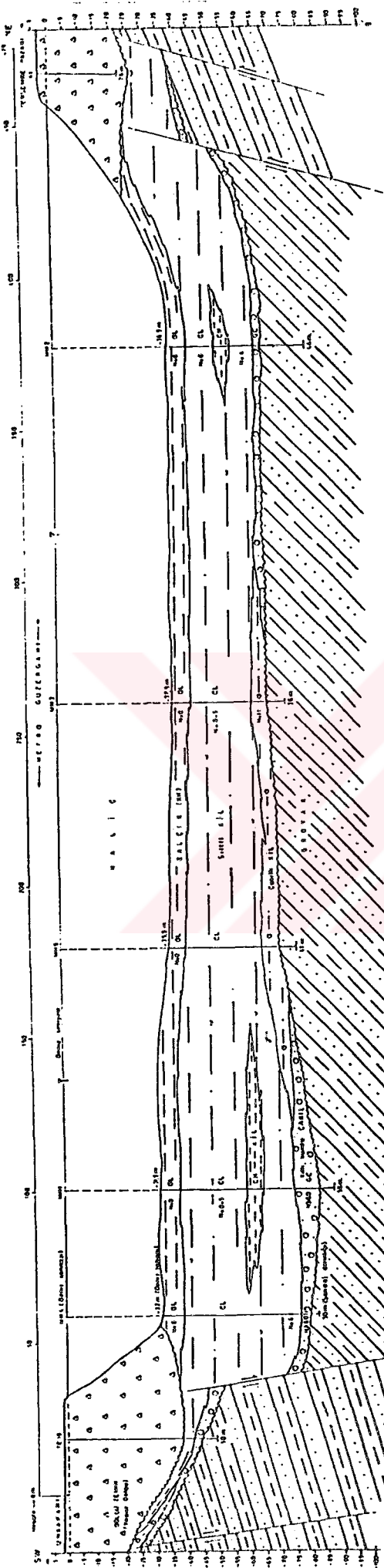
#### **3.3.1. Kuzey (Doğu) Sahilleri Zemin Kesitleri**

Haliç Köprüsü ayağına yakın kesimden başlayıp kuzeyindeki Sütluçe Mezbahası'ndan geçerek Kağıthane Deresine kadar kıyıda 50-100 m. içeriden yola paralel uzanan kollektör hattı boyunca yapılan sondajların (S1,S2, S3, S4, S5,S6, S7, S8,S9, S10, S11, S12, H4, H5, H6) korele edilmesi sonucu yüzeyde 8-10 m. kalınlığa kadar varan dolgu toprak Sütluçe Mezbahası'ndan itibaren kuzeye doğru incelmekte ve H6 sondajında birkaç metreye düşmektedir (Erguvanlı, K., Yüzer, E., 1983). Dolgu toprağın altında denizel nitelikli kavkılı düzeylerin bulunması, Haliç çökellerinin iç kesimlere kadar uzandığını göstermektedir. Dolgu toprağın altında görülen gri renkli, çakıllı-killi-kavkılı, genellikle gevşek kum Haliç ayağından Sütluçe Mezbahası'na kadar (H4) uzanan düzey olup, daha kuzeyde gri-kahverengi siltli kumlu kil yada yüksek plastisiteli kil düzeyleriyle yanal girişimlidir. Daha alt seviyelerde yer alan yer yer 20-25 m. kalınlığa varan koyu gri, siyah renkli denizel kavkılı yumuşak kil tabakası ise, Sütluçe Mezbahası kuzeyinden itibaren giderek incelmekte, Kağıthane Deresi'ne doğru kumlu kil, silt, siltli kil, kum gibi düzeylerle girik olup, yer yer 15 m. derinlikte (S9) grovak kayasına girildiği görülmektedir (Şekil 3.3).

#### **3.3.2. Güney (Batı) Sahilleri Zemin Kesitleri**







Şekil 3.3. Unkapanı Perşembe Pazarı-Yeni Galata Köprüsü Eksenli Boyunca Zemin Enine Kesitleri

Haliç Köprüsü-Defterdar ayağı kesiminden başlayarak Defterdar Caddesi boyunca kuzeye doğru yapılmış S2,S3,H15,H16,H17 sondajları sonuçlarına göre yüzeyden itibaren 8 m. kalınlığa varan bir dolgu toprak, kıyı çizgisinde gevşek karakterde (S4 sondajı) iken, sahilden uzaklaştıkça daha sıkı hale (S1-S2 sondajları) gelmektedir. S1 sondajında 5 m. kalınlığındaki dolgu toprağın altında grovak kayasına girilip S2 sondajında yaklaşık 5-6 m. kalınlığında organik kilden (Haliç çökelleri) sonra grovak kayasının kesilmesi, Haliç çökellerinin kıyı çizgisinden başlayıp karadaki uzantısının yaklaşık Defterdar Caddesi ile sınırlandığını göstermektedir. Buna göre sahil çizgisinden karaya doğru ortalama 150 metrelik bir şeritte dolgu toprağın altında Haliç çökellerinin varlığı anlaşılmaktadır. Yüzeyden itibaren 10 m. derinliğe kadar yapılan H15,H16,H17 sondajlarında 7-8 metrelik killi, kumlu, çakıllı ve bloklu dolgu zeminin altında ise sondaj bitimi olan 3 metrelik zonda grimsi yeşil kavkılı, kumlu, siltli, kil ile devam etmektedir. Daha kuzeyde Eyüp sahil şeridinde yer alan SK1, SK3, SK4, SK5 ve Eyüp sahil şeridinde yer alan SK1, SK3, SK4, SK5 ve Eyüp Lisesi civarında açılan SK6 sondajlarına göre 5-7 m. arasında değişen kahve-gri renkli, kiremit parçalı, kumlu, çakıllı dolgu altında yeşilimsi gri, siyah renkli, kavkılı, yer yer kum bantlı, yüksek plastisiteli yumuşak-orta katı kil yer almakta ve SK3 sondajında bu kil yaklaşık 50 m. kalınlığa ulaşmaktadır. Kilin altında ise 2m. kalınlıkta gri çakıl tabakasıyla son bulan Haliç çökelleri, toplam 60 metrelik bir kalınlıktan sonra gri ayrışmış grovak kayalarına geçmektedir. Daha kuzeye gittikçe bu grovak kayalarının SK4'de 52 metrede, SK5'de 41 metrede kesildiği görülmüştür. Haliç çökelleri SK1-SK3-SK4 sondajlarında kilin kıvamı yumuşak iken, Eyüp İskelesi-Bahariye Fabrikası yanında yapılan sondajda 6 metrelik dolgunun altında 35 m. kalınlığa ulaşan bu kil tabakalarının grovak kayasının kesildiği derinliğe kadar (41m.) çok yumuşak olduğu görülmektedir. Eyüp Lisesi kuzeyinde Silahtarağa Caddesi'nde H10 sondajında 3.5 metrelik dolgunun altında killi kumlu düzeylerden oluşan çakıllı Haliç çökellerinin kalınlığı 9 metreye düşmektedir. Kıyı şeridine 100 m. mesafede Haliç'e paralel uzanan ve kuzeye gittikçe sahilden uzaklığı artan Silahtarağa Caddesi'nde yapılan H5, H5A, H6, H7, H8, H9 sondajlarında ise direkt temel kayayı oluşturan grovoklara girilmiştir. Haliç'in bitim noktasından itibaren Alibey Deresi boyunca açılan H1,H2,H4 gibi 10 metrelik sığ sondajlarında ise

270 m. ile 4 m. arasında değişen dolgu zeminin altında 2-5 m'lik yumuşak gri kahverengi, az çakılı siltli kil, onun altında ise siltli çakıl yer alır. Deniz yüzeyinden 4 m. yükseklikte yapılan H2 sondajında ise 5.70 m. derinlikte grovak kayalarının kesildiği görülmüştür (şekil 3.3).



## BÖLÜM 4

### 4. YUMUŞAK KOHEZYONLU ZEMİN ÖZELLİKLERİ

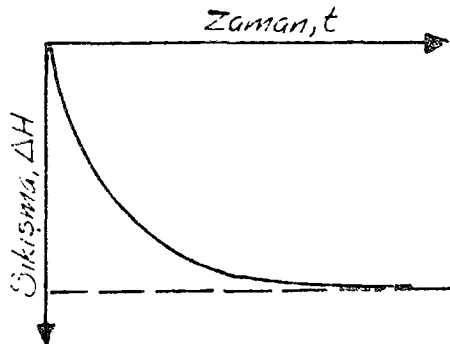
Normal konsolide yumuşak killer yeryüzünde kalın tabakalar halinde çok geniş alanlar kaplamaktadır ve bu yüzden yumuşak killer üzerinde inşa edilecek dolguların tasarım ve yapımı son yıllarda geoteknik mühendisliğinin problemlerinden biri haline gelmiştir.

Yumuşak killerin yük taşıma kapasitesi ve mukavemeti imalatı safhalar halinde yapmak ve aralarda konsolidasyon için beklemeye bırakmak suretiyle artırılabilir. Bu tarzda aralıklı yükleme metodu uygun olarak kullanılmaya başlamıştır.

#### 4.1. Kohezyonlu Zeminlerin Konsolidasyonu

Suya doymuş zemin tabakası yüklendiğinde, sıkışma esas olarak boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu meydana gelir. Sabit bir yük altında boşluk suyunun dışarı çıkması sonucu, zeminlerde uzun sürede meydana gelen hacimsel şekil değiştirmelere konsolidasyon denir.

Killi zeminlerin konsolidasyonu zamana bağlı olarak ve yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, zeminlerin sıkışmasının hesaplanmasında gerilme - şekil değiştirme - zaman ilişkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu ilişkiler deneysel olarak laboratuvarında ödometre aleti kullanılarak incelenmektedir. Şekil 4.1'de belirli bir düşey gerilme altında zemin numunesinin sıkışmasının zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Ödometre Deneyinde Gözlenen Sıkışma Davranışı

Killi zeminlerde çok yavaş olarak uzun süre devam eden ve birincil konsolidasyonu takip eden sıkışmalara ikincil konsolidasyon adı verilmektedir. Genelde ikincil konsolidasyon sonucu meydana gelen oturmalar birincil konsolidasyon ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür.

Killer, konsolidasyon geçmişine göre başlıca üçe ayrılırlar :

**1) Normal Konsolide Killer :** Şu anda üzerinde etkiyen jeolojik yük ( $\sigma'_{vo}$ ), o tabaka üzerinde etkimiş en büyük konsolidasyon basıncına ( $\sigma'_p$ ) eşit olan ve halihazırdaki yükler altında, konsolidasyonunu tamamlamış killerdir.

**2) Aşırı Konsolide Killer :** Arazideki bir kil tabakası üzerinde şu anda etkiyen düşey efektif basınç (üzerinde yer alan tabakaların ağırlığından dolayı), o kil tabakası üzerinde geçmişte etkili olmuş basınçtan daha az olabilmektedir ( $\sigma'_{vo} < \sigma'_p$ ). Bu durumda, gerçekte zemin daha yüksek gerilmeler altında konsolidasyona uğramış fakat sonradan bu yükün bir kısmı kaldırılmıştır (tabaka, bu devrinde buz ağırlığında kalmış olabilir veya aşınma, kazı gibi nedenlerle tabaka üzerinden ağırlık kalkmış olabilir). Bu tür killer, önceden yüklenmiş veya aşırı konsolide kil olarak nitelendirilmektedir.

Ön konsolidasyon basıncının ( $\sigma'_p$ ) arazideki mevcut efektif düşey basınca ( $\sigma'_{vo}$ ) oranı, aşırı konsolidasyon oranı (AKO) şeklinde tanımlanmaktadır. Bu oranın

$$AKO = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \quad (4.1)$$

değeri yükseldikçe zeminin aşırı konsolide olma derecesi artmakta, buna bağlı olarak da dış yükler altında göstereceği sıkışma azalmaktadır. Aşırı konsolide killerin daha yüksek mukavemete sahip oldukları gözlenmektedir.

**3) Konsolidasyonu Devam Eden Killer :** Mevcut yük altında, konsolidasyonu tamamlanmamış, konsolidasyonu devam eden killerdir. Yakın bir tarihte insanlar veya jeolojik olaylar tarafından oluşturulan zemin tabakaları bu gruba örnek gösterilebilir.

#### 4.1.1. Yumuşak Zeminlerin Sıkışabilirlik Parametreleri

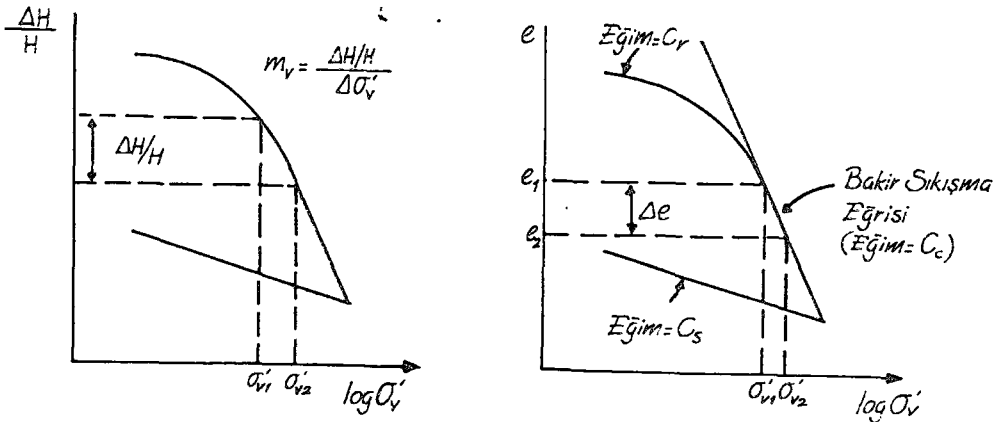
Kil tabakalarından bozulmamış numune almak ve ödometre deneyini mutlaka bozulmamış numuneler üzerinde yapmak gerekmektedir. Aksi halde, deneysel olarak ölçülen sıkışmalar arazi davranışı hakkında sağlıklı bilgi vermemektedir.

Yumuşak killerin tanımlanması için aşağıdaki özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir.

- 1) Tabakaların jeolojik geçmişi,
- 2) Zeminin su muhtevası, Atterberg limitleri, organik içeriği ve kilin sensitivitesi
- 3) Kilin yapısında su muhtevasından dolayı meydana gelebilecek değişiklerin incelenmesi.
- 4) Arazide yapılan veyn deneylerinden elde edilen çok sayıdaki mukavemet değerlerinin normal konsolide zeminlerde korelasyonlarla beklenebilecek mukavemet değerleri ile karşılaştırılması.
- 5)  $e - \log p$  eğrisinin belirlendiği konsolidasyon deneylerinin yapılması ve  $p_c$  değerinin belirlenmesi.

Yumuşak çökellerin yük altında yapacağı oturmanın miktarı ve bu oturmanın ne kadar sürede gerçekleşeceğinin tahmini konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır.

Ödometre deneylerinden elde edilen boşluk oranı - basınç ( $\log$ ) eğrisinin (Şekil 4.2) de bakir sıkışma eğrisinin eğimi sıkışma indisi  $C_c$  olarak tanımlanan katsayının değerini vermektedir.



Şekil 4.2 Hacimsal Sıkışma Katsayısı ( $m_v$ ) ve Sıkışma İndisi ( $C_c$ ) nin Bulunması

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} = \frac{e_1 - e_2}{(\log \sigma'_{v2} - \log \sigma'_{v1})} = \frac{e_1 - e_2}{\log \left( \frac{\sigma'_{v2}}{\sigma'_{v1}} \right)} \quad (4.2)$$

Literatürde sıkışma indisinin diğer geoteknik büyüklüklerle korelasyonuna ilişkin çok sayıda eşitlik vardır. Bunlardan likit limit ( $w_L$ ) ve Plastisite indisi ( $I_P$ ) ile ilgili olan ikisi aşağıda verilmektedir.

$$C_c = 0.009 \times (w_L - 10) \quad \text{Terzaghi-Peck (1967)} \quad (4.3)$$

$$C_c = 0.5 \times I_P \times G_s \quad \text{Wroth - Wood (1978)} \quad (4.4)$$

Sıkışma indisinin başlangıç boşluk oranına ( $e_i$ ) ve zemin danelerinin özgül yoğunluğuna ( $G_s$ ) bağlı olarak tahmini Rendon-Herrero (1983) tarafından

$$C_c = 0.141 \times G_s^{1.2} \times [(1+e_i) / G_s]^{2.38} \quad (4.5)$$

şeklinde verilmektedir. Bazı zemin türlerinde  $C_c$  nin olası değerleri Tablo 4.1' de verilmektedir.

Tablo 4.1. Sıkışma İndisi ( $C_c$ )' nin Tipik Değerleri

ZEMİN TÜRÜ	$C_c$
Orta hassasiyetli normal konsolide killler	0.2-0.5
Chicago sitli kili (CL)	0.15-0.3
Mavi Boston kili (CL)	0.3-0.5
Orta hassasiyetteki İsveç killeri (CL-CH)	1-3
Canada Leda killeri (CL-CH)	1-4
Mexico City kili (MH)	7-10
Organik killer (OH)	$\geq 4$
Turbalar	10-15
Organik silt ve killi siltler (ML-MH)	1.5-4.0

Tekrar sıkışma indisi ( $C_r$ )' nin tipik değerleri, 0.015-0.035 arasında değişmektedir. Düşük plastisiteli ve aşırı konsolidasyon oranı küçük killer için daha düşük değerler mevcuttur. 0.005-0.05 aralığının dışında kalan  $C_r$  değerlerinin problem yaratabileceği dikkate alınmalıdır.

Konsolidasyon oturmasının büyüklüğünün tahmin edilmesinde ikinci yolun hacimsel sıkışma katsayısına bağlı bir eşitlik kullanmak olduğu bilinmektedir. Ödometre deneylerinden elde edilen boy kısalması basınç eğrisinden, herhangi bir basınç artışı kademesi için, zeminin hacimsel sıkışma katsayısının ( $m_v$ )

$$m_v = \frac{\Delta H / H}{\Delta \sigma_v} = \frac{\Delta H / H}{(\sigma'_{v1} - \sigma'_{v2})} \quad (4.6)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada ( $\Delta H / H$ ) zemin numunesi üzerindeki basınç  $\Delta \sigma'_v$  kadar arttığı zaman meydana gelen birim sıkışmayı göstermektedir.

Oturma - zaman ilişkisinin ve boşluk suyu basıncı sönmümlerinin hesaplanabilmesi için

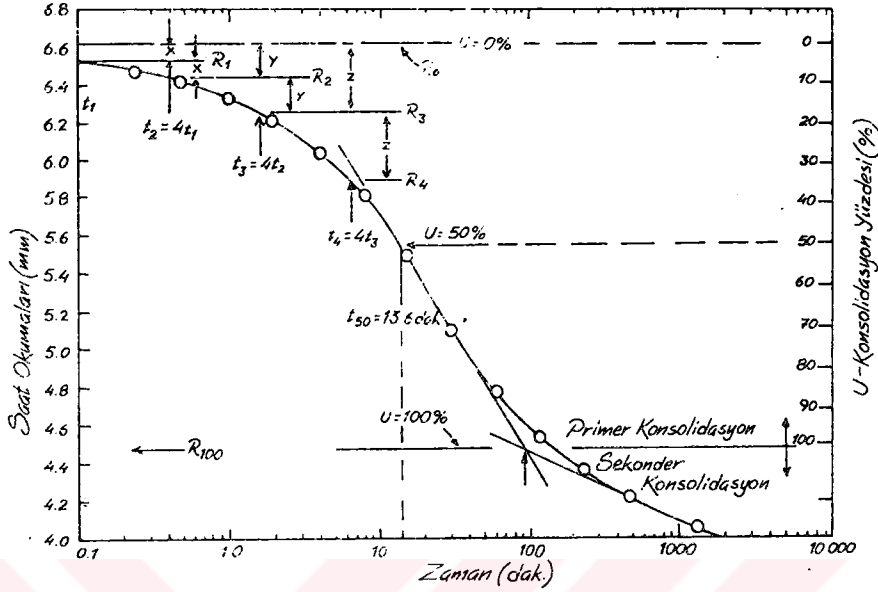
$$t = TH_d^2 / c_v \quad (4.7)$$

ilişkisindeki konsolidasyon katsayısı ( $C_v$ ) değerinin saptanması gerekmektedir. Ödometre deneyinde ölçülen sıkışma zaman okumalarından Şekil 4.3' e benzer eğriler elde edilmektedir.

Elde edilen bu eğrilerden konsolidasyon katsayısı hesaplanabilmektedir. Terzaghi' nin varsayımına göre zeminin konsolidasyon katsayısı ( $C_v$ ) konsolidasyon süresince sabit kalmaktadır. Bu katsayı

$$C_v = \frac{k(1 + e_o)}{a_v \gamma_w} \quad (4.8)$$

olarak tanımlanmaktadır. Deneysel sonuçlar ( $C_v$ ) nin sabit kalmadığını konsolidasyon basıncı ile birlikte azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.3. Konsolidasyon Katsayısının ( $C_v$ ) Casagrande Logaritma Zaman Yöntemi ile Saptanması.

İkincil konsolidasyon sıkışması birinci konsolidasyon sırasında hacim değişiminin değişmesi ile başlayarak genellikle çok yavaş olarak meydana gelir. İkinci konsolidasyonu bir katsayı ile tanımlayabilmek en iyi yoldur ve bu katsayı Raymond, Wahls (1976) ve Mesri, Godlowski (1978) şu şekilde tanımlanmıştır :

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (4.9)$$

#### 4.2. Kohezyonlu Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Zemin mekaniğinde karşılaşılan bütün stabilite problemlerinin limit denge analizi kayma mukavemetinin bilinmesine bağlıdır. Bir zeminin taşıma gücü kayma mukavemeti ile 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. Terzaghi

(1936), kayma mukavemeti yük altındaki hacim değişimi gibi problemlerin efektif gerilmeyle ilgili olduğunu göstermiştir.

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 kohezyon teriminden meydana gelmektedir. Buna göre zeminin göçme anındaki kayma mukavemeti

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (4.10)$$

bağıntısı ile bulunabilmektedir.

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

$\sigma$  = Kayma düzlemine etkiyen normal gerilme,

$c$  = Zemin kohezyonu,

$\phi$  = İçsel sürtünme açısını göstermektedir.

Denklemden  $c$ ,  $\phi$  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 4.4).

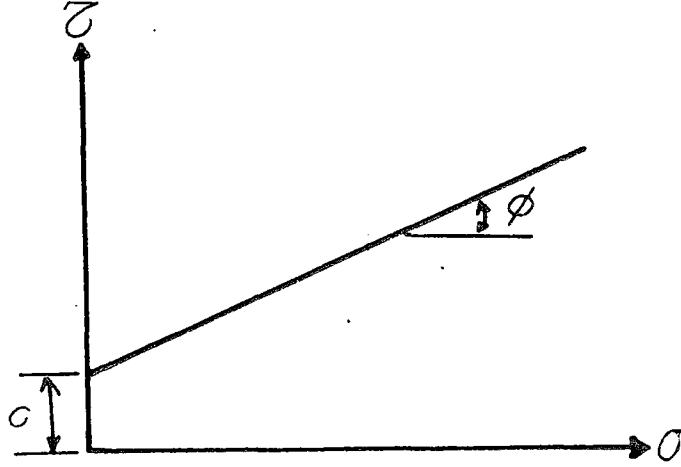
Kayma mukavemeti parametreleri toplam gerilmeler cinsinden ifade edildiğinde  $c$ ,  $\phi$  ile gösterilir. Toplam gerilme, zeminin iskeleti ve boşluklardaki su tarafından taşınan gerilmelerin toplamı olduğuna göre  $\sigma'$  efektif gerilme,  $u$  boşluk suyu basıncı olmak üzere

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4.11)$$

yazılabilir. Mohr-Coulomb denklemi efektif gerilmeler cinsinden,

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4.4. Kayma Mukavemeti parametreleri

#### 4.2.1. 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 edilemesi ve deney yönteminin bir parçası olarak boşluk suyu basıncı ölçümlerinin yapılabilmesidir. 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 - drenajsız deneylerde boşluk basıncının ölçülmüş olması halinde Mohr-Coulomb eşitliği efektif gerilmelere göre ,

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi \quad (4.13)$$

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

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.

#### 4.2.2. Yumuşak Kohezyonlu Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Yumuşak zeminlerin su muhtevası ve birim hacim ağırlık gibi özelliklerin mukavemet özelliklerine etkisi çok büyüktür. Bu zeminlerin mukavemeti esas olarak onların su muhtevası, kuru birim hacim ağırlıkları tarafından kontrol edilmektedir. Dolayısıyla, yumuşak zeminlerden elde edilecek suni dolgu alanların kullanılabilir hale getirilmesi her şeyden önce bu tabakaların etkin bir drenaj ve kurutma sistemi ile su muhtevalarının azaltılmasına ve kuru birim hacim ağırlıklarının artırılmasına bağlıdır

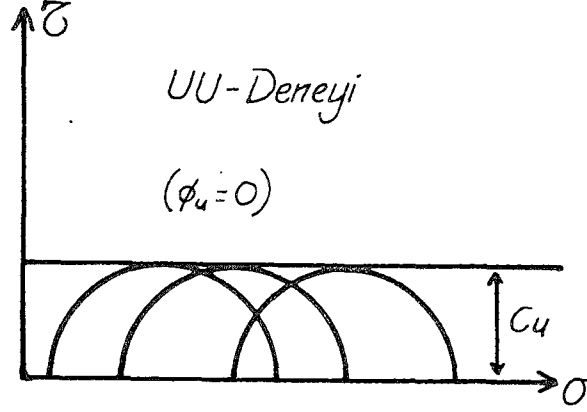
Arazide yeraltı su tablası altında yer alan zeminlerin çoğunlukla suya doymun olduğu bilinmektedir. Yeraltı su tablasının üzerinde yer alan ince daneli zeminler de belli bir yüksekliğe kadar kapilerite etkisi ile suya doymun hale gelir. Bu nedenle temel mühendisliği ile ilgili problemlerde çoğunlukla suya doymun killi zeminlerin davranışının saptanması gerekli olmaktadır.

Arazide bir kil tabakası uygulanan dış yük altında konsolidasyona uğramadan ve hızlı olarak yüklenmesi durumunda kayma mukavemeti, konsolidasyonsuz drenajsız (UU) deneyleri ile bulunabilmektedir. Bu durumda kayma mukavemeti zarfı Şekil 4.5'te görüldüğü gibi yatay bir doğru olmaktadır ( $\phi_u = 0$ ). Bu durumda, zeminin kayma mukavemeti drenajsız kohezyon katsayısı  $c_u$  ile tanımlanmaktadır,

$$\tau_f = c_u$$

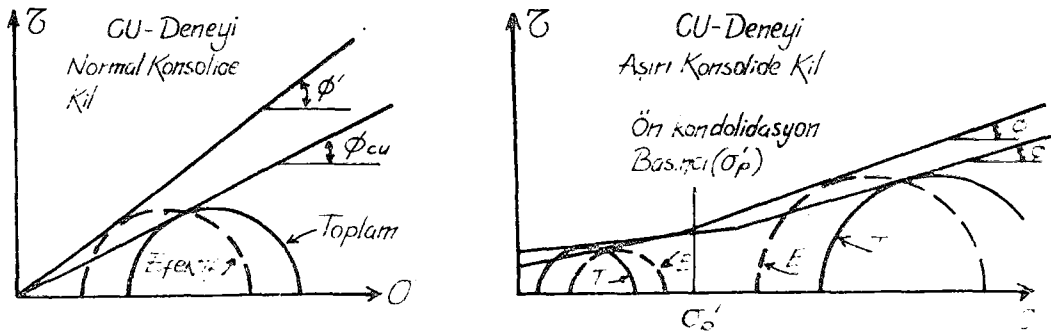
(4.14)

ve çevre basıncından bağımsız olmaktadır.



Şekil 4.5. Konsolidasyonsuz Drenajsız Kayma Mukavemeti Zarfı.

Arazide bir kil tabakasının konsolide olduktan sonra, hızlı yüklendiği durumlarda, kayma mukavemetinin konsolidasyonlu - drenajsız deneylerle saptanması mümkün olmaktadır. Şekil 4.6'da farklı konsolidasyon basınçları altında konsolide olduktan sonra drenajsız olarak kesilen normal konsolide ve aşırı konsolide killerin kayma mukavemeti zarfları toplam ve efektif gerilmelere göre gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Konsolidasyonlu - Drenajsız Durumda Kayma Mukavemeti Zarfları.

Normal konsolide killerde kayma mukavemeti zarfları eksen başlangıç noktasından geçen bir doğru ( $c = c' = 0$ ) olurken, aşırı konsolide killerde kayma mukavemeti zarfları eğimleri farklı iki doğrusal kısımdan oluşmaktadır. Ön konsolidasyon basıncı ( $\sigma'_p$ ) değerlerinden büyük basınçlarda kayma mukavemeti zarfları yatayla yaptıkları açı  $\phi_{cu}$  ve  $\phi'$  (toplam ve efektif gerilmeler için) olan ve uzantıları orijinden geçen iki doğru halinde olurken ön konsolidasyon basıncından küçük basınçlarda kayma mukavemeti zarflarını eğimi daha az olan ve düşey eksenini orijinden daha yukarıda kesen ( $c > 0, c' > 0$ ) iki doğru ile göstermek gerekmektedir.

Aynı konsolidasyon basıncının etkisi altında kaldıktan sonra, drenaja izin vermeden farklı çevre basınçları altında kayma gerilmeleri uygulanan normal konsolide killerde CU deneylerinde gözlenen davranış ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Konsolidasyonlu Drenajsız Kayma Mukavemeti

Bu koşullarda da  $\phi_u = 0$  durumu geçerli olmakta ve drenajsız kohezyon  $c_u$  değerinin konsolidasyon basıncı ile doğrusal olarak arttığı (veya  $c_u / p_c$  oranının sabit olduğu) gözlenmektedir. Bu oranın zeminin plastisite indisine bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir. Değişik killer üzerinde yapılan çok sayıda deney sonuçlarından elde olunan

$$\frac{c_u}{p_c} = 0.11 + 0.0037I_p \quad (4.13)$$

istatistiksel bağıntısı Skempton (1957) tarafından önerilmiştir. Aynı zamanda, ( $c_u / p_c$ ) oranı ile konsolidasyonlu - drenajsız kayma mukavemeti açısı ( $\phi_{cu}$ ) arasında, normal konsolide killer için

$$\frac{c_u}{p_c} = \frac{\sin \phi_{cu}}{1 - \sin \phi_{cu}} \quad (4.14)$$

ilişkinin geçerli olacağı kolaylıkla gösterilebilir. Bu bilgilerin ışığı altında, arazideki normal konsolide kil tabakalarının drenajsız kayma mukavemetini bulmak için, önce konsolidasyon basıncının (= jeolojik yük) bulunması, sonra o basınç altında konsolide edilmiş numuneler üzerinde CU deneyi yapılması veya yukarıdaki istatistiksel bağıntıdan yararlanma yoluna gidilebilmektedir.

## BÖLÜM 5

### 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Haliç' de açılan zemin etüd sondajlarından örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri elde edilmiştir. Sondajlardan elde edilen örselenmiş numuneler üzerinde rutin endeks özellikleri saptanırken, örselenmemiş numuneler üzerinde endeks özelliklerinin yanısıra kayma mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Haliç taban çamurunun geoteknik özelliklerini belirlemek için deniz dibinden alınan büyük hacimli temsili numuneler üzerinde arazide depolanacak taranmış zemin davranışı için sulu çamur konsolidasyon deneyleri ve bu şekilde hazırlanan blok numuneler üzerinde sıkışabilirlik ve mukavemet deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilmiş olan geoteknik parametreler Haliç' in temizlenmesi söz konusu olduğunda başka bir yere taşınacak olan çamurun yeni geometride olası stabilite sorunlarının önceden görülmesi ve geometrisinin buna göre saptanması açısından yararlı olacaktır.

Yapılan çalışmada geoteknik parametrelerin belirlenmesi için likit limit deneyi, plastik limit deneyi, hidrometre analizi, üç eksenli basınç deneyi, veyn deneyi, sulu çamur konsolidasyonu ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Tüm deneyler Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarın' da yapılmıştır.

#### 5.1. Endeks Özelliklerinin Belirlenmesi

Haliç' ten gelen örselenmiş ve örselenmemiş deney numunelerini sınıflandırabilmesi, numunelerin su muhtevasına bağlı olarak kıvam limitlerini ve yoğunluklarında plastik limitlerini saptanabilmesi için yapılan deneyler AASHTO T89 ve T90 Standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.

Kıvam limitlerinin belirlenmesi sınıflandırma deneylerinin önemli bir kısmını teşkil eder. Özellikle kohezyonlu zeminlerin likit ve plastik limitleri ve platisite indisleri zeminin genel karakteristiklerinin belirlenmesinde çok faydalı olmaktadır.

Likit limit ile plastik limit arasında kalan su muhtevalarında zeminin plastik davranış gösterdiği için, bu iki limitin farkı plastisite indisi ( $I_p$ ) olarak

$$I_p = (w_L - w_p) \quad (5.1)$$

tanımlanmıştır.

İnce daneli zeminlerin (siltler ve killer) dane çapı dağılımını deneysel olarak saptamak için bir süspansiyon içindeki küresel katı maddelerin çökme hızlarının onların dane çapına bağlı olarak değiştiğini gösteren Stoke kanunundan yararlanmak mümkün olmaktadır.

İncelenen örneklerin endeks özellikleri ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi' ne göre Zemin cinsi toplu olarak Bölüm 6' da Tablo 6.1' de verilmiştir.

## 5.2. Sulu Çamur Konsolidasyonu

Dipsel çamurun uzaklaştırılıp, etrafı çevrelenmiş bir alanda havuzlanarak dolgu alanları oluşturulması dipsel çamuru depolama ve temizleme tekniklerinden biridir. Elde edilen alanların ne kadar süre sonra ve hangi amaçla kullanılabilir hale getirilebilecekleri, hangi aralıklarla bir öncekinin üzerine yeni malzeme yerleştirilebileceği gibi sorulara verilecek yanıtın dipsel çamurun konsolidasyon özellikleri ile direkt ilişkisi vardır. Tarandığında yüksek su kapsamı ile sifıra yakın kayma mukavemetindeki çamurlar zamanla bünyelerindeki suyun çıkması ve yüzeyde buharlaşma ile mukavemetlerinde bir artış olmaktadır. Çok düşük permeabilite nedeniyle bu artış hızı oldukça düşüktür.

### 5.2.1. Sulu Çamur Konsolidometre Aygıtı

Çamur Konsolidometre aygıtının en önemli işlevi arazi çökme koşullarına benzer şekilde zemini konsolide etmek ve homojen zemin örnekleri elde etmektir. Örnek hazırlama işlemi basit, hızlı ve tekrarlanabilir olup, doğa koşullarına benzer bir yükleme tarihçesi uygulamaya elverişlidir. Bu çalışmada Northwestern Üniversitesi'nde

geliştirilene benzer olarak yaptırılan sulu çamur konsolidasyon aleti Şekil 5.1'te gösterilmektedir.

Sulu çamur konsolidasyon aleti paslanmaz çelikten 50 cm. boy, 16 cm. iç çapı silindirik hücre, yükleme pistonu, taşıyıcı sehpa, bağlantı elamanları ile alt üst başlıktan oluşmaktadır. Bu parçalar Şekil 5.2'de görülmektedir. Çamur bulamacı ile yüzyüze kalan tüm parçalar için paslanmaz çelik malzeme kullanılmış olup, silindir iç yüzeyi ilk deneyden sonra ayrıca kromlanmıştır. Haliç çamurunun kimyasal bileşenlerinin etkisi olduğuna inanılan bir oluşmayla ilk deney sonunda silindir iç yüzeyinde kumlanmalar görülmüş; bu da hava basıncı kaçaqlarını arttırmıştır. Krom kaplama bu kimyasal etkileşimi en aza indirmiştir.

Yükleme pistonunun altında ve alt başlıklarda 13 cm çaplı, 1 cm kalınlıkta poroz taşlar yerleştirilerek çamurun basınç altında iki yönlü olarak drenajı sağlanmıştır. Poroz taşlar No. 40 - 200 elekler arası kumun (podima kumu) epoksi bir bağlayıcı ile nemli olarak karıştırılıp yerinde dökülmesi yoluyla elde edilmiştir. Üstteki poroz taş deney sırasında hareketli olduğu için üst başlığa bağlantısı, uzama için kıvrılarak pay sağlanmış naylon tüpler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Alt taş ise üzerine oturduğu alt başlıktan direkt olarak dışa açılabilir. Üstten iki, alttan bir açılma başlıklar üzerine yerleştirilmiş 3 adet (ikisi üstte, birisi altta) vana ile kontrol edilmektedir.

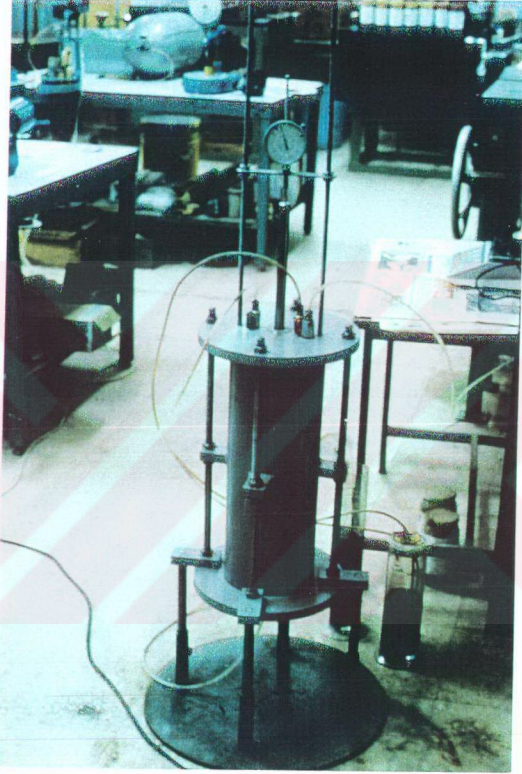
Alt ve üst başlıkların, piston çubuğunun sızdırmazlıkları sızdırmazlık halkaları ile, piston kenarlarının sızdırmazlığı ise keçeli bir sistemle sağlanmıştır.

Konsolidometrede zeminin konsolidasyonu hücre içerisinde pistonun üst kısmına bir vanadan geçerek etki yapan hava basıncı ile gerçekleşmektedir. Hava basıncı kompresörden sonra bir regülatörden geçirilerek sabit tutulmaktadır.

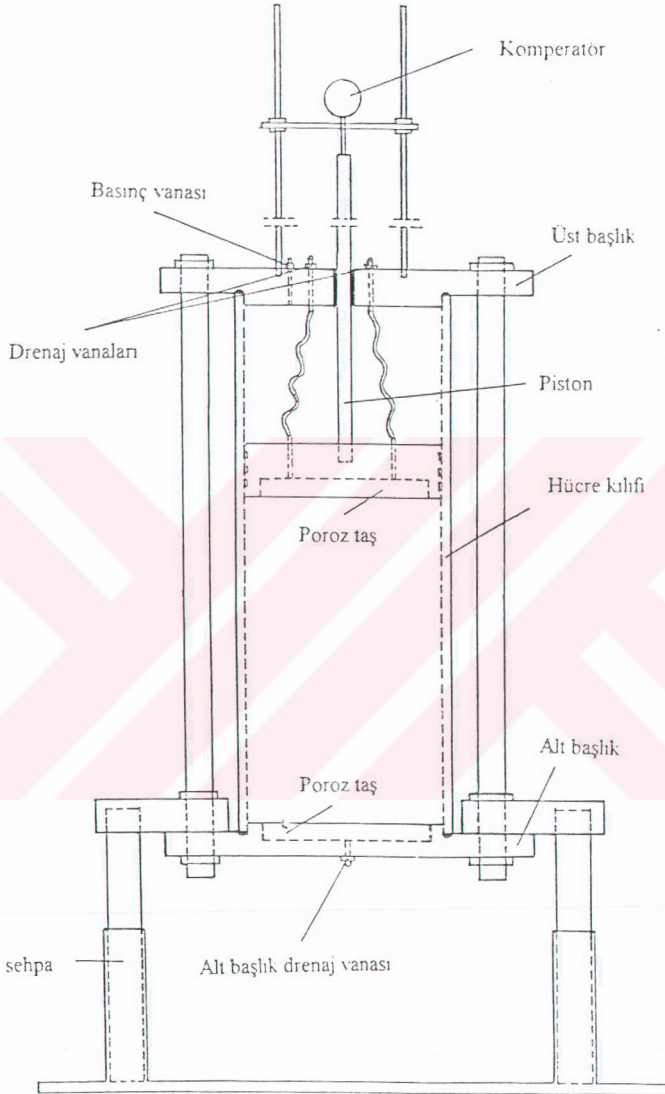
Deney sırasında düşey deformasyonlar piston çubuğu üzerine dokunan bir komperatör yardımı ile ölçülmüştür. Alt ve üst drenaj vanalarından geçtikten sonra bütetlerde toplanan su miktarları ölçülerek deformasyonlarla karşılaştırılmıştır.

Bulamaç, örnek alma sırasında varolan Haliç suyu ile birlikte konsolidometreye konulmadan önce minimum yarım saat karıştırılarak olabildiğince homojen olması sağlanmıştır. Poroz taşların tıkanmasını önlemek için bulamaç yerleştirilmeden önce bulamaç ile taş arasına üç kat poroz kağıt konulmuştur. Bulamaç doldurulup piston ve üst başlık yerleştirilerek bağlantılar yapılmış; komperatör takılarak sisteme basınç verilebilir

hale getirilmiştir. İlk basınç kademesi 25 kPa olarak seçilmiş; her kademe de %90 konsolidasyona ulaşıncaya bir öncekinin iki katına çıkarılan yeni bir kademeye geçilmiştir.



Şekil 5.1. Sulu Çamur Konsolidasyon Aygıtı



Şekil 5.2. Sulu Çamur Konsolidasyon Aygıtı Kesiti

### 5.2.2. Sulu Çamur Konsolidasyonu ile Hazırlanan Blok Numuneler Üzerinde Deneyler

Taranan dipsel çamurların etrafı çevrili alanlarda gerek kuruyarak gerek kendi ağırlığı veya sürsarj etkisinde kalarak katılaştıktan sonra kullanılabilirliğini araştırmak için sulu çamurdan elde edilmiş örneklerin geoteknik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır.

Sulu çamur konsolidometredeki elde edilen blokların üzerinde sıkışabilirlik özelliklerini belirlemek için bir dizi konsolidasyon deneyi, mukavemet özelliklerini saptamak için bir dizi laboratuvar veyn ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

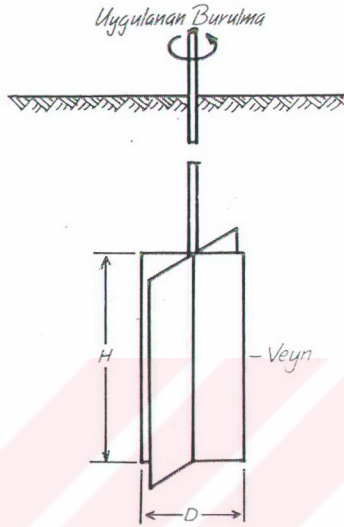
#### 5.2.2.1. Blok Numuneler Üzerinde Yapılan Veyn Deneyleri

Laboratuvarında konsolidometrede hazırlanan blok numuneler üzerinde diğer deneylere başlamadan önce Veyn deneyi yapılmıştır. Bu deneyde Şekil 5.3'de gösterilen fırıldak zemin içine batırıldıktan sonra zemin içinde dönmeye zorlanmakta, zeminin direncinin aşılmasına karşılık gelen burulma momentinden zeminin kayma mukavemeti aşağıdaki bağıntılardan bulunabilmektedir.

$$\tau_f = \frac{3 T_{\max}}{2 \pi D^3} \quad (5.2)$$

$$\tau_f = \frac{6 T_{\max}}{7 \pi D^3} \quad (5.3)$$

Burada  $T_{\max}$  zemine göçmeye yol açan burulma momentini, H ve D ise fırıldakın boyutlarını göstermektedir.



Şekil 5.3. Veyn Deney Aleti

### 5.2.2.2. Blok Numuneler Üzerinde Yapılan Konsolidasyon Deneyleri

Laboratuarda sulu çamur konsolidometre aygıtında hazırlanan blok numunelerden örnekler üzerinde standart kademeli yüklemeli ödometre deneyleri yapılmıştır. Her yük kademesi için elde olunan oturma zaman grafiklerinden konsolidasyon katsayısı  $C_v$  ve ikincil konsolidasyon katsayısı  $C_\alpha$  elde edilmiştir. Yükleme kademesinin sonu için boşluk oranı hesaplanıp  $e - \log p$  grafiği çizilip buradan hacimsel sıkışma katsayısı  $m_v$  ve sıkışma indisi  $C_c$  hesaplanmıştır.

Blok numune üzerinde gerçekleştirilen ödometre deneyi sulu çamurun çökmesi sırasında ve sulu çamurun karada havuzlanması sonucu elde edilecek dolgu tabakalarının ilave yükler altında göstereceği oturma - zaman davranışlarını belirleyecek kompresibilite özelliklerini belirlenmesini sağlamıştır.

### 5.2.2.3. Blok Numuneler Üzerinde Yapılan Üç Eksenli Deneyler

Laboratuvarda sulu çamur konsolidometre aygıtında hazırlanan blok numunelerden üç eksenli deney için numuneler hazırlamak için parçalara bölünmüş ve bu numuneler çeşitli saklama sürelerinde deneye tabi tutulmak üzere desikatörde (Şekil 5.4) drenajsız koşullarda saklandıktan numune traşlama aleti (Şekil 5.5) ile üç eksenli deneylere numune hazırlanmıştır. Numunenin hazırlanması sırasında mümkün olduğunca fiziksel örsemeye izin verilmeden silindirik olarak hazırlanmıştır. Traşlama aletinde ince ince tabakalar halinde yontularak 50 mm. çapında, 100 mm. boyunda standart silindirik üç eksenli numuneleri elde edilmiştir.

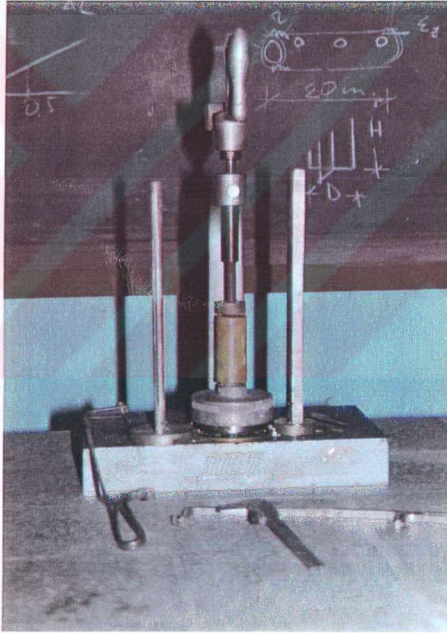


Şekil 5.4. Numunelerin Drenajsız Koşullarda Desikatörde Bekletilmesi.

Laboratuvarda hazırlanan blok numuneden üç eksenli deney için numune hazırlandıktan sonra konsolidasyonlu deneyler için numunenin çevresine filtre kağıdı sarılmıştır. Numune üç eksenli hücrenin alt başlığında poroz taş üzerine yerleştirilmiş ve

numune membran geçici 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 drenaja izin verilerek numune konsolide edilmiştir. Uygulanan bu basınç altında konsolidasyon tamamlandıktan sonra drenaj vanaları kapatılarak drenajsız durumda eksenel yüklenme altında boşluk suyu basıncı değişimleri ölçölmüştür.

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



şekil 5.7 Numune Traşlama Aygıtı

### 5.3. Tüp Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

Haliç'te farklı yer ve farklı derinliklerde 25 m'ye kadar yapılan sondajlarda elde edilen numuneler tüplerin içinde ağızları parafinle kapalı olarak getirilmiştir. Bu tüplerdeki numuneler laboratuarda mevcut olan özel numune çıkarıcılar ile istenilen boyutlarda çıkarılmıştır. Tüp numuneler üzerinde parafin kaldırıldıktan sonra önce veyn deneyi yapılmıştır. Daha sonra 140 mm. boyunda ve 70 mm. çapında numuneler üzerinde konsolidasyonlu drenajsız üç ekdenli deneyleri ve ödometre için ringlere yerleştirilmiş numuneler üzerinde tek boyutlu konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir.



## BÖLÜM 6

### 6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Sondajlardan alınan zemin numuneleri üzerinde Haliç tabanından itibaren rastlanılan zemin çökellerinin geoteknik özelliklerini belirlemek üzere bir seri laboratuvar deneyi uygulanmıştır. Deniz tabanından 25 m. derinliğe kadar yer alan zeminlerin endeks özellikleri ile kayma mukavemeti ve konsolidasyon özellikleri belirlenmiştir. Zemin etüd sondajları çalışmaları sırasında, deniz tabanına yüzeyine yakın seviyelerden alınan çamur numuneleri arasından Haliç'teki farklı bölgeleri temsil ettiği düşünülen örnekler üzerinde sulu çamur konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonunda hazırlanmış konsolide blok zemin numuneleri üzerinde ise kayma mukavemeti ve konsolidasyon deneyleri yapılarak, taranmış çamurun karada depolanması durumunda konsolide olduktan sonra arazide beklenilebilecek davranışı ile ilgili geoteknik parametreler belirlenmiştir.

#### 6.1. Endeks Özellikleri

Arazi etüdüleri sırasında alınan zemin örnekleri üzerinde tabii su muhtevası, Atterberg (kıvam) limitleri, hidrometre analizi, özgül yoğunluk deneyleri yapılmış, tüp örnek üzerinde ise tabii birim hacim ağırlıkları saptanmış ve endeks özellikleri belirlenmiştir. İncelenen örneklerin endeks özellikleri ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre zemin cinsi toplu olarak Tablo 6.1'de sunulmuştur.

##### 6.1.1. Tabii Birim Hacim Ağırlığı

Arazi sondajlarından alınan örselenmemiş tüp örneklerden laboratuvarda mukavemet ve sıkışabilirlikle ilgili deney yapılanlarında deneyden önce tabii birim hacim ağırlıkları saptanmıştır. Şekil 6.1'de bu değerlerin derinlikle değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi 6-19 m. arasındaki tabii birim hacim ağırlıkları geniş bir aralıkta dağılmakta olup

Tablo 6.1: Endeks Özellikleri ve Zemin Sınıflandırması

Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Tabii Su Muhtevası (%)	Zemin Sınıfı (USC)
AR-1	D1	0.80-1.25	48	34	74.5	ML
	D5	5.80-6.25	65	39	90.5	MH
	D6	8.10-8.55	-	-	76	SM
AR-2	D1	0.75-1.20	-	-	33.5	SM
	D3	4.00-4.45	-	-	41.5	SM
	D5	8.10-8.55	61	42	81.5	MH
	D6	10.75-11.20	64	34.5	69.5	MH
	D7	13.00-13.45	59	29.5	68.5	MH
	D8	15.80-16.45	62	39	65.5	MH
	D9	19.20-19.65	66	39.5	63	MH
	D10	21.50-21.95	68	36	70.5	MH
	U1	1.75-2.25	65	40	82	MH
	U2	6.75-7.25	42	27	59	ML
AR-3	U5	6.75-7.25	69	45	17.5	MH
	U6	16.75-17.25	99	40	59	CH
	U8	22.50-23.00	73	45	69	MH
	D2	2.00-2.45	37	27	52	ML
	D3	3.05-3.50	30	18	35	CL
	D4	5.25-5.70	-	-	24.5	SM
AR-4	D7	8.50-8.95	-	-	43	-
	BD1	-	64	30	51.5	CH
	D3	3.10-3.55	53	32	89.5	MH
	D4	5.75-6.25	47	30	62	ML
	D7	9.55-10.00	-	-	91.5	SP
	U1	4.00-4.50	-	-	59	-
AR-5	D1	1.00-1.45	-	-	77.5	-
	D4	4.00-4.45	55	41	85	MH
	D6	6.75-7.20	52	28.5	73.5	CH
	D8	9.55-10.00	60	42	64.5	MH
	U1	4.70-5.20	57	39	83	MH
	U2	8.80-9.30	54	37.5	74	MH
AR-6	BD1	-	61	49	52	MH
	D1	2.25-2.70	-	-	149	-
	D3	4.60-5.05	-	-	33	SM
	D4	7.35-7.80	26	17	46.5	SC
	U1	3.75-4.25	57	40.5	105	MH
	U2	6.50-7.00	-	-	37	-
AR-7	D4	4.80-5.25	26	-	48	-
	D5	8.00-8.45	39	30	59	ML
	U1	9.00-9.50	-	-	25.5	-
AR-9	D1	2.00-2.45	48	12	84	CL
	D3	4.50-4.95	61	15	88	CH
	U1	5.50-6.00	49	39.5	69.5	ML
	U2	8.50-9.00	61	40.5	74.5	MH

Tablo 6.1 : Devamı

Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Tabii Su Muhtevası (%)	Zemin Sınıfı (USC)
AR-10	BD1	-	67	41	58.5	MH
	D1	1.55-2.00	62	46	127.5	MH
	D4	7.30-7.80	28	18	45	CL
AR-11	D1	1.55-2.00	58	48.5	93	MH
	D2	2.25-2.70	53	40	109	MH
	D3	4.60-5.05	31	24.5	41.5	ML
	D5	9.55-10.00	38	26.5	49.5	ML
AR-12	BD1	-	74	55	76	MH
	D1	2.00-2.45	65	42	74	MH
	D2	4.50-4.95	68	42.5	-	MH
	D3	7.35-7.80	-	33.5	67	MH
	U1	6.50-7.00	41	31	57	ML
	U2	8.75-9.25	44	30	54	ML
AR-13	D1	2.00-2.65	36	21	64.5	CL
	D2	4.10-4.56	57	35	39	MH
	D4	9.55-10.00	41	24	49.5	CL
	U2	8.75-9.25	58	26	57.5	CH
AR-14	U5	14.25-14.75	60	37	65	MH
	D2-1	4.50-4.80	50	28	69	CH
	D3	5.65-6.20	37	24.5	45	CL
	D4	8.00-8.45	49	27.5	54	CL
	U1	3.30-3.90	52	19	49.5	CH
	U3	8.90-9.40	42.5	28.5	58	ML
AR-15	BD-1	0.50-1.00	52	41.5	83.5	MH
	D1	2.35-2.80	39	26.5	59	ML
	D2	4.55-5.00	52	32	61.5	MH
	D3	7.35-7.80	55	33	67	MH
	D4	9.55-10.00	55	35.5	71	MH
AR-16	D1	2.40-2.85	45	27.5	58.5	ML
	D2	5.20-5.65	53	33.5	64	MH
	D3	8.50-8.95	55	35	73	MH
AR-17	U2	6.25-6.75	50	38	77	MH
	U4	11.50-12.00	51	36.5	53	MH
	U6	18.00-18.50	53	37	62	MH
	D1	2.50-2.95	55	32	75.5	MH
	D2	4.75-5.20	56	36	79	MH
	D4	9.70-10.15	52	29	70	MH
	D6	16.65-17.10	60	33	62	MH
	D8	22.60-23.05	59	35	59.5	MH
AR-18	BD-1	1.00-1.50	62	39.5	108	MH
	D1	2.75-3.20	54	42	89.5	MH
	D3	8.50-8.95	56	43	65.5	MH
	D5	18.00-18.45	60	47	64	MH
AR-19	BD-1	-	55	39	49	MH
	BD-2	2.00-3.00	49	40	104.5	ML
	D2	5.50-5.75	50	36	68.5	ML
	D4	14.50-14.95	60	41	72	MH

Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Tabii Su Muhtevası (%)	Zemin Sınıfı (USC)
	D6	24.30-24.75	52	32.5	61	MH
AR-20	D2	1.75-2.25	32	24.5	33	CL
	BD-2	3.50-4.00	61	33	55	MH
	D3	5.00-5.45	36	23	72	SC
	D5	7.80-8.25	40	26	33	MH
	D6	10.75-11.20	54	38	61	MH
	D7	13.00-13.45	46	30	53	ML
	D8	15.80-16.25	47	33	47	MH
	D10	20.75-21.20	57	33	62	MH
	D11	23.00-23.45	58	34	59	MH
	U1	9.00-9.50	51	31.5	74.5	MH
	U2	11.25-12.00	53	33	52	MH
	U3	14.00-14.50	50	36	49	ML
	U5	19.00-19.50	58	38	58	MH

D : Örselenmiş Numune  
BD: Örselenmiş Taban Numunesi  
U : Örselenmemiş Numune

$$\gamma_1 : 12.0-17.55 \text{ kN/m}^3$$

mertebelerindedir. Eldeki tüm tabii birim hacim ağırlıklarının değerleri gözönüne alındığında her derinlik için ortalama bir değer olarak

$$\gamma_{iav} : 14.94 \text{ kN/m}^3$$

alınabileceği anlaşılmaktadır.

### 6.1.2. Tabii Su Muhtevası

Laboratuar deneyleri yapılan örneklerde saptanan deney başı su muhtevasının Şekil 6.2’de derinliğe göre değişimi verilmektedir. Değerler

$$w_i : \%40-83$$

arasındadır.

### 6.1.3. Atterberg Limitleri

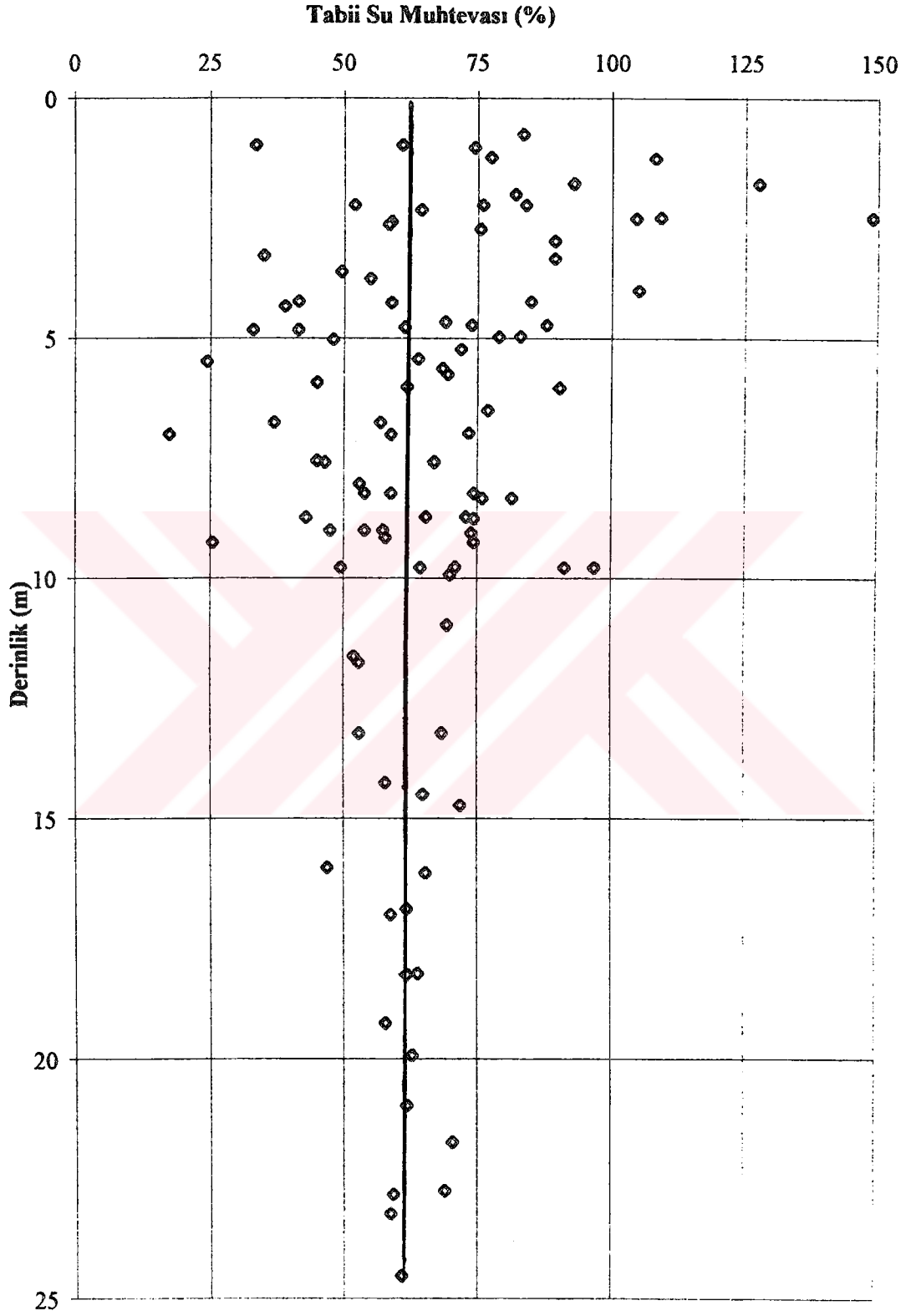
Örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan likit ve plastik limit değerleri çok büyük bir aralıkta değişmektedir.

$$\text{Likit Limit} \quad w_L : \%26-99$$

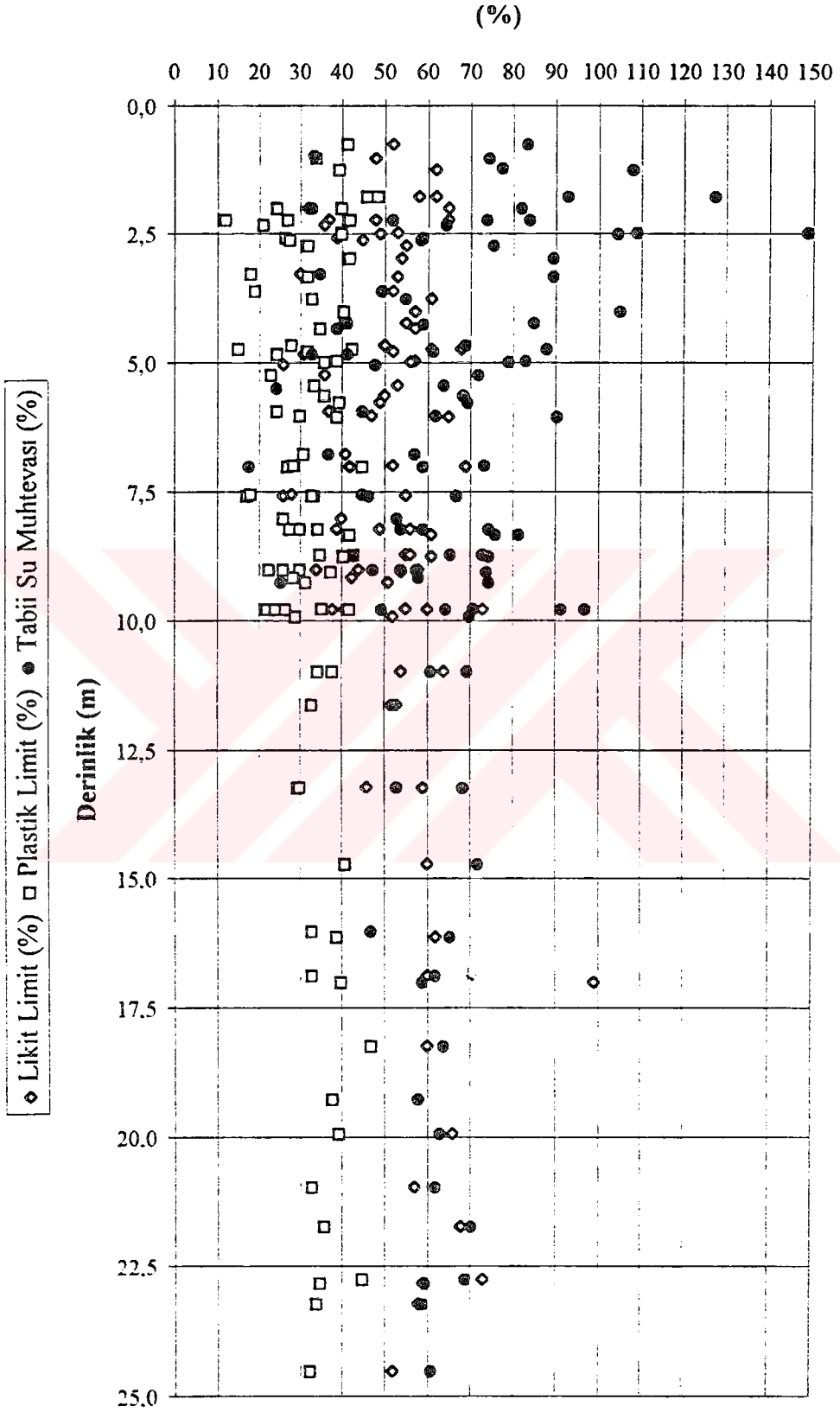
$$\text{Plastik Limit} \quad w_P : \%12-49$$

İnce dane oranlarının ve organik madde içeriğinin çok değişken olduğu bu tür çökellerde değişim aralığının böylesine büyük olması doğal olup, ortalama değerler olarak





Şekil 6.2. Tabii Su Muhtevasının Derinlikle Değişimi



Şekil 6.3. Atterberg Limitleri ve Tabii Su Muhtevasının Derinlikle Değişimi

$$w_{L_{av}} : \%55 \text{ ve } w_{P_{av}} : \%35$$

değerleri gözönüne alınabilir. Şekil 6.3'de Atterberg limitleri ve Tabii su muhtevasının derinlikle değişimi gösterilmiştir.

#### 6.1.4. Likitide İndeksi

Atterberg limitlerine göre aşağıdaki gibi tariflenen likitide indeksinin derinlikle değişimi de ilk 10 m. için çok fazla olduğu görülmüştür.

$$I_L : (w_n - w_p) / (w_L - w_p)$$

Tüp örnekler için 1.35-3.25 arasında değişen değerlerdedir. Şekil 6.4'de Likitide İndeksi ile derinliğin değişimi gösterilmektedir.

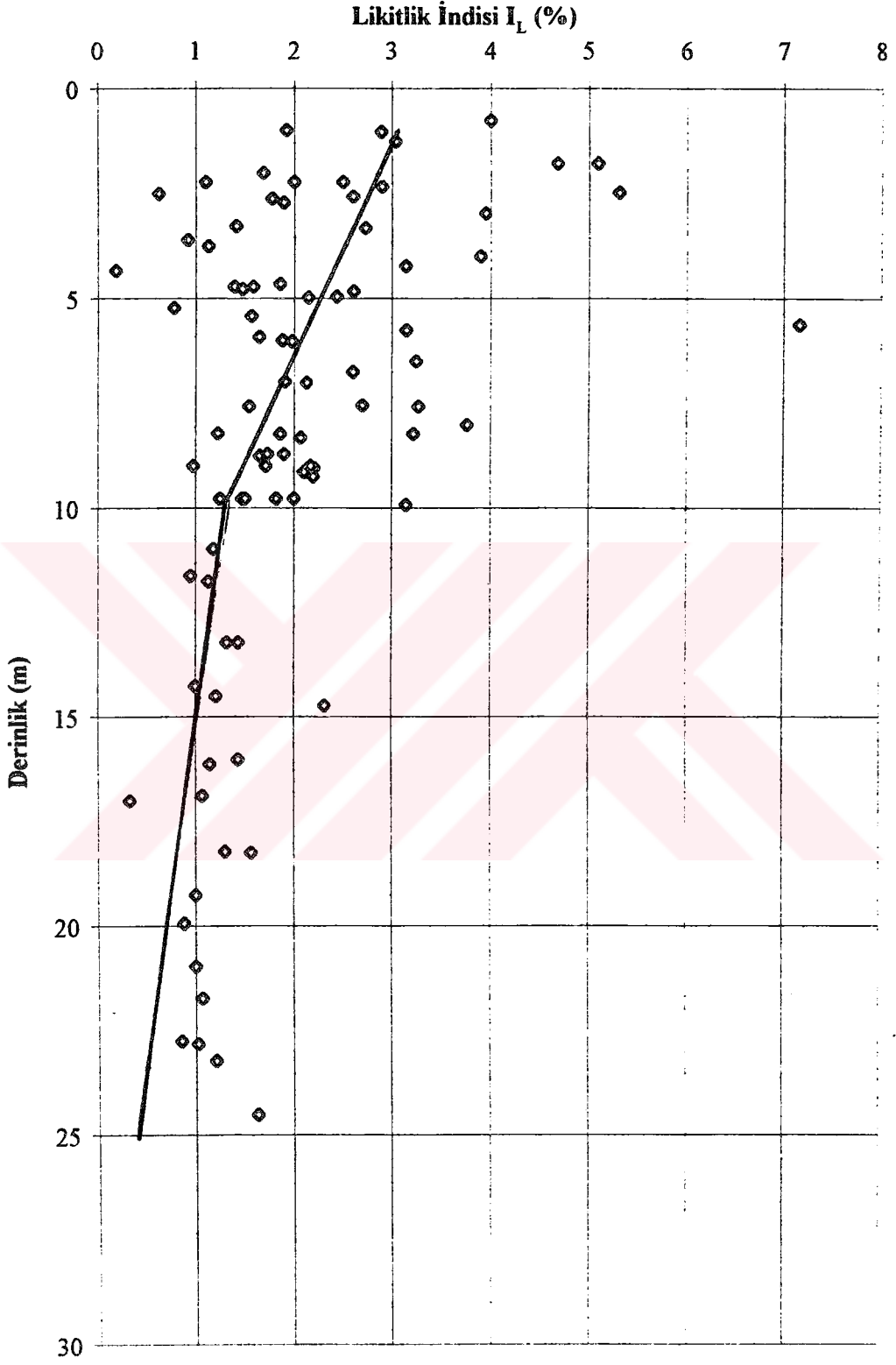
#### 6.2. Mukavemet Özellikleri

Stabilite ile ilgili sorunların çözümünde kullanılacak bu parametrelerin derinlikle ya da diğer geoteknik özelliklerle değişimini elde etmek üzere, örselenmemiş tüp örnekler ve taban çamuru örneklerinin sulu çamur konsolidasyon aygıtında konsolide edilmesiyle edilmesiyle elde edilen blok örnekler üzerinde konsolidasyonlu- drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri yanında laboratuvar veyn deneyleri yapılarak drenajsız kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir.

Tüpler ve blok numuneler üzerinde yapılan veyn deneylerinin sonuçları Şekil 6.5'te verilmektedir. Bu sonuçlara göre drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle değişimi

$$S_U : 6 + 1.1z \text{ (kPa)}$$

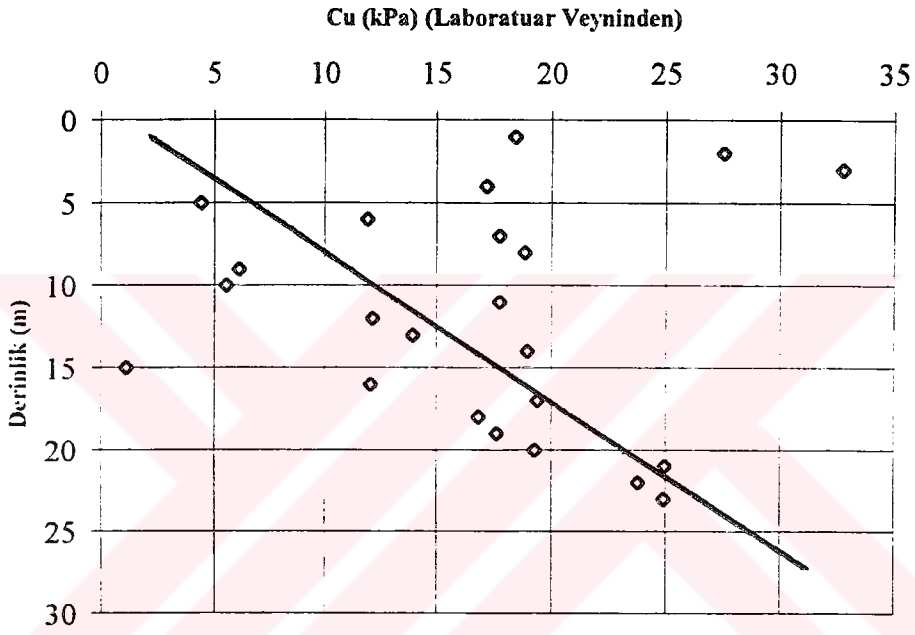
ile ifade edilebileceği anlaşılmaktadır. Burada z yüzeyden itibaren derinliği göstermektedir.



Şekil 6.4. Likitlik İndisinin Derinlikle Değişimi

Tüp örnekler ve blok örnekler üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajsız deneylerden elde edilen deviator gerilme- birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı- birim deformasyon arasındaki grafikler Ekler kısmında sunulmaktadır.

Tablo 6.2'de örselenmemiş tüp örnekler üzerinde ve blok numuneler üzerinde yapılan üç eksenli konsolidasyonlu drenajsız (CU) deneyleri, Tablo 6.3'de örselenmemiş tüp örnekler ve blok numuneler üzerinde yapılan laboratuvar veyn deney



Şekil 6.5. Laboratuvar Veyn Deneylerinden Belirlenen Drenajsız Kayma Mukavemetinin Derinlikle Değişimi

sonuçları verilmektedir. Drenajsız kayma mukavemetinin jeolojik düşey efektif gerilmelere göre ( $\sigma_{vo}'$ ) göre normalize edilmiş değerlerinin plastisite indisine göre değişimi Şekil 6.6'da, aynı mukavemet değerlerinin ön konsolidasyon basıncına göre değişimi Şekil 6.7'de verilmektedir. Elde edilen değerler normal konsolide olmuş killer için Skempton'un önerdiği

$$(c_u / \sigma_p') = 0.11 + 0.0037 \times I_p$$

Tablo 6.2. Üç Eksenli (CU) Deney Sonuçları

Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	w <sub>n</sub> (%)	γ <sub>i</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	σ <sub>3</sub> (kPa)	σ' <sub>3f</sub> (kPa)	(σ <sub>1</sub> '-σ <sub>3</sub> ') <sub>f</sub> (kPa)
AR-2	U2	6.75-7.25	59	14.71	100	57	55.10
	U6	16.75-17.25	59	15.63	100	70.1	98
			59	14.83	200	174	73
AR-4	BD1	-	51.5	12.34	200	185.30	38
			51.5	12.34	250	211.61	50
AR-6	BD1	-	59	14.88	200	154	139
			52	15.21	250	178	162
		U2	37	17.55	100	64	118
	U3	8.75-9.25	47.50	15.63	100	47	68
			47.50	16.57	200	98.50	120
AR-10	BD1	-	60	14.47	150	115	104
			58	13.81	200	125	125
AR-12	BD1	-	76	14	100	61.6	70
			76		200	161.6	80
AR-13	U1	6.80-7.00	51	15.97	100	57	45
			51	16.52	200	131	101
	U2	8.75-9.25	57.50	15.29	100	65.5	52.5
			57.5	15.33	200	11.	90
AR-14	U5	14.25-14.75	65	15.43	50	47	41
			65	15.43	200	177	78
AR-17	U2	6.25-6.75	77	14.29	100	63	53
	U4	11.50-12.00	53	14.81	100	67	51
			50	14.74	200	138	117
	U6	18.00-18.50	62	14.02	100	62	56
			57	14.16	200	132	113
AR-19	BD1	-	49	15.49	200	179.7	110
AR-20	U1	9.00-9.50	74.50	14.84	100	59.5	51
			74.50	14.82	200	121	110
	U2	11.75-12.25	52	17.00	100	52	48.5
			52	16.27	200	126	120
	U3	14.00-14.50	59	15.31	100	65	50
			51	15.60	200	142	108
	U5	19.00-19.50	58	15.42	100	65.50	52.5
		58	15.49	200	138	116	

Tablo 6.3. Laboratuvar Veyn Deneyi Sonuçları

Sondaj No	Numune No	w <sub>i</sub> (%)	Derinlik (m)	Drenajsız Kayma Mukavemeti (kPa)
AR-2	U2	59	6.75-7.25	14.12
	U5	17.5	14.00-14.50	18.39
	U6	59	16.75-17.25	27.53
	U8	69	22.50-23.00	32.79
AR-4	BD1	51.5	-	57.66
	U1	59	4.00-4.50	17.17
AR-5	U1	83	4.70-5.20	4.43
	U2	74	8.80-9.30	11.96
AR-6	BD1	59	-	50.36
	U1	91.5	3.75-4.25	17.72
	U2	37	6.50-7.00	18.83
AR-9	U1	69.5	5.50-6.00	6.10
	U2	74.5	8.50-9.00	5.54
AR-10	BD1	60	-	29.67
AR-12	BD1	76	-	20.72
	U1	57	6.70-7.00	17.72
	U2	54	8.25-9.25	12.19
AR-13	U1	51	6.80-7.00	13.96
	U2	57.5	8.75-9.25	18.94
AR-14	U1	49.5	3.30-3.90	1.11
	U3	58	8.90-9.40	12.10
	U5	65	14.25-14.75	19.38
AR-17	U2	77	6.25-6.75	16.83
	U4	53	11.50-12.00	17.61
	U6	62	18.00-18.50	19.26
AR-19	BD1	49	-	22.21
AR-20	U1	74.5	9.00-9.50	24.98
	U3	59	14.00-14.50	23.81
	U5	58	19.00-19.50	24.92

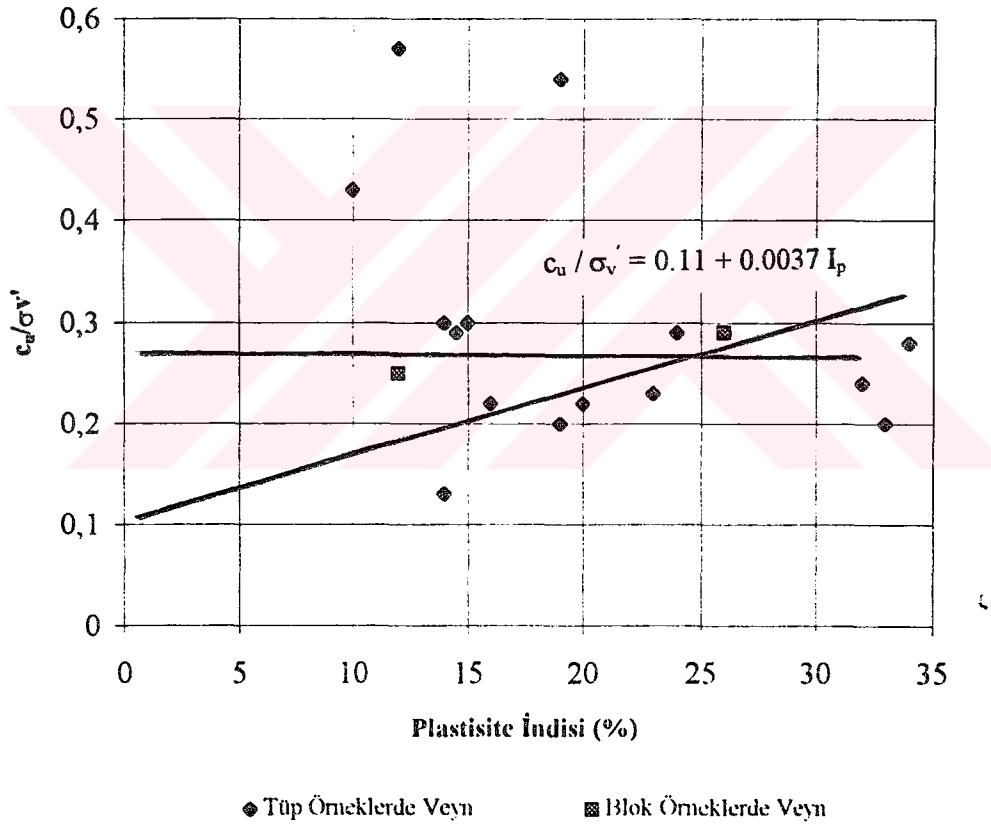
bağıntısına uymamakta olup, her plastisitedeki zemin için ortalama olarak,

$$c_u / \sigma_{vo}' = 0.25$$

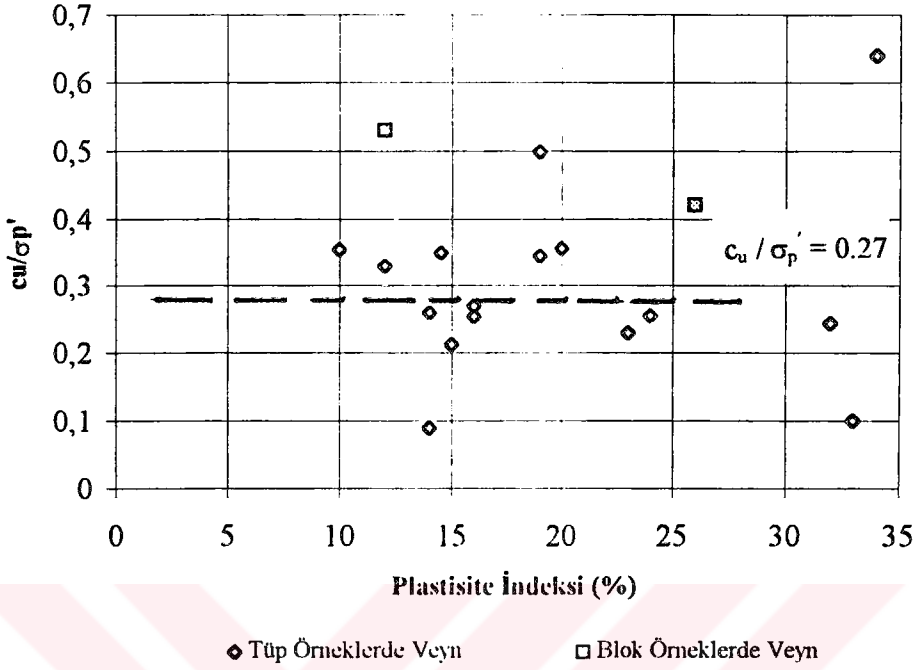
$$c_u / \sigma_p' = 0.27$$

değerlerinin alınabileceği anlaşılmaktadır.

Mesri (1975)  $c_u / \sigma_p'$  için sabit 0.22 değeri bulmuşken, Jardine ve Hight (1987) plastisite indisinin 10 değeri için 0,19,80 değeri için 0.28'e doğru yükselen değerlerini ölçmüşlerdir. Bu nedenle  $c_u / \sigma_p' : 0.27$  eşitliği ile ifade edilen değerlerin daha önceki



Şekil 6.6. Drenajsız Kayma Mukavemetinin Jeolojik Düşey Efektif Gerilmelere Göre Normalize Edilmiş Değerlerinin Plastisite İndisine Göre Değişimi



Şekil 6.7 Drenajsız Kayma Mukavemetinin Ön Konsolidasyon Basıncına Göre Normalize Edilmiş Değerlerinin Plastisite İndisine Göre Değişimi

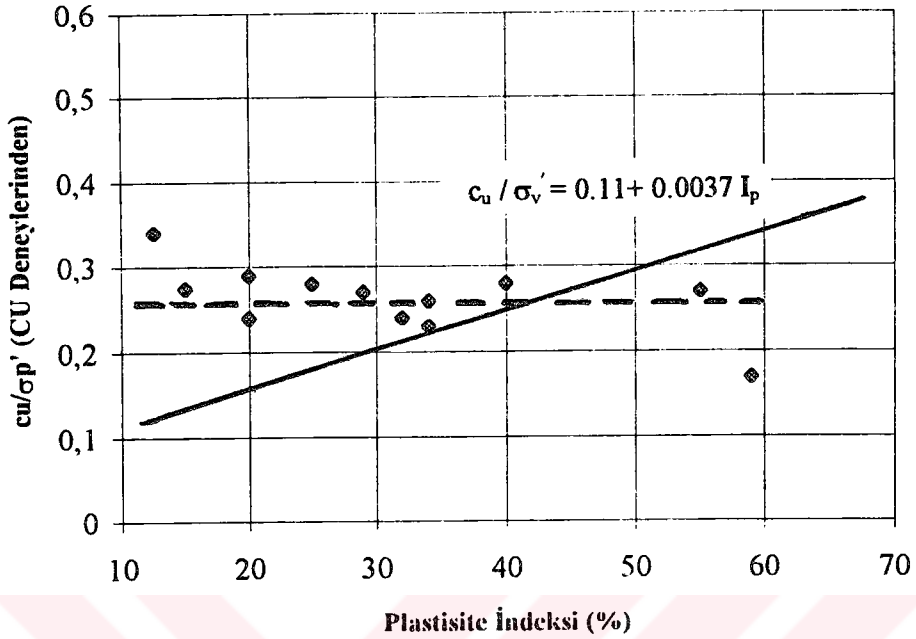
bulgularla uyum içinde olduğu söylenebilir.  $c_u / \sigma_{vo}'$  ve  $c_u / \sigma_p'$  eşitliklerinin birbirinden çok az farklı oluşu Haliç çamurunun aşırı konsolidasyon oranının  $0.65 \approx 1.53$  arasında değişmesinden kaynaklandığı açıktır.

Tüpten ve çamur konsolidasyonundan çıkan bloklardan elde edilen üç eksenli deney sonuçlarından drenajsız kayma mukavemetinin plastisite indisi ile değişimi Şekil 6.8'de verilmektedir.

100, 200, 250 kPa hücre basınçlarında konsolide edilen örneklerde ölçülen maksimum deviator gerilme değerlerinin yarısı drenajsız kayma mukavemeti olarak alındığında plastisite indisinden bağımsız olarak, konsolidasyon basıncına göre normalize edilmiş drenajsız kayma mukavemeti oranı için

$$(c_u / \sigma_p) = 0.27$$

ortalama değerinin alınabileceği görülmektedir.



Şekil 6.8. Konsolidasyonlu Drenajsız Deneylere Göre Normalize Edilmiş Drenajsız Kayma Mukavemetinin Plastisite İndisine Göre Değişimi

### 6.2.1. Drenajlı Kayma Mukavemeti Parametreleri

Haliç Dipsel Çamuru türü normal konsolide olmuş kohezyonlu birikintilerde efektif gerilmeler cinsinden kohezyon değerinin

$$c' = 0$$

olacağı tabiidir.

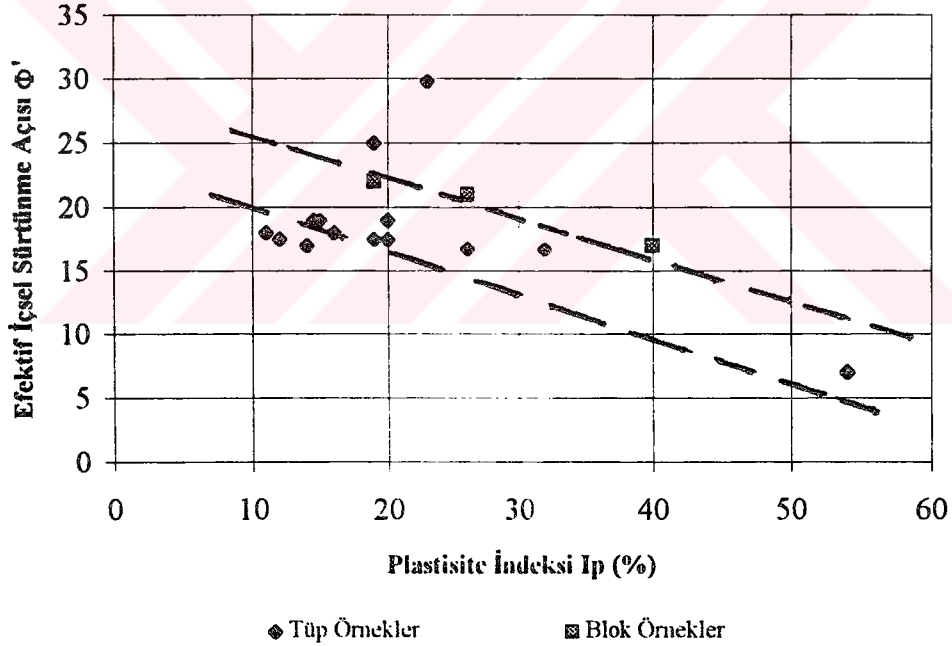
Efektif gerilmeler cinsinden sürtünme açısı ( $\phi'$ ) için örselenmemiş tüp örnekler ve çamur konsolidasyonundan elde edilmiş bloklardan hazırlanan örnekler üzerinde bir dizi boşluk suyu basıncı ölçümlü konsolidasyonlu-drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.9 bu deney sonuçlarını toplu halde göstermektedir. Doğal ve blok örneklerde içsel sürtünme açısında plastisite indisinin artan değerleri için azalma olduğu açık olup, bu bulgu başka araştırmacıların, örneğin Gibson (1953), gözlemleri ile uyumludur.

Şekil 6.9'da plastisite indisi ile  $\phi'$  değerlerinin blok örneklere göre fazla olduğu görülmektedir. Bu fark büyük olasılıkla Haliç çamuru gibi organik içeriği yüksek formasyonlarda iç dokunun bozulmasını yansıtmaktadır. Her ne kadar orjinal dokusu ile örneklerin büyük deformasyondaki dirençleri ölçerek kalıcı efektif sürtünme açısı ölçülmemişse de blok örneklerin bu yoğrulmuş duruma karşılık gelen davranışı gösterdikleri söylenebilir. Haliç çamurunda ölçülen ortalama plastisite indisi gözönüne alınırsa, bu formasyon için ortalama olarak

$$\phi'_{\text{pik av}} = 19^{\circ}$$

$$\phi'_{\text{r av}} = 12^{\circ}$$

değerlerinin kabul edilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.9. Konsolidasyonlu Drenajsız Deneylerden Belirlenen Efektif İçsel Sürtünme Açısının Plastisite İndisine Göre Değişimi

### 6.3. Sıkışabilirlik Parametreleri

Yumuşak çökellerin yük altında yapacağı oturmanın ne kadar sürede gerçekleşeceğini tahmini, konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla gerek örselenmemiş tüp örnekler gerekse çamur konsolidasyonu ile hazırlanmış blok örnekler üzerinde bir seri konsolidasyon (ödometre) gerçekleştirilmiştir. Çamur konsolidasyon aygıtında blok örneklerin elde edilmesi aşaması ise kendi başına büyük çaplı bir konsolidasyon deneyi olup, sonuçların tartışılmasında bu unsur da göz önüne alınmıştır. Konsolidasyon deneylerinden elde edilen  $e$ - $\log \sigma_v'$  eğrileri Ekler kısmında sunulmuştur. Deney sonuçlarından saptanan hacimsel sıkışma katsayısı, sıkışma indisi ve konsolidasyon katsayıları toplu olarak Tablo 6.4'de verilmiştir.

Sulu çamur konsolidometre aygıtına yerleştirilen örneklerin su kapsamı % 121 ile % 124 arasında değişirken son konsolidasyon basıncı olarak kullanılan 100 kPa basınç altında su kapsamı % 53 ile % 58 arasında kalmıştır. Bu değerler Tablo 6.5'de verilmektedir. Her bir basınç kademesindeki oturma - zaman eğrileri Ekler kısmında gösterilmektedir. Laboratuarda çamur konsolidometrede belirli aralıklarla artan basınç kademelerinde normal konsolide olarak hazırlanan numuneler üzerinde standart ödometre deneyleri de yapılmıştır. Blok numunelerde ki ödometre deneylerinin  $e$ - $\log p$  grafikleri Ekler'de sunulmuştur.

Tablo 6.5 : Dipsel Çamurda Konsolidasyon Öncesi ve Sonrası Bazı Özellikler

#### KONSOLIDASYON ÖNCESİ

Örnek No	Son Basınç (kPa)	Su Kapsamı $w_i$ (%)	Birim Hacim Ağ. $\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	Boşluk Oranı $e_i$ (%)	Doy. Derecesi $S_i$ (%)
AR-10-BD1	100	121	12.20	3.83	86
AR-6-BD1	100	124	11.99	3.98	84

#### KONSOLIDASYON SONRASI

Örnek No	Son Basınç (kPa)	Su Kapsamı $w_i$ (%)	Birim Hacim Ağ. $\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	Boşluk Oranı $e_i$ (%)	Doy. Derecesi $S_f$ (%)
AR-10-BD1	100	58	15.36	1.96	80
AR-6-BD1	100	53	15.71	1.85	77

#### 6.3.1. Sıkışma İndisi

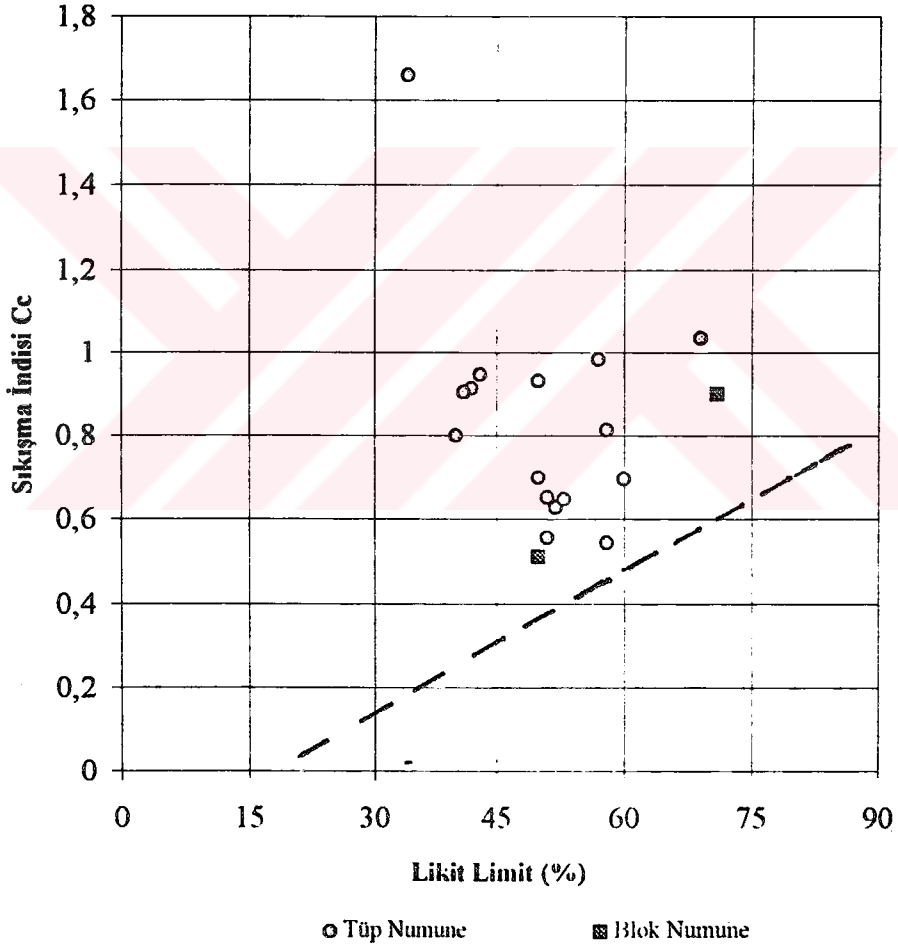
**Tablo 6.4 : Konsolidasyon Katsayısı ( $c_v$ ), İkincil Konsolidasyon Katsayısı ( $c_\alpha$ )  
Hacimsal Sıkışma Katsayısı ( $m_v$ ) ve Sıkışma İndisi ( $c_c$ ) değerleri**

Sondaj No Numune No Derinlik (m)	Yük Kademesi (kPa)	$C_v$ cm <sup>2</sup> /sn	$C_\alpha$	$m_v$ (kPa <sup>-1</sup> )	$c_c$
AR-2 U2 6.75-7.25	25	$1.73 \times 10^{-3}$	$2.54 \times 10^{-2}$	$1.098 \times 10^{-3}$	0.913
	50	$6.44 \times 10^{-4}$	$4.30 \times 10^{-2}$	$7.69 \times 10^{-1}$	
	100	$4.10 \times 10^{-4}$	$1.98 \times 10^{-2}$	$2.31 \times 10^{-3}$	
	200	$3.46 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-2}$	$2.308 \times 10^{-3}$	
	400	$5.47 \times 10^{-4}$	$1.75 \times 10^{-2}$	$3.98 \times 10^{-4}$	
	800	$4.10 \times 10^{-4}$	$1.41 \times 10^{-1}$	$1.179 \times 10^{-4}$	
AR-2 U5 14.00-14.50	25	$9.38 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-3}$	$1.233 \times 10^{-3}$	1.0347
	50	$3.86 \times 10^{-4}$	$3.08 \times 10^{-3}$	$7.83 \times 10^{-4}$	
	100	$2.86 \times 10^{-4}$	$2.30 \times 10^{-2}$	$1.125 \times 10^{-3}$	
	200	$1.43 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-2}$	$7.97 \times 10^{-4}$	
	400	$2.74 \times 10^{-4}$	$1.36 \times 10^{-2}$	$3.79 \times 10^{-4}$	
AR-6 U1 3.75-4.25	25	$8.2 \times 10^{-4}$	$4.40 \times 10^{-2}$	$7.099 \times 10^{-3}$	0.983
	50	$3.28 \times 10^{-4}$	$1.36 \times 10^{-2}$	$2.70 \times 10^{-3}$	
	100	$7.63 \times 10^{-4}$	$2.30 \times 10^{-2}$	$1.366 \times 10^{-3}$	
	200	$5.97 \times 10^{-4}$	$9.40 \times 10^{-3}$	$7.59 \times 10^{-4}$	
	400	$4.69 \times 10^{-4}$	$1.60 \times 10^{-2}$	$2.90 \times 10^{-4}$	
AR-6 U2 6.50-7.00	30	$4.72 \times 10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-3}$	$1.065 \times 10^{-3}$	0.279
	60	$2.06 \times 10^{-3}$	$2.30 \times 10^{-3}$	$5.66 \times 10^{-4}$	
	120	$3.64 \times 10^{-3}$	$3.58 \times 10^{-2}$	$4.66 \times 10^{-4}$	
	240	$4.73 \times 10^{-3}$	$4.61 \times 10^{-2}$	$2.18 \times 10^{-4}$	
	440	$6.75 \times 10^{-3}$	$4.94 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-4}$	
	960	$7.88 \times 10^{-3}$	$4.43 \times 10^{-3}$	$7.43 \times 10^{-3}$	
AR-6 U3 8.25-9.25	25	$8.21 \times 10^{-4}$	$2.27 \times 10^{-2}$	$1.178 \times 10^{-3}$	1.66
	50	$1.64 \times 10^{-3}$	$8.20 \times 10^{-2}$	$9.89 \times 10^{-4}$	
	100	$5.05 \times 10^{-4}$	$2.02 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-3}$	
	200	$8.21 \times 10^{-4}$	$1.98 \times 10^{-1}$	$8.25 \times 10^{-4}$	
	400	$4.83 \times 10^{-4}$	$4.23 \times 10^{-4}$	$8.21 \times 10^{-4}$	
	800	$5.66 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-1}$	$2.21 \times 10^{-4}$	
AR-12 U1 6.50-7.00	25	$9.66 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-3}$	$6.55 \times 10^{-3}$	0.904
	50	$4.10 \times 10^{-4}$	$6.35 \times 10^{-3}$	$1.098 \times 10^{-3}$	
	100	$1.64 \times 10^{-4}$	$9.88 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-3}$	
	200	$2.74 \times 10^{-4}$	$1.59 \times 10^{-2}$	$7.92 \times 10^{-4}$	
	400	$3.65 \times 10^{-4}$	$1.27 \times 10^{-2}$	$3.82 \times 10^{-4}$	
	800	$2.35 \times 10^{-4}$	$8.89 \times 10^{-3}$	$1.86 \times 10^{-4}$	
AR-13 U1 6.80-7.00	25	$4.10 \times 10^{-3}$	$9.66 \times 10^{-4}$	$131 \times 10^{-3}$	0.270
	50	$5.47 \times 10^{-4}$	$4.10 \times 10^{-4}$	$8.09 \times 10^{-4}$	
	100	$1.43 \times 10^{-3}$	$1.64 \times 10^{-4}$	$5.72 \times 10^{-4}$	
	200	$2.35 \times 10^{-3}$	$2.74 \times 10^{-4}$	$3.61 \times 10^{-4}$	
	400	$1.93 \times 10^{-3}$	$3.65 \times 10^{-4}$	$1.86 \times 10^{-4}$	
	800	$2.98 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-4}$	$9.55 \times 10^{-5}$	
AR-13 U2 8.75-9.25	25	$8.20 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-2}$	$1.57 \times 10^{-3}$	0.814
	50	$2.19 \times 10^{-3}$	$6.00 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-3}$	
	100	$2.52 \times 10^{-3}$	$1.08 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-3}$	
	200	$3.65 \times 10^{-4}$	$1.27 \times 10^{-2}$	$6.68 \times 10^{-4}$	

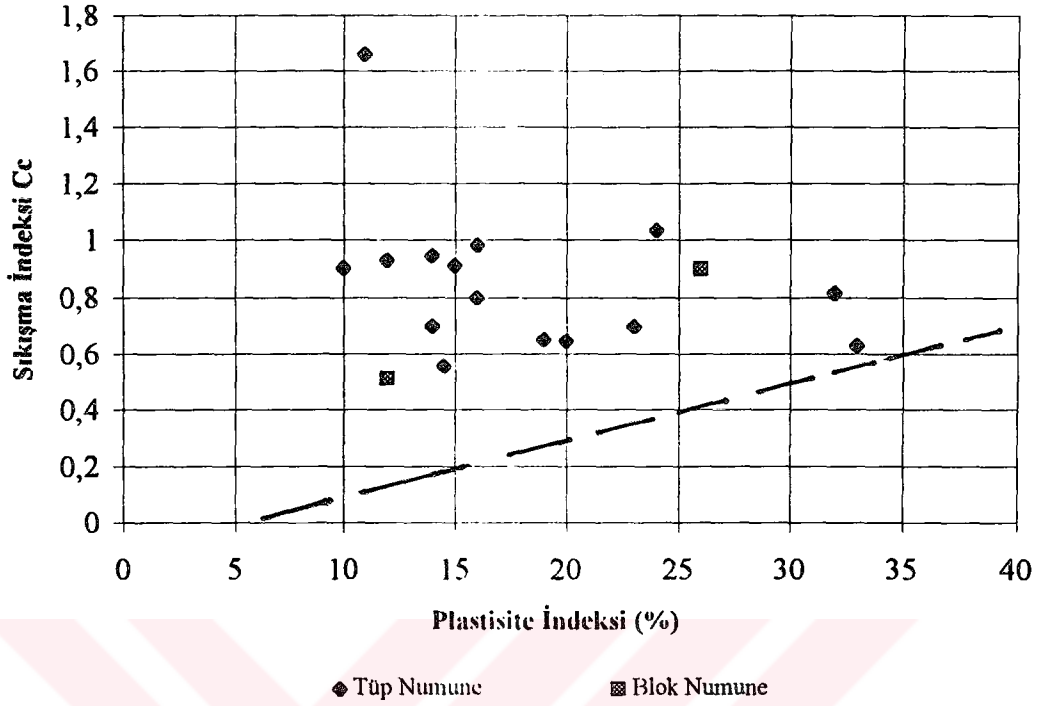
Sondaj No Numune No Derinlik (m)	Yük Kademesi (kPa)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$C_\alpha$	$m_v$ (kPa)	$c_c$
	400	$4.10 \times 10^{-4}$	$2.79 \times 10^{-2}$	$3.23 \times 10^{-1}$	
	800	$4.21 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.52 \times 10^{-1}$	
AR-14 U1 3.30-3.90	30	$2.06 \times 10^{-3}$	$5.77 \times 10^{-3}$	$2.06 \times 10^{-3}$	0.628
	60	$2.15 \times 10^{-3}$	$4.23 \times 10^{-3}$	$1.50 \times 10^{-3}$	
	120	$1.18 \times 10^{-3}$	$1.088 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^{-3}$	
	240	$3.38 \times 10^{-3}$	$1.27 \times 10^{-2}$	$5.11 \times 10^{-4}$	
	480	$4.73 \times 10^{-3}$	$9.88 \times 10^{-3}$	$3.09 \times 10^{-4}$	
	960	$3.94 \times 10^{-3}$	$8.89 \times 10^{-3}$	$1.12 \times 10^{-4}$	
AR-14 U3 8.90-9.40	30	$3.78 \times 10^{-3}$	$2.027 \times 10^{-3}$	$7.91 \times 10^{-4}$	0.947
	60	$4.66 \times 10^{-4}$	$8.47 \times 10^{-4}$	$8.31 \times 10^{-4}$	
	120	$3.152 \times 10^{-4}$	$9.77 \times 10^{-3}$	$9.97 \times 10^{-4}$	
	240	$2.364 \times 10^{-3}$	$5.64 \times 10^{-3}$	$8.30 \times 10^{-4}$	
	480	$7.88 \times 10^{-4}$	$8.47 \times 10^{-3}$	$3.04 \times 10^{-4}$	
	960	$1.182 \times 10^{-3}$	$7.82 \times 10^{-3}$	$1.73 \times 10^{-4}$	
AR-14 U5 14.25-14.75	25	$7.58 \times 10^{-4}$	$3.10 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-3}$	0.696
	50	$3.64 \times 10^{-4}$	$2.13 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-3}$	
	100	$4.69 \times 10^{-4}$	$2.68 \times 10^{-3}$	$8.34 \times 10^{-4}$	
	200	$6.56 \times 10^{-4}$	$7.90 \times 10^{-3}$	$5.89 \times 10^{-4}$	
	400	$5.47 \times 10^{-4}$	$6.35 \times 10^{-3}$	$3.61 \times 10^{-4}$	
	800	$4.10 \times 10^{-4}$	$7.05 \times 10^{-3}$	$2.07 \times 10^{-4}$	
AR-17 U2 6.25-6.75	25	$2.52 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.78 \times 10^{-3}$	0.931
	50	$2.188 \times 10^{-4}$	$4.6 \times 10^{-2}$	$1.48 \times 10^{-3}$	
	100	$2.052 \times 10^{-4}$	$6.4 \times 10^{-2}$	$1.33 \times 10^{-3}$	
	200	$2.62 \times 10^{-4}$	$7.3 \times 10^{-2}$	$8.04 \times 10^{-4}$	
	400	$3.28 \times 10^{-4}$	$9.2 \times 10^{-2}$	$4.55 \times 10^{-4}$	
	800	$2.73 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-2}$	$2.58 \times 10^{-4}$	
AR-17 U4 11.50-12.00	25	$4.69 \times 10^{-4}$	$4.6 \times 10^{-2}$	$1.36 \times 10^{-3}$	0.557
	50	$1.98 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-2}$	$9.31 \times 10^{-4}$	
	100	$3.86 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-2}$	$8.16 \times 10^{-4}$	
	200	$2.62 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-2}$	$4.62 \times 10^{-4}$	
	400	$2.73 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$3.87 \times 10^{-4}$	
	800	$3.64 \times 10^{-4}$	$4.3 \times 10^{-2}$	$1.86 \times 10^{-4}$	
AR-17 U6 18.00-18.50	25	$4.10 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-3}$	$7.20 \times 10^{-4}$	0.111
	50	$1.21 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$7.49 \times 10^{-4}$	
	100	$6.56 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-2}$	$7.94 \times 10^{-4}$	
	200	$3.64 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-2}$	$6.34 \times 10^{-4}$	
	400	$3.28 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-2}$	$4.33 \times 10^{-4}$	
	800	$2.52 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-2}$	$2.42 \times 10^{-4}$	
AR-20 U1 9.00-9.50	30	$3.15 \times 10^{-3}$	$6.68 \times 10^{-3}$	$9.40 \times 10^{-4}$	0.652
	60	$4.15 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-2}$	$1.16 \times 10^{-3}$	
	120	$3.37 \times 10^{-4}$	$5.20 \times 10^{-3}$	$8.13 \times 10^{-4}$	
	240	$1.59 \times 10^{-4}$	$6.30 \times 10^{-3}$	$4.23 \times 10^{-4}$	
	480	$3.68 \times 10^{-4}$	$7.85 \times 10^{-3}$	$2.65 \times 10^{-4}$	
	960	$2.51 \times 10^{-4}$	$2.83 \times 10^{-2}$	$1.31 \times 10^{-4}$	
AR-20 U2	25	$3.64 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-3}$	$5.58 \times 10^{-4}$	0.648
	50	$6.98 \times 10^{-4}$	$2.76 \times 10^{-2}$	$7.24 \times 10^{-4}$	
	100	$4.69 \times 10^{-4}$	$5.84 \times 10^{-3}$	$7.90 \times 10^{-3}$	
	200	$3.28 \times 10^{-4}$	$4.20 \times 10^{-3}$	$6.70 \times 10^{-4}$	

Sondaj No Numune No Derinlik (m)	Yük Kademesi (kPa)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$C_u$	$m_v$ (kPa <sup>-1</sup> )	$c_c$
	400	$2.34 \times 10^{-4}$	$1.38 \times 10^{-3}$	$3.62 \times 10^{-4}$	
	800	$5.66 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-3}$	$1.77 \times 10^{-4}$	
AR-20 U3 14.00-14.50	30	$1.71 \times 10^{-3}$	$4.61 \times 10^{-4}$	$9.65 \times 10^{-4}$	0.288
	60	$3.42 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-3}$	$6.19 \times 10^{-4}$	
	120	$1.71 \times 10^{-4}$	$5.52 \times 10^{-3}$	$6.61 \times 10^{-4}$	
	240	$2.85 \times 10^{-4}$	$7.93 \times 10^{-3}$	$5.15 \times 10^{-4}$	
	480	$2.44 \times 10^{-4}$	$5.44 \times 10^{-3}$	$3.19 \times 10^{-4}$	
	960	$2.13 \times 10^{-4}$	$5.25 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-4}$	
	25	$4.10 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-4}$	$4.96 \times 10^{-4}$	
AR-20 U5 19.00-19.50	50	$1.09 \times 10^{-3}$	$8.53 \times 10^{-3}$	$7.59 \times 10^{-4}$	0.544
	100	$3.28 \times 10^{-4}$	$3.78 \times 10^{-3}$	$8.37 \times 10^{-4}$	
	200	$1.64 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-2}$	$6.39 \times 10^{-4}$	
	400	$1.72 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-4}$	
	800	$1.42 \times 10^{-4}$	$1.55 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-4}$	

Konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma indisi ( $C_c$ ) değerlerinin likit limit ( $w_L$ ) ile değişimi Şekil 6.10 a' da, plastisite indisi ( $I_p$ ) ile değişimi ise Şekil 6.10 b' de gösterilmiştir. Literatürde sıkışma indisinin diğer geoteknik büyüklerle korelasyonuna ilişkin çok sayıda eşitlik vardır. Bunlardan  $w_L$  ve  $I_p$  ile ilgili olan ikisi Bölüm 4'de verilmiştir. Bu eşitlikler 6.10 a ve 6.10 b'de deney sonuçları ile birlikte işaretlenmiş olup Haliç konsolidasyonunda ölçülen değerlerin tahminlerin çok üstünde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.10. a) Sıkışma İndisinin Likit Limit ile Değişimi



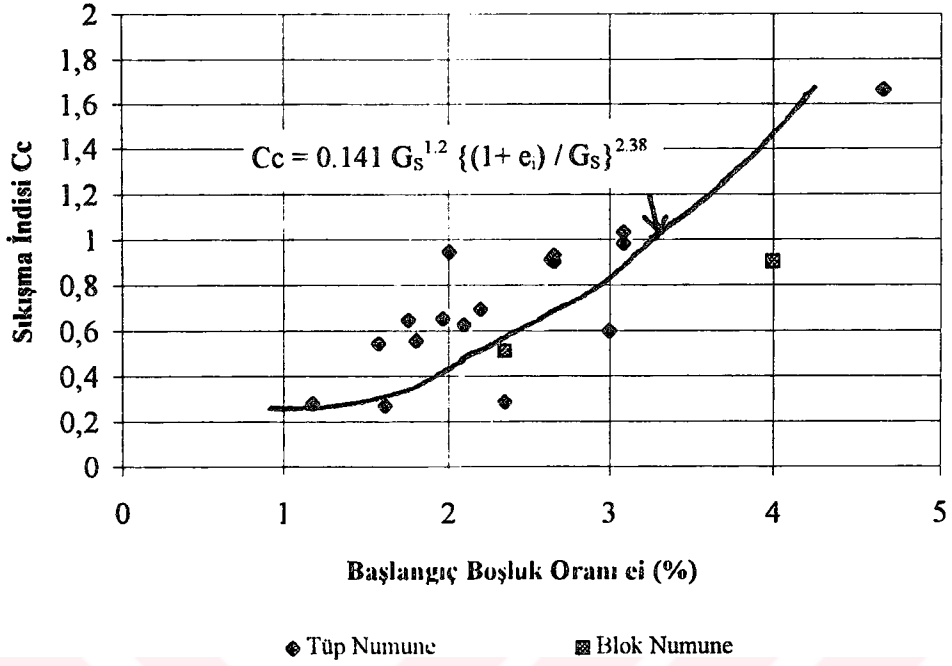
Şekil 6.10. b) Sıkışma İndisinin Plastisite indisi ile Değişimi

Sıkışma İndisinin başlangıç boşluk oranına ( $e_i$ ) ve zemin danelerinin özgül yoğunluğuna bağlı olarak tahmini Rendon Herrero (1983) tarafından verilmektedir. Şekil 6.11 a'da sıkışma indisinin ölçülen değerleri örneklerin başlangıç boşluk oranına karşı işaretlenmiş olup, Rendon Herrero bağıntısının aşağıdaki eğrisi ile birlikte gösterilmektedir.

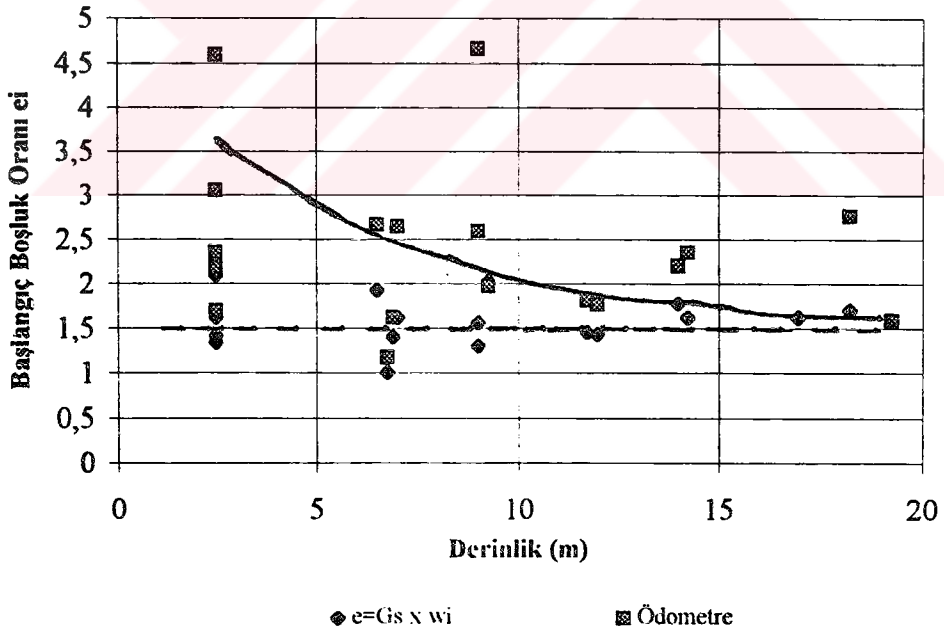
$$c_c = 0.141 \times G_s^{1.2} \times [(1+e_i) / ]^{2.38}$$

Blok örnekler ve tüp örnelerin sonuçlarının bu bağıntıya oldukça iyi uyum sağladığı görülmektedir.

Doğal zeminin boşluk oranının ve buna bağlı olarak sıkışma indisinin derinliğe bağlı olarak nasıl değişeceğini saptamak için örselenmemiş örneklerin ölçülen başlangıç boşluk oranlarının değişimi Şekil 11 b'de işaretlenmiştir. Değerler çok değişken olmakla birlikte zemin yüzünde 1.5, 20 m. derinliklerde 2.5 değerine eşit boşluk oranlarının göz önüne almak uygun olacaktır. Diğer deyişle sıkışma indisi zemin yüzünde 0.70 olup, derinlikle azalarak 0.30 değerine düşüyor kabul adilebilir.



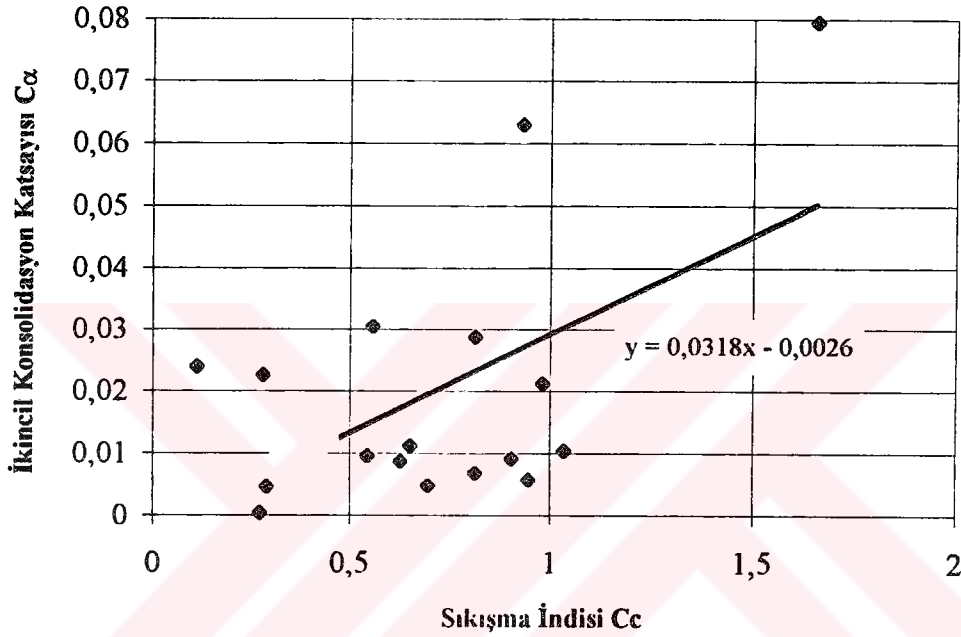
Şekil 11. a) Sıkışma İndisinin Başlangıç Boşluk Oranı ile Değişimi



Şekil 11. b) Derinlik ile Başlangıç Boşluk Oranlarının Değişimi

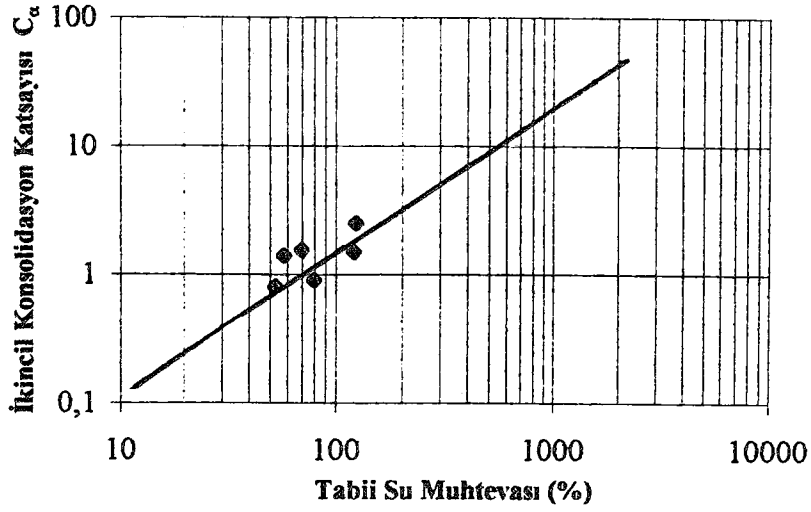
Sıkışabilirlik kuramına göre her zemin için konsolidasyon basıncı ve zamanın tüm kombinasyonlarında sabit bir  $C_\alpha / C_c$  değeri geçerlidir. Örselenmemiş numunelerde

yapılan ödometre deneylerinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen sıkışma indisi  $C_c$  ve ikincil konsolidasyon katsayısı  $C_\alpha$  arasındaki ilişki Şekil 6.12’de verilmektedir. Elde edilen sonuçların doğrusala oldukça yakın olduğu gözlenmektedir. Değerler Mesri ve diğerleri 1973 tarafından organik kökenli zeminler için verilen  $0.05 + 0.01$  değerlerine yakındır.



Şekil 6.12. Ödometre Denev Sonuçlarından Elde Edilen  $C_\alpha / C_c$

Tabii su muhtevası ve ikincil konsolidasyon katsayısı  $C_\alpha$  arasındaki ilişki Mesri (1973) tarafından değişik örnekler üzerinde incelenmiş ve iki parametre arasında doğrusal bir ilişki olduğu saptanmıştır. Sulu çamur konsolidometre aygıtında değişik basınç kademelerinde hazırlanan blok numunelerden hesaplanan  $C_\alpha$  lara karşılık gelen su muhtevaları arasındaki ilişki Şekil 6.13’de verilmektedir.



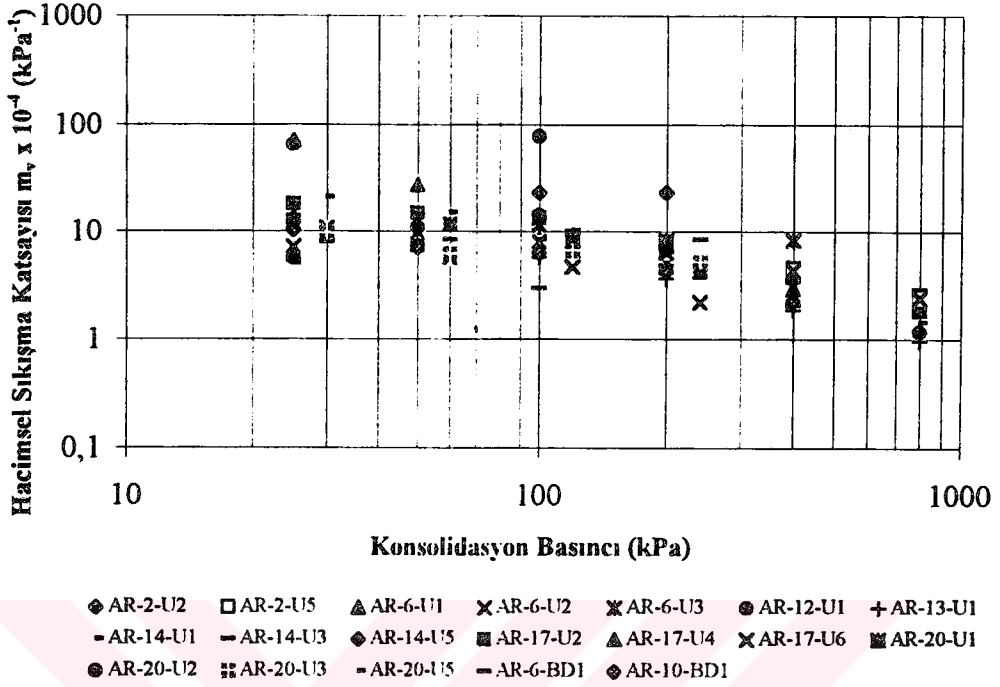
Şekil 6.13. Tabii Su Muhtevası ve İkincil Konsolidasyon Katsayısı Arasındaki İlişki

### 6.3.2. Hacimsel Sıkışma Katsayısı ( $m_v$ )

Konsolidasyon oturmasının büyüklüğünün tahmin edilmesinde ikinci yolun hacimsel sıkışma katsayısına bağlı bir eşitlik kullanmak olduğu bilinmektedir. Tüp örneklerden yapılan ödometre deneyleri ile çamur konsolidasyonu aşamalarının değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar toplu halde Şekil 6.14'de verilmektedir. Görüldüğü gibi konsolidasyon basıncı ( $\sigma_v'$ ) arttıkça beklendiği üzere hacimsel sıkışma katsayısında ( $m_v$ ) azalma görülmektedir. Buna göre değişik konsolidasyon basıncı aralıkları için

$\sigma_v'$ (kPa)	$m_v$ (kPa) <sup>-1</sup>
25-100	$8 \times 10^{-5}$
100-200	$6 \times 10^{-5}$
200-400	$3 \times 10^{-5}$
400-800	$1.7 \times 10^{-5}$

değerleri kabul edilebilecektir.



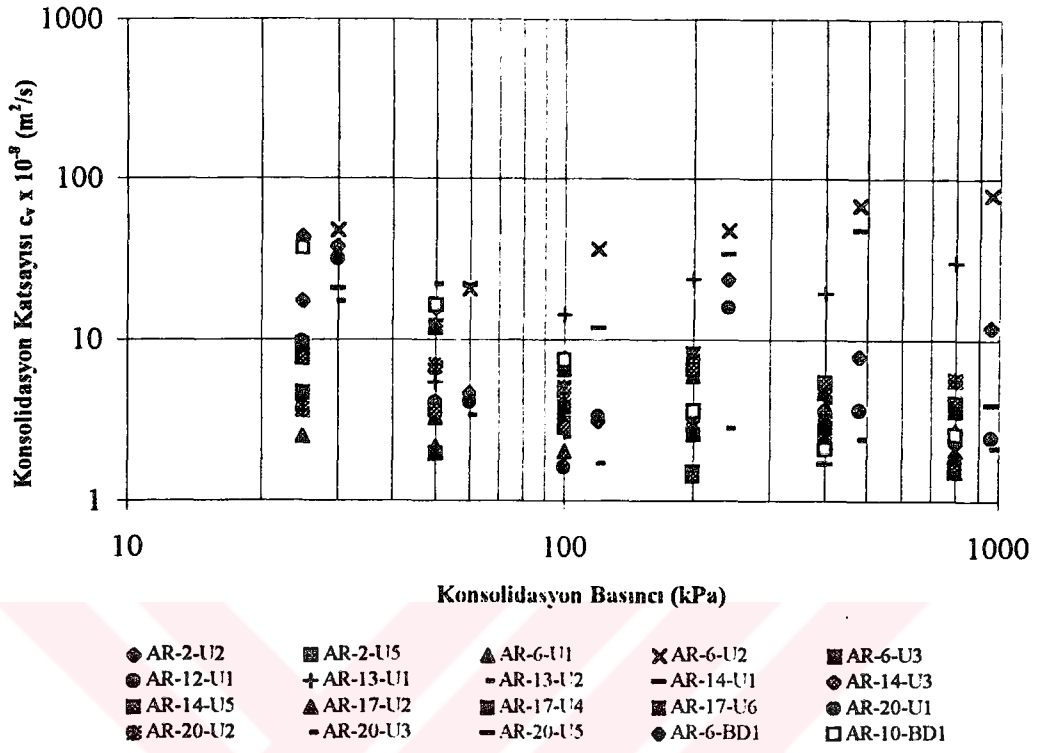
Şekil 6.14. Hacimsel Sıkışma Katsayısının Konsolidasyon Basıncı ile Değişimi

### 6.3.3. Konsolidasyon Katsayısı

Tüp ve blok örnekler ödometre deneyleri ile çamur konsolidasyonu deneylerinin konsolidasyon basıncı ile değişimi Şekil 6.15’de verilmektedir. Deney sonuçları yine çok büyük aralıklarla değişmekle birlikte, konsolidasyon katsayısında konsolidasyon basıncı ile birlikte azaldığı açıktır. Buna göre değişik konsolidasyon basıncı aralıkları için

$\sigma_v'$ (kPa)	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)
25-50	$9 \times 10^{-4}$
50-100	$4.5 \times 10^{-4}$
100-200	$3 \times 10^{-4}$
200-400	$2.5 \times 10^{-4}$
400-800	$1.5 \times 10^{-4}$

değerlerinin alınabileceği gözlenmektedir



Şekil 6.15. Konsolidasyon Katsayısının Konsolidasyon Basıncı ile Değişimi

## BÖLÜM 7

### 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Haliç'te çökelen çökellerin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Bu çökellerden deniz tabanından 25 m. derinliğe kadar yer alan zeminlerin endeks özellikleri ile kayma mukavemeti ve konsolidasyon özellikleri belirlenmiştir. Haliç'teki farklı bölgeleri temsil ettiği düşünülen belirli sayıda örnek üzerinde sulu çamur konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonunda hazırlanmış konsolide blok zemin numuneleri üzerinde ise kayma mukavemeti ve konsolidasyon deneyleri yapılarak, taranmış çamurun karada depolanması durumunda konsolide olduktan sonra arazide beklenilebilecek davranışı ile ilgili geoteknik parametreler belirlenmiştir.

Haliç Kilinin Geoteknik Parametrelerinin Belirlenmesi adı altında yapılan bu tez çalışması Haliç İslah Projesi ardından yapılmış ve bu projede kullanılmayan numuneler üzerinde deneyler yapılarak geoteknik parametreler bulunmuştur. Her iki çalışma sonucu elde edilen parametrelerin birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

#### 7.1. Endeks Özellikleri

Arazide etüdüleri sırasında alınan zemin örnekleri üzerinde endeks özelliklerini belirlemek için yapılan deney sonuçları Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre zemin cinsi toplu olarak Tablo 6.1'de sunulmuştur. Arazi sondajlarından alınan örselenmemiş tüp örneklerde mukavemet veya sıkışabilirlikle ilgili deney yapılanlarında deneyden önce tabii birim hacim ağırlıkları geniş bir ağırlıkta dağılmakta olup

$$\gamma_1 = 12.0 - 17.55 \text{ kN/m}^3$$

mertebelerindedir. Daha derindeki değerlerin sayısı daha az olmakla birlikte birim hacim ağırlıkları daha dar bir bant içerisinde dağılmaktadır. Eldeki tüm değerler birlikte gözönüne alındığında ortalama bir değer olarak

$$\gamma_{iav} = 14.94 \text{ kN/m}^3$$

alınabileceği anlaşılmaktadır.

Laboratuvar deneyleri yapılan örneklerde saptanan deney başı su muhtevasının derinliğe göre dağılımı oldukça geniş bir aralıkta olup

$$w_i = \%40-83$$

arasındadır.

Örselenmemiş ve örselenmiş örnekler üzerinde yapılan likit limit ve plastik limit değerleri çok büyük bir aralıkta değişmektedir.

$$w_L = \%26-99$$

$$w_p = \%12-49$$

İnce dane oranlarının ve organik madde içeriğinin çok değişken olduğu bu tür çökellerde değişim aralığının böylesine büyük olması doğal olup, ortalama olarak

$$w_{Lav} = \%55$$

$$w_{Pav} = \%35$$

değerleri gözönüne alınabilir.

## 7.2. Mukavemet Parametreleri

Üç eksenli deneylerin yapıldığı tüpler üzerinde laboratuvarda gerçekleştirilen veyn deneylerinden elde edilen drenajsız kayma mukavemetlerinin derinlikle (z - metre) değişimi cinsinden

$$S_U = 6 + 1.1z \text{ (kPa)}$$

ifade edilebileceği anlaşılmaktadır.

Drenajsız kayma mukavemetinin efektif düşey gerilmeye ( $\sigma'_{vo}$ ) ve önkonsolidasyon basıncına ( $\sigma'_p$ ) göre normalize edilmiş değerlerinin aşağıdaki gibi olduğu gözlenmiştir.

$$(c_u / \sigma'_{vo}) = 0.25$$

$$(c_u / \sigma'_p) = 0.27$$

Çamurun taranması sonucu ve daha sonra Haliç kıyısında depolanması sonucu meydana gelebilecek stabilite sorunlarını incelemek üzere kullanılan drenajsız kayma mukavemetinin derinlik ile değişimi, laboratuvar ve arazi deneyleri birlikte değerlendirilerek

$$S_U = 6 + 0.7z \text{ (kPa)}$$

eşitliği ile hesaplanmış, efektif parametreler ise  $c' = 0$  ve  $\phi' = 19^\circ$  olarak saptanmıştır.

Mesri (1975)  $c_u / \sigma'_p$  için sabit 0.22 değerini bulmuşken, Jardine ve Hight (1987) plastisite indisinin 10 değeri için 0.19, 80 değeri için 0.28'e doğru yükselen değerlerini ölçmüşlerdir. Ladd (1991)'e göre bu oranın yüksek değerleri organik killere karşılık gelmektedir. Bu nedenle  $(c_u / \sigma'_p) = 0.27$  eşitliği ile ifade edilen değerlerin ancak bulgularla uyum içerisinde olduğu söylenebilir.

Efektif gerilmeler cinsinden sürtünme açısı ( $\phi'$ ) için örselenmemiş tüp örnekler ve çamur konsolidasyonundan elde edilmiş bloklarda hazırlanan örnekler üzerinde bir dizi boşluk suyu basıncı ölçümlü konsolidasyonlu-drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Doğal ve blok örneklerde içsel sürtünme açısında plastisite indisinin artan değerleri için azalma olduğu açık olup, bu bulgu başka araştırmacıların, örneğin Gibson (1953), gözlemleri ile uyumludur.

### 7.3. Sıkışabilirlik Parametreleri

Yumuşak çökellerin yük altında yapacağı oturmanın miktarı ve bu oturmanın ne kadar sürede gerçekleşeceğini tahmini, konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla gerek örselenmemiş tüp örnekler, gerek çamur konsolidasyonu ile hazırlanmış blok örnekler üzerinde bir seri konsolidasyon (ödometre) gerçekleştirilmiştir.

Konsolidasyon deneylerinden elde edilen Haliç taban çamurunun sıkışabilirlik parametreleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Sıkışma indisinin başlangıç boşluk oranına ( $e_i$ ) ve zemin danelerinin özgül yoğunluğuna ( $G_s$ ) bağlı olarak tahmini Rendon - Herrero (1983) tarafından verilmektedir. Şekil 6.11’de verilen sıkışma indisinin ölçülen değerleri örneklerin başlangıç boşluk oranlarına karşı işaretlenmiş olup, Rendon - Herrero’nun aşağıdaki bağıntısı ile uyum sağladığı gözlenmiştir.

$$C_c = 0.141 \times G_s^{1.2} \times [ ( 1 + e_i ) / G_s ]^{2.38}$$

Konsolidasyon oturmasının büyüklüğünün tahmin edilmesinde ikinci yolun hacimsel sıkışma katsayısına bağlı bir eşitlik kullanmak olduğu bilinmektedir. Konsolidasyon basıncı ( $\sigma'_v$ ) arttıkça hacimsel sıkışma katsayısında ( $m_v$ ) azalmakta olduğu gözlenmiştir.

Tüp ve blok örnekler üzerindeki ödometre deneyleri ile çamur konsolidasyonu deneylerinden elde olunan konsolidasyon katsayısı değerlerinin konsolidasyon basıncı ile değişimi Şekil 6.13’de verilmekte ve konsolidasyon katsayısının konsolidasyon basıncı ile azaldığı görülmektedir.

### 7.4. Uygulanması Düşünülen Uzaklaştırma Alternatifleri

Haliç’ten taranacak taban çamurunun en ekonomik uygulanabilir ve çevreye zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırılması amaçlanmaktadır. Taranacak taban çamurunun

uzaklaştırılmasında taranacak çamurun hacmi, deşarj hızı, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi gibi adımların izlenmesi gerekmektedir.

Değişik derinliklerden alınmış numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarından elde edilen parametreler doğrultusunda taranacak taban çamurunun uzaklaştırılmasına yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur.

1- Denizde uzaklaştırma (Taranan sulu çamurun dubalar veya borular ile taşınması ve denizde boşaltılması)

- a) Haliç'te su derinliğinin yeterli olduğu yerlere boşaltma
- b) Marmara Denizi'nde, deniz tabanında depolama

2- Karadan Uzaklaştırma

a) Haliç kıyı şeridi sınırları içinde depolama ile park ve rekreasyon alanları oluşturma

b) Kemerburgaz yöresinde eski kömür ocakları çukurlarında depolama veya mevcut sahalarının ıslahı için kullanma

c) Katı atık depolama sahalarına taşıma ve buralarda depolama veya mevcut sahaların ıslahı için kullanma

d) Eski kömür ocakları sahalarına ve katı atık depolama sahalarına uzaklaştırma için nakliye maliyetlerini azaltma açısından taranacak sulu çamurun kimyasal veya fiziksel işlemlere tabi tutularak katılaştırılması ve karadan taşınması.

## KAYNAKLAR

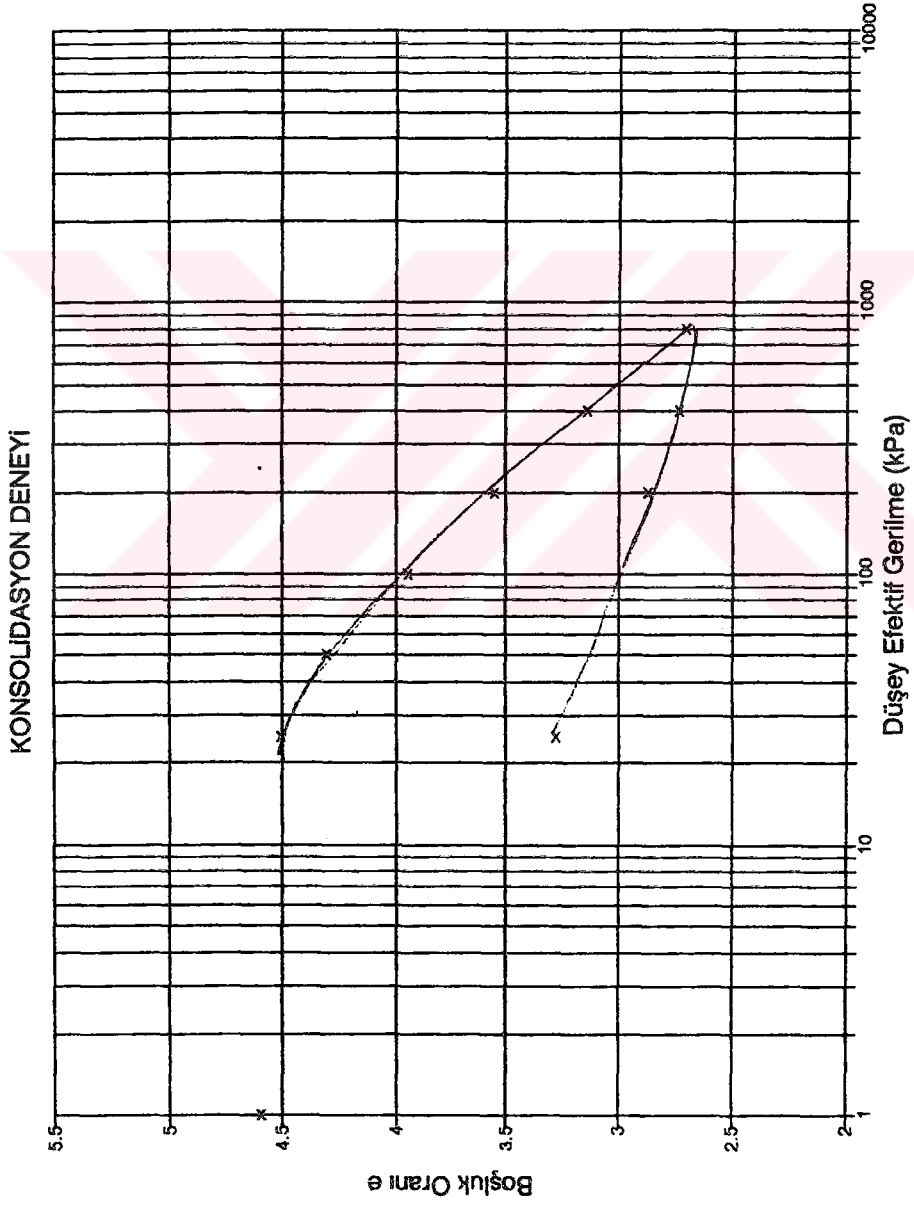
1. Bjerrum, L. (1972). " Embankments on Soft Ground ", State-of-Art Report, Proc. ASCE Spec. Conf. on Performance of Earth and Earth- Supports Structures, Lafayette, Vol. II, pp. 1-54.
2. Bjerrum, L. (1973), "Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clay and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansive and Others)", Proc. 8th I.C: S.M.F.E. Moscow, Vol. 3, 111-159.
3. DAS, B.M. (1990). " Principles of Geotechnical Enginnering " Second Edition, PWS Publishing Company, Boston.
4. DURGUNOĞLU, T., (1978) : " Geotechnical Evaluations for the İstanbul's Golden Horn ", Boğaziçi Üniversitesi Dergisi, No.6, s 37-56.
5. Holtz, R. D., Kovacs, W.D.(1981). " An Introduction to Geotechnical E ngineering" Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NewJersey
6. Jardine, R. J and Hight, D.W., (1987), " The Behaviour and Analysis of Embankments on Soft Clay ", Bull. of the Public Works Research Center, Athens 159-244.
7. KUMBASAR, V., ve ÖZAYDIN, İ.K. , (1985) : " Consolidation Characteristics of Polluted Sea Bottom Sediments " , Proceedings of the Eleventh Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. , San Francisco, Cilt 3, s. 1159-1162.
8. MADEN, S. (1975) : " Haliç Köprüsü'nün Bulunduğu Yerde Haliç'in Geoteknik Özellikleri ", Haliç Sempozyumu, İsyanbul Teknik Üniversitesi, s. 133-138.
9. MESRİ, G., (1975), " Discussion on ' New Design Procedures for Stability of Soft Clays' ", ASCE Journal of Geotechnical Eng. , Vol 101 No. GT4, 409-412.

10. ORHON, D., ÖZAYDIN, K., ve TÜNAY, O., (1978) : “ Haliç’te Dipsel Çamur Kirliliği ve Uzaklaştırılması Sorunu ”, Teknik Rapor, TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu Proje No. 439.
11. ÖZAYDIN, I. K. (1989). Zemin Mekaniği, Meva Matbaacılık ve Yayıncılık Ltd. Sti.
12. ÖZAYDIN, K., YILDIRIM, M., VE ERGUVANLI, A., (1991) : “İstanbul Boğazı Güneyi ve Haliç’ in Jeolojik Oluşumu ve Geoteknik Yapısı Üzerine Düşünceler ”, Zemin Mühendisliği, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi Bülteni, Sayı 2, s. 13-26.
13. ÖZAYDIN, K., YILDIRIM, S., ve YILDIRIM, M., (1995a) : “ Haliç Islah Projesi-Fizibilite Raporu : Birinci Geoteknik Ara Raporu ”, Teknik Rapor ”, Yıldız Teknik Üniversitesi.
14. ÖZAYDIN, K., YILDIRIM, S., YILDIRIM, M., ve AKGÜNER, C., (1995b) : “Haliç Islah Projesi- Fizibilite Raporu : İkinci Geoteknik Ara Rapor ”, Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.
15. ÖZAYDIN, K. ve YILDIRIM, Ş., (1995c) : “ Haliç Islah Projesi-Fizibilite Raporu : Üçüncü Geoteknik Ara Rapor ”, Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.
16. ÖZAYDIN, K., YILDIRIM, S., KILIÇ, H. VE AKGÜNER, C., (1995d) : “ Haliç Islah Projesi-Fizibilite Raporu : Dördüncü Geoteknik Ara RAPOR ”, Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.
17. Özaydın , K., YILDIRIM, S., ve YILDIRIM, M., (1995e) : “ Haliç Islah Projesi-Fizibilite Raporu : Nihai (Beşinci) Geoteknik Ara Rapor ”, Teknik Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.

18. PEYNİRCİOĞLU, A.H., (1962) : “ İstanbul Haliç Sahillerinin Geotekniği ”, Teknik Rapor, Türkiye İnşaat Müh. I. Teknik Kongresi, Ankara.
19. PEYNİRCİOĞLU, A. H., (1973) : “ Performance of Very Muds Under Very Light Loads and Consolidation of a Muddy Bottom Under a Wide Sand Fill ”, Proceedings of the Eight Int. Conf. on Soil Mech and Found. Eng., Moscow, cilt 2.2, s. 159-163.
20. SAYAR, C., (1976) : “ Haliç Civarının Jeolojisi ”, Haliç Sorunları Sempozyumu, Boğaziçi Üniversitesi, s. 391-401.
21. Terzaghi, K., and Peck, R. B., (1967), “ Soil Mechanics in Engineering Practice ”, John Wiley, London.
22. YILDIRIM, M., ÖZAYDIN, K., ve ERGUVANLI, A., (1992) : “ İstanbul Boğazı Güneyi ve Haliç'in Jeolojik Yapısı ve Geoteknik Özellikleri ”, TMMOB Jeoloji Müh. Odası Dergisi. Sayı 40, s. 5-14.
23. Wroth, C. P. and Wood, D. M. (1978), “ The Correlation of Index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soil ”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, s. 137-145.

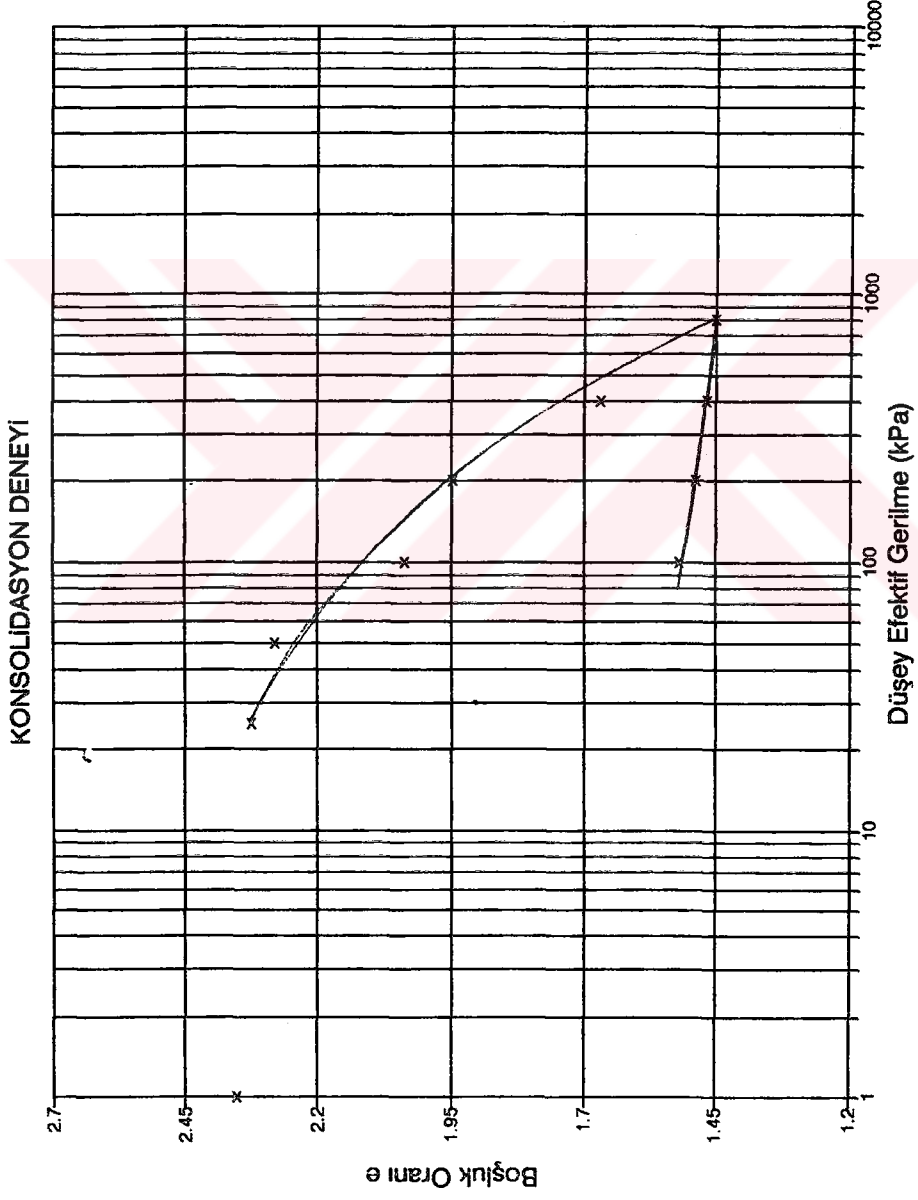
# EKLER





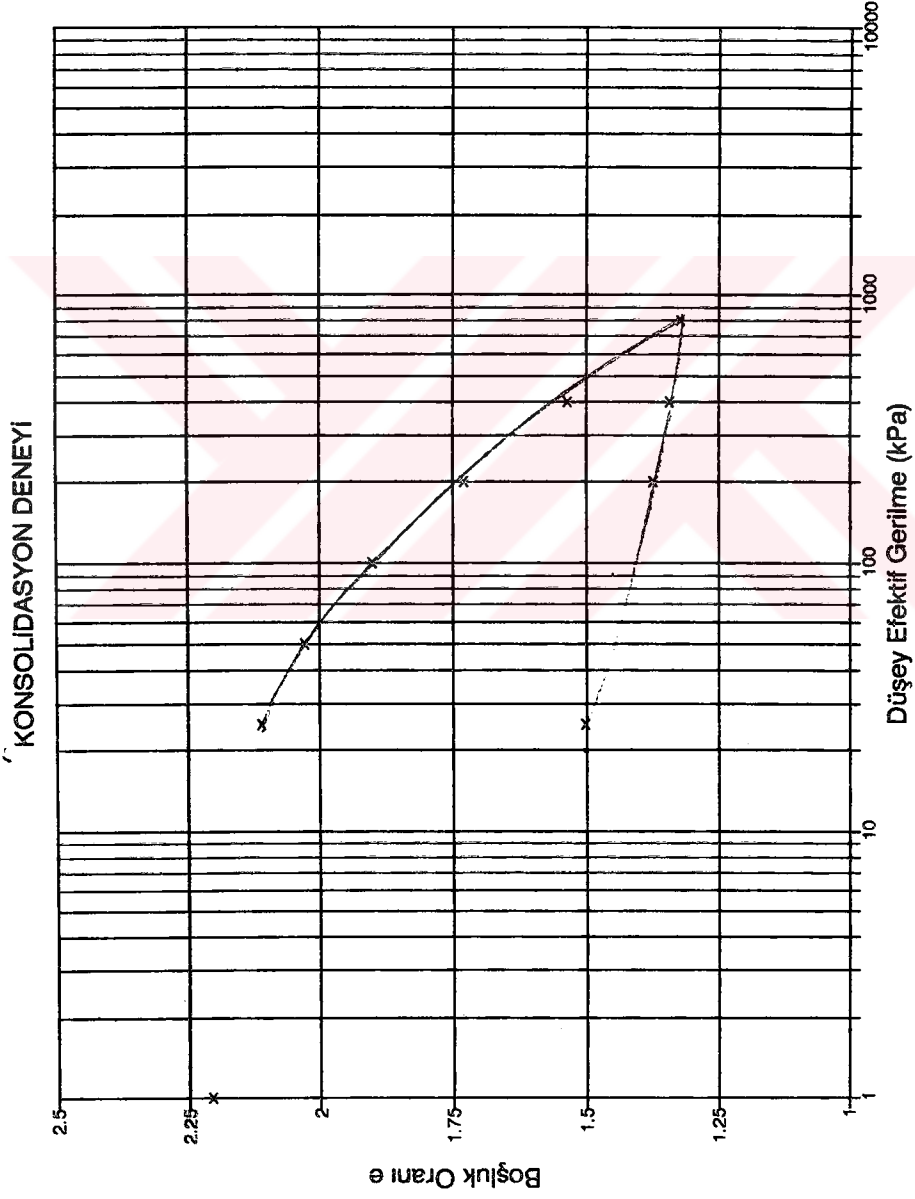
Sondaj No : AR-10  
 Numune No : BD1  
 Derinlik (m) : 0.00-5.00  
 $e_i$  : 4.59  
 $e_r$  : 2.70  
 $w_i$  (%) : 58.5  
 $w_f$  (%) : 50  
 $\gamma_i$  (kN/m<sup>3</sup>) : 15.61  
 $\gamma_f$  (kN/m<sup>3</sup>) : 21.48

Şekil E.1. Blok Numune (AR-10-BD1) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı-Konsolidasyon Basıncı Değişimi



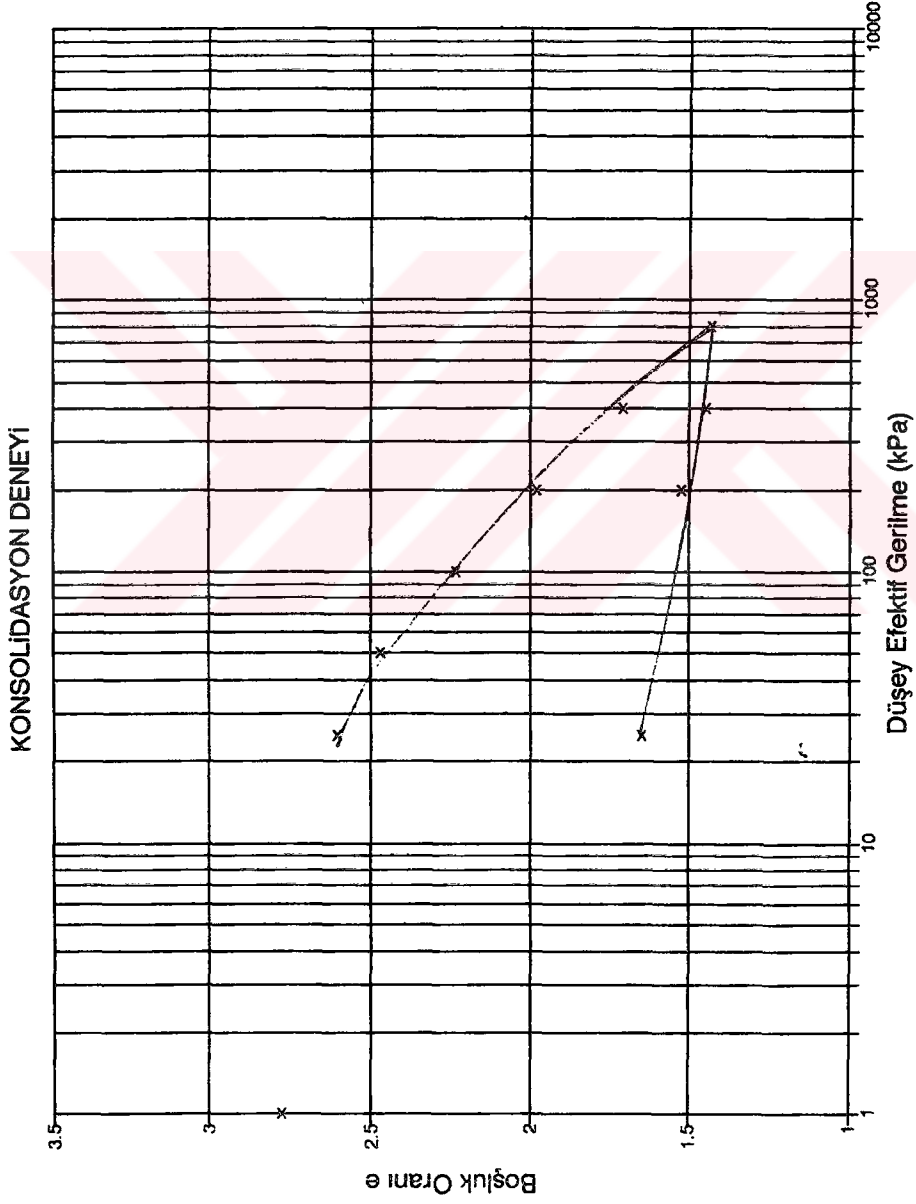
Sondaj No : AR-6  
 Numune No : BDI  
 Derinlik (m) : 0.00-5.00  
 $e_i$  : 2.35  
 $e_f$  : 1.45  
 $w_i$  (%) : 66  
 $w_f$  (%) : 44  
 $\gamma_i$  (kN/m<sup>3</sup>) : 15.23  
 $\gamma_f$  (kN/m<sup>3</sup>) : 18.78

Şekil E.2. Blok Numune (AR-6-BD1) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı-Konsolidasyon Basıncı Değişimi



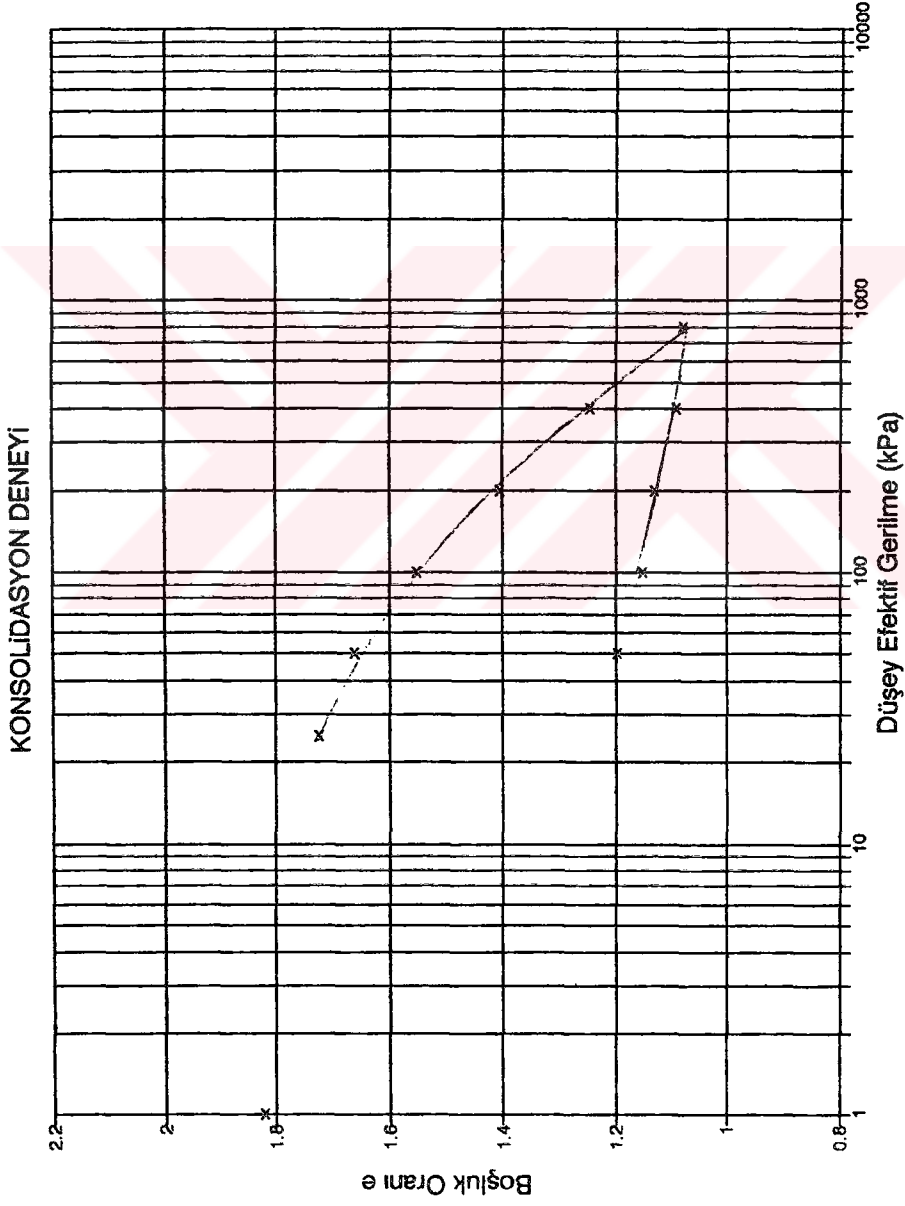
Sondaj No : AR-14  
 Numune No : U5  
 Derinlik (m) : 14.25-14.75  
 $e_i$  : 2.20  
 $e_r$  : 1.32  
 $w_i$  (%) : 65  
 $w_r$  (%) : 35  
 $\gamma_t$  (kN/m<sup>3</sup>) : 16.26  
 $\gamma_r$  (kN/m<sup>3</sup>) : 19.72

Şekil E.3. Tüp Numune (AR-14-U5) Konsolidasyon Deneği Boşluk Oranı-Konsolidasyon Basıncı Değişimi



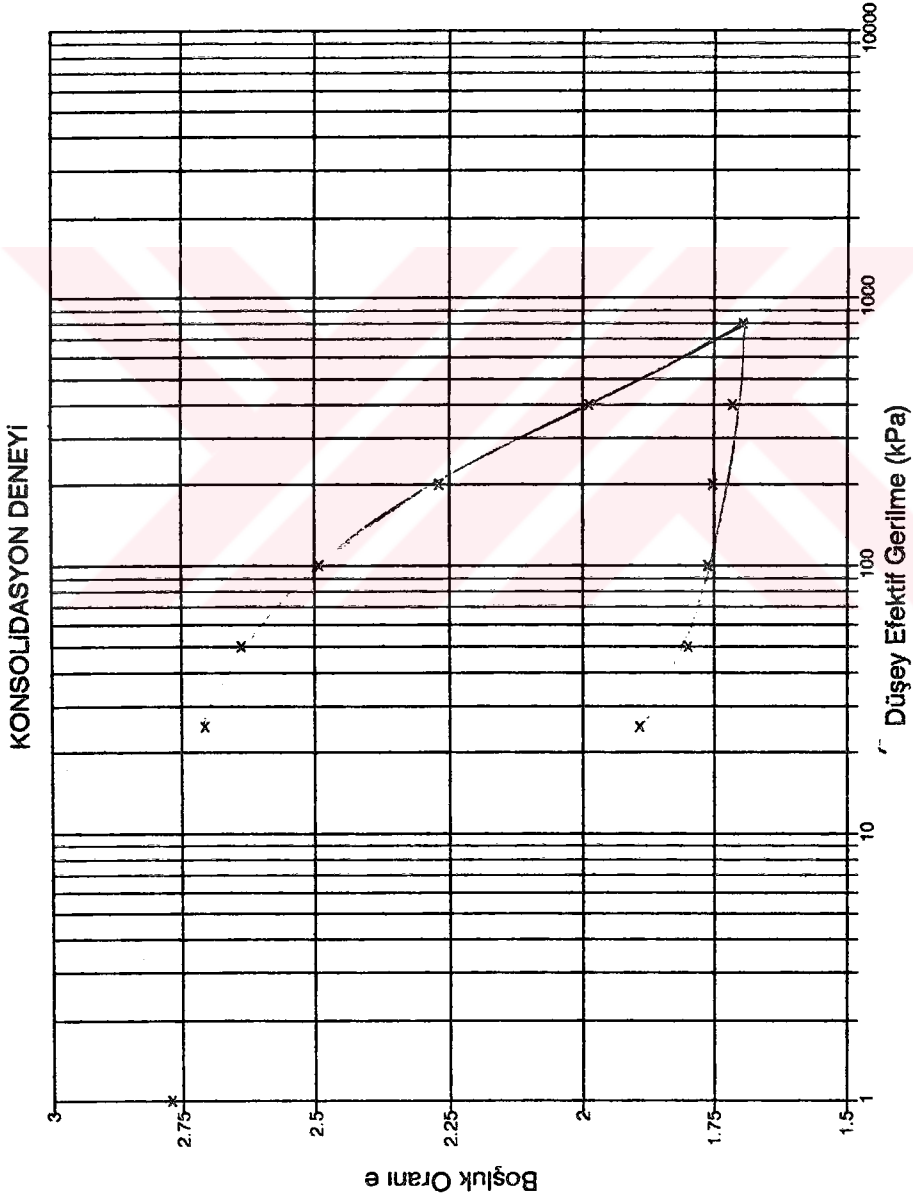
Sondaj No : AR-17  
 Numune No : U2  
 Derinlik (m) : 6.25-6.75  
 $e_i$  : 2.66  
 $e_r$  : 1.42  
 $w_i$  (%) : 77  
 $w_f$  (%) : 42  
 $\gamma_i$  (kN/m<sup>3</sup>) : 15.83  
 $\gamma_f$  (kN/m<sup>3</sup>) : 19.34

Şekil E.4. Tüp Numune (AR-17-U2) Konsolidasyon Deneği Boşluk Oranı-Konsolidasyon Basıncı Değişimi



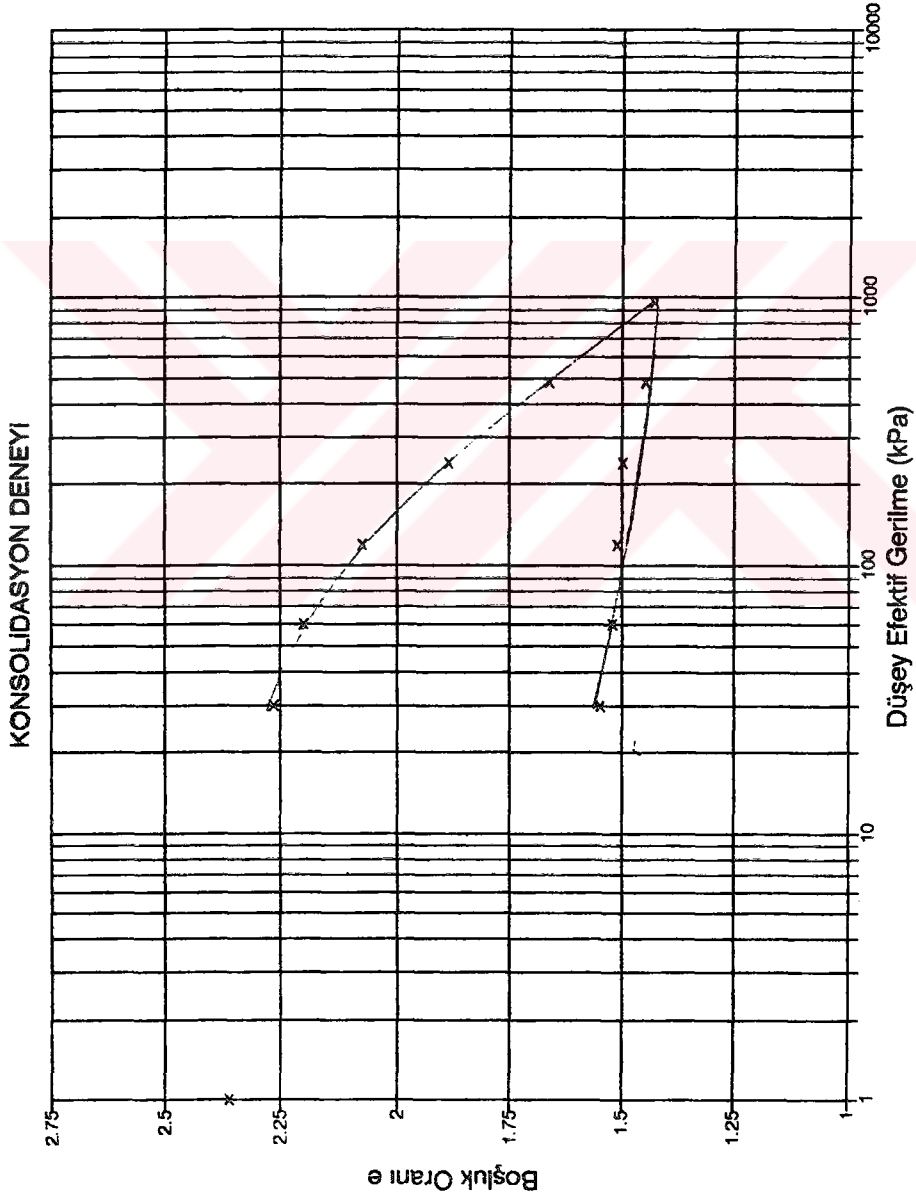
Sondaj No : AR-17  
 Numune No : U4  
 Derinlik (m) : 11.25-12.00  
 $e_i$  : 1.81  
 $e_f$  : 1.07  
 $w_i$  (%) : 53  
 $w_f$  (%) : 34  
 $\gamma_i$  (kN/m<sup>3</sup>) : 16.48  
 $\gamma_f$  (kN/m<sup>3</sup>) : 19.67

Şekil E.5. Tüp Numune (AR-17-U4) Konsolidasyon Deneği Boşluk Oranı-Konsolidasyon Basıncı Değişimi



Sondaj No : AR-17  
 Numune No : U6  
 Derinlik (m) : 18.00-18.50  
 $e_i$  : 2.76  
 $e_r$  : 1.69  
 $w_i$  (%) : 64  
 $w_r$  (%) : 46  
 $\gamma_i$  (kN/m<sup>3</sup>) : 15.61  
 $\gamma_r$  (kN/m<sup>3</sup>) : 19.35

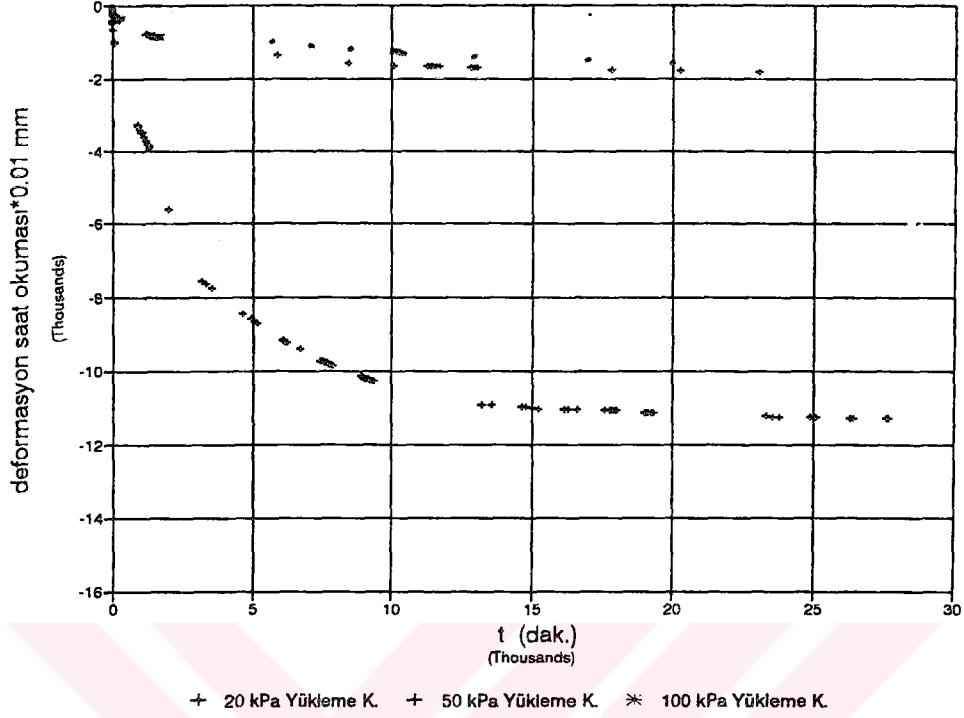
Şekil E.6. Tüp Numune (AR-17-U6) Konsolidasyon Deneji Boşluk Oranı-Konsolidasyon Basıncı Değişimi



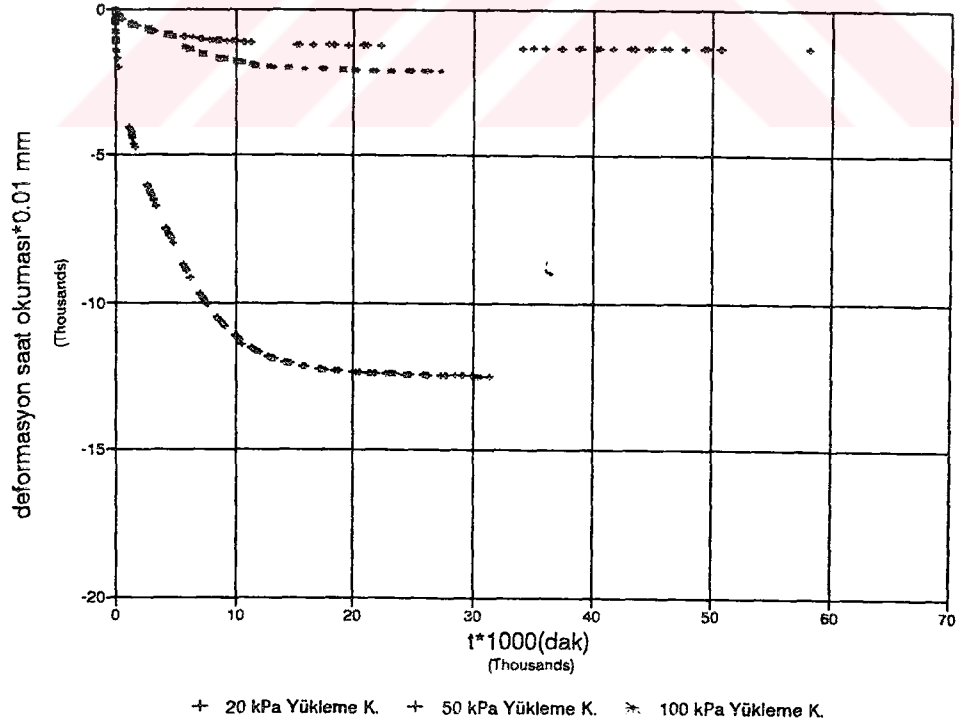
Sondaj No : AR-20  
 Numune No : U3  
 Derinlik (m) : 14.00-14.50  
 $e_i$  : 2.35  
 $e_f$  : 1.42  
 $w_i$  (%) : 49  
 $w_f$  (%) : 39  
 $\gamma_1$  (kN/m<sup>3</sup>) : 16.51  
 $\gamma_f$  (kN/m<sup>3</sup>) : 20.37

Şekil E.7. Tüp Numune (AR-20-U3) Konsolidasyon Deneyi Boşluk Oranı-Konsolidasyon Basıncı Değişimi

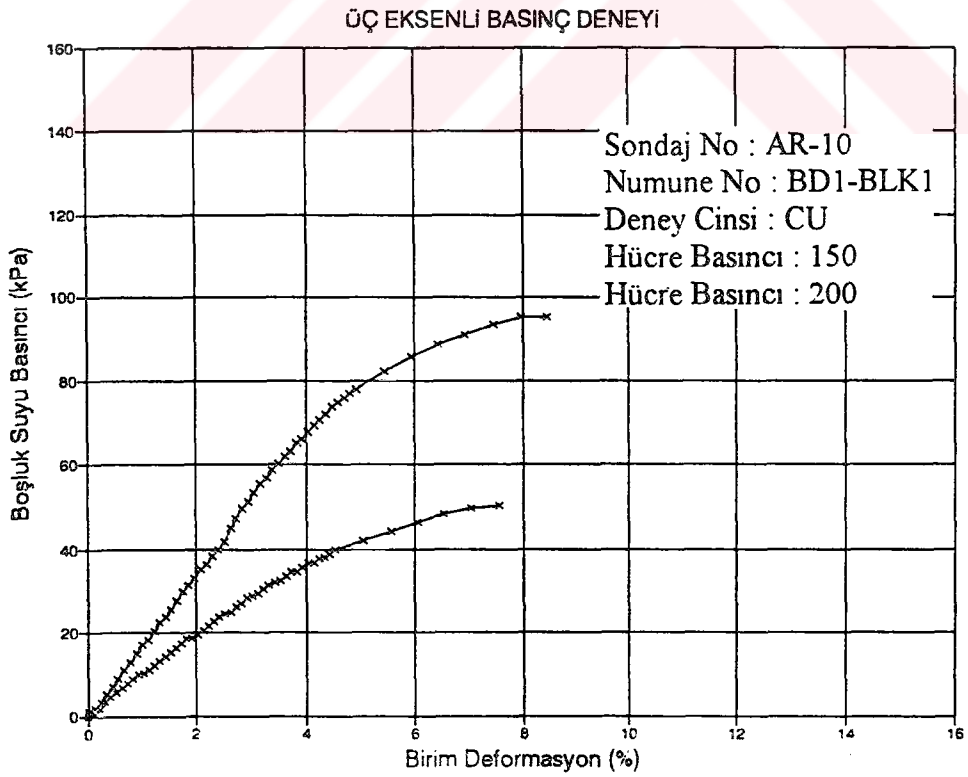
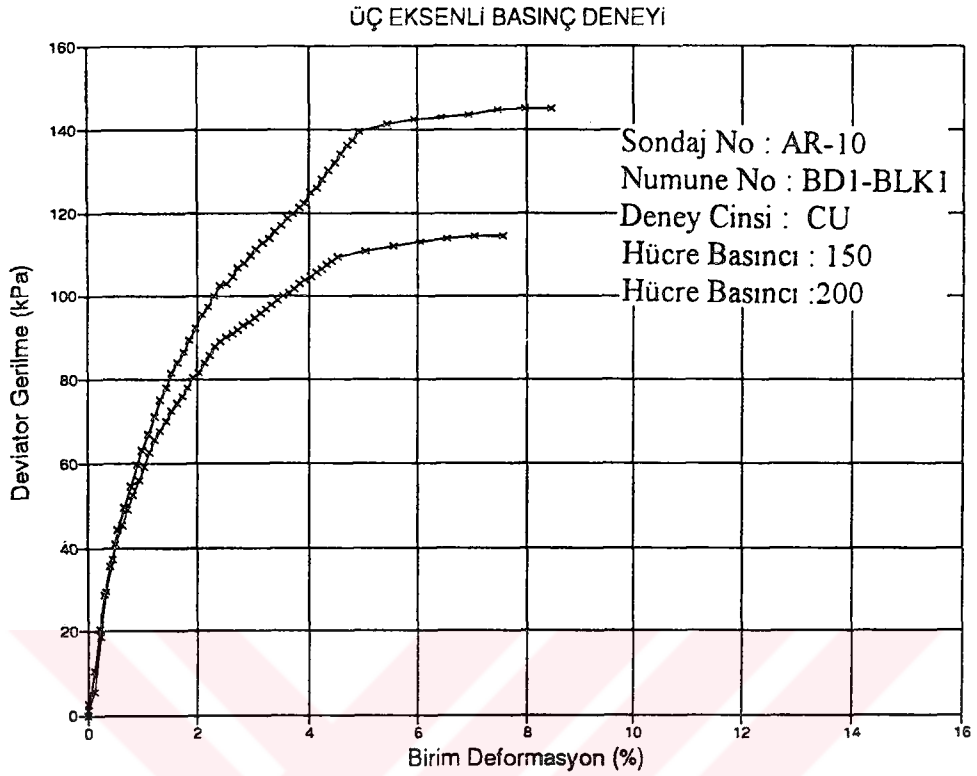
SULU ÇAMUR KONSOLIDASYON DENEYİ  
AR-10-BD1



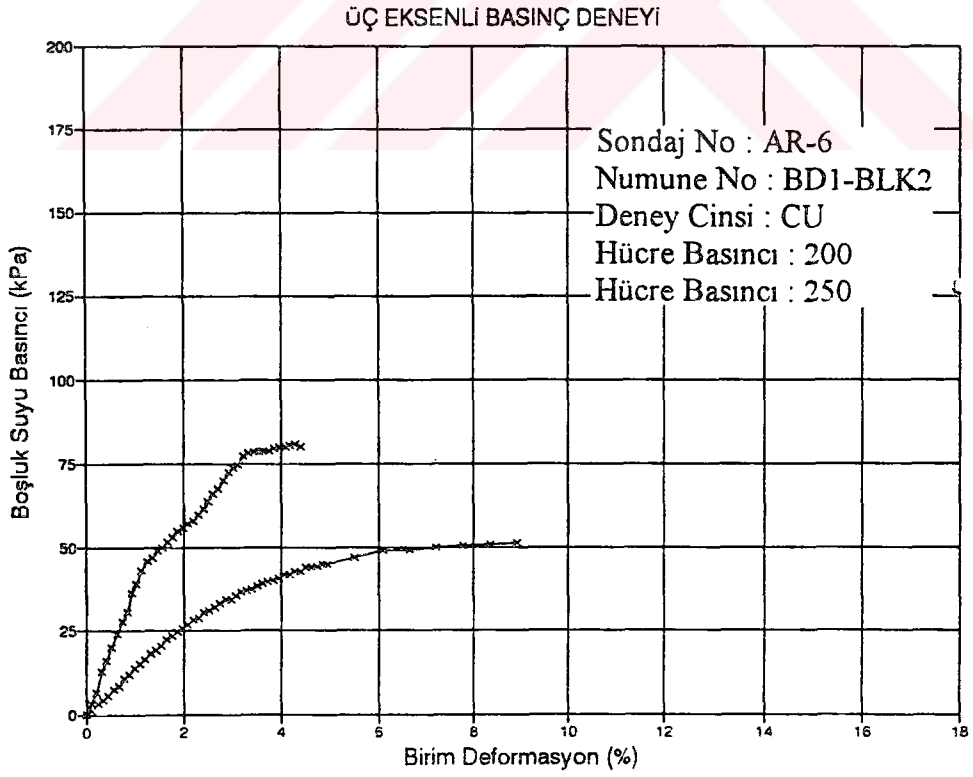
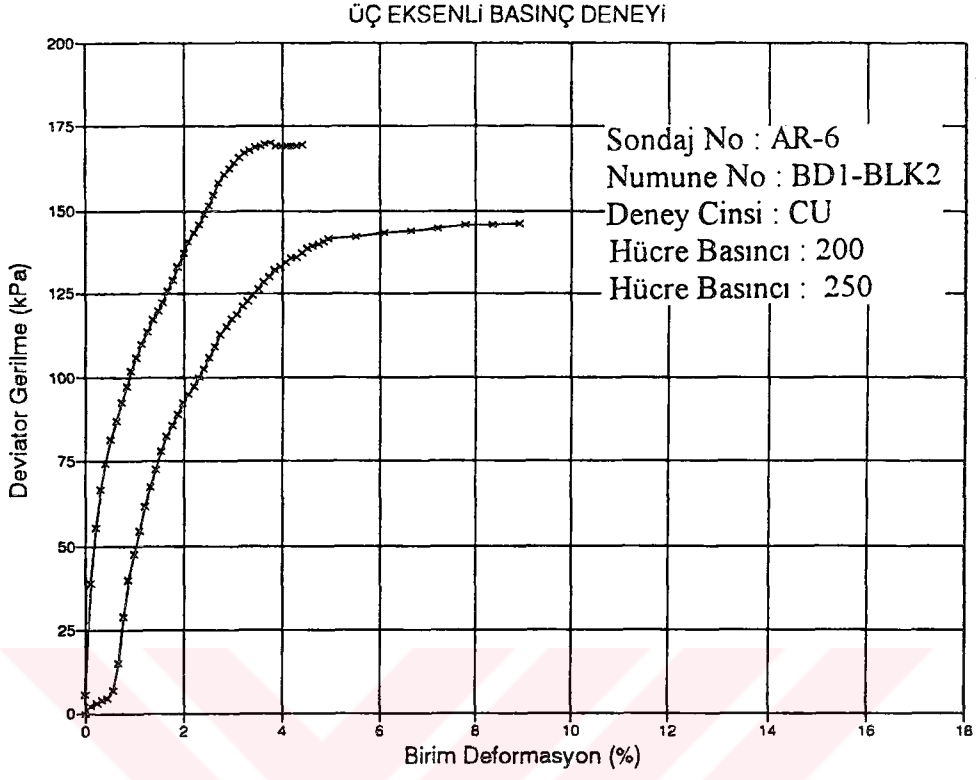
SULU ÇAMUR KONSOLIDASYON DENEYİ  
AR-6-BD1



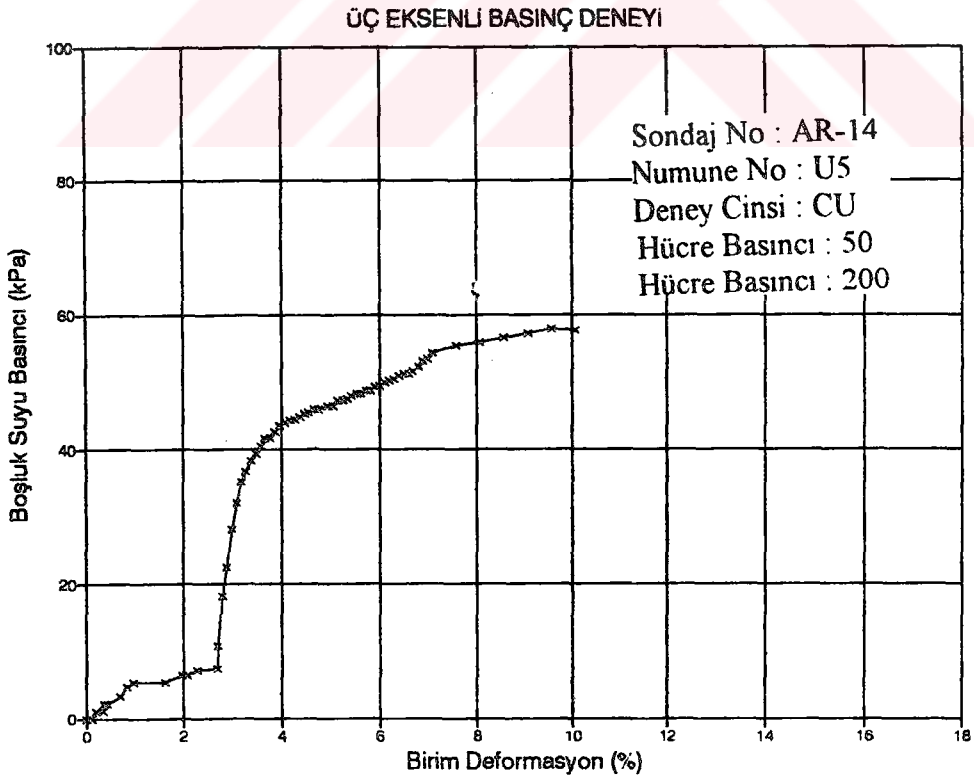
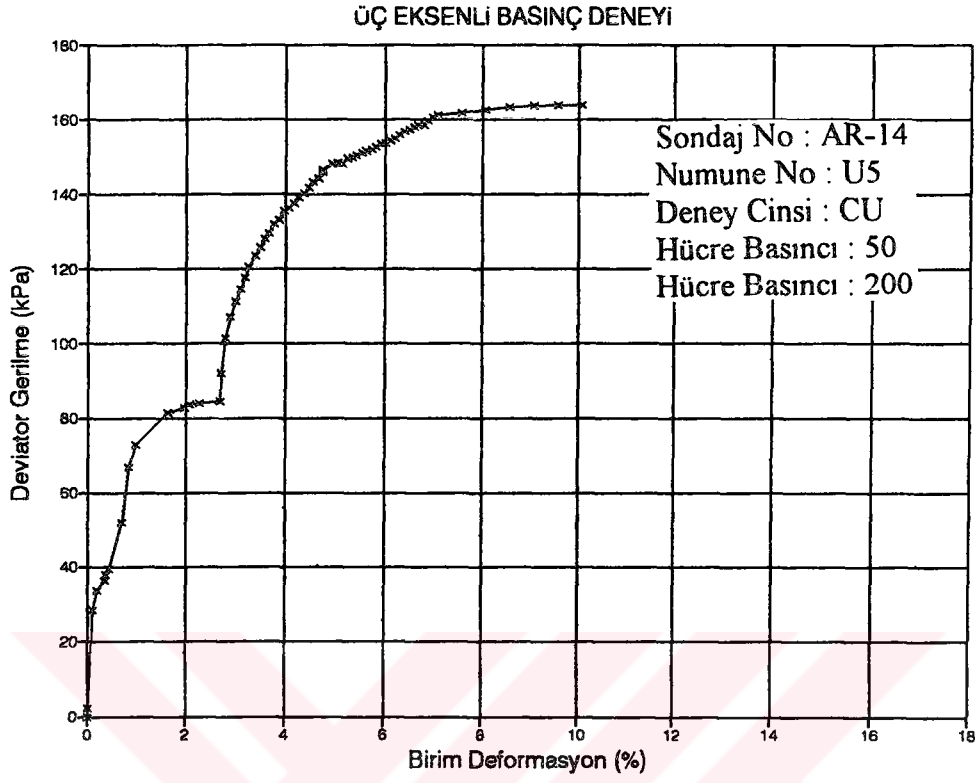
Şekil E.8. Sulu Çamur Konsolidasyon Sırasında Örneklerin Sıkışmasının Zamanla Değişimi



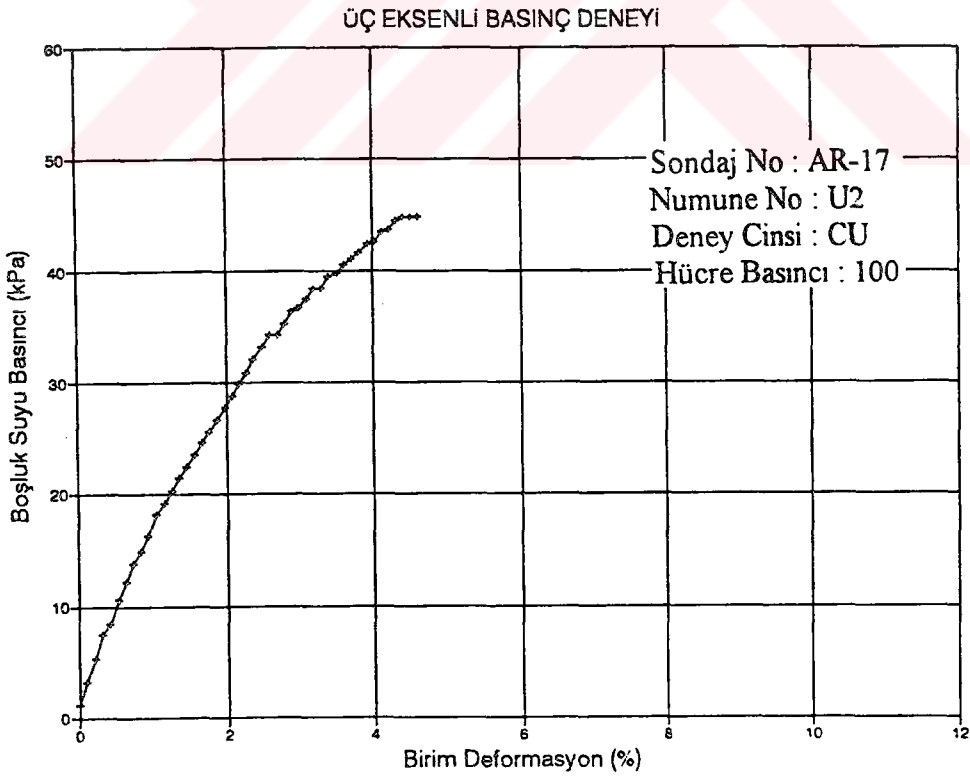
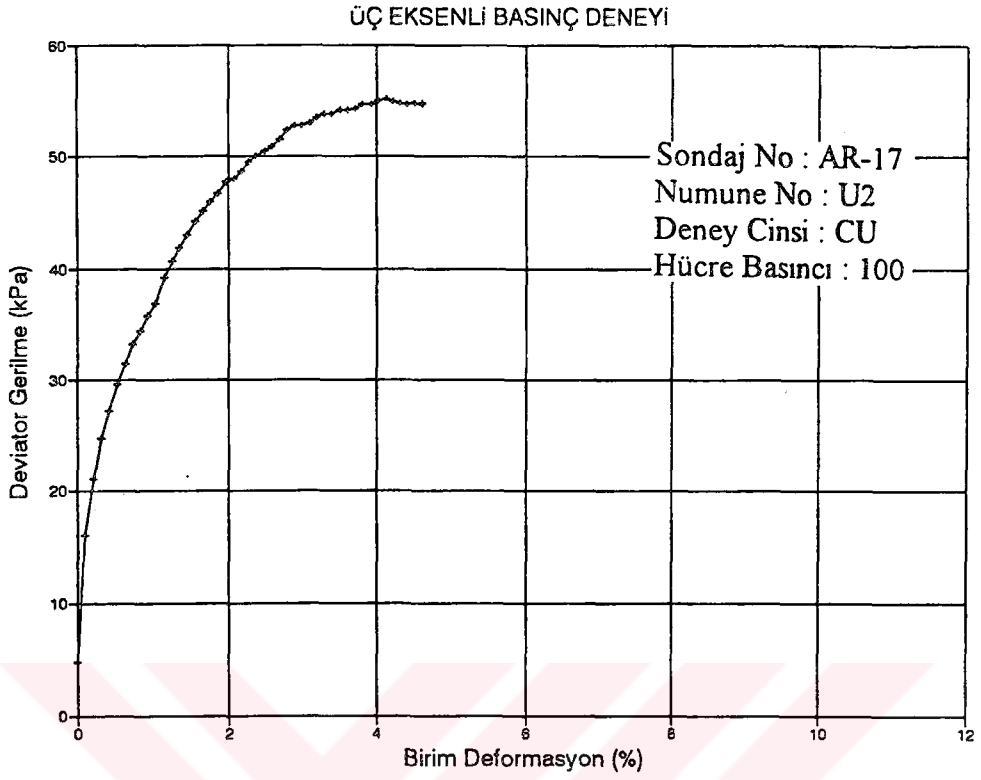
Şekil E.9. (AR-10-BD1) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi



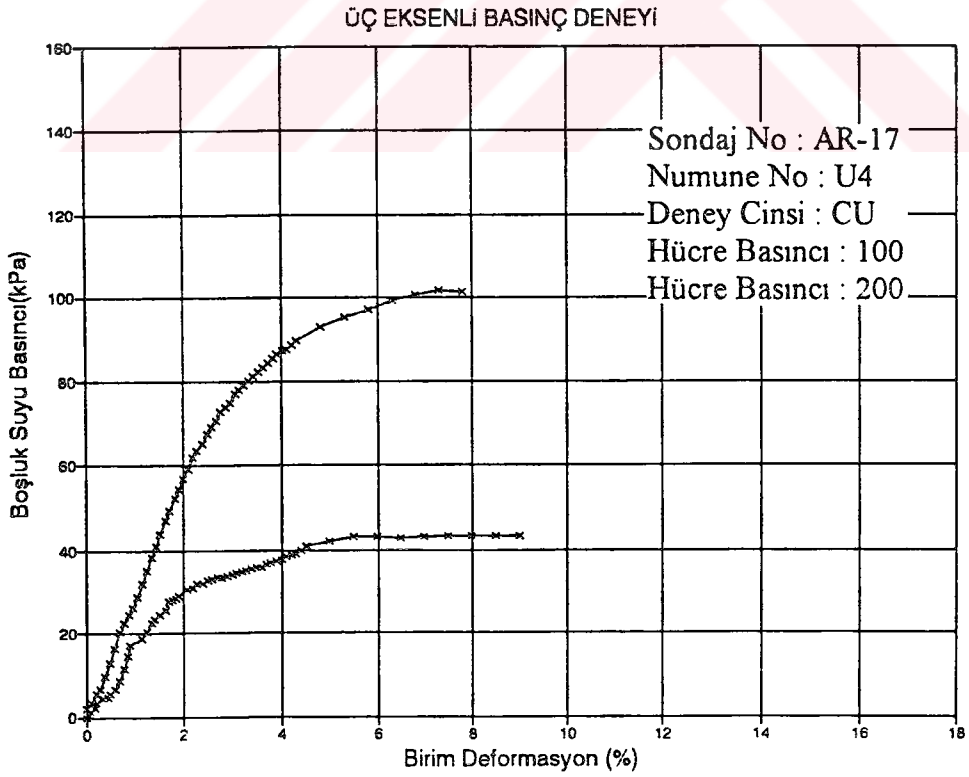
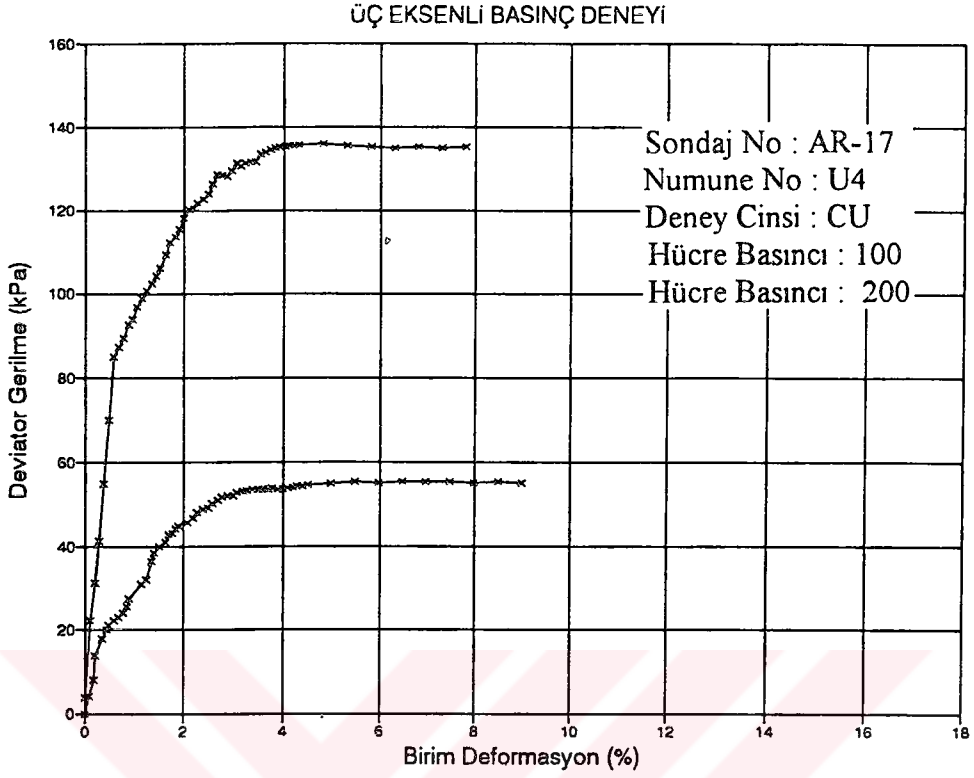
Şekil E.10. (AR-6-BD1) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi



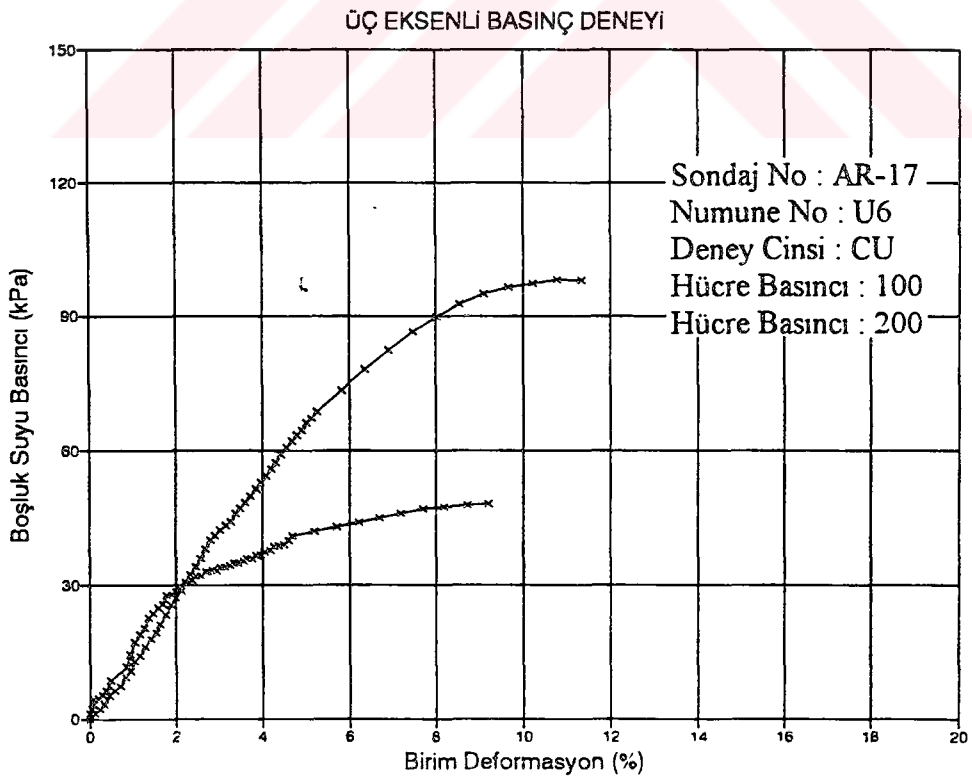
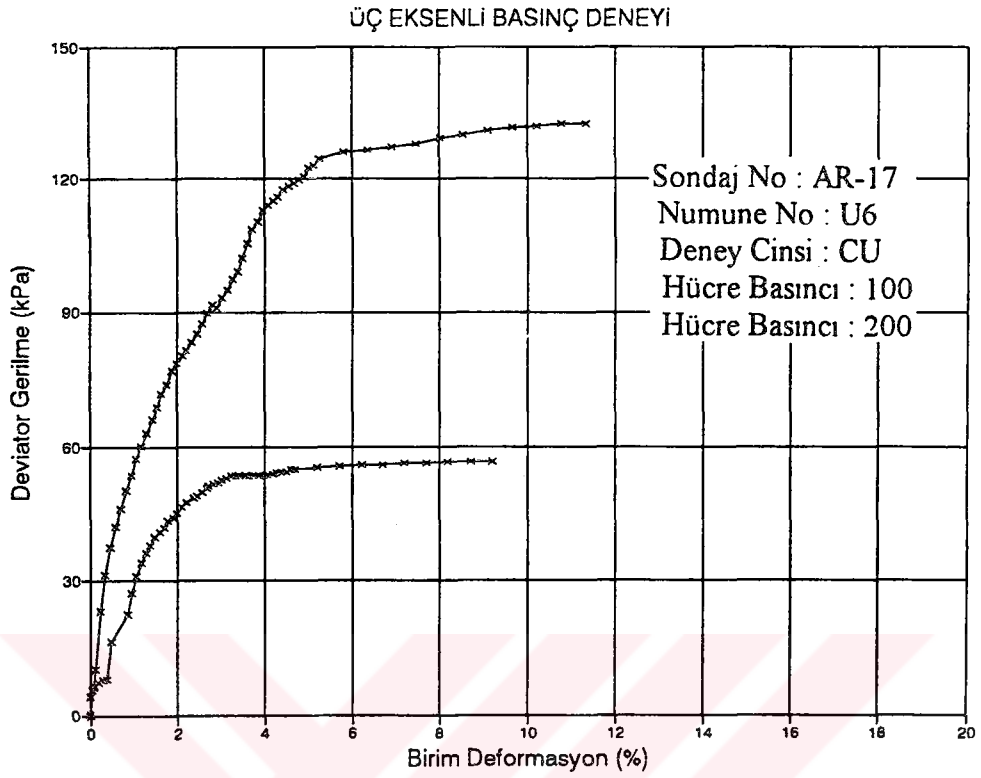
Şekil E.11. (AR-14-U5) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi



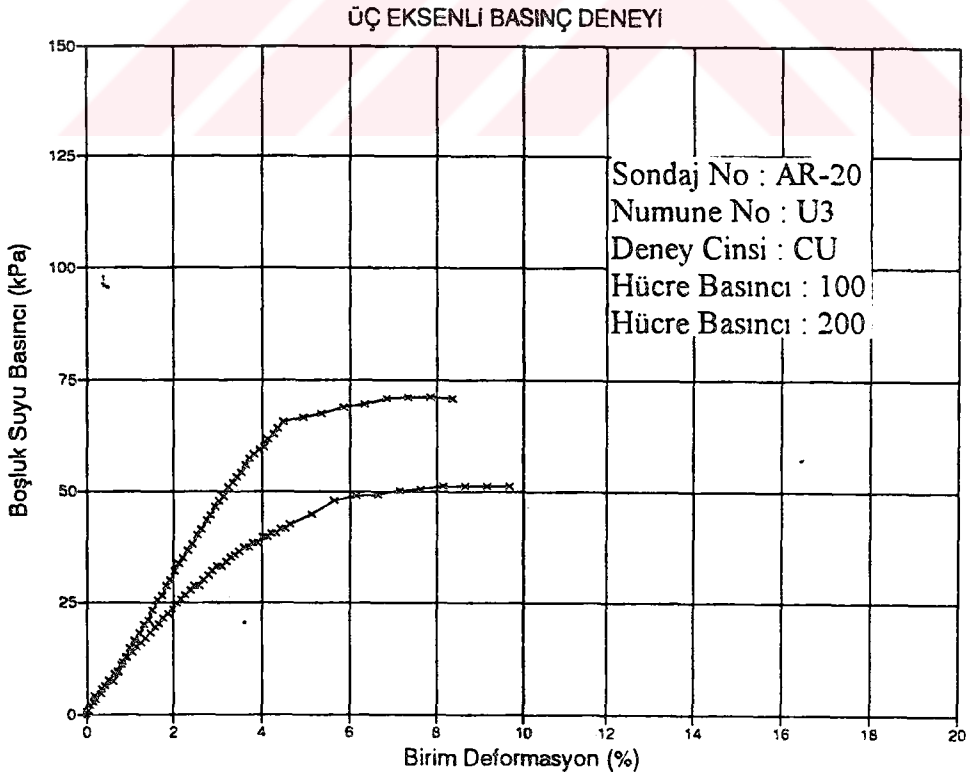
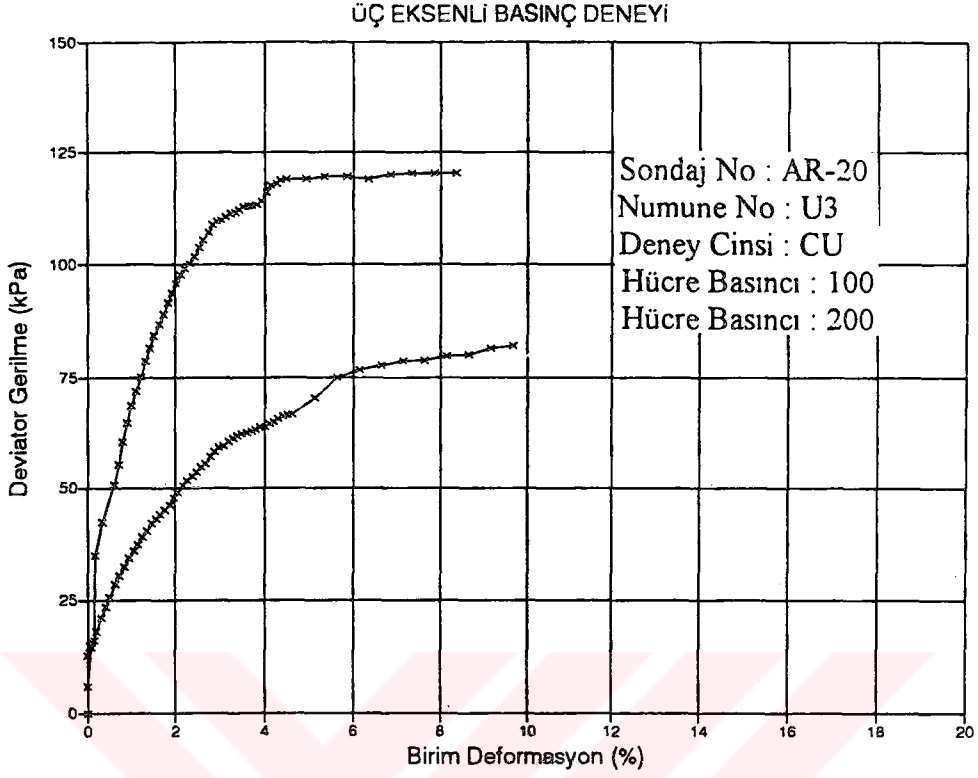
Şekil E.12. (AR-17-U2) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi



Şekil E.13. (AR-17-U4) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi



Şekil E.14. (AR-17-U6) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi



Şekil E.15. (AR-20-U3) Deviator Gerilme ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Deformasyon ile Değişimi

## ÖZGEÇMİŞ

Araştırmacı 06.06.1969 tarihinde Çorlu'da doğmuş, ilköğremini ve orta öğremini burada tamamlamıştır. 1988 yılında İstanbul Üniversitssi Jeofizik Mühendisliği bölümünde lisans öğremini yapmış ve 1992 yılında mezun olmuştur. 1994 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Geoteknik programında yüksek lisans öğremine başlamıştır. Araştırmacı T.Ü. Çorlu Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisidir.

