

## GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF SOILS HAVING HIGH WATER CONTENT

**Perihan BİÇER\***

*Trakya Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çorlu-Tekirdağ*

**Geliş/Received: 04.10.2004 Kabul/Accepted: 09.03.2005**

---

### ABSTRACT

As a part of the rehabilitation project, approximately 5 million cubic meter sea bottom sediments dredged from the Golden Horn were pumped via a pipeline to a confined land disposal site in Alibeyköy. In this study, it is aimed to obtain parameters which are necessary to examine the behavior of the slurry dredged from the Golden Horn by the experiments done in the laboratory. Model test tank, sedimentation-consolidation test set up, and Rowe Cell are used in experimental studies. In the concept of experimental studies, definite block samples, whose stress history is specific, are prepared with Rowe Cell and oedometer and triaxial compression tests are made on the samples that are prepared from these block samples. The slurry that is placed on model test tank and sedimentation-consolidation test set up, is left to self weight consolidation. During consolidation, settlement levels are observed and compared with numerical analysis results. In the test tank, the shear strength tests are made on samples which have four different water contents obtained from self weight consolidation tests verified on four different samples. The data obtained from experiments done on the Golden Horn samples and the data obtained from studies done on similar soils in literature are compared.

**Keywords:** Slurry, Consolidation, Strength, Numerical analysis

### YÜKSEK SU MUHTEVASINA SAHİP ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

#### ÖZET

Haliç'in temizlenmesi çalışmaları kapsamında yaklaşık 5 milyon metre küp dıpsel çamur taranarak Alibeyköy'de kullanılmayan eski taş ocaklarında inşa edilen bir rezervuara depolanmıştır. Bu çalışmada, Haliç'ten taranan sulu çamurların davranışını inceleyebilmek için gerekli parametrelerin laboratuvarda yapılan deneylerle elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda model deney tankı, sedimentasyon-konsolidasyon deney düzeneği ve Rowe hücresi kullanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında, Rowe hücresi ile gerilme tarihçesi belirli blok örnekler hazırlanmış ve bu blok örneklerden hazırlanan örnekler üzerinde üç eksenli basınç ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Model deney tankı ve sedimentasyon-konsolidasyon deney düzeneğine yerleştirilen çamur kendi ağırlığı altında konsolidasyona bırakılmıştır. Konsolidasyon sırasında, oturma miktarları izlenerek numerik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney tankında, dört numune üzerinde gerçekleştirilen kendi ağırlığı konsolidasyon deneyinden elde edilen dört farklı su muhtevasına sahip numune üzerinde mukavemet deneyleri yapılmıştır. Haliç numuneleri üzerinde yapılan deneylerde elde edilen veriler literatürde benzer zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Çamur, Konsolidasyon, Mukavemet, Nümerik analiz.

---

e-posta: perihani@corlu.edu.tr, tel: (0282) 652 94 75

## 1. GİRİŞ

Yapılan araştırmalar yüksek su muhtevasına sahip atıkların dünyanın her yerinde her yıl üretildiğini göstermektedir. Nüfusun çoğalması ve sanayinin hızla gelişmesi meydana gelen atık miktarlarında büyük bir artış meydana getirmiştir. Üretimin artması atık maddelerin uzaklaştırılması ve/veya bertaraf edilmesi sorununu da beraberinde getirmiş ve alınan önlemlerin yetersizliği, insanlığını günümüzde ciddi çevre problemleri ile karşı karşıya bırakmıştır. Sürekli oluşan ve genellikle kirlenmiş bulunan sulu çamurların taranması ve uzaklaştırılması bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Taranan bulamaç halindeki çamurun depolanması ve ıslahı, atık tortularıyla ilgilenen pek çok mühendisin problemidir. Buldukları yerden taranarak başka alanlara yerleştirilen bu malzemeler oldukça geniş alanlar kaplayabilmektedir. Bu yumuşak atıklar (veya yumuşak zeminler), yüksek su muhtevası, yüksek sıkışabilirlik, düşük permeabilite ve düşük mukavemet özellikleri ile nitelendirilmektedir. Bu nedenle bu tür zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesinde klasik konsolidasyon deneyleri yerine çok küçük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite değişimlerinin bulunmasını sağlayan konsolidasyon deneylerinin yapılması tercih edilmelidir (Abu Hejleh [1]). Haliç çamuru gibi malzemelerin kendi ağırlığı altında konsolidasyonunun analizi için düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisinin ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisinin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçüm verileri ve deney sonuçları kullanılarak (Berilgen vd., [2]) numerik modeller ile arazi davranışının tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. Nümerik analizler için Fox ve Berles (1997) [3] tarafından CS2 modeli geliştirilmiştir. Haliç tarama çamuru üzerinde yapılan çalışmalarda İnce [4] tarafından konsolidasyon deney düzeneği ile sulu çamurun kendi ağırlığı altında konsolidasyon davranışı incelenmiştir. Krizek vd., [5] çeşitli zeminler için bu konuda çalışmalar yapmışlardır.

Depolamadan sonra zemin danecikleri çökeldiği ve çamurun su muhtevası azaldığında, dayanımında çarpıcı bir artış meydana gelmektedir. İlk sedimentasyon teorisi Kynch [6] tarafından ortaya atılmış ve bir süspansiyon içindeki taneciklerin çökme davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Depolama alanının boyutları ve atık miktar ve özelliklerine bağlı olarak sedimentasyon fazı birkaç gün ile birkaç hafta sürerken, kendi ağırlığı altında konsolidasyon fazı uzun yıllar sürmektedir (Liu, [7]). Depolanmış taranmış sulu çamurların çökmesi ince danelerin sedimentasyonu ve tortu tabakalarının kendi ağırlığı altında konsolidasyonu şeklinde iki fazda meydana gelmektedir (Pane, [8]).

Sedimentasyon, bir süspansiyon içerisindeki taneciklerin çökmesi olayıdır. Depolanan danecikler, sıvı sütununun tabanı üzerinde, doymuş ince bir zemin tabakası olarak çökel yatağında biçimlenir. Konsolidasyon, zemin kütesinin kendi ağırlığı ya da olası diğer yüklerle zamana bağlı sıkışmasıdır.

Terzaghi [9] tarafından ortaya atılan konsolidasyon teorisinde küçük şekil değiştirmeler için konsolidasyon denklemi oluşturulmuştur. Doygun zeminler için, Toorman [10] tarafından sedimentasyon ve kendi ağırlığında konsolidasyon için genel birleşik teori geliştirilmiştir. Woo vd., [11] geoteknik parametreler arasında bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir.

Su muhtevası yüksek atık çamurlar, pompalandığı havuzlarda birkaç gün ya da birkaç hafta içerisinde sedimentasyonunu tamamladıktan sonra efektif gerilmenin oluşmaya başladığı kendi ağırlığında konsolidasyon safhasına gelmektedir. Efektif gerilme ilkesinin uygulanmaya başladığı bu aşamada boşluk oranının bulamaç boyunca sabit olmadığı ancak, başlangıç boşluk oranına bağlı olduğu belirlenmiştir. Efektif gerilme ile permeabilite ve boşluk oranı değişimleri, özellikle efektif gerilmenin düşük olduğu konsolidasyonun ilk devrelerinde yumuşak killer için oldukça önemlidir. Bu yüzden bu tür zeminler için, konsolidasyon özelliklerini direkt olarak belirlemek oldukça zordur (Znidarcic [12]).

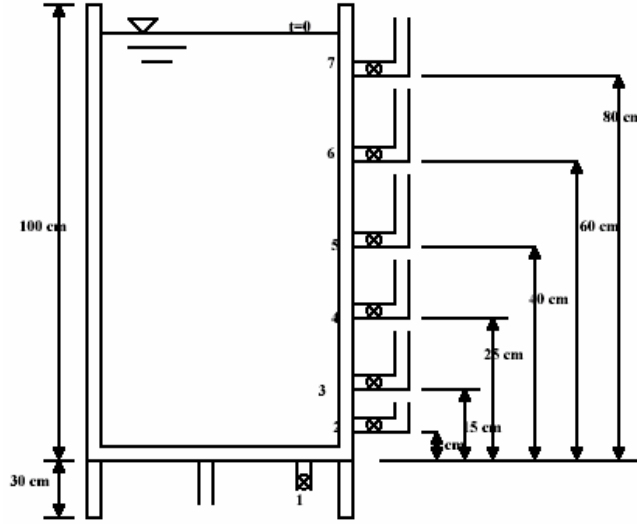
Bu çalışmada model tank ve sedimentasyon-konsolidasyon deney düzeneği içinde kendi ağırlığı altında konsolide olan zemin davranışı Fox ve Berles [3] tarafından geliştirilen CS2

modeli ile analiz edilmiştir. Haliç güncel çökellerinin karada depolanmaları durumunda, çamurun davranışını önceden belirlemek, zayıf zemin özelliklerini iyileştirmek, yıllarca süren çökme ve oturma süresini tahmin edebilmek ve sonuçta depolama bölgesinin yeniden kullanıma kazandırılmasını sağlamak amacıyla taranmış sulu çamurun depolama sahasında çökme ve kendi ağırlığı altında konsolidasyon ve mukavemet kazanım davranışının laboratuvar koşullarında araştırılması amaçlanmıştır.

## 2. KONSOLIDASYON DENEYLERİ

### 2.1. Model Deney Tankı ve Kendi Ağırlığı Altında Konsolidasyon Davranışı

Kendi ağırlığı altında konsolide olan su muhtevası yüksek Haliç Tarama Çamuru'nun oturma ve mukavemetinin zamanla değişimini inceleyebilmek amacıyla 100 cm yüksekliğinde ve 80 cm çapında silindirik bir deney tankı yaptırılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Model Deney Tankı

Haliç tarama çalışmaları sırasında Alibeyköy'deki eski taş ocaklarına depolanarak oluşturulan çamur rezervuarından alınan %95 su muhtevasına sahip çamura su eklenerek su muhtevası depolama alanına boşaltılma sırasındaki değeri olan %300'e çıkarılmıştır. Hazırlanan bulamaçlar yaklaşık olarak 2-3 hafta süre ile hava ile teması olmayan bir kapta bekletilerek ve zaman zaman mikserle karıştırılarak danelerin segragasyonu önlenmiş numunelerin homojen hale gelmesi sağlanmıştır. Böylece numune suya doymun hale de getirilmiştir. Depolama alanındaki koşulları modellemek için model çamura %0.8 tuzlu su eklenerek  $1.17 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluğunda bir süspansiyon elde edilmiştir. Tanka bir pompa yardımı ile yerleştirilen bu çamurun toplam ağırlığı yaklaşık 460-500 kg civarında olmuştur. Çamur tanka yerleştirilme aşamasından sonra kendi ağırlığı altında konsolidasyona bırakılmıştır. Alibeyköy'den getirilen çamurdan alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerden tarama çamurunun indeks özellikleri Çizelge 1'de verildiği gibi bulunmuştur. Bulunan bu özelliklere göre zeminin yüksek plastisiteli organik silt sınıfına girdiği görülmüştür.

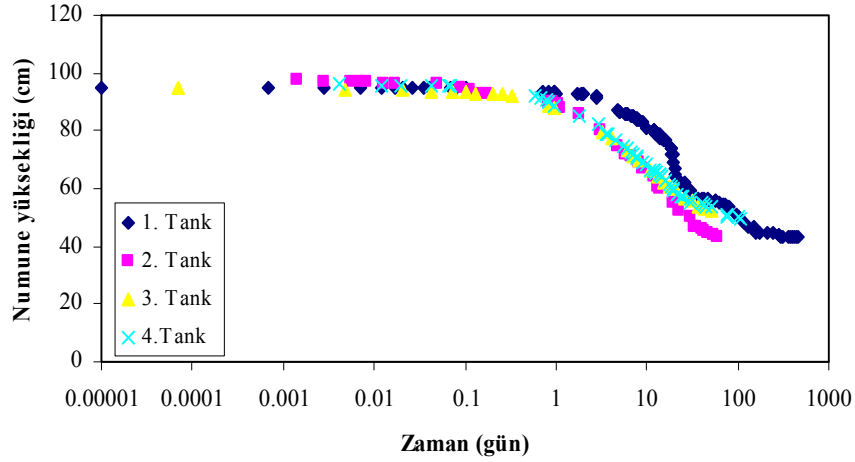
Kendi ağırlığı altında konsolidasyon deneyi dört ayrı model deney tankına yerleştirilen numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kendi ağırlığı altında konsolidasyon deneylerinde tankın

altından su çıkışına izin verilerek çift yönlü drenaj altında konsolidasyonunun gerçekleşmesi sağlanmıştır. Taban drenajını sağlamak için tankın tabanına çakıl ve üzerine uygun drenaj koşullarını sağlayacak bir geotekstil şilte serilmiştir.

**Çizelge 1. Haliç Tarama Çamuru'nun İndeks Özellikleri**

Likit Limit	%75
Plastik Limit	%50
Plastisite İndisi	%25
Danelerin özgül yoğunluğu	2.72 Mg/m <sup>3</sup>
Organik madde içeriği	%12.6

Çökeltme tankında dört adet kendi ağırlığı altında konsolidasyon deneyinde elde edilen oturma-zaman grafikleri Şekil 5'de verilmektedir.



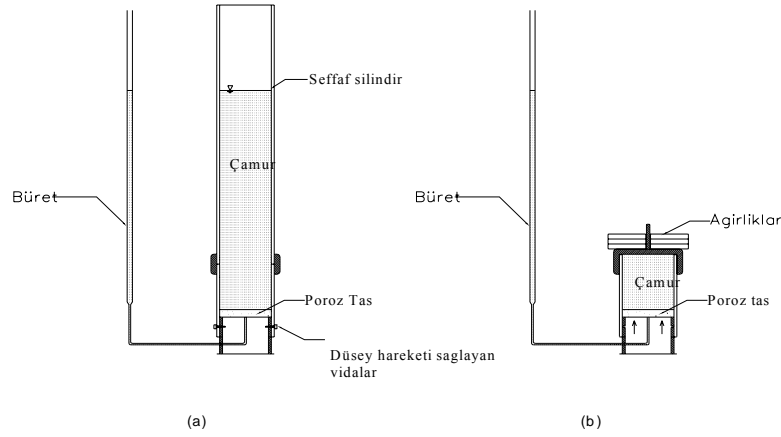
**Şekil 5.** Model deney tankında dört adet kendi ağırlığı altında konsolidasyon deneyinde gözlenen oturma-zaman davranışı

## 2.2. Rowe Hücresi ile Konsolidasyon Deneyleri

Laboratuarda gerilme tarihçesi belirli blok örnekler elde edebilmek için Rowe Hücresi kullanılmıştır. Alibeyköy'den getirilen numunelerin su muhtevaları likit limitlerinin yaklaşık 1.5 katı olacak şekilde bulamaç haline getirilerek, Rowe konsolidasyon aletine yerleştirilmiştir. Rowe hücresinde 25 ve 50 kPa yükleme kademelerinde konsolide edilerek elde edilen 2 adet blok numune üzerinde ödometre, üç eksenli basınç deneyleri (konsolidasyonlu-drenajsız) yapılmıştır.

## 2.3. Sedimentasyon Deneyi

Sulu çamurun kendi ağırlığı altında konsolidasyon davranışı model deney tankı yanında Şekil 4'de gösterilen konsolidasyon deney düzeneği ile araştırılmıştır. Bu düzenek daha önce İnce [4] tarafından Haliç Tarama Çamuru üzerinde yapılan çalışmalarda kullanılmıştır. Bu düzende şekilde görüldüğü gibi yüksek su muhtevalarına sahip numune önce iki parçadan oluşan şeffaf bir silindir içinde kendi ağırlığı altında konsolide edilmekte daha sonra silindirin üst kısmı kaldırılarak tabanda çökelmiş zemin kademeli olarak arttırılarak sürşarj yükleri altında konsolide edilmektedir.



**Şekil 4.** Yüksek su muhtevasına sahip zeminler için konsolidasyon deney düzeneği

## 2.4. Ödometre Deneyi

Yumuşak çökellerin yük altında yapacağı oturmanın ne kadar sürede gerçekleşeceğini tahmini, konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla 1. model deney tankından alınan örselenmemiş tüp numune üzerinde, Rowe hücresinde 25 ve 50 kPa basınç altında konsolidasyon sonucu elde edilen blok numune üzerinde ve Sedimentasyon deneyi sonunda numune aletten çıkarılmadan yükleme yapılarak elde edilen numune üzerinde odometre deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de verilmektedir.

**Çizelge 2.** Ödometre deneylerinden elde edilen, sıkışma İndisi (Cc), su muhtevası (w), Başlangıç boşluk oranı ( $e_0$ )

Deney	w (%)	Cc	$e_0$
Tüp numune	75	0.70	2.39
Blok numune $\sigma'_{max}=25$ kPa	59	0.40	1.66
Blok numune $\sigma'_{max}=50$ kPa	54	0.43	1.74
Sedimentasyon numunesi	85	0.65	2.5

## 3. MUKAVEMET DENEYLERİ

### 3.1. El Vane Deneyi

Drenajsız kayma mukavemeti, doymuş killerde temelin taşıma kapasitesi ve dolgu stabilitesinin analizi için gereklidir. Zeminin kayma mukavemeti laboratuvar ve arazi deneylerinde kullanılan farklı aletlerle doğrudan ölçülebilmektedir. El Vane aleti hem arazide hem de laboratuvarda örselenmemiş kohezyonlu zeminlerin yerinde kayma mukavemetini belirlemek için uygun ve taşınabilir bir alettir (Şekil 2). El Vane aleti ile model deney tankına yerleştirilen çamurun konsolidasyon aşamasından sonra derinlikle değişen kayma mukavemetini ölçebilmek için silindirik deney tankı üzerine askı sistemi yapılarak monte edilmiştir. Askı sistemi Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 2. El Vane Aleti



Şekil 3. Silindir model deney tankı üzerine yerleştirilen El Vane Askı sistemi

El Veyn deneyi dört ayrı model deney tankında konsolide olan numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. 1. model deney tankı içerisinde kendi ağırlığı altında konsolidasyona bırakılan numunenin, vane deneyine başlamadan önce kalınlığının 43 cm ve ortalama su muhtevasının %77.5 olduğu saptanmıştır. Vane aleti askı sistemine yerleştirildikten sonra derinlik boyunca 8, 16, 24, 32, 40 cm boylarında zemine batırılarak ölçümler yapılmıştır. İşlem 4 ayrı noktada ve aynı derinliklerde tekrar edilmiştir. 2. model deney tankı içerisinde kendi ağırlığı altında konsolidasyona bırakılan numunenin kalınlığının, vane deneyine başlamadan önce 44 cm ve numunenin su muhtevasının ortalama %100 olduğu belirlenmiştir. Vane aleti askı sistemine yerleştirildikten sonra iki farklı noktada ve farklı derinliklerde zemine batırılarak ölçümler yapılmıştır. 3. model deney tankı içerisinde kendi ağırlığı altında konsolidasyona bırakılan numunenin kalınlığının, vane deneyine başlamadan önce 46 cm ve numunenin su muhtevasının ortalama %87 olduğu belirlenerek, vane aleti askı sistemine yerleştirildikten sonra iki farklı noktada ve farklı derinliklerde zemine batırılarak ölçümler yapılmıştır. 4. model deney tankı içerisinde kendi ağırlığı altında konsolidasyona bırakılan numunenin kalınlığının, vane deneyine başlamadan önce 48 cm ve su muhtevasının ortalama %92 olduğu belirlenmiştir. Vane aleti askı sistemine yerleştirildikten sonra üç farklı noktada ve farklı derinliklerde zemine batırılarak ölçümler yapılmıştır. 4 Model Deney Tankında ölçülen drenajsız kayma mukavemeti değerleri Çizelge 3’de verilmektedir.

**Çizelge 3.** Model Deney Tanklarında değişik derinliklerde ölçülen drenajsız kayma mukavemeti değerleri

1. Tank	Derinlik (cm)	Cu <sub>1.nokta</sub> (kPa)	Cu <sub>2.nokta</sub> (kPa)	Cu <sub>3.nokta</sub> (kPa)
	8	14.0	17.0	17.7
	16	11.8	12.0	13.0
	24	11.8	12.5	12.5
	32	11.8	13.8	12.0
2. Tank	40	11.8	19.5	11.8
	Derinlik (cm)	Cu <sub>1.nokta</sub> (kPa)	Derinlik (cm)	Cu <sub>2.nokta</sub> (kPa)
	8	2.8	10	2.8
	19	2.5	23	3.0
3. Tank	30	2.7	36	4.5
	8	3.8	10	3.5
	19	3.25	23	3.6
4. Tank	30	3.4	36	3.7
	8	3.2	10	3.3
	19	3	23	3.1
	30	3	36	3

**Çizelge 4.** Üç Eksenli (CU) Deney Sonuçları

Deney No	Numune Türü	w <sub>n</sub> (%)	γ <sub>i</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	σ' <sub>3</sub> (kPa)	u <sub>r</sub> (kPa)	(σ' <sub>1</sub> -σ' <sub>3</sub> ) <sub>f</sub> (kPa)
1	Tüp Numune (Deney Tankı 1)	77	15.97	75	13.9	27.8
2		77	16.52	150	35	92.8
3	Blok Numune (Rowe <sub>25</sub> )	59	15.67	25	0.5	40.1
4		59	14.44	50	3.2	119.2
5		58	15.05	100	52.7	114.6
6		59.5	14.89	150	67.5	132
7		57	16.49	200	94.4	105.6
8	Blok Numune (Rowe <sub>50</sub> )	54	15.9	40	15.9	47.8
9		54	15.5	60	25.6	60.6
10		54	15.71	80	38.3	78.7
11		54	15.78	40	4.2	115.7

#### 4. HALIÇ KİLİ ÜZERİNDE YAPILAN KONSOLİDASYON VE MUKAVEMET DENEYLERİNİN SONUÇLARI

Yumuşak çökellerin yük altında yapacağı oturmanın ne kadar sürede gerçekleşeceğini tahmini, konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi ile mümkün olduğu düşünülerek, birinci model deney tankına yerleştirilen zemin kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu tamamladıktan sonra alınan örselenmemiş numune ve Rowe hücresinde konsolide edildikten sonra elde edilen numune üzerinde ödometre deneyi yapılmıştır

Bir çok çalışmada, zeminin temel indeks özellikleri ile sıkışma indisi (Cc) arasında basit ilişkiler araştırılmıştır. Woo vd., [11] (1990) gibi bazı araştırmacılar doğal su muhtevası ve sıkışma indisi arasında bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 6'da Alibeyköy'den alınan Haliç numuneleri üzerinde yapılan ödometre deneylerinden elde edilen sıkışma indisi ve su muhtevası arasındaki ilişki ile Klang kili için yapılan çalışmadan elde edilen veriler birlikte sunulmaktadır. Haliç Kili için sıkışma indisinin ve su muhtevasına bağlı değişimi

$$Cc=0.0175w_n-0.3288 \quad (1)$$

olarak elde edilmektedir. Daha önce Klang kili için yapılan çalışmada benzer ilişki,

$$Cc=0.02w_n-0.37 \quad (2)$$

şeklinde elde edilmiştir

Şekil 7'de Alibeyköy'den alınan Haliç numuneleri üzerinde yapılan ödometre deneylerinden elde edilen sıkışabilirlik faktörü  $F=(Cc/1+e_0)$  başlangıç boşluk oranı ile  $e_0$  arasındaki ilişki ile Krizek vd., [5] (1971)'nin çeşitli zeminler için yaptıkları çalışma birlikte sunulmaktadır. Şekil 7'den

$$F=0.0977e_0+0.0821 \quad (3)$$

şeklinde bir eşitlik elde edilebilmektedir. Bu bağıntı ile Krizek vd.,[5] (1971)'nin çeşitli zeminler için yaptıkları çalışmada elde ettikleri eşitliğin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 8'de, bu çalışmada, 1996 yılında Haliç Islah Projesi kapsamında yapılan çalışmada ve dünyanın değişik yerlerindeki zeminler üzerinde yapılan Vane deneyi ve üç eksenli konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) deneylerinden elde edilen drenajsız kayma mukavemeti ile su muhtevası arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu çalışmada dört model deney tankında ölçülen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin diğer araştırmacılar tarafından ölçülen drenajsız kayma mukavemetinin su muhtevasına bağlı değişim eğilimi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekilde, farklı kil zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda drenajsız kayma mukavemetinin, su muhtevasına bağlı değişimi,

$$c_u=3.4752w^{-2.4853} \quad (4)$$

eşitliği ile gösterilmiştir.

Bu çalışmada, ölçülen drenajsız kayma mukavemeti değerleri aynı grafik üzerinde işlenmiş ve yüksek plastisiteli silt sınıfına (MH) giren Haliç tarama çamurunda, drenajsız kayma mukavemetinin su muhtevasına bağlı değişimi,

$$c_u=3.0354w^{-2.667} \quad (5)$$

eşitliği ile verilmektedir.

Şekil 9'da, bu çalışmada, 1996 yılında Haliç Islah Projesi kapsamında yapılan çalışmada ve dünyanın değişik yerlerindeki zeminler üzerinde araştırılan Likitlik İndisi ile drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişki verilmektedir. Bu çalışmada alınan drenajsız kayma mukavemeti değerleri dört model deney tankında yapılan vane deneyinden elde edilen değerler olup, diğer araştırmalarda elde edilen sonuçlarla uyumlu oldukları görülmektedir.

Şekil'de, farklı zeminler üzerinde yapılan çalışmada drenajsız kayma mukavemetinin likitlik indisine bağlı değişimi,

$$I_L=-0.3006\ln(c_u)+1.3722 \quad (6)$$

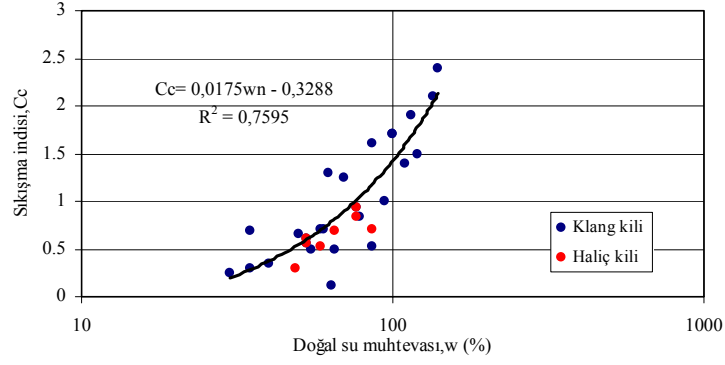
eşitliği ile verilmiştir.

Bu çalışmada ölçülen drenajsız kayma mukavemeti değerleri aynı grafik üzerine işlenmiş ve drenajsız kayma mukavemetinin, likitlik indisine bağlı değişimi,

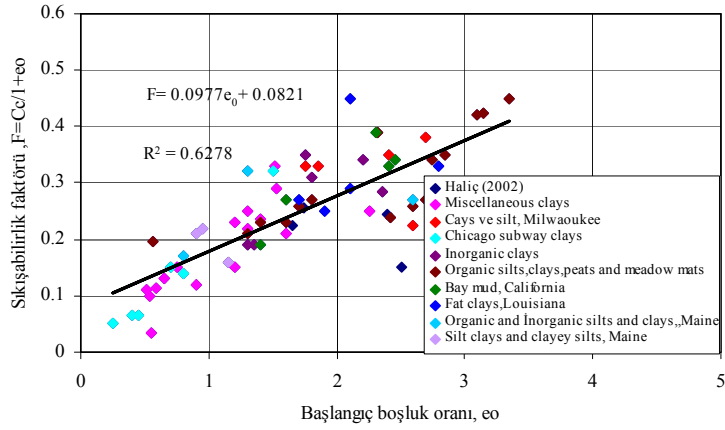
$$I_L=-0.3937\ln(c_u)+1.7065 \quad (7)$$

olarak verilmiştir.

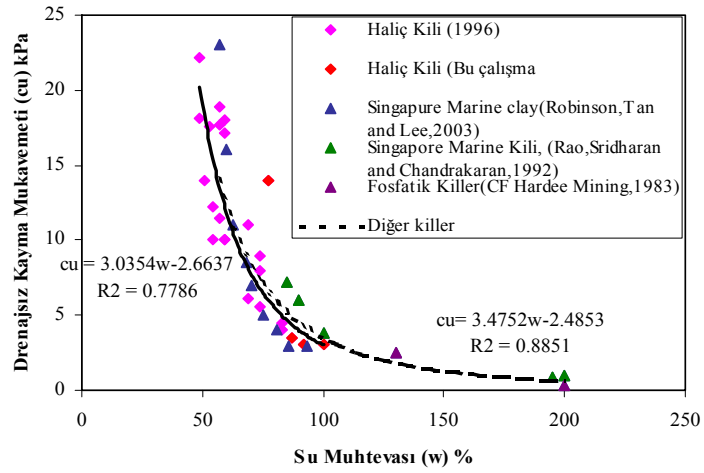




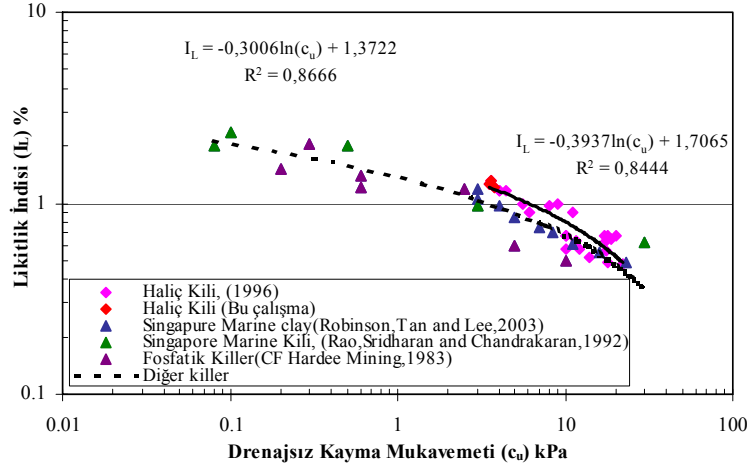
Şekil 6. Doğal su muhtevası ile sıkışma indisi arasındaki ilişki



Şekil 7. Başlangıç boşluk oranı ile sıkışabilirlik faktörü arasındaki ilişki



Şekil 8. Drenajsız kayma mukavemeti ile su muhtevası arasındaki ilişki



Şekil 9. Drenajsız kayma mukavemeti ve likitide indeksi arasındaki ilişki

## 7. KENDİ AĞIRLIĞI ALTINDA KONSOLİDASYON DAVRANIŞININ NÜMERİK OLARAK MODELLENMESİ

Kendi ağırlığı altında konsolide olan su muhtevası yüksek Haliç Tarama Çamuru'nun oturma ve mukavemetinin zamanla değişimini inceleyebilmek amacıyla yapılan bir model tankta yerleştirilen malzemenin yüksekliği sürekli gözlenerek oturma miktarları kaydedilmiştir. Bahsedilen model deneyde gözlenen kendi ağırlığı altında oturma zaman davranışının analizi için Fox ve Berles [3] tarafından geliştirilen ve non-linear sonlu şekil değiştirme (finite strain) analizi yapabilen CS2 adındaki konsolidasyon modelinden yararlanılmıştır. Bu model, düşey efektif gerilme - boşluk oranı ( $\sigma'_v - e$ ) ve permeabilite - boşluk oranı ( $k - e$ ) arasındaki ilişkileri kullanarak zamana bağlı büyük miktardaki oturmaları (large strain consolidation) analiz edebilmektedir. Bu ilişkileri belirlemek için (8) ve (9) bağıntılarından yararlanılmış

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (8)$$

$$k = Ce^D \quad (9)$$

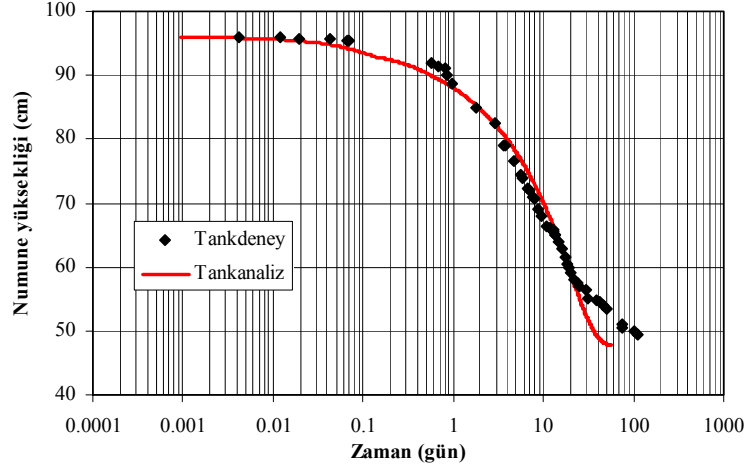
ve bu bağıntılardaki malzeme parametreleri başlangıç boşluk oranı  $e_0 = 8-9$  olan sulu çamur için Berilgen [2] tarafından Haliç Tarama Çamuru üzerinde yapılan "Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi" lerinden Çizelge 5'de verildiği gibi elde edilmiştir. Model deney tankına %300 su muhtevasında 95 cm olarak yerleştirilen Haliç Çamur'unun kendi ağırlığı altında konsolidasyonunun non-linear sonlu şekil değiştirmeli konsolidasyon (CS2) analizi sonuçları ile deney ölçümlerinden elde olunan sıkışma zaman grafiği Şekil 10'da verilmiştir.

Çizelge 5. Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyinden  $e_0 = 8.0-9.0$  için Elde Edilen Malzeme Parametreleri ( $\square$  - kPa, k - m/s)

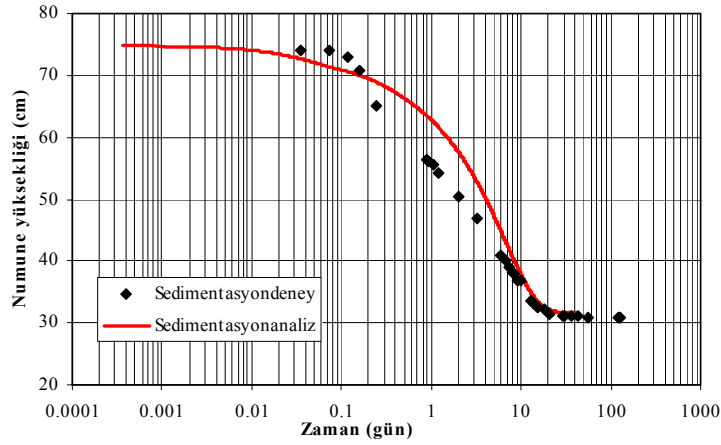
Parametreleri	A	B
$e = A(\sigma' + Z)^B$	2.58	-0.28
		0.018
$k = Ce^D$	4.96E-08	
	1.1	

Şekilden görüldüğü gibi, model deney tankında gerçekleştirilen deney ile sızıntı etkili konsolidasyon deneyinden elde edilen parametreler ile yapılan konsolidasyon analiz sonuçları birbiri ile uyumlu görülmektedir.

Kendi ağırlığı altında konsolidasyona bırakılan sulu çamurun davranışını incelemek için model deney tankı yanında Şekil 4’de gösterilen bir deney düzeneği de kullanılmıştır. Deney tankına yerleştirilen sulu çamurun davranışında olduğu gibi bu deney düzeneğinde % 390 su muhtevasına ( $e_0=10.6$ ) sahip olarak hazırlanan numunenin kendi ağırlığı altında zamana bağlı davranışı Haliç kili üzerinde yapılan sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verileri kullanılarak Fox ve Berles (1997) tarafından hazırlanan CS2 programı ile Çizelge 6’da  $e_0=10$  sulu çamur için (Berilgen [2]) verilen parametreler ile analiz edilmiştir. Deneyde elde edilen değerlerin CS2 programından elde edilen oturma-zaman davranışı ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 11).



Şekil 10. Model Deney Tankından elde edilen deneysel ölçümlerle CS2 analizi ile hesaplanan oturma-zaman davranışı



Şekil 11. Sedimentasyon deneyinden elde edilen ölçümlerle CS2 modeli ile hesaplanan oturma-zaman davranışı

**Çizelge 6.** Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyinden  $e_0=10.0$  için Elde Edilen Malzeme Parametreleri ( $\sigma$  - kPa, k - m/s)

$e=A(\sigma'+Z)^B$	A	2.6
	B	-0.34
	Z	0.016
$k=Ce^D$	C	4.5E-08
	D	1.4

## 8. SONUÇLAR

Bu çalışma Haliç Tarama Projesi kapsamında Alibeyköy'de kullanılmayan eski taş ocaklarına pompalanan yaklaşık 5 milyon metre küp dıpsel çamurun depo sahasındaki zamana bağlı davranışını inceleyebilmek amacı ile yapılmıştır. Çamurun arazideki davranışını yani zamanla meydana gelecek oturmaların ve mukavemet kazanımının gerçeğe yakın olarak tahmin edilmesi ekonomi ve çevre mühendisliği açılarından önemlidir. Bu sahaların özellikle İstanbul gibi kent içinde kalan bölgelerde yer alması durumunda kısa zamanda geri kazanılması önemli bir kentsel kazanç olmaktadır.

Model deney tankında ve sedimentasyon-konsolidasyon deney düzeneğinde zeminin kendi ağırlığı altında konsolidasyon davranışının nümerik analizi için CS2 adında konsolidasyon modelinden yararlanılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri model tankından bağımsız deneysel yöntemler ile belirlenmiş ve model tankında gözlenen davranış bu zemin parametreleri ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Hesaplanan değerlerin gözlenen oturma-zaman davranışı ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Woo vd., [11] (1990) gibi bir çok araştırmacı sıkışma indeksi ve su muhtevası arasında bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Haliç numuneleri üzerinde yapılan deneylerde elde edilen verilerin literatürde benzer zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen veriler ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Krizek vd., [5] (1971) tarafından benzer zeminler üzerinde yapılan araştırmalarda tanımlanan sıkışabilirlik faktörü,  $F=C_v/(1+e_0)$  ile başlangıç boşluk oranı,  $e_0$  arasındaki ilişkinin Haliç killeri için de geçerli olduğu gözlenmiştir.

Deneysel sonuçlardan drenajsız kayma mukavemetinin su muhtevası ile değişimi belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları ile dünyanın değişik yerlerindeki zeminler üzerinde yapılan veyn deneyleri ve konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen drenajsız kayma mukavemeti ve su muhtevası arasındaki ilişkiler karşılaştırılmış ve Haliç kilinin davranışının denizsel killerin davranışı ile genelde uyumlu olduğu görülmüştür. Drenajsız kayma mukavemeti ile likitide indeksi arasındaki ilişki açısından da sonuçların diğer çalışmalara uyumlu olduğu görülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmayı 21.05.01.01 numaralı proje ile destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

- [1] Abu-Hejleh, A.N., Znidarcic, D., and Bames, B.L. (1996), "Consolidation characteristics of phosphatic clays." J. Geotech Engrg., ASCE, 122(4), 295-301.
- [2] Berilgen, S.A., Berilgen, M.M. ve Özyayın, İ.K., (2002), "Haliç kilinin konsolidasyon özelliklerinin sızıntı etkili konsolidasyon deneyi ile belirlenmesi", ZMTM 9. Ulusal Kongresi, Eskişehir.

### ***Geotechnical Characteristics of Soils Having ...***

- [3] Fox P., Berles J.D., (1997), "CS2: A Piecewise-Linear Model for Large Strain Consolidation", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol:21, 453-475.
- [4] İnce, Ç. G.,(1998), "Sulu Çamurların Sedimentasyonu ve Konsolidasyonu", Yüksek Lisans Tezi., YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Krizek, R. J., Parmelee, R. A., Kay, J.N., and Elnaggar, H. A., 1971, *Structural Analysis and Design of Pipe Culverts*, National Cooperative Highway Research Program, Report 116, National Research Council, Wasington, D.C.
- [6] Kynch, G.J., (1952), "A theory of sedimentation", *Trans. Faraday Society*, 48, 166-176.
- [7] Liu, J.C. and Znidarcic, D. (1991), "Modeling one-dimensional compression characteristic of soils", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE,117 (GT1), 161-169
- [8] Pane, V., and Schiffman, R.L., (1985), "A note on sedimentation and consolidation", *Geotechnique*, London, England, 35(1), 69-77.
- [9] Terzaghi, K. (1923). The computation of the permeability of soils from the hydrodynamic pressure gradients. *Sitzungsber. Math-naturwiss. Kl., Part Iia*, 132, Nos ¾, 125-138 (in German).
- [10] Toorman, E. A.,(1996), "Sedimentation and Self Weight Consolidation: General Unifying Theory.", *Geotechnique*, London, England, 46(1), 103-113.
- [11] Woo, S.M.& Moh, Z.C. (1990). "Geotechnical Characteristics of Soils in the Taipei Basin", Tenth Southeast Asian Geotechnical Conference, 16-20 April 1990, Taipei.
- [12] Znidarcic, D., Liu, J.C., (1989), "Consolidation characteristics determination for dredged materials" *Proc., 22 nd Annu. Dredging Seminar, Ctr. For Dredged Studies, Texas A&M Univ., College Station, Tex.*, 45-65.