

## DETERMINATION OF CONSOLIDATION BEHAVIOUR OF HALIÇ DREDGED MATERIAL BY USING A SEEPAGE INDUCED CONSOLIDATION TESTING SYSTEM

**Saadet Arzu BERİLGİN\***

*Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL*

**Geliş/Received: 19.02.2004 Kabul/Accepted: 02.09.2004**

### ABSTRACT

Determination of consolidation properties of high water content clays under its own weight and/or very little effective stress is currently not possible through the classic experimental methods. A new experimental technique, dubbed "Seepage Induced Consolidation Test" by Imai (Imai, G. (1979), Soils and Foundations, 19, No.3, 45-60) was developed to more realistically study the consolidation behaviour of such high water content soils under seepage forces.

The goal of this study was to determine the consolidation properties (specifically the "variation of void ratio with effective stress ( $e-\sigma_v'$ )" and "coefficient of permeability with void ratio ( $k-e$ )" relationships) of high water content soils that are deposited in areas where they are subject to compression under their own weight and/or surcharge loads. A seepage induced testing system was built at the Yıldız Technical University Soil Mechanics Laboratory, and this system was used to investigate three different clay samples that were prepared in a slurry style mix. The experimental results were observed to be consistent with the relationships proposed in the literature for the "variation of void ratio with effective stress" and "coefficient of permeability with void ratio" during consolidation of high water content soils.

**Keywords:** Saturated soft soil, consolidation, seepage induced consolidation test

### HALIÇ TARAMA ÇAMURU KONSOLIDASYON DAVRANIŞININ SIZINTI ETKİLİ KONSOLIDASYON DENEYİ İLE BELİRLENMESİ

#### ÖZET

Yüksek su muhtevasına sahip killi malzemelerin konsolidasyon davranışının incelenmesinde malzemenin kendi ağırlığı altında ve çok küçük efektif gerilme durumlarında konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi klasik konsolidasyon deneyleriyle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ilk kez İmai (Imai, G. (1979), Soils and Foundations, 19, No.3, 45-60) tarafından bu tip zeminlerin davranışını gerçeğe daha yakın modelleyen, akış hızı kontrollü sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (Seepage Induced Consolidation Test) kullanılmıştır.

Bu çalışmada yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin depolandığı sahada kendi ağırlığı ve/veya sürşarj yükleri altındaki davranışını tahmin edebilmek için gerekli sıkışma özelliklerinin (efektif gerilme-boşluk oranı ve permeabilite-boşluk oranı ilişkileri) belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda YTÜ Geoteknik Laboratuvarı'nda sızıntı etkili bir konsolidasyon deney düzeneği kurularak, Haliç tarama çamurundan "slurry" kıvamında hazırlanan numuneler üzerinde sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen bulguların literatürde yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde elde edilen bulgularla uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Suya doymun yumuşak zeminler, konsolidasyon, sızıntı etkili konsolidasyon deneyi

\* e-mail: koc@yildiz.edu.tr , Tel: (0212) 259 7070/2568

## 1. GİRİŞ

Ekonomik ve çevresel güvenlik açısından yüksek sıkışabilirliğe sahip dıpsel çamur, maden çamurları, kanalizasyon çamurları gibi atık maddelerin uygun bir yerde depolanması ve bu depolama sahalarının kullanıma kazandırılması son yıllarda geoteknik mühendisliğinde çözüm aranan önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Ülkemizde de Haliç, İzmir Körfezi, İzmit Körfezi gibi çevre kirliliği olan bölgelerdeki denizel dıpsel çamurların taranarak depolanması veya çeşitli endüstriyel ve kentsel atık çamurların depolanması güncel mühendislik problemlerindedir. Bu çamurların depolanarak yeni araziler elde edilmesi hem çevre güvenliği hem de ülke ekonomisi açısından yararlı olmaktadır. Dünyada bu şekilde atık çamurlar ile ortaya çıkan sahaların değerlendirilerek kullanıldığı bir çok örneğe A.B.D ve Japonya gibi ülkelerde sık rastlanılmaktadır. Ülkemizde de son yıllarda İstanbul'da Haliç'in kirlenmesine çözüm getirmesi bakımından yaklaşık 5 milyon metre küp dip çamuru taranarak Alibey'de kullanılmayan eski taş ocaklarında bir baraj arkasında oluşturulan depolama havuzuna pompalanmıştır. Bu depolama alanında pompalanan çamur kütlesi üzerinde oluşan sahanın İstanbul kentine kazandırılması ekonomik ve sosyal açıdan yararlı olacaktır. Bu sahanın kazanılması için yapılacak iyileştirme çalışmalarında depolanan çamurun kendi ağırlığı ve/veya üzerine konacak sürşarj yükleri altındaki davranışının bilinmesi gerekmektedir. Depolanan çamurun davranışını tahmin etmede deneysel yöntemlerden yararlanarak oturma-zaman ilişkisinin belirlenmesi gerekmektedir.

Taranmış çamurlar gibi yüksek su muhtevasına sahip zeminler kayma mukavemeti sıfır veya sıfıra yakın olan malzemelerdir. Ayrıca yüksek miktarda organik madde içermektedirler. İşte bu nedenlerden dolayı klasik zemin mekaniği teorileri ile davranışlarını açıklamak mümkün olmamaktadır. Bu malzemelerin depolandıkları sahalarda kendi ağırlıkları altında zamanla sırasıyla sedimentasyon, konsolidasyon ve desikasyon olayları gerçekleşmektedir.

Yüksek su muhtevasına sahip bu malzemelerin depolandığı sahalarda çökmesi geoteknik mühendisliği açısından önemsenmediği için analizlerde genellikle ihmal edilmektedir. Sedimentasyon süreci konsolidasyonla karşılaştırıldığında çok kısa sürmekte konsolidasyon ise yıllar süren bir zaman dilimi içinde gerçekleşmektedir. Arazideki yumuşak zeminin sedimentasyon sonrası kendi ağırlığı altında konsolidasyon problemini çözebilmek için dört elemana ihtiyaç vardır. Bunlar konsolidasyonu ifade eden denklem, başlangıç ve sınır koşulları, malzeme özellikleri ve çözüm yöntemidir. Analizlerdeki en önemli madde çok geniş bir aralıkta değişen ve her yeni malzeme için belirlenmesi gereken malzeme karakteristikleridir. Bu malzeme karakteristiklerinin kalitesi arazide yumuşak zeminlerin konsolidasyon analizleri sonuçlarının gerçek değerlere yaklaşmasında büyük önem taşır.

Yüksek su muhtevasına sahip yumuşak killi zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi sırasında malzemenin kendi ağırlığı altında ve çok küçük efektif gerilme durumlarında konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi klasik konsolidasyon deneyleriyle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ilk kez İmai [1] tarafından bu tip zeminlerde akış hızı kontrollü hidrolik konsolidasyon deneyini uygulamıştır. Daha sonra bu deney yöntemi sızıntı etkili konsolidasyon deneyi (Seepage Induced Consolidation Test) adını almıştır. İmai deneyleri sabit-duvar konsolidometresinde numune içinde aşağı doğru oluşturulan bir hidrolik eğim ile gerçekleştirmiştir. Bu sayede numunede oluşan sızıntı kuvvetleri zemini konsolide etmiş ve numune içinde uniform olmayan bir efektif gerilme dağılışı oluşması sağlanmıştır. Numune içinde oluşan boşluk suyu basıncı deney süresince ölçülmüş, boşluk oranı dağılımı deney sonunda numuneyi dilimlere ayırarak hesaplanmıştır. Znidarcic ve Liu [2] yüksek nonlineer konsolidasyon ilişkilerini değerlendirmek için daha güvenilir yeni bir deney yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem İmai [1] tarafından düzenlenen orijinal sızıntı etkili konsolidasyon deneyi esas alınarak düzenlenmiştir. Bu yeni yöntem diğer deney yöntemlerindeki dezavantajları ve sınırlandırılmaları ortadan kaldırmıştır.

Bu çalışmada yüksek su muhtevasına sahip çeşitli killerin kendi ağırlıkları ve/veya sürşarj yükleri altında konsolidasyon oturmalarını tahmin etmek için kullanılan hesap

yöntemlerinde kullanılacak malzeme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu hesap yöntemleri çamurun kendi ağırlığı altında konsolidasyonunu hesaplayabilmek için çok küçük gerilme seviyelerinde boşluk oranı-efektif gerilme ve hidrolik iletkenlik boşluk oranı ilişkisini göz önüne almaktadır. Bu ilişkilerin saptanması için yukarıda sözü edilen, düşük gerilme seviyelerinde malzemenin sıkışabilirlik özelliklerini elde etmekte kullanılan en verimli deney tekniği Seepage Induced Test (Sızıntı etkili konsolidasyon deneyi)'lerden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında Haliç dipsel tarama çamuru, slurry hale getirilmiş ve Sızıntı Etkili Konsolidasyon deneyleri yapılmış ve elde edilen verilerle nonlineer konsolidasyon analizleri yapılmıştır. Haliç tarama çamurunun depolandığı saha ve aynı sahadan alınan çamurun laboratuvar model deney tankındaki davranışı Fox ve Barles [3] tarafından geliştirilen CS2 modeli kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL ANALİZ

Tarama çamurları madensel çamurlar gibi yüksek su muhtevalarındaki yumuşak zeminlerde uzun yıllardır yapılan çalışmalarla, bu tip zeminlerin arazide depolandıkları yerlerdeki davranışları izlenerek laboratuvar ve arazi deneyleri yardımıyla benzer zeminlerin davranışlarını tahmin etmek açısından büyük gelişmeler sağlamıştır. Ayrıca yapılan çalışmalar, araştırmalar sırasında kullanılan deney yöntemlerinin geliştirilmesine ve böylece nümerik çalışmaların daha başarılı olmasına yardımcı olmuştur. Literatürde nehir ve denizlerden taranan malzemelerde, Florida fosfatik killeri gibi maden çamurlarından oluşan yumuşak killerde ve ayrıca su muhtevası çok yüksek (çok yumuşak) organik killer üzerinde yapılan bir çok çalışmaya rastlamak mümkündür [3-6].

Arazideki yumuşak zeminin konsolidasyon problemini çözebilmek için dört elemana ihtiyaç vardır. Konsolidasyonu ifade eden denklem, başlangıç ve sınır koşulları, malzeme özellikleri ve çözüm metodu. Konsolidasyonu ifade eden denklem teoride tanımlanmaktadır, başlangıç ve sınır koşulları arazi koşulları ile tanımlanmış olup dikkate alınacak sınırlı sayıda durum vardır. Çözüm metodu genellikle nümerik bir algoritma geliştirilerek bilgisayara uygulanmaktadır. Analizler için gerekli en önemli husus çok geniş bir aralıkta değişen ve her yeni malzeme için belirlenmesi gereken malzeme karakteristikleridir. Arazide yumuşak zeminlerin konsolidasyon analizlerinin doğruluğunda kullanılacak malzeme karakteristiklerinin kalitesi büyük önem taşımaktadır.

Zemin kendi ağırlığı altında veya üzerine uygulanan yükler altında şekillendiğinde boşluk suyu konsolidasyon süresince dışarı atılmaktadır. Sıkışma zeminin kendi ağırlığında, dış yüklerle veya her ikisinin kombinasyonu ile gerçekleşebilir. Klasik konsolidasyon teorisindeki ana kabuller (sonsuz küçük şekil değiştirme ve sabit malzeme özellikleri) tarama çamurlarının yeni depolandığı alanlardaki büyük hacim değişimlerini modellemede yetersiz kalmaktadır. Konsolidasyon süreci başlangıçta McNabb [7], tarafından matematiksel olarak modellenmiş daha sonra bu model Gibson, England ve Hussey [8], tarafından geliştirilerek fiziksel olayı daha gerçekçi olarak modelleyen bir teoriye dönüştürülmüştür. Literatürde birçok sonlu şekil değiştirme teorisi eşitlikleri mevcut olup bu eşitliklerin esası aynı temel ilkeler üzerine kurulmuştur. Gibson, England ve Hussey (1967) [8], tarafından yazılan bir boyutlu lineer olmayan sonlu şekil değiştirme konsolidasyon eşitliğinde, kalın kil tabakalarının hızlı depolanması, yavaş yavaş biriktirilmesi ve yüklenmesi ile meydana gelecek konsolidasyon davranışı analiz edilebilmektedir. Bu eşitlik aşağıda verildiği şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ g(e) \frac{\partial e}{\partial z} \right] - f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

burada

### Determination of Consolidation Behaviour of...

$$g(e) = -\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad (2)$$

$$f(e) = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[ \frac{k(e)}{(1+e)} \right] \quad (3)$$

olup  $e$  boşluk oranı,  $\gamma_s$  ve  $\gamma_w$  sırasıyla ortamı meydana getiren katı ve sıvı kısımların birim hacim ağırlıkları,  $k$  permeabilite katsayısını,  $\sigma'$  düşey efektif gerilme,  $z$  ise azalan koordinattır. Bu denklem ince daneli zeminlerin uygulanan yükler altında tek boyutlu konsolidasyonunu değişen geometri ve değişen malzeme özelliklerini (permeabilite ve sıkışma modülü) dikkate alarak idealize etmektedir. Ancak bu diferansiyel denklemin çözülebilmesi için başlangıç ve sınır koşulları yanında ilave eşitliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu eşitlikler malzemenin bünye davranışını ifade eden boşluk oranı- efektif gerilme ve boşluk oranı- permeabilite eşitlikleridir. Bu bünye özelliklerinin değişimini ifade eden çeşitli bağıntılar (yukarıda verilen denklemin çözümü için) değişik araştırmacılar tarafından önerilmiştir (Somogyi [4], Krizek vd [9]).

Bu konuda Liu ve Znidarcic [10], tarafından yapılan çalışmalarda konsolidasyon sırasında yumuşak killerin sıkışmasını tanımlayan,

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (4)$$

eksponansiyel fonksiyonunun deneysel verilere kolayca uydurulabildiği bulunmuştur. Eşitlikte  $B$  üssü değeri daima negatiftir. Araştırmacılar bu formdaki sıkışabilirlik ilişkisi ile, genel logaritmik eşitlikte bulunan tüm eksikliklerin giderildiğini ileri sürmüşler, sıfır efektif gerilme durumundaki boşluk oranı tanımlanarak, gerilme büyüklüğüne bakılmaksızın boşluk oranının negatif olmasının engellendiğini belirlemişlerdir.

Yumuşak zeminlerin konsolidasyon probleminde büyük önem taşıyan permeabilite-boşluk oranı ilişkisi sınırlarının genişliği nedeni ile en zor belirlenen ilişki olmaktadır. Permeabilitenin boşluk oranıyla değişimi çok büyük aralıklarda gerçekleşmektedir.

Somogyi (1979) [4], tarafından tek boyutlu sıkışma altında zeminin konsolidasyonu sırasındaki permeabilite değişimi

$$k = Ce^D \quad (5)$$

fonksiyonuyla tanımlanmıştır. Burada  $C$  ve  $D$  ampirik katsayılarıdır.

Yumuşak zeminlerde yapılan deneysel çalışmaların amacı eşitliklerde kullanılan parametreleri en doğru şekilde belirleyerek konsolidasyon problemlerinde güvenilir sonuçlara ulaşmayı sağlayabilmektir. Bu tip yüksek su muhtevasına sahip yumuşak zeminlerde kendi ağırlığı ile konsolidasyon söz konusu olduğundan çok küçük efektif gerilme seviyelerine karşılık boşluk oranı ve permeabilite katsayısı değerlerinin saptanması arazideki davranışı modellemek açısından büyük önem taşımaktadır.

### 3. DENEY YÖNTEMİ: SIZINTI ETKİLİ KONSOLIDASYON DENEYİ

Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon özelliklerini belirlemek üzere farklı çalışma sistemlerine sahip bir çok deney yöntemi literatürde mevcuttur. Bu deneylerin bazıları sabit deformasyon hızlı deneyler, sulu çamur (slurry) konsolidometre, hidrolik konsolidasyon, santrifüj deneyleri ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleri olarak sayılabilir. Tüm bu deney yöntemlerinin uygulanma esaslarına ve veri değerlendirme yöntemlerine bağlı olarak avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon özellikleri belirlemek üzere son yıllarda ilk kez İmai tarafından oluşturulan sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği diğer yöntemlere kıyasla bir çok avantaja sahiptir. Znidarcic ve Liu [2], sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneğinde bazı iyileştirmeler yaparak yüksek nonlineer konsolidasyon ilişkilerini değerlendirmek için daha güvenilir yeni bir deney yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem İmai tarafından düzenlenen orijinal sızıntı etkili konsolidasyon deneyi esas alınarak düzenlenmiştir. Bu yeni yöntem ile diğer deney yöntemlerindeki

dezavantajların ve sınırlandırılmalarının birçoğu ortadan kaldırmıştır. İmai [1] tarafından geliştirilen sızıntı etkili deney yönteminin dezavantajlarından ilki, sistemin özel deney aletleri gerektirmesi, ikincisi ise deney sonunda alınan dataların kalitesinin deneyi yapan kişiye bağlı olmasıdır. Bununla birlikte boşluk oranı dağılımının belirlenmesinde kullanılan yöntemin güvenilir olmadığı ve yanlış sonuçların bulunabildiği Znidarcic [11] tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Znidarcic [2] tarafından, lineerleştirilmiş konsolidasyon teorisini temel alan sabit deformasyon hızlı deney tekniğinin de çok yumuşak kohezyonlu zeminler için uygun olmadığı değerlendirilmiştir yapılmıştır.

Sızıntı etkili konsolidasyon deneyi aynı amaçla uygulanan Hidrolik Yük Farkı tekniği [12] ile karşılaştırıldığında da birçok avantaja sahiptir. Bunlardan ilki, akım pompası sayesinde, hacim değişimlerini ölçen metotlardan dört kat daha hassas bir şekilde dengeli durum akım hızlarının belirlenmesinin sağlanmasıdır. İkincisi olarak, akım pompası düşük efektif gerilme değerlerinde daha güvenilir sonuçlar almayı sağlamakta, son olarak, deney esnasında zeminin dengeli duruma gelişi transdüserler yardımıyla anında kontrol edilebilmektedir [13]. Florida fosfatik killeri üzerinde sızıntı etkili konsolidasyon deneyi ve birçok analizler yapılmıştır [14]. Sızıntı etkili konsolidasyon deneyinde zeminde dengeli durum koşullarına ulaşmadan geçici bir konsolidasyon sağlanmaktadır. Böylece bu evrede elde edilen veriler belirlenen konsolidasyon için bağımsız bir doğrulama şansı vermektedir.

Bu deney yönteminde, zemin numunesindeki su akım pompasıyla geri çekilerek akım hızının sabit tutulması sağlanır. Suyun aşağı doğru akmasına bağlı olarak numune konsolide olur ve zemin boyunca basınç farklılıklarına neden olur. Bu basınç farklılıkları deney boyunca ölçülür ve veri toplama sistemi ile kaydedilir. Sabit akış dengeli duruma ulaşıncaya, yani konsolidasyon tamamlanıp zemin içindeki basınç farklılığı sabit bir değer alıncaya kadar devam eder. Deneylerde belirlenen basınç düşüşleri akış mesafesi bitiminde akım pompasının sıfırlanması sonucu oluşmaktadır. Deney verilerinde görülen akış kesintileri boşluk basıncı davranışını önemli olarak etkilemez.

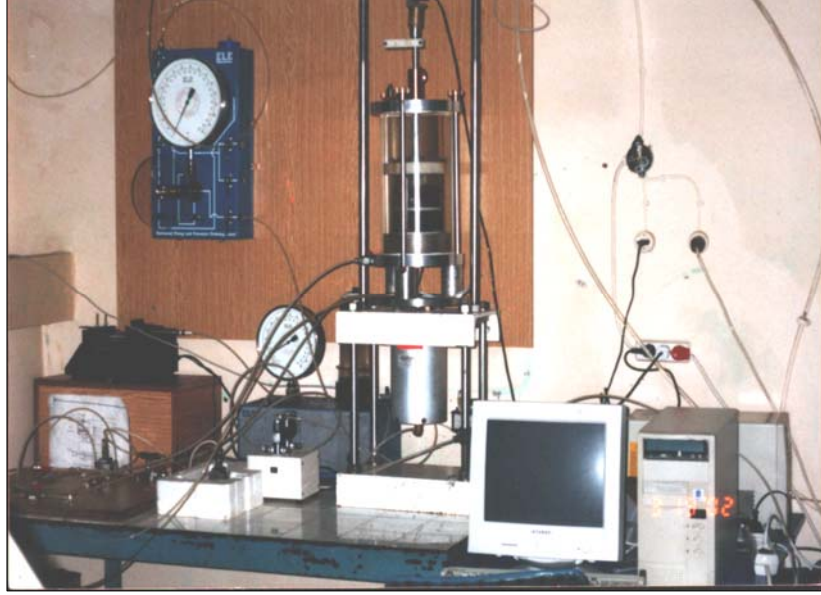
#### 4. SIZINTI ETKİLİ KONSOLIDASYON DENEY DÜZENEĞİ

Şekil 1' de görüldüğü gibi laboratuvar ekipmanı saydam bir halka içinde zemin numunesini kaplayan bir basınç hücresi, hafif bir piston ve tabana oturan geçirimsiz bir düzlem plaka, yükleme halkası, ve yüksekliği ölçmek için deformasyon saatinden oluşmaktadır. Alt tabandaki iki kanal zemin tabanındaki boşluk suyunu akış pompasına ve basınç ölçere (transduser) bağlamakta olup akış pompası ile numunedeki akış oranı hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Numunenin her iki tarafındaki basıncın zamana bağlı değişimleri, basınç transduserleri ile bir veri toplama sistemi vasıtasıyla bilgisayara istenilen zaman aralıklarıyla kaydedilmektedir.

Bu deneyde zemin numunesindeki su bir pompa ile geri çekilerek akım hızının sabit tutulması sağlanmaktadır. Suyun aşağı doğru akmasına bağlı olarak, değişen hidrolik yük farkı ile numune konsolide olmakta ve zemin boyunca basınç farklılıkları oluşmaktadır. Bu basınç farklılıkları deney süresince ölçülerek veri toplama sistemi ile kaydedilmektedir. Sabit akış dengeli duruma ulaşıncaya, yani konsolidasyon tamamlanıp zemin içindeki basınç farklılığı sabit bir değer alıncaya kadar devam etmektedir.

Sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği beş ana parçadan oluşmaktadır:

- Basınç kontrol paneli
- Sızıntı etkili konsolidasyon deney hücresi ve basınç transduserleri
- Pompa (Hız ayarlı)
- Yükleme sistemi
- Veri toplama ve değerlendirme sistemi (Bilgisayar ve Labview programı)



**Şekil 1.** Sızıntı etkili konsolidasyon deney düzeneği

### **5. HALIÇ KİLİ ÜZERİNDE YAPILAN SIZINTI ETKİLİ KONSOLIDASYON- KADEMELİ YÜKLEME VE PERMEABİLİTE ÖLÇÜMÜ DENEY SONUÇLARI**

Bu çalışmada sızıntı etkili konsolidasyon deneyi Haliç tarama çamuru alınarak hazırlanmış sulu karışımlarda uygulanmış ve bu zeminler için düşük gerilme seviyelerini de içeren efektif gerilme-boşluk oranı ( $e-\sigma_v'$ ) ve permeabilite- boşluk oranı ( $k-e$ ) ilişkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Haliç kilinde beş ayrı başlangıç boşluk oranında ( $e_0$ ) sızıntı etkili konsolidasyon ve kademeli yükleme ile permeabilite ölçümü deneyi yapılmıştır. Deneylerde kullanılan Haliç kiline ait zemin indeks özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

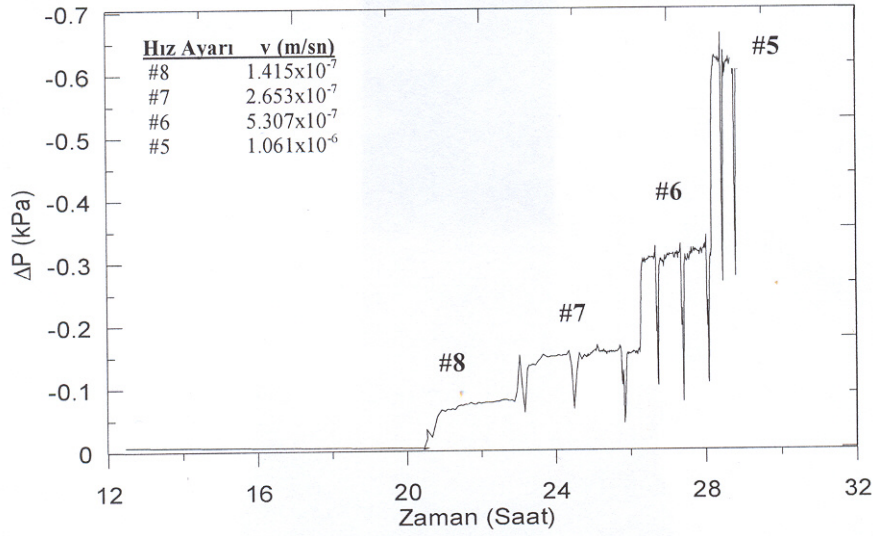
Sızıntı etkili konsolidasyon deneyi numune kendi ağırlığı altında çökeldikten sonra çok düşük bir basınç (0.25 kPa) altında yapılmaktadır. Deneyin her aşamasında numuneye 200 kPa'lık bir ters basınç verilmektedir. Deneysel çalışmalarda her bir deney iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada numuneler sızıntı etkisi ile konsolide edilmiş ve ikinci aşamada ise kademeli yük uygulanarak numune konsolide edilmiştir. Haliç kilinde başlangıç boşluk oranı  $e_0=11.44$  değerinde düzenlenen 1 No'lu deneyde numuneye uygulanan farklı akış hızları sonucu tabanda oluşan basınç farkı  $\Delta P$  (kPa) değerleri, verilerin Matlab programında gerçekleştirilen filtrasyon işlemi sonucu grafiksel olarak Şekil 2'de, deney verileri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Haliç kili zemin indeks özellikleri

	$W_L$ (%)	$W_P$ (%)	$I_P$ (%)	$G_S$
Haliç	53	23	30	2.72

**Tablo 2.** Haliç kili üzerinde yapılan ( $e_0=11.44$ ) Sızıntı Etkili Konsolidasyon Deneyi (SEK) ve Kademeli Yükleme (KY) deneyi ile permeabilite ölçümü sonuçları

Denev No	Akım Hızları	Efektif Gerilme (kPa)	Bosluk Oranı (e)	Ölçülen Permeabilite Katsayıları Değerleri (m/sn)
1 ( $e_0=11.44$ )	SEK # 7	0.364	5.22	-
	# 6	0.445	4.36	-
	# 5	0.575	4.01	-
	KY # 7, # 6	5.0	2.32	$1.31 \times 10^{-7}$
	# 8, # 7	25.0	1.41	$1.35 \times 10^{-7}$
	# 7, # 6	85.0	0.97	$6.74 \times 10^{-8}$ , $5.2 \times 10^{-8}$ $4.60 \times 10^{-8}$ , $5.1 \times 10^{-8}$

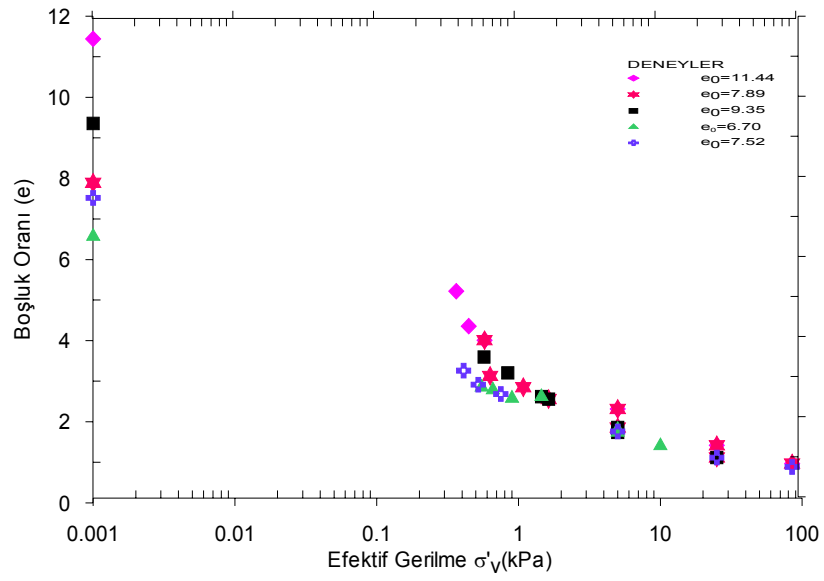
**Şekil 2.** Haliç kili ( $e_0= 11.44$  için) SEK deneyi zamana bağlı basınç farkı değişim grafiği

Deney sonuçlarından ölçülen değerler (4) ve (5) eşitliklerinde yerine konularak elde edilen denklem takımının çözülmesiyle A,B C, D ve Z ampirik parametrelerinin değerleri elde edilmiş ve Tablo 3'de verilmiştir.

Haliç kilinde uygulanan SEK deney sonuçlarından elde edilen (e)-( $\sigma_v'$ ) değişimi Şekil 3'de,(e)-(k) değişimi ise Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu şekillerde deney verileri noktalar olarak gösterilmiştir. Gerilme artışına bağlı boşluk oranı değişimi ve permeabilite katsayısının boşluk oranına bağlı değişiminin literatüre uygun olduğu gözlenmiştir.

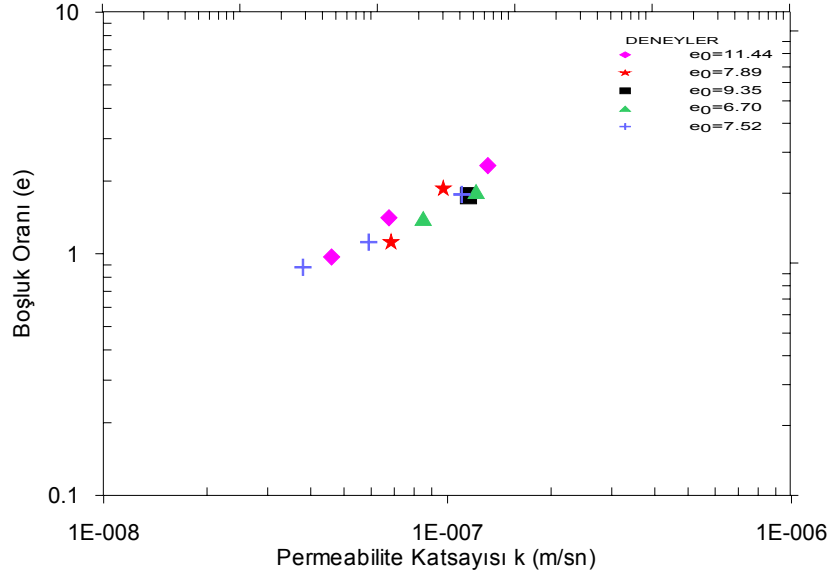
Tablo 3. Deneysel olarak belirlenen A,B,C,D ve Z katsayıları değerleri

DENEY NO	Boşluk Oranı (e)	A	B	Z	C	D
1	11.44	3.73	-0.30	0.024	$3.62 \times 10^{-08}$	1.80
2	7.89	2.55	-0.28	0.010	$3.00 \times 10^{-07}$	0.80
3	9.36	2.77	-0.29	0.015	$6.12 \times 10^{-08}$	1.13
4	6.70	2.32	-0.22	0.008	$4.02 \times 10^{-08}$	2.21
5	7.52	2.53	-0.22	0.008	$4.43 \times 10^{-08}$	0.85



Şekil 3. Haliç kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e) -efektif gerilme ( $\sigma'_v$ ) grafiği





Şekil 4. Haliç kili üzerinde yapılan SEK deney sonuçlarından elde edilen boşluk oranı (e)–permeabilite katsayısı (k) grafiği

## 6. DENEY SONUÇLARININ NÜMERİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

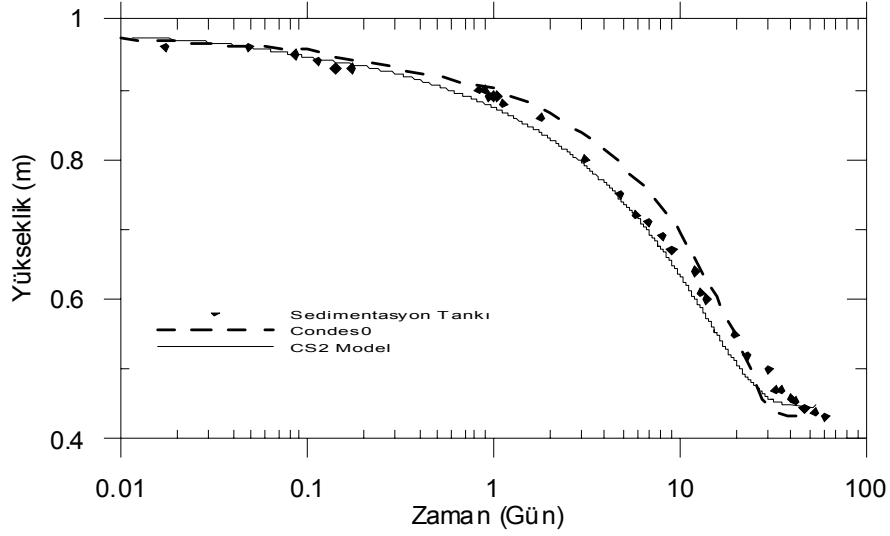
### 6.1. Haliç Kilinde Sedimentasyon Tankı Oturma Analizi

Depolanmış yüksek su muhtevasına sahip çamurun kendi ağırlığı altında konsolidasyonu sonucu meydana gelecek oturmaların doğru tahmin edilmesinde model deneyler yapılması ve sonuçlarının nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılması, arazi davranışının tahmininde kullanılacak parametrelerin güvenilirliği açısından önemli bir deneyim sağlamaktadır. Haliç'ten taranan dipsel çamurun depolanma alanındaki sedimentasyon ve konsolidasyon davranışını laboratuvar deneyleri olarak inceleyebilmek amacı ile İpekoğlu [15] tarafından model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Model deney tankına arazideki su muhtevası değerinde hazırlanarak yerleştirilen sulu çamur örneklerinin kendi ağırlığı altında konsolidasyon davranışı belirlenmiştir. Diğer yandan Haliç tarama çamuru gibi yüksek su muhtevasına sahip malzemelerin kendi ağırlığı ve/veya sürüş yükleri altında analizi için non-lineer sonlu şekil değiştirme (finite strain) analizi yapılması ve bu analizler için düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisinin ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Model deney tankına yerleştirilen, (başlangıç su muhtevası değeri  $w=300\%$ , başlangıç boşluk oranı  $e_0=8.00$ , başlangıç yüksekliği  $H_0=0.98$  m olmak üzere) Haliç dipsel tarama çamurunun zamana bağlı davranışı, düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkileri deney sonuçlarından elde edilen A,B,Z,C ve D parametreleri kullanılarak, iki farklı bilgisayar programı CONDES0 [16],CS2 Model [12] ile modellenmiştir [17]. Buna göre farklı programlar kullanılarak elde edilen oturma-zaman davranışının model deney tankı oturma-zaman davranışına çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Deneylemlerden elde edilen veriler ile CS2 ve CONDES0 adlı programları yardımı ile yapılan analizlerde; sedimentasyon tankındaki Haliç sulu çamurunun kendi ağırlığı altındaki davranışını doğruya en yakın şekilde başlangıç boşluk oranı  $e_0=7.894$  olan deney verisinden elde

## Determination of Consolidation Behaviour of...

edilebildiği belirlenmiştir. Buna göre başlangıç boşluk oranı  $e_0=7.894$  olan deney verileri bu iki farklı program ile kullanılarak elde edilen oturma eğrileri Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Sedimentasyon tankı oturma davranışının SEK ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney verileri ve deney verilerinden elde edilen parametreler kullanılarak CS2 ve CONDES0 programlarıyla modellenmesi

## 6.2. Haliç Tarama Çamurunun Arazideki Davranışının CS2 Model ve CONDES0 ile Modellenmesi

Haliç tarama çamurunun arazideki davranışı, model tank için yapılanlara benzer şekilde sızıntı etkili konsolidasyon deneylerinden elde edilen sıkışma parametreleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde CS2 model programı kullanılmıştır Alibeyköy’deki depolama sahasına başlangıç yüksekliği 73 m olacak miktarda ve %300 su muhtevasında Haliç’ten taranan dipsel çamur pompalanmıştır. Analizlerde kullanılan ve malzeme bünye ilişkilerini veren (4) ve (5) bağıntıları için gerekli malzeme katsayıları Tablo 4 ’de verilmiştir. Bu malzeme katsayıları sızıntı etkili konsolidasyon deneylerinden belirlenmiş olup yukarıda açıklandığı gibi model tank analizlerinde de kullanılmıştır.

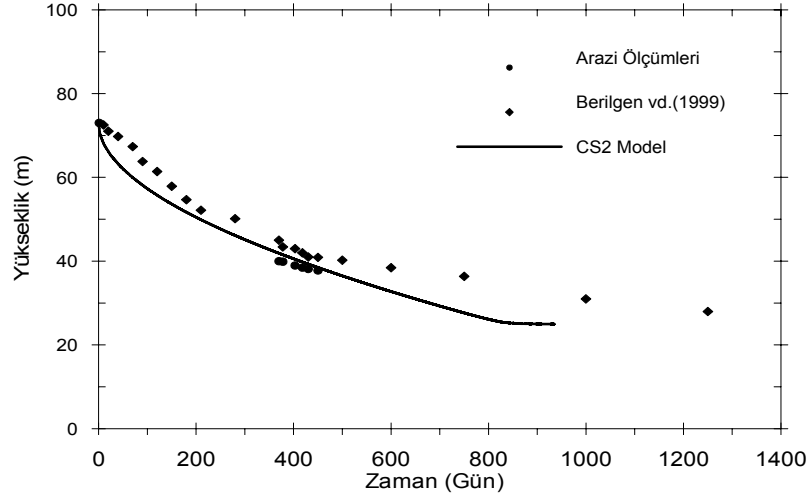
Analizlerden elde edilen oturma-zaman değişimi Şekil 6’da verilmiş, sonuçlar ayrıca, daha önce kendi ağırlığında konsolidasyon deney verileri kullanılarak CS2 model ile yapılan [18] oturma analizinden elde edilen verilerle de karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. Haliç kili oturma analizlerinde kullanılan ve sızıntı etkili konsolidasyon deneyleriyle belirlenen A,B,Z,C ve D katsayıları

<u>Numune Adı</u>	<u>G<sub>s</sub></u>	<u>PL</u> <u>w<sub>p</sub>(%)</u>	<u>LL</u> <u>w<sub>L</sub>(%)</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>Z</u> <u>(kPa)</u>	<u>C</u> <u>(m/sn)</u>	<u>D</u>
Haliç	2.71	50	75	2.55	-0.28	0.10	$3.00 \times 10^{-7}$	0.8

Grafikte de görüldüğü gibi yapılan analizlerle elde edilen davranış eğrileri arazi

verileriyle uyumlu olup, daha önce bu konudaki bir çalışmada yapılan oturma tahminine yakın oturma değerleri belirlenmiştir.



**Şekil 6.** Haliç tarama çamurunda (zemin indeks özellikleri yardımı ile belirlenen tahmin parametreleri CS2 modelde kullanılarak) oturma analizlerinin arazi ölçümleriyle karşılaştırılması

## 7. SONUÇLAR

Yüksek su muhtevasına sahip ince daneli zeminler (tarama çamuru, maden atığı vb.) konsolidasyonunu tamamlamamış olup kendi ağırlığı ve/veya düşey sürşarj yükleri altında çok büyük miktarda şekil değiştirme (oturma) meydana getirdiğinden, bu tür zeminlerin konsolidasyon oturmalarını hesaplarken klasik konsolidasyon teorisinden yararlanmak doğru sonuçlar vermemektedir. Bu tür zeminlerin konsolidasyon davranışı için non-lineer sonlu şekil değiştirmeli konsolidasyon analizleri yapılmalıdır. Bünye bağıntısı olarak boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi yanında permeabilite-boşluk oranı ilişkisinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu ilişkilerin çok düşük gerilme seviyelerindeki değerlerini elde etmek klasik laboratuvar konsolidasyon deneyleri ile mümkün olmamaktadır. Günümüzde bu amaçla kullanılan en etkin deney yöntemi sızıntı etkili konsolidasyon deneyidir. Bu çalışmada sızıntı etkili konsolidasyon deneyi Haliç tarama çamuru ile hazırlanmış sulu karışımlarda uygulanmış ve bu zeminler için düşük gerilme seviyelerini' de içeren efektif gerilme-boşluk oranı ( $e-\sigma_v'$ ) ve permeabilite- boşluk oranı ( $k-e$ ) ilişkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda her bir deney iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada numuneler sızıntı etkisi ile konsolide edilmiş ve ikinci aşamada ise kademeli yük uygulanarak numune konsolide edilmiştir. Haliç tarama çamuru üzerinde yapılan permeabilite deney sonuçlarından elde edilen verilere göre zeminlerin permeabilite katsayısı  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  m/sn arasında değişmekte ve yüksek plastisiteli, kil oranı düşük ve organik madde miktarı yüksek siltli zeminler için literatürde yer alan değerlerle uyum göstermektedir.

Sızıntı etkili konsolidasyon (SEK) ve kademeli yüklemeli konsolidasyon aşamalarında ölçülen sıkışma ve permeabilite deney verileri değerlendirilerek (4) ve (5) eşitliklerinde boşluk oranı-efektif gerilme ( $e-\sigma_v'$ ) ve efektif gerilme-permeabilite ( $k-e$ ) değişimlerini tanımlayan A,B,C,D ve Z parametreleri Haliç kili için belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak elde edilen boşluk oranı-efektif gerilme ( $e-\sigma_v'$ ) ve permeabilite katsayısı-boşluk oranı ( $k-e$ ) değişimlerine ait

## ***Determination of Consolidation Behaviour of...***

bulguların literatürde yüksek su muhtevasına sahip zeminlerde elde edilen bulgularla uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Haliç tarama çamuru gibi yüksek su muhtevasına sahip malzemelerin kendi ağırlığı ve/veya sürüş yükleri altında analizi için non-linear sonlu şekil değiştirme (finite strain) analizi yapılması ve bu analizler için düşük gerilme seviyelerindeki boşluk oranı efektif gerilme ilişkisinin ve boşluk oranı permeabilite ilişkisinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir model deney tankına yerleştirilen (İpekoğlu [15]), Haliç dipsel tarama çamurunun zamana bağlı davranışı sızıntı etkili konsolidasyon deneyi ve kademeli yükleme permeabilite ölçümü deney sonuçlarından elde edilen malzeme parametreleri konsolidasyon analizi programında kullanılarak (CS2 Model [12]) modellenmiştir. Buna göre farklı modeller kullanılarak elde edilen oturma-zaman davranışının model deney tankı oturma-zaman davranışına çok yakın olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan Haliç çamurunun depolandığı sahadaki davranışını tahmin etmek için CS2 modelinde, deneylerden elde edilen parametreler kullanılarak oturma analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler ile Haliç tarama çamurunun arazideki davranışının uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

## **TEŞEKKÜR**

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

## **KAYNAKLAR**

- [1] Imai, G. (1979), "Development Of A New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force", Soils and Foundations, 19, No. 3, 45-60.
- [2] 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.
- [3] Carrier, W. D. III, Bromwell, L. G., ve Somogyi, F. (1983), "Design capacity of slurried mineral waste ponds." J. Geotech. Engrg., ASCE, 109(5), 699-716.
- [4] Somogyi, F. (1979), Analysis and Prediction of Phosphatic Clay Consolidation: Implementation Package, Technical Report, Florida Phosphatic Clay Research Project, Lakeland, Florida.
- [5] Olsen, R. E., ve Ladd, C. C (1979), "One-Dimensional Consolidation Problems" Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Volume 105, Number GTI, 11-30.
- [6] Abu-Hejleh, A. N. Ve Znidarcic, D., (1992), "User Manual for Computer Program SICTA " Rep. Prepared for FIPR, Vol:2 ,Dep.of Civ. Engr. University of Colorado, Boulder, Colo.
- [7] McNabb, A., (1960), "A Mathematical Treatment of One-Dimensional Soil Consolidation" Q. Appl. Maths. Vol:17: Number 4:337-347.
- [8] Gibson, R. E., England, G.L. ve Hussey, M.J.L (1967), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. I. finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers." Geotechnique 17, No: 3, 261-273.
- [9] Krizek, R. J., ve Salem, A.M., (1974), "Behavior of Dredged Material in Diked Containment Areas", Technical Report No:5 , Department of Civil Engineering, Northwestern University , Evanston, Illinois.
- [10] Liu, J.C., ve Znidarcic, D. (1991), "Modelling One-Dimensional Compression Characteristics of Soils" Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 117(1), 162-169.
- [11] Znidarcic, D., Schiffman, R. L., Pane, V., Croce, P., Ko, H.Y., ve Olsen, H. W. (1986), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: Part V. constant rate of

- deformation testing and analysis." *Geotechnique*, London, England, 36(2), 227-237.
- [12] 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.
- [13] Abu-Hejleh, A. N., Znidarcic, D., ve Barnes, B.L (1996), "Consolidation characteristics of phosphatic clays." *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 122(4), 295-301.
- [14] Abu-Hejleh, A. N. Ve Znidarcic, D., (1995), "Dessiccation Theory for Soft Cohesive Soils " *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 121(6), 493-502.
- [15] İpekoğlu, P., "Atık Çamur Sahalarının Rehabilitasyonu" Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.T.Ü., 2004.
- [16] Yao, D.T.C., Znidarcic, D., (1997), User's Manual for Computer Program CONDES0, Prepared for FIPR, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder.
- [17] İpekoğlu, P., Berilgen. S. A., Berilgen, M. M. Ve Özçoban, M.Ş. (2002), "Haliç kilinin kendi ağırlığı altında konsolidasyonu", ZMTM 9. Kongresi, Eskişehir.
- [18] Berilgen, M.M, Ozaydin, K., and Edil, T., (1999), "A Case Study: Dredging And Disposal Of Golden Horn", *Geotechnics of High Water Content Materials*, ASTM STP 1374, T.B. Edil and P.J. Fox, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.