

MATHEMATICAL MODELLING OF PORE WATER PRESSURE VARIATION OF SATURATED NORMALLY CONSOLIDATED CLAYEY SOILS

Uğur DAĞDEVİREN

Res. Ass.
Sakarya University
Sakarya, TURKEY
udagdeviren@sakarya.edu.tr

Mustafa TUNCAN

Prof. Dr.
Anadolu University
Eskişehir, TURKEY
mtuncan@anadolu.edu.tr

Mehmet İ. ONUR

Res. Ass.
Anadolu University
Eskişehir, TURKEY
mionur@anadolu.edu.tr

Ahmet TUNCAN

Prof. Dr.
Anadolu University
Eskişehir, TURKEY
atuncan@anadolu.edu.tr

ABSTRACT

One of the most important problems in saturated cohesive soils is the effect of excess pore water pressure to the soil behavior. In order to determine the consolidation parameters, tests is conducting on remolded samples. In this study, mathematical model is developed for the test system without disturbance is made. Four different initial conditions and constant boundary conditions were nominated and pore water pressure conduction equation was recommended. Explicit analytical and numerical solutions of this equation were made. In addition, relationship between consolidation theory and pressure conduction approach was discussed.

**SUYA DOYGUN NORMAL KONSOLİDE KİLLİ ZEMİNLERİN
BOŞLUK SUYU BASINCI DEĞİŞİMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

Uğur DAĞDEVİREN

Arş. Gör.
Sakarya Üniversitesi
Sakarya, TÜRKİYE
udagdeviren@sakarya.edu.tr

Mustafa TUNCAN

Prof. Dr.
Anadolu Üniversitesi
Eskişehir, TÜRKİYE
mtuncan@anadolu.edu.tr

Mehmet İ. ONUR

Arş. Gör.
Anadolu Üniversitesi
Eskişehir, TÜRKİYE
mionur@anadolu.edu.tr

Ahmet TUNCAN

Prof. Dr.
Anadolu Üniversitesi
Eskişehir, TÜRKİYE
atuncan@anadolu.edu.tr

ÖZET

Suya doygun kohezyonlu zeminlerde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi aşırı boşluk suyu basıncının zemin davranışına etkisidir. Zeminlerin konsolidasyon parametrelerinin doğru olarak belirlenebilmesi ancak deneylerin örselenmemiş numuneler üzerine uygulanması ile mümkündür. Bu çalışmada, örselenmenin beklenmediği deney sistemi için matematiksel model geliştirilmiştir. Deneysel modele uygun olacak şekilde, dört farklı başlangıç şartı ve değişmeyen sınır şartları tayin edilerek boşluk suyu iletim denklemi önerilmiştir. Denklemin tam analitik ve nümerik çözümü yapılarak, konsolidasyon teorisiyle basınç iletimi arasındaki ilişki incelenmiştir.

GİRİŞ

Suya doymun kohezyonlu zeminlerdeki en önemli sorun aşırı boşluk suyu basıncının zemin davranışına etkisidir. Aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesi kil zeminlerde zamana bağılı olarak gerçekleşmektedir. Bu ise yapılarıdaki oturmaının zamana bağılı olacağı anlamına gelmektedir. Oluşacak oturmaları önceden önlem alınmaması, ileride yapıda istenmeyen problemler doğurabilecektir. Bu nedenle temel zemininin konsolidasyon parametrelerinin ve buna bağılı olarak aşırı boşluk suyu basıncının değışiminin tam olarak bilinmesi gerekmektedir.

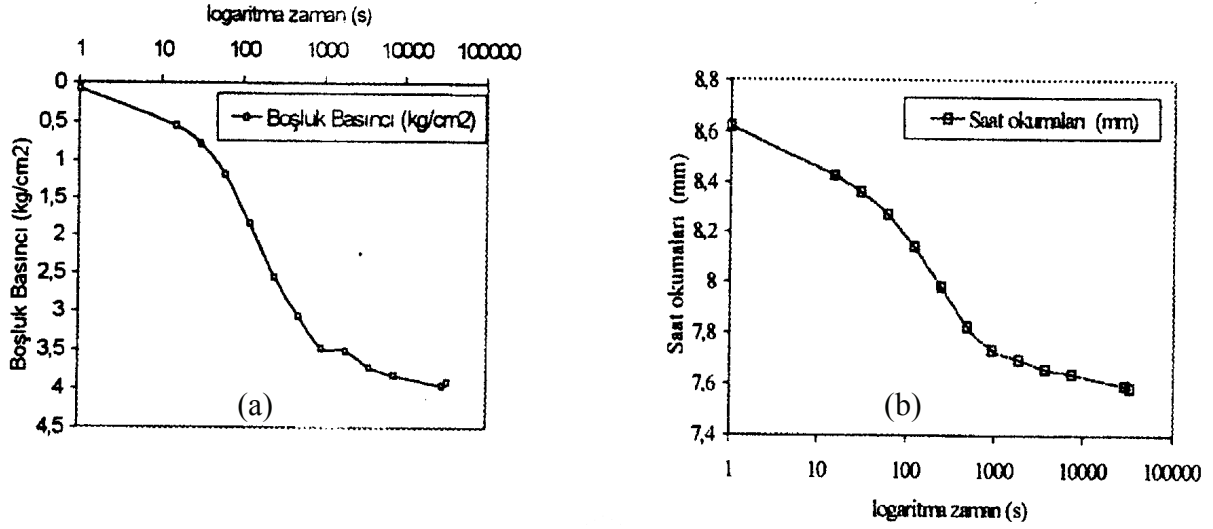
Konsolidasyon parametrelerinin doğru olarak belirlenebilmesi için, deneyler örselenmemiş numuneler üzerinde yapılmaktadır. Fakat numunenin araziden alınışı ve deney için hazırlanışı örselenmelere yol açmaktadır. Buna ek olarak, mevcut konsolidasyon deneylerinde uygulanan gerilmeler altında numunelerin yapısı kısa süre içinde değışmektedir. Deney sırasında örselenmenin olmadığı bir sistem sonuçların daha güvenilir olmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada, örselenmenin olmadığı bir deney sisteminin matematiksel modeli geliştirilmiştir. Deney sistemi temel olarak, drenaja kapalı yüzeylerden oluşmaktadır. Bu nedenle uygulanan su basıncı altında, suya doymun zemin numunesinde hacim değışikliği ve yapısal bozulmalar oluşmayacaktır.

PROBLEMİN TANIMI ve AMAÇ

Konsolidasyon kavramı geoteknik mühendisliğindeki en önemli kavramlardan biridir. Suya doymun yumuşak ve sıkışabilir kil zeminler gerilme artışına maruz kaldığında, zamana bağılı olarak oturmalar meydana gelecektir. Oturmaların bir boyutlu olduğu kabulü yapılmakta ve konsolidasyon parametreleri genellikle bir boyutlu konsolidasyon deneyi sonuçlarıyla belirlenmektedir. Bu deney sırasında, numunenin her an yapısı değışmektedir. Deney sırasında örselenmenin olmadığı bir sistemde sonuçların daha güvenilir olacağı düşünülmektedir. Bununla ilgili bir deney sistemi Tuncan vd. (1998) tarafından geliştirilmiştir. Hazırlanan deney sisteminde yan yüzler kapalıdır ve suyun drenajına izin verilememektedir. Bu nedenle, suya doymun olarak hazırlanan numunelerde yükleme durumunda hacimsel değışiklik oluşmayacaktır. Çalışmanın esas prensibi numunenin üst başlığından su basıncının uygulanması ve numunenin alt başlığından basınç değışiminin gözlenmesidir. Deneylerde, ön konsolide edilmiş kaolinit kil numunesi yeni geliştirilen deney aletine yerleştirdikten sonra,

0.25 kg/cm², 0.50 kg/cm², 1.00 kg/cm², 2.00 kg/cm² ve 4.00 kg/cm²'lik su basınçlarını numunenin üst başlığından uygulamışlar ve drenaja kapalı alt başlıktan boşluk suyu basıncı ölçümelerini almışlardır. Çalışma sonucunda, alt başlıktan okunan boşluk suyu basıncı değerinin zamanla arttığı gözlenmiş ve bu artış geleneksel konsolidasyon deneyindeki zamana bağlı deformasyonla ilişkilendirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. 4 kg/cm²'lik yükleme kademesi için a) Boşluk suyu basıncı – logaritma zaman grafiği, b) Saat okuması – logaritma zaman grafiği (Tuncan vd., 1998)

Problemin mekanik olduğunu düşünecek olursak, numunenin üst yüzeyinden uygulanan su basıncı, aynı anda tepki olarak alt yüzeyde de okunmalıydı. Fakat deneylerde bu gözlenmemiştir. Ortam drenaja kapalı ve numune tamamen suya doymun olduğu için numunede su akışı olacağı da düşünülemez. Deneysel gözlemler mevcut bilgilerle açıklanamamaktadır. Bu nedenle, boşluk suyu basıncının zamanla numunenin alt noktalarına ulaşmasını açıklayabilmek için bazı tanımlamaların yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

MATEMATİKSEL MODEL

Tabiattaki olayların tümünde bir enerji akışı gözlenmektedir. Yani bir ortamda enerji farkı nedeniyle atomik veya moleküler hareketlilik olmaktadır. Ortamdaki enerji akışı, denge anına kadar devam edecektir. Enerji iletimiyle ilgili en çok bilinen problemler, su akışı (Darcy Kanunu), ısı akışı (Fourier Kanunu), elektriksel akış (Ohm Kanunu) ve kimyasal akış (Fick

Kanunu)'dur[4]. Bu yasalar tamamen doğada gözlenen olaylardan geliştirilmiştir. Olaylara daha çok deneysel verilere dayanan bir genelleştirme olarak bakılmaktadır. Deneysel çalışmalarda, enerji akışının bağlı olduğu parametreler belirlenmekte ve malzeme yapısına bağlı olarak katsayılar tanımlanmaktadır.

Tuncan vd. kurdukları deney sisteminde, alt başlıktan ölçülen boşluk suyu basıncının zamanla arttığını gözlemişlerdir. Bu sonuç, matematiksel olarak diğer difüzyon problemlerine benzemektedir (Şekil 2). Konsolidasyon probleminde aşırı boşluk suyunun sönümlenmesi, ısı transferi problemlerinde ısıtılan bir çubuğun ucundaki sıcaklığın zamanla artışı gibi, buradaki problemde de boşluk suyu basıncının zamanla artması söz konusudur. Modeldeki anlık iletim denklemi, Darcy ve Fourier yasalarından yararlanılarak çıkarılırsa,

$$q = k_p \cdot A \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

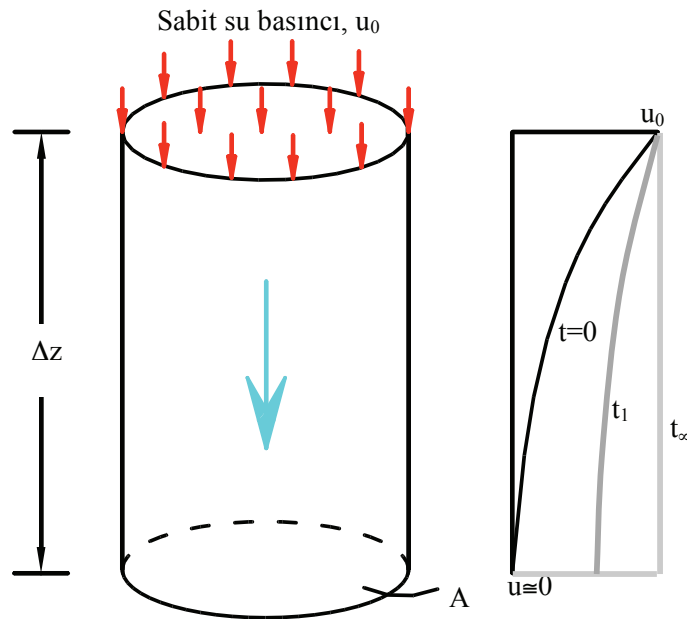
şeklinde olacaktır. Burada,

q , numunede birim zamanda aktarılan basınç miktarı,

k_p , zeminin basınç iletim katsayısı,

A , numunenin kesit alanı,

$\frac{\partial u}{\partial x}$, numune üzerindeki basınç farklılığı nedeniyle oluşacak basınç gradyanı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2. Boşluk suyu basıncı iletimi

Boşluk suyu basıncının iletim denklemi, numunenin uzunluğuna ve zamana bağlı parabolik kısmi diferansiyel denklem olacaktır.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

K , yayılım katsayısıdır. Boyutu ise cm^2/s 'dir.

Yayılım katsayısının içeriğiyle ilgili çalışmalar halen devam etmektedir. Ön bilgi olarak, bu katsayının çok büyük bir olasılıkla basınç iletim katsayısıyla orantılı olacaktır. Basınç iletim katsayısı büyük olan zeminlerde yayılım katsayısı da büyük olacaktır ve basıncın alt noktalara iletimi kısa sürede gerçekleşecektir. Basınç iletim katsayısı küçük zeminlerde ise iletim zamana bağlı olacaktır.

MODELİN ANALİTİK ve NÜMERİK ÇÖZÜMÜ

BOŞLUK SUYU BASINCI İLETİM DENKLEMİNİN ANALİTİK ÇÖZÜMÜ

Boşluk suyu basıncı iletim denkleminin (Denklem 2) çözümü için gerekli olan iki sınır şartı ve bir başlangıç şartı deneysel modelden belirlenmektedir. Numunenin üst yüzeyinden ($z=0$) sabit bir su basıncı uygulanmaktadır. Alt yüzey ($z=L$) ise drenaja kapalıdır. Başlangıç anında ise numunenin her noktasındaki boşluk suyu basıncı farklı değerdedir. Başlangıç şartını fonksiyonel olarak tanımlamak için, numune üzerinde ara noktalarda da boşluk suyu basınç değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Önceki deney sisteminde bu olmadığı için denklemin çözümü için, dört tip başlangıç şartı durumu incelenmiştir.

I. sınır şartı : $z = 0$ 'da $u(0,t) = u_0$

II. sınır şartı : $z = L$ 'de $\frac{\partial u}{\partial z}(L,t) = 0$

Başlangıç şartı,

a) Birinci üstel yaklaşım; $u(z,0) = f(z) = u_0 \cdot e^{-z}$

b) Lineer yaklaşım; $u(z,0) = f(z) = u_0 \left(1 - \frac{z}{L}\right)$

c) Parabolik yaklaşım; $u(z,0) = f(z) = u_0 \left(1 - \frac{z^2}{L^2}\right)$

d) İkinci üstel yaklaşım; $u(z,0) = f(z) = u_0 \cdot e^{-4z}$

Her dört yaklaşım için de, denklemin çözümü aşağıda sunulmuştur.

- Birinci üstel yaklaşım için çözüm;

$$u(z,t) = u_0 + u_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left\{ 4e^{-L} \left[-4e^L \cdot L^2 + 2L \cdot (2n-1) \cdot \pi \cdot \cos(n\pi) \right] \right\}}{(2n-1) \cdot \pi \cdot [4L^2 + (2n-1)^2 \pi^2]} \cdot \sin\left[\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot z}{2L}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \cdot K \cdot t}{4L^2}\right] \quad (3)$$

- Lineer yaklaşım için çözüm;

$$u(z,t) = u_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ -\frac{8 \cdot u_0}{\pi^2 \cdot (2n-1)^2} \cdot \sin\left[\frac{(2n-1) \cdot \pi}{2}\right] \right\} \cdot \sin\left[\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot z}{2L}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \cdot K \cdot t}{4L^2}\right] \quad (4)$$

- Parabolik yaklaşım için çözüm;

$$u(z,t) = u_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16 \cdot u_0 \cdot (2 + \pi \cdot (2n-1) \cdot \cos[n\pi])}{(2n-1)^3 \pi^3} \cdot \sin\left[\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot z}{2L}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \cdot K \cdot t}{4L^2}\right] \quad (5)$$

- İkinci üstel yaklaşım için çözüm;

$$u(z,t) = u_0 + u_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[-\frac{32 \cdot e^{-4L} \cdot L \cdot (8 \cdot e^{4L} \cdot L + (\pi - 2n\pi) \cdot \cos[n\pi])}{(2n-1) \cdot \pi \cdot (64 \cdot L^2 + (1-2n)^2 \pi^2)} \right] \cdot \sin\left[\frac{(2n-1) \cdot \pi \cdot z}{2L}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \cdot K \cdot t}{4L^2}\right] \quad (6)$$

Yukarıdaki çözümler sonucunda, modelde herhangi bir noktada, herhangi bir zamandaki boşluk suyu basıncı değeri teorik olarak bulunabilecektir.

BOŞLUK SUYU BASINCI İLETİM DENKLEMİNİN NÜMERİK ÇÖZÜMÜ

Analitik metotla incelenen dört başlangıç yaklaşımından görüleceği gibi, başlangıç şartının değişmesi durumunda boşluk suyu basıncı dağılımı $u(z,t)$ için yeni bir denklem oluşacaktır. Olayı deneysel çalışmalarla birlikte düşünecek olursak, $t = 0$ anında numune üzerindeki farklı noktalardan boşluk suyu basıncını ölçtüğümüzde, dağılımın her zaman tarif

ettiğimiz başlangıç şartlarına uymaması söz konusu olabilir. Analitik çözüm için, başlangıçtaki dağılımın eğri denklemi bulunup, yeni bir seri çözümü elde etmek gerekecektir. Fakat nümerik metot olarak kullandığımız sonlu farklar metodunda, numune üzerinde ölçülen boşluk suyu basıncı değerleri, hazırlanan bilgisayar programında data olarak girilebilir ve dağılım elde edilebilir. Böylece eğri tanımlama, seri çözümü gibi zaman alıcı işlemlere gerek almayacaktır.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \text{ tipindeki denklemler parabolik sınıfına girmektedir. Parabolik kısmi}$$

diferansiyel denklemlerin tam çözümüne göre;

$i = 0, 1, 2, \dots, I$ **ve** $m = 1, 2, 3, \dots, M - 1$ olmak üzere,

İkinci dereceden türev için, orta fark denklemi,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \cong \frac{u_{m-1}^i - 2u_m^i + u_{m+1}^i}{(\Delta z)^2}$$

Birinci dereceden türev için, ileri fark denklemi,

$$\frac{\partial u}{\partial t} \cong \frac{u_m^{i+1} - u_m^i}{\Delta t}$$

olduğu bilinmektedir [1]. Bu ifadeleri boşluk suyu basıncı iletim denkleminde yerlerine yazarsak,

$$\frac{u_m^{i+1} - u_m^i}{\Delta t} = K \cdot \frac{u_{m-1}^i - 2u_m^i + u_{m+1}^i}{(\Delta z)^2}$$

$$\beta = \frac{K \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2}$$

olmak üzere,

$$u_m^{i+1} = \beta \cdot (u_{m-1}^i + u_{m+1}^i) + (1 - 2\beta) u_m^i \quad (7)$$

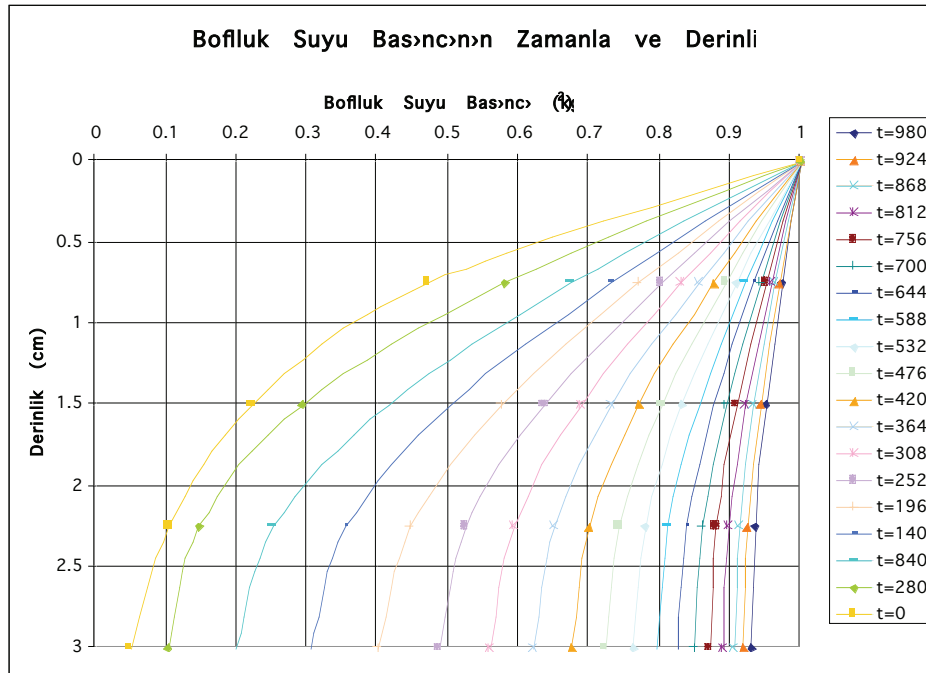
ifadesi yazılabilir. Denklem 7 sonlu farklar metoduyla, boşluk suyu basıncı iletim denkleminin çözümüdür. Başlangıç anından itibaren, sınır şartları belirlenmiş problemde, istenilen noktalardaki boşluk suyu basıncı değerleri hesaplanabilmektedir. Bu ifadenin stabilitesini sağlayan parametre β 'dır. Çözümün doğru olabilmesi için $\beta \leq \frac{1}{2}$ olmalıdır.

Matematiksel olarak problemin gerçek çözümünün analitik yöntemle elde edilen sonuçlar olduğu kabul edilmektedir. Nümerik çözümle bulunan sonuçlardaki hatanın

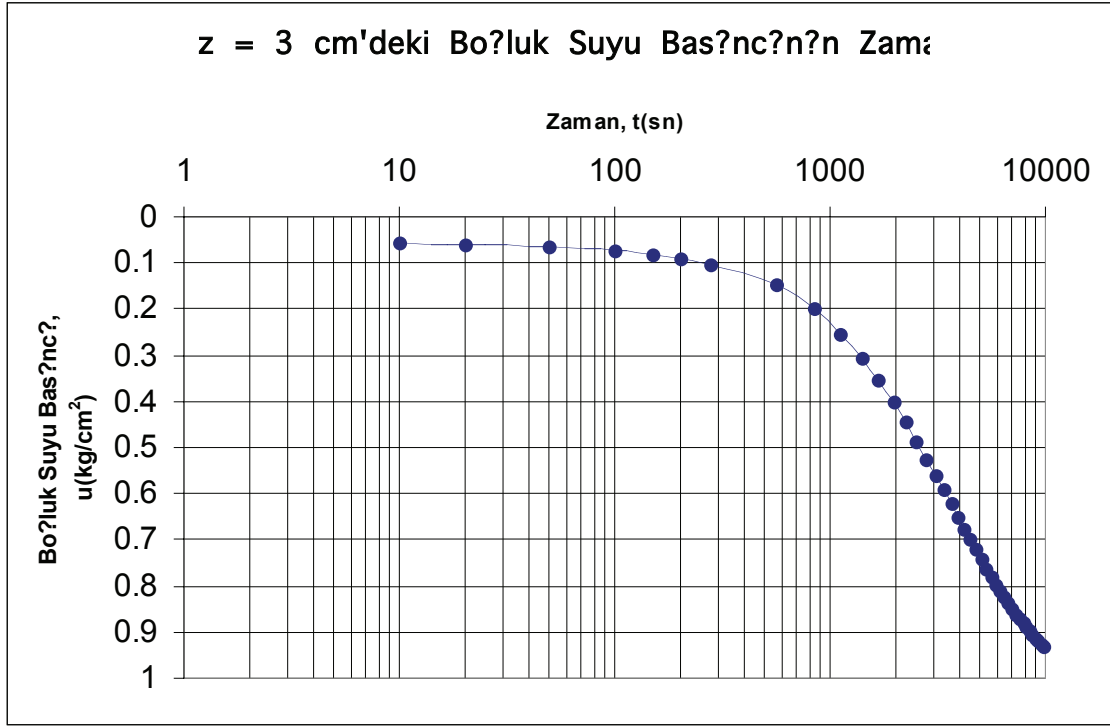
azaltılabilmesi için modelin mümkün olduğunca çok parçaya bölünmesi gerekmektedir. 80 parçalık bir çözüm için herhangi bir zamandaki hata %1'lere kadar düşmektedir.

DEĞERLENDİRMELER

Uygulanan basınç altında, numunede oluşacak boşluk suyu basıncı artışının zamanla ve derinlikle değişimi incelendiğinde, ilk zamanlarda basınç gradyanının büyük olduğu, zamanla aktarılan enerjinin azaldığı görülmektedir. Bununla ilgili olarak Şekil 3'de $K=0.001 \text{ cm}^2/\text{s}$, $L=3 \text{ cm}$. olan bir numunenin $u_0=1 \text{ kg/cm}^2$ 'lik su basıncı altındaki, başlangıç şartının e^{-z} olması durumunda analitik çözümle bulunan boşluk suyu basıncı dağılımı gösterilmiştir. Aynı şartlar altında, numunenin alt yüzeyindeki boşluk suyu basıncının zamanla değişimi Şekil 4'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, Tuncan vd. tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen boşluk suyu basıncı artışını gösteren grafikler elde edilmiştir.



Şekil 3. Farklı zamanlarda boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi



Şekil 4. Alt yüzeyde boşluk suyu basıncının zamanla değişimi

Konsolidasyon teorisinde, uygulanan ilave gerilme sonunda, tabakanın her noktasında, boşluk suyu basıncı değerinin uygulanan gerilmeye eşit olduğu kabulü yapılmaktadır. Eğer tek yönlü drenaj söz konusu ise, tabakanın alt yüzeyindeki boşluk suyu basıncı zamanla sönümlenecek ve bir süre sonra sıfır olacaktır. Modelimizde ise uygulanan su basıncının zamanla alt yüzeyde basınç artışına neden olacağı düşünülmektedir.

Konsolidasyon teorisinde, alt yüzeydeki boşluk suyu basıncının %50, %67, %90'ının sönümlenmesi için geçen süre ile modelimizdeki dört farklı başlangıç şartı için basınç iletiminin %50, %67, %90'ının tamamlanması için geçen süreler incelenmiştir.

Tablo 1. L=3 cm'lik bir numunede z=3'de (alt yüzey) iletimin %50'nin tamamlanması için geçen süre, $u_0 = n \text{ kg/cm}^2$

c_v, K	KONS.TEO.	1. ÜSTEL	LİNEER	PARABOLİK	2. ÜSTEL
0.001	3410	2620	1770	818	3347
0.002	1705	1310	885	409	1674
0.003	1137	873	590	273	1116

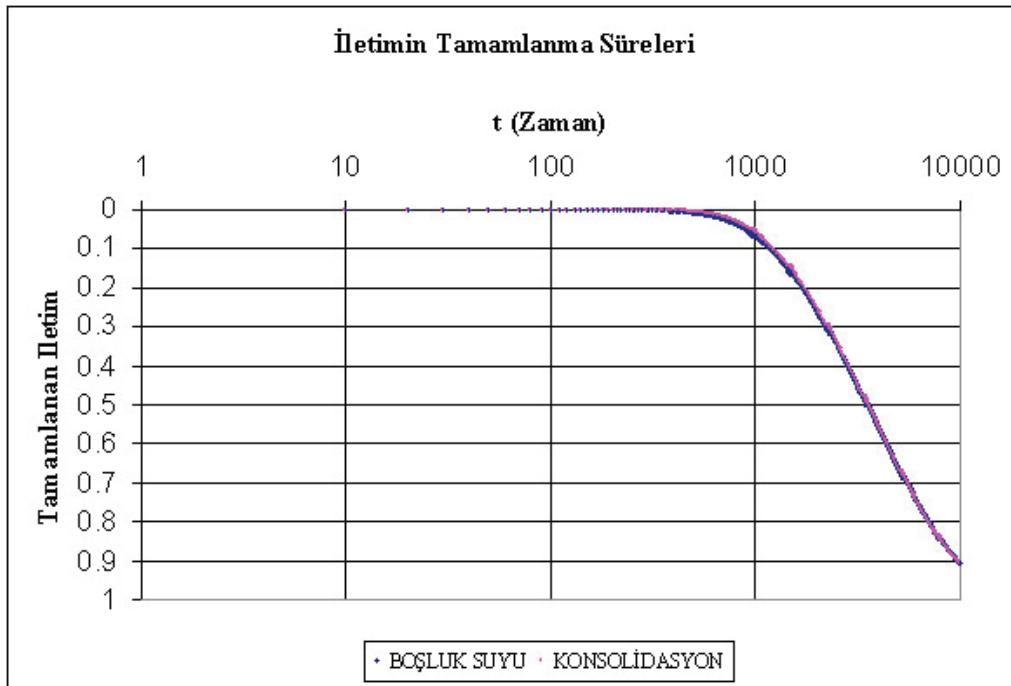
Tablo 2. L=3 cm'lik bir numunede z=3'de (alt yüzey) iletimin %67'nin tamamlanması için geçen süre, $u_0 = n \text{ kg/cm}^2$

c_v, K	KONS.TEO.	1. ÜSTEL	LİNEER	PARABOLİK	2. ÜSTEL
0.001	4925	4135	3278	2126	4864
0.002	2463	2068	1639	1063	2432
0.003	1642	1378	1093	709	1621

Tablo 3. L=3 cm'lik bir numunede z=3'de (alt yüzey) iletimin %90'nın tamamlanması için geçen süre, $u_0 = n \text{ kg/cm}^2$

c_v, K	KONS.TEO.	1. ÜSTEL	LİNEER	PARABOLİK	2. ÜSTEL
0.001	9280	8500	7650	6469	9218
0.002	4640	4250	3825	3235	4609
0.003	3093	2833	2550	2156	3073

İkinci üstel yaklaşım (e^{-4z}) ile konsolidasyon teorisindeki değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu iki durum özel olarak ele alınırsa aralarındaki ilişkiyle ilgili daha doğru bir yorum yapılabilir. Her iki yaklaşımda da, söz konusu olan iletim, iletimin tamamlanma yüzdesine göre normalize edilir ve iletimin tamamlanması için geçen süreler ele alınırsa, konsolidasyon teorisindeki boşluk suyu basıncının sönümlenme yüzdesi ile basınç iletimi yaklaşımındaki basınç değişimi yüzdesine yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. Konsolidasyonda ve boşluk suyu basıncı iletiminde, iletimin ilerleyiş eğrisi

SONUÇ ve ÖNERİLER

Yaptığımız çalışmada, konsolidasyon parametrelerini belirlemek için numune yapısında değişimin çok az düzeyde olduğu deney sisteminin matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Model, suya doygun zemin numunelerinin drenaja kapalı bir ortamda uygulanan gerilmeler altında hacim değişikliğine uğramayışı mantığından yola çıkarak hazırlanmıştır. Burada boşluk suyu basıncının değişimi ile ısı transferi arasında büyük benzerliklerin olduğu fark edilmiştir ve boşluk suyu basıncının iletimini formülize eden bir denklem önerilmiştir. Bu denklemde zeminler için basınç iletim katsayısının tanımlanması gerektiği düşünülmektedir. Basınç iletim katsayısının permeabilite veya boşluk oranıyla ilişkili olabileceği tahmin edilmektedir.

Deney sisteminde yüklemenin yapıldığı anda numune üzerinde oluşacağı tahmin edilen 4 tip başlangıç fonksiyonu tanımlanmıştır. Boşluk suyu basıncı yayılımını belirleyen kısmi diferansiyel denklemin, 4 tip başlangıç fonksiyonu için de tam analitik çözümleri yapılmıştır. Elde edilen seri çözümlerinde, tarif edilen başlangıç ve sınır şartlarının doğruluğu kontrol edilmiştir.

Bu çalışmadan sonra, boşluk suyu basıncının iletimini sağladığı düşünülen basınç iletim katsayısı ile ilgili bir seri deney yapılmalıdır. Bu deneylerin yapımı öncesi, numunelerin gerçek konsolidasyon modeline uygun bir sistemle hazırlanması ve örselenmeye yol açmadan, boşluk suyu basıncı değerlerinin ölçüleceği deney sistemine yerleştirmesi gerekmektedir. Boşluk suyu basınçlarının ölçümünde, numune üzerinde sadece alt ve üst yüzeylerde değil, ara noktalarda da boşluk suyu basıncı ölçülerek başlangıç fonksiyonunun deneysel olarak tespit edilmesi uygun olacaktır. Deneysel gözlemler ve enerji korunumu prensibinden, yayılım katsayısının içeriğini tam olarak tespit edilmelidir. Yayılım katsayısı ile konsolidasyon katsayısı ve önerilen basınç iletim katsayısı ile permeabilite katsayısı arasındaki ilişkinin incelenmesi çalışmanın en önemli sonucunu oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Chapra, S.C. and Canale, R.P., 2003, “Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler”, McGraw-Hill Book Com., New York, 1004 p.
- [2] Dağdeviren, U., 2005, “Suya Doygun Normal Konsolide Killi Zeminlerin Boşluk Suyu Basıncı Değişimi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, 78 s.
- [3] Güney, Y., 1998, “Suya Doygun Killerin, Hasarsız Deney Yöntemiyle Konsolidasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, 304 s.
- [4] Mitchell, J.K., 1976, “Fundamentals of Soil Behavior”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422 p.
- [5] Tuncan, M., Güney, Y. ve Tuncan, A., 1998, “Konsolidasyon Katsayısı c_v ve Permeabilite Katsayısı k Belirlenmesi İçin Yeni Bir Yöntem”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği VII. Ulusal Kongresi, İstanbul, 24-34.