

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

**TERZAGHI KONSOLİDASYON KURAMININ**  
**NON-LİNEER NÜMERİK ANALİZİ**

**İnşaat Mühendisi Nilgün KARAMAN**

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında**

**Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN**

**İSTANBUL, 2008**

## İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ .....	xii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KONSOLİDASYON KURAMLARI.....	3
2.1 Sonsuz Küçük Şekil Değişirme (Terzaghi) Konsolidasyon Kuramı.....	3
2.1.1 Derinlikle Sabit Boşluk Suyu Basıncı Dağılımı.....	11
2.1.2 Derinlikle Lineer Boşluk Suyu Basıncı Dağılımı.....	13
2.1.3 Sinüzoidal Boşluk Suyu Basıncı Dağılımı.....	14
2.1.4 Diğer Boşluk Suyu Basıncı Dağılımları .....	14
2.2 Sonlu Şekil Değişirme Konsolidasyon Teorisi (Gibson Eşitliği).....	17
2.3 Büyük Şekil Değişirme Konsolidasyonu İçin Bir Nümerik Model, CS2 (Fox ve Berles, 1997) .....	19
2.3.1 CS2 İçin Geometri .....	19
2.3.2 Malzeme Bünye Bağlıntıları: .....	22
2.4 Bir Boyutlu Sonlu Şekil Değişirme Konsolidasyon Denklemi İçin Bir Nümerik Çözüm:Condes0 .....	30
2.5 Değişken Sıkışma Katsayısı ve Permeabiliteli Konsolidasyon Davranışı İçin Sonlu Fark Yaklaşımı (Abbasi, Rahimi, Fakher, 2006) .....	32
2.5.1 Temel Eşitlik .....	32
2.5.2 Boşluk Oranı Etkif Gerilme ve Boşluk Oranı Permeabilite İlişkisi .....	32
2.5.3 Bünye Bağlıntısı .....	33
2.5.4 Non-linear Denklemın Çözümü .....	35
3. BİR BOYUTLU KONSOLİDASYON DENKLEMİNİN NÜMERİK ÇÖZÜMÜ (VERRUIJT, 1995).....	38
4. TERZAGHI KONSOLİDASYON DENKLEMİNİN NONLİNEER PROBLEMLER İÇİN NÜMERİK ÇÖZÜMÜ (KP1).....	41
4.1 KP1 İçin Geometri.....	41
4.2 Malzeme Bünye Bağlıntıları .....	42

5.	KP1 PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER.....	49
5.1	KP1 Programında Yapılan Lineer Analizlerin Terzaghi Yöntemiyle Karşılaştırılması.....	49
5.1.1	Örnek 1 İçin Zemin Özellikleri ve Problem Geometrisi.....	49
5.1.2	Örnek 2 İçin Zemin Özellikleri ve Problem Geometrisi.....	52
5.2	Tek ve Çift Yönlü Drenaj Durumları İçin Ortalama Konsolidasyon Yüzdesinin Değişimi.....	54
5.3	KP1 Programı ile Yapılan Analizlerin CS2 Programı ile Yapılan Analizlerle Karşılaştırılması.....	56
5.3.1	Örnek 3.....	56
5.3.2	Örnek 4 İçin Zemin Özellikleri ve Problem Geometrisi.....	65
6.	SONUÇLAR .....	72
	KAYNAKLAR.....	73
	ÖZGEÇMİŞ.....	74

## SİMGE LİSTESİ

$\tilde{v}_s$	Katıların hızı
$\tilde{v}_{df}$	Nispi sızıntı hızı
$\tilde{v}_f$	Sıvının sızıntı hızı
$\tau$	Boyutsuz zaman aralığı
$\eta$	Çatlak duvarlarındaki buharlaşmayı belirleyen parametre
$\alpha$	Elemanın alanının yüksekliğine oranı
$\xi$	Euler koordinatı
$\beta$	Sıvının sıkışabilirliği
$\alpha$	Zeminin sıkışabilirliği
$\sigma'$	Efektif gerilme
$\Delta\sigma$	Uygulanan gerilme artışı
$\gamma_i$	i.elemanın suya doymun birim hacim ağırlığı
$\Delta q$	Uygulanan düşey gerilme artışı
$\gamma_s$	Katıların birim hacim ağırlığı
$\sigma_t$	Uygulanan toplam yük
$\Delta t$	Zaman artımı
$\sigma'_v$	Efektif gerilme
$\sigma'_{v0}$	Başlangıç efektif gerilmesi
$\gamma_w$	Suyun birim hacim ağırlığı
$\rho_w$	Suyun yoğunluğu
$\Delta z$	Düşey düğüm aralığı
$2H$	Kil tabakasının kalınlığı
$2h$	Sıkışabilir tabakanın yüksekliği
$a$	Birim efektif gerilmeye karşılık gelen boşluk oranı
$a, a_1$	Lagrange koordinat sistemi
$a_v$	Sıkışabilirlik katsayısı
$b$	Birim permeabiliteye karşılık gelen boşluk oranı
$c$	Danelerin konsantrasyonu
$C_c$	Sıkışma indisi
$c_v$	Konsolidasyon katsayısı
$dL$	Elemanın konsolidasyon oturması

dt	Zaman artımı
du	Boşluk suyu basıncı değişimi
$e_0$	Başlangıç boşluk oranı
$e_{cr}$	Çatlama boşluk oranı
$e_f$	Nihai boşluk oranı
$e_i$	i. elemanın boşluk oranı
$E_i$	Zemin üst yüzeyinden itibaren buharlaşma oranı
$e_{q0}$	Düşey efektif gerilme $q_0$ da boşluk oranı
g	Yer çekimi ivmesi
Gs	Katıların özgül yoğunluğu
$H_d$	Drenaj yolu uzunluğu
$H_f$	Tabakanın nihai yüksekliği
$H_t$	t zamanında tabaka yüksekliği
$H_w$	Yer altı su seviyesi yüksekliği
i	Hidrolik eğim
j	Eleman koordinatı
k	Permeabilite
$k_{q0}$	Boşluk oranı $e_{q0}$ düşey permeabilite
L	Eleman yüksekliği
L	Eleman yüksekliği
$L_0$	Elemanın başlangıç yüksekliği
$L_j$	t zamanında j. elemanın yüksekliği
n	Porozite
$NiGer$	i. elemanın nihai gerilmesi
p	Boşluk basıncı
q	Uygulanan yük artışı
$q_0$	Jeolojik efektif gerilme
S	Konsolidasyon sonundaki oturma
S	Nihai konsolidasyon oturması
$S^\tau$	$\tau$ anındaki tabakanın oturması
$S^*$	Sıkışabilir tabakanın nihai şekil değiştirmesi
St	Sıkışabilir tabakanın oturması
t	Zaman
T	Zaman faktörü

$u$	Boşluk suyu basıncı
$U_{avg}$	Ortalama konsolidasyon yüzdesi
$u_i$	Artık boşluk suyu basıncı
$U_{ort}$	Ortalama konsolidasyon yüzdesi
$u_s$	Elemanın ortasında boşluk suyu basıncı
$U_z$	Konsolidasyon oranı
$v_c$	Çatlak zeminde hız bağıntısı
$v_u$	Çatlak olmayan zeminde hız bağıntısı
$W$	Katıların ağırlığı
$z$	Geometrik parametre
$z$	Zemin elemanındaki derinlik değişkeni
$z_{0,j}$	Eleman merkezindeki düğüm noktası koordinatı

## **KISALTIMA LİSTESİ**

ADE Değişen Yönlü Açık Metot

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Derinlikle Başlangıç Boşluk Suyu Basıncı (ui) Dağılımı (Das, 1997) .....	10
Şekil 2.2 Derinlik faktörü (Z) ve zaman faktörü (T) ye konsolidasyon yüzdesi değişimi (Das, 1997).....	12
Şekil 2.3 Şekil 2.1 de verilen boşluk suyu basıncı dağılımları için ortalama konsolidasyon yüzdesi $U_{av}$ 'nin zaman faktörü $T_v$ ile değişimi (Das, 1997).....	15
Şekil 2.4 CS2 için geometri (a) başlangıç konfigürasyonu ( $t < 0$ ), (b) düşey efektif gerilme artışı uygulanmasından sonraki konfigürasyon ( $t \geq 0$ ).....	20
Şekil 2.5 Zemin bünye ilişkileri: sıkışabilirlik .....	22
Şekil 2.6 Zemin bünye ilişkileri: permeabilite .....	23
Şekil 2.7 Bitişik elemanlar arasındaki sıvı akışı.....	26
Şekil 2.8 Barakat-Clark algoritması (Abbasi, Rahimi, Fakher, 2006).....	36
Şekil 4.1 KP1 için geometri .....	42
Şekil 4.2 Zemin bünye ilişkileri: sıkışabilirlik .....	43
Şekil 4.3 Zemin bünye ilişkileri: permeabilite .....	43
Şekil 4.4 KP1 programı için akış şeması .....	48
Şekil 5.1 Örnek 1 için problem geometrisi .....	50
Şekil 5.2 Örnek 1 için laboratuvar sıkışma eğrisi.....	51
Şekil 5.3 Örnek1 için farklı yükler altında Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerlerinin değişimi.....	52
Şekil 5.4 Örnek 2 için problem geometrisi .....	52
Şekil 5.5 Örnek 2 için laboratuvar sıkışma eğrisi.....	53
Şekil 5.6 Örnek 2 için farklı yükler altında Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerlerinin değişimi.....	54
Şekil 5.7 Tek yönlü drenaj durumu için Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen ortalama konsolidasyon yüzdesi $U_{avg}$ 'nin derinlik ve zaman faktörü ile değişimi .....	55
Şekil 5.8 Çift yönlü drenaj durumu için Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen ortalama konsolidasyon yüzdesi $U_{avg}$ 'nin derinlik ve zaman faktörü ile değişimi .....	56
Şekil 5.9 Örnek 3 için problem geometrisi .....	56
KP1 programında input olarak girilen boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisi Çizelge 5.8' de verilmiştir.....	57
Şekil 5.10 Örnek 3 için $d\sigma=4,788$ kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde	

edilen boşluk oranı permeabilite değerlerinin değişimi .....	58
Şekil 5.11 Örnek 3 için $d\sigma=23,940$ kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerlerinin değişimi .....	59
Şekil 5.12 Örnek 3 için $d\sigma=43,092$ kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerlerinin değişimi .....	60
Şekil 5.13 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.50$ olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi.....	60
Şekil 5.14 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.90$ olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi.....	61
Şekil 5.15 Örnek 3 $d\sigma=43,092$ kPa için $U_{avg}=0.90, 0.50, 0.10$ olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerlerinin derinlikle değişimi .....	63
Şekil 5.16 Örnek 3 $d\sigma=43,092$ kPa için $U_{avg}=0.90$ olması durumunda KP1 ve CS2 programlarının ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi.....	64
Şekil 5.17 Örnek 3 $d\sigma=43,092$ kPa için $U_{avg}=0.50$ olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi .....	64
Şekil 5.18 Örnek 4 için problem geometrisi.....	65
KP1 programında data olarak girilen boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisi Çizelge 5.17'de verilmiştir.....	65
Şekil 5.19 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.50$ olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi.....	66
Şekil 5.20 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.90$ olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi.....	67
Şekil 5.21 Örnek 4 $d\sigma=100$ kPa için $U_{avg}=0.10, 0.50, 0.90$ olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerlerinin derinlikle değişimi .....	69
Şekil 5.22 Örnek 4 $d\sigma=100$ kPa için %90 konsolidasyona ulaşınca kadar KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi .....	70
Şekil 5.23 Örnek 4 $d\sigma=100$ kPa için %50 konsolidasyona ulaşınca kadar KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi .....	70

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1 Örnek 1 için ödometre deneyi sonuçları.....	50
Çizelge 5.2 Örnek 1 için farklı sürşarj yükleri altında Terzaghi yöntemiyle bulunan oturma değerleri.....	51
Çizelge 5.3 Örnek 1 için farklı yük kademelerinde Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerleri .....	51
Çizelge 5.4 Örnek 2 için ödometre deneyi sonuçları.....	53
Çizelge 5.5 Örnek 2 için farklı sürşarj yükleri altında Terzaghi yöntemiyle bulunan oturma değerleri.....	53
Çizelge 5.6 Örnek 2 için farklı yük kademelerinde Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerleri .....	54
Çizelge 5.7 Ortalama konsolidasyon yüzdesinin zaman faktörü ve derinlik faktörü ile değişimi $*(U_{avg}=u/u_0)$ .....	55
Çizelge 5.8 Örnek 3 için malzeme bünye ilişkisi (a) boşluk oranı-efektif gerilme (b) boşluk oranı permeabilite .....	57
Çizelge 5.9 Örnek 3 için $d\sigma=4,788$ kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerleri .....	57
Çizelge 5.10 Örnek 3 için $d\sigma=23,940$ kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerleri.....	58
Çizelge 5.11 Örnek 3 için $d\sigma=43,092$ kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerleri.....	59
Çizelge 5.12 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.50$ için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerleri .....	60
Çizelge 5.13 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.90$ için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerleri .....	61
Çizelge 5.14 Örnek 3 için $d\sigma=43,092$ kPa sürşarj yükü altında $U_{avg}=0.90$ 10 KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi.....	62
Çizelge 5.15 Örnek 3 için $d\sigma=43,092$ sürşarj yükü altında $U_{avg}=0.50$ için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi.....	62
Çizelge 5.16 Örnek 3 için $d\sigma=43,092$ sürşarj yükü altında $U_{avg}=0.10$ KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi.....	63
Çizelge 5.17 Örnek 4 için malzeme bünye ilişkisi (a) boşluk oranı-efektif gerilme (b) boşluk oranı permeabilite .....	65

Çizelge 5.18 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.50$ için KP1 ve CS2 programı ile elde edilen oturma değerleri .....	66
Çizelge 5.19 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında $U_{avg}=0.50$ için KP1 ve CS2 programı ile elde edilen oturma değerleri .....	67
Çizelge 5.20 Örnek 4 için $d\sigma=100$ kPa sürşarj yükü altında $U_{avg}=0.90$ için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi.....	68
Çizelge 5.21 Örnek 4 için $d\sigma=100$ kPa sürşarj yükü altında $U_{avg}=0.50$ için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi.....	68
Çizelge 5.22 Örnek 4 için $d\sigma=100$ kPa sürşarj yükü altında $U_{avg}=0.10$ için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi.....	69

## ÖNSÖZ

Zeminlerin konsolidasyon davranışı kuramsal olarak ilk olarak Terzaghi tarafından incelenmiştir. Terzaghi konsolidasyon teorisi bazı basit varsayımlar üzerine kurulmuş olmasına rağmen günümüzde hala geçerliliğini korumaktadır. Bu teori, pratikte oturma problemlerinin çözümünde iyi sonuçlar vermekle birlikte, yumuşak killerin konsolidasyon davranışının incelenmesinde sonuçların hata derecesi büyük değerlere ulaşmaktadır. Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin kendi ağırlığı altında ve/veya sürşarj yükleri altında non-lineer olan deformasyon davranışının doğru tahmin edilmesi için fiziksel olayı modelleyen bir matematiksel model ile denklemin çözümünü elde edebilmek için zeminin özelliklerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilebilir. Son otuz yılda yapılan bilimsel çalışmalar yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin deformasyon davranışı hakkında önemli bulgular elde edilmesini sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında zeminlerin büyük miktarda konsolidasyon (large strain) yapması durumunda oturma miktarını hesaplayabilen bir nümerik model geliştirilmiştir. Bu nümerik model Terzaghi konsolidasyon kuramının esas olarak non-lineer konsolidasyon problemlerini bir boyutlu (1-D) olarak çözmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen nümerik model ile KP1 adında bir bilgisayar programı yazılmış ve bu program yardımı ile küçük şekil değiştirme konsolidasyona maruz örnek problemler çözülmüştür.

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında deneyim ve bilgilerimi benimle paylaşan danışman hocam Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca beni destekleyen ve her zaman yanımda olan aileme gösterdikleri sabır ve anlayış için çok teşekkür ederim.

## ÖZET

Fazla miktarda deformasyon yapan ve kendi ağırlığı altında konsolide olan zeminlerde klasik konsolidasyon analizlerinin uygulanması doğru sonuçlar vermediğinden dolayı, bu tür zeminlerin konsolidasyon davranışını modelleyebilmek için, uygun malzeme bünye bağıntılarını kullanarak meydana gelecek deformasyonları hesaplayabilecek non-lineer analiz yöntemleri geliştirilmiştir. (Abu-Hejleh ve Znidarcic (1994,1995), Fox ve Berles (1997), Abbasi, Rahimi vd. (2006)). Yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin kendi ağırlığı altında ve/veya sürşarj yükleri altında non-lineer olan deformasyon davranışının doğru tahmin edilmesi, fiziksel olayı modelleyen bir matematiksel model ile denklemin çözümünü elde edebilmek zeminin özelliklerinin belirlenmesi ile gerçekleşebilir.

Bu çalışmada, homojen zemin tabakalarının non-lineer konsolidasyon analizi için nümerik bir model geliştirilmiştir. Bu model, Visual Basic programında yazılan bilgisayar koduyla sunulmuştur. Öncelikle, klasik analiz yöntemleri ile lineer konsolidasyon analizleri yapılmış, bu analizler KP1 programında yapılan çözümlerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra, konsolidasyon süresince konsolidasyon katsayısının değişimi dikkate alınarak bir boyutlu non-lineer kısmi diferansiyel konsolidasyon denklemi elde edilmiş ve KP1 programında bu non-lineer denklemin çözümünde sonlu fark yaklaşımı kullanılmıştır. KP1 programı ile non-lineer analizler yapılmış elde edilen sonuçlar Bölüm 2' de ayrıntıları verilen CS2 model sonuçları ile karşılaştırılmış ve grafiklerle sunulmuştur. KP1 programı ile küçük ve büyük deformasyon yapan zeminler için çözüm yapılabilmektedir.

KP1 programı ile yapılan lineer analiz sonuçları klasik çözüm yöntemleriyle, non-lineer analiz sonuçları ise CS2 model sonuçları ile karşılaştırılmış elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** konsolidasyon, yumuşak zemin, non-lineer, nümerik analiz.

## **ABSTRACT**

Classical consolidation analyses applications may give erroneous results for the soil types which make large strain and for soils consolidating under self weight. In order to overcome this dilemma, nonlinear analyses are developed to model the behaviour of these types of soils. Nonlinear analyses calculate the deformations by adopting the constitutive relationships (Abu-Hejleh and Znidarcic 1994, 1995; Fox and Berles, 1997; Abbasi, Rahimi et.al., 2006). To facilitate the non linear deformation behaviour of high water content soils under its own weight and/or under surcharge loading, it is imperative that we obtain both a mathematical model that will accurately predict the physical event, as well as the physical properties of the soil to solve this mathematical model.

In this thesis, a numerical model for non-linear consolidation is developed. The numerical model was coded in Visual Basic Programming Language named KP1. To start with, classical analyses methods and linear consolidation analyses are performed and the obtained results are compared with the results gathered from the KP1. Subsequently, by taking into consideration the variation of coefficient of consolidation throughout the consolidation process, one dimension non-linear partial differential consolidation equation is obtained. Finite difference approach is exploited for the solution of the equation. Lastly, non-linear analysis is achieved by KP1 code and outcomes are compared with CS2 code developed by Fox and Berles (1997). Results are illustrated in figures. KP1 code can be used to analyse soil problems with small strains and large strains.

Overall, the comparisons between the results obtained from the linear classical analysis with KP1, and the non-linear analysis with CS2 demonstrates a compatible relationship.

**Key words:** Consolidation, soft soils, non-linear, numeric analysis

## 1. GİRİŞ

Zeminler değişik minerallerden oluşan kayaların farklı nedenlerin etkisi altında ayrışması sonucunda boyutları ve biçimleri birbirinden farklı çok sayıda küçük danelerin ve bunların arasında yer alan boşlukların bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Zemin boşlukları ise kısmen veya tamamen su ile dolu olabilmektedir. Suya doygun zeminlerdeki sıkışma esas olarak boşluklardaki suyun dışarı çıkması ile meydana gelmektedir. Sabit yük altında, boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu zeminlerde meydana gelen hacimsel şekil değiştirmelere konsolidasyon adı verilmektedir.

Zemin içinde suyun hareketi, zeminlerin permeabilitesine bağlı olarak değişmektedir. İnce daneli zeminlerin permeabilite katsayıları çok düşük olduğu için suyun hareketi de yavaş olmakta, bu da zeminin sıkışma süresini artırmaktadır. Dolayısıyla sıkışmanın hesaplanmasında kullanılan gerilme-şekil değiştirme-zaman ilişkileri önem kazanmakta ve bu ilişkiler ödometre deneyi ile belirlenmektedir. Ödometre deneyinden elde edilen ön konsolidasyon basıncı, birincil konsolidasyonun tamamlandığı ( $e-\log \sigma'_v$ ) eğrileri ve permeabilite- boşluk oranı ( $e-k$ ) değişimi ile oturma analizleri yapılmaktadır.

Hidrolik yapılar, yollar ve yumuşak zeminler üzerine inşa edilen yapıların güvenliği açısından konsolidasyon hesabı geoteknik mühendisliğinde büyük öneme sahiptir. İlk olarak Karl Terzaghi (1923) tarafından ortaya atılan konsolidasyon kuramı küçük hacim değişimi yapan zeminlerin konsolidasyon oturmalarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu kuram zeminlerin kendi ağırlığını ve büyük miktarda oluşacak deformasyonları göz ardı ettiği için yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon analizlerinde yeterli yaklaşıklıkta sonuçlar vermemektedir. Terzaghi kuramı konsolidasyon kavramını ilk defa mühendislik literatürüne sokması ve böylece zemin mekaniği biliminin kurulmasına yol açmasından dolayı büyük öneme sahiptir.

Bu tez çalışmasında, Terzaghi konsolidasyon teorisinin nonlinear nümerik analizinin yapılması amacıyla Visual Basic programlama dili ile bir kod oluşturulmuştur. KP1 adı verilen bu kod ile öncelikle lineer analizler yapılmıştır. Ödometre deneyinden elde edilen veriler ile farklı numuneler için klasik yöntemlerle oturma hesabı yapılmış ve bu sonuçlar KP1 programından elde edilen oturma değerleri ile karşılaştırılmıştır. KP1 programında yapılan analizler sonucunda, boşluk suyu basıncının derinlikle sabit olduğu kabulü ile tek yönlü ve çift yönlü drenaj durumları için konsolidasyon oranının derinlik ve zaman faktörü ile değişimini gösteren grafikler Terzaghi çözümleriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. KP1

programında yapılan non-lineer konsolidasyon analizleri Bölüm 2’de detayları verilen CS2 model ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, Bölüm 1’de konsolidasyon kavramı, Bölüm 2’de konsolidasyon kuramları, Bölüm 3 ’de KP1 programında kullanılan nümerik çözüm, Bölüm 4’de Terzaghi konsolidasyon denkleminin nümerik çözümü ve KP1 programı, Bölüm 5’de KP1 programında yapılan analizler ve bu analizlerin klasik yöntemlerle ve CS2 programı ile karşılaştırmaları, Bölüm 6’de sonuç ve öneriler sunulmuştur.

## 2. KONSOLİDASYON KURAMLARI

İlk olarak Karl Terzaghi (1923) tarafından ortaya atılan Konsolidasyon Kuramı küçük hacim değişimi yapan zeminlerin konsolidasyon oturmalarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu kuram, zeminlerin kendi ağırlığını ve büyük miktarda oluşacak deformasyonları göz ardı ettiği için yüksek su muhtevasına sahip zeminlerin konsolidasyon analizlerinde yeterli yaklaşıklıkta sonuçlar vermemektedir. Terzaghi kuramı Konsolidasyon kavramını ilk defa mühendislik literatürüne sokması ve böylece zemin mekaniği biliminin kurulmasına yol açmasından dolayı büyük öneme sahiptir.

Yüksek su muhtevalarına sahip ince daneli zeminlerin konsolidasyon davranışını tahmin etmek için kullanılan konsolidasyon kuramları iki gruba ayrılabilir. Birinci gruptaki kuramlar Terzaghi kuramına dayanmakta olup, O'nun konsolidasyon süresince sabit kabul ettiği malzeme özellikleri zamana bağlı artımsal olarak değiştirilmektedir. (Olson ve Ladd, 1979, Yong vd., 1983; Fox ve Berles, 1979). İkinci gruptaki kuramlar ise Gibson vd. (1967) tarafından geliştirilen sonlu şekil değiştirme konsolidasyon kuramına dayanmaktadır. Bu bölümde yüksek su muhtevasına sahip ince daneli zeminlerin konsolidasyon analizi için geliştirilen bu kuramlar incelenecektir.

### 2.1 Sonsuz Küçük Şekil Değiştirme (Terzaghi) Konsolidasyon Kuramı

Konsolidasyon, sabit yük altındaki bir zemin tabakasında boşluk suyunun dışarı çıkması sonucu meydana gelen hacimsel şekil değiştirme olarak tanımlanmaktadır. Zemin suyunun bu hareketi genel difüzyon denklemi ile tanımlanabilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.1)$$

Burada  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  sırasıyla x, y, z doğrultularında permeabiliteleri, h hidrolik eğimi, e boşluk oranını, t ise zamanı göstermektedir. (2.1) eşitliğinin sol tarafındaki terimler x-, y-, z-,

doğrultularında, sırası ile  $\frac{\partial h}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial h}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial h}{\partial z}$  hidrolik eğimleri altında Darcy Kanununa göre

hareketini, sağ tarafındaki terim ise zeminin hacim değişimini göstermektedir. Permeabilite katsayılarının x-, y-, z-, doğrultularında sabit olması durumunda ise difüzyon denklemi (2.2) eşitliğine dönüşmektedir.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.2)$$

Denklemi bu genel şekli ile kullanmak ve uygulamada karşılaşılan problemlerin çözümünde yararlanmak çok kolay olmamaktadır.

Konsolidasyon problemi ilk olarak Terzaghi tarafından incelenmiştir. Terzaghi konsolidasyon kuramı, halen yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bir takım kabuller üzerine kurulmuştur. Bu kabuller;

- Sıkışabilir kil tabakası homojendir ve tamamen suya doygundur.
- Zemin daneleri ve boşluklardaki suyun sıkışması ihmal edilmektedir.
- Zemin boşluklarındaki suyun hareketi Darcy yasasına uyar.
- Drenaj ve sıkışmanın sadece bir yönde (düşey) olduğu kabul edilmektedir.
- Şekil değiştirmeler küçüktür.
- Hacim değişimleri (dolayısıyla boşluk oranı değişimi) efektif gerilme değişimine bağlıdır.
- Efektif gerilme değişimleri boşluk suyu basıncı değişimlerine bağlıdır.
- Zeminin permeabilite katsayısı konsolidasyon süresince sabit kalmaktadır.
- Zeminin konsolidasyon katsayısı  $c_v$  konsolidasyon süresince sabit kalmaktadır.

Bu varsayımlar çerçevesinde tanımlanan Terzaghi konsolidasyon kuramı küçük şekil değiştirmeleri göz önüne aldığında pratik maksatlar için arazide yeterli sonuç verdiği görülmüştür. Bu yüzden halen temel mühendisliği uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yukarıda verilen varsayımlar ile tek boyutlu konsolidasyon denklemi aşağıda verilen denklemler ile elde edilebilmektedir.

Tek doğrultuda su akımı için, difüzyon denklemi (2.3) eşitliğindeki şeklini almaktadır.

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.3)$$

Terzaghi eşitliğinin çıkartılması için bir diferansiyel zemin elemanı incelenebilir. Bu inceleme sırasında dikkat edilmesi gereken bu elemandan dışarı çıkan suyun hacmidir. Darcy'nin

yasasına göre, akışın miktarı zeminin permeabilitesine bağlı olduğu kadar hidrolik eğimine de bağlıdır. Akışa neden olan hidrolik eğim,  $\Delta u/(\rho_w g)$  bağıntısı yardımıyla elemanın içersindeki artık boşluk suyu basıncı ile ilişkilendirilmiştir. Su sıkışamaz olarak kabul edildiği için, hacim değişimi  $dt$  kadar bir diferansiyel zamanda elemanın içine ve dışına doğru olan akıştaki farka eşit olmalıdır.  $(h = (z + \frac{u}{\gamma_w}) \rightarrow \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} \left( \frac{1}{\gamma_w} \right))$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

(2.4)

Bu denklemde  $z$  ile sembolize edilen ifade zemin elemanındaki derinlik veya alan değişkenidir. Bu denklemde kısmi diferansiyel kullanılmıştır. Çünkü boşluk suyu basıncı hem derinliğin hem de zamanın bir fonksiyonudur.

Ödometre deneyinden elde edilen  $a_v$  (sıkışabilirlik katsayısı=gerilme-deformasyon ilişkisi=zemin modülü) değeri yardımıyla, efektif gerilmedeki değişim zemin iskeletinin boşluk oranındaki değişim (veya hacim değişim) ile ilişkilendirilir. Efektif gerilme prensiplerinden yola çıkılarak, efektif gerilmedeki değişim boşluk basıncındaki değişime eşitlenebilir. Bir başka deyişle, toplam gerilme sabit olduğu sürece, artık boşluk suyu basıncı zamanla sönümleneceği için, aynı zamanda efektif gerilmede de bir artış söz konusudur.  $(\Delta \sigma'_v = -\Delta u)$ .  $u$  hem derinliğin hem de zamanın bir fonksiyonu olarak bilindiği için, eşitliğin bu yarısı genellikle şu şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{\partial \sigma'_z}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial t}$$

(2.5)

ve

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -a_v \frac{\partial \sigma'_z}{\partial t} = -a_v \frac{\partial u}{\partial t}$$

(2.6)

(2.5) ve (2.6) eşitlikleri difüzyon denkleminde yerine konulursa;

$$\left( \frac{k}{\gamma_w} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \left( \frac{a_v}{1 + e_0} \right) \frac{\partial u}{\partial t}$$

(2.7)

$$\left( \frac{k(1+e_0)}{\gamma_w a_v} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.8)$$

oluşturabilir. (2.8) eşitliğinde;

$$\frac{k(1+e_0)}{\gamma_w a_v} = c_v \text{ dir.} \quad (2.9)$$

(2.9) eşitliğinde k permeabilite,  $e_0$  boşluk oranı,  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı,  $a_v$  hacimsel sıkışma katsayısıdır.

O halde (2.8) eşitliği

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.10)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklem bir boyutlu (1-D) Terzaghi konsolidasyon denklemi olup yukarıda belirtilen kabuller için zeminlerdeki konsolidasyon olayını ifade eden matematiksel bağıntıdır.(2.10) eşitliğinde  $c_v$  konsolidasyon katsayısı olup,

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (2.11)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada k permeabilite,  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı,  $m_v$  hacimsel sıkışma katsayısıdır.

Terzaghi konsolidasyon denkleminin kapalı çözümü:

(2.10) eşitliği Terzaghi konsolidasyon teorisinin temel diferansiyel denklemdir ve uygun sınır koşulları ile çözülebilir. Denklemi çözebilmek için,  $u$ 'nun  $z$  ve  $t$  ye bağlı fonksiyonlardan oluştuğu kabul edilebilir.

$$u = F(z)G(t) \quad (2.12)$$

Burada u boşluk suyu basıncını, z derinliği t ise zamanı göstermektedir. (2.12) eşitliğinin t' ye göre türevi alınırsa;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(z) \frac{\partial}{\partial t} G(t) = F(z) G'(t) \quad (2.13)$$

(2.13) eşitliği elde edilir.(2.13) eşitliğinin z' ye göre ikinci türevi alınırsa (2.14) eşitliği elde edilir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} F(z) G(t) = F''(z) G(t) \quad (2.14)$$

(2.10) eşitliğinde  $\frac{\partial u}{\partial t}$  terimi yerine (2.13) eşitliği,  $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$  terimi yerine ise (2.14) eşitliği yazılırsa,

$$F(z) G'(t) = c_v F''(z) G(t) \quad \text{veya} \quad \frac{F''(z)}{F(z)} = \frac{G'(t)}{c_v G(t)} \quad (2.15)$$

(2.15) eşitliğinin sol tarafı t den bağımsız sadece z'nin fonksiyonu, sağ tarafı ise z den bağımsız sadece t'nin fonksiyonudur. Bu nedenle bunlar bir sabite eşit olmalıdır. Bu sabite – B<sup>2</sup> dersek;

$$F''(z) = -B^2 F(z) \quad (2.16)$$

(2.16) eşitliğinin çözümü aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$F(z) = A_1 \cos Bz + A_2 \sin Bz \quad (2.17)$$

Burada A<sub>1</sub> ve A<sub>2</sub> sabitlerdir.

Tekrar, (2.15) eşitliğinin sağ tarafı (2.18) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$G'(t) = -B^2 c_v G(t) \quad (2.18)$$

(2.18) eşitliğinin çözümü aşağıdaki gibidir;

$$G(t) = A_3 e^{-B^2 c_v t} \quad (2.19)$$

Burada  $A_3$  bir sabittir. (2.12), (2.17) ve (2.19) eşitlikleri birleştirilirse,

$$u = (A_1 \cos Bz + A_2 \sin Bz) A_3 e^{-B^2 c_v t} \quad (2.20)$$

$$u = (A_4 \cos Bz + A_5 \sin Bz) A_3 e^{-B^2 c_v t} \quad (2.21)$$

Burada  $A_4 = A_1 A_3$  ve  $A_5 = A_2 A_3$  dür.

(2.21) eşitliğindeki sabitler aşağıda verilen sınır koşulları ile bulunabilir.

1.  $t=0$  anında  $u=u_t$  (Her derinlikte başlangıç artık boşluk suyu basıncı)
2. Üst yüzeyin drenaja müsaade etmesi durumunda  $z = 0$  da  $u = 0$
3. Alt yüzeyin drenaja müsaade etmesi durumunda  $z = H_t = 2H$   $u = 0$

$H$  en uzun drenaj yolu uzunluğudur. Bu durumda iki yönlü drenaj durumu için (üst ve alt tabaka geçirimli)  $H$  toplam tabaka kalınlığı  $H_t$  'nin yarısına eşittir.

2. sınır koşulu  $A_4 = 0$  olduğunu gösterir. 3. sınır koşulundan,  $A_5 \sin 2BH = 0$  veya  $2BH = n\pi$  bulunur. Burada  $n$  tam sayıdır.

(2.21) eşitliği tekrar yazılırsa;

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \sin \frac{n\pi z}{2H} e^{-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (2.22)$$

Burada  $T_v$  boyutsuz zaman faktörüdür ve

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (2.23)$$

(2.23) eşitliğinde  $c_v$  konsolidasyon katsayısı,  $t$  zaman,  $H$  ise en kısa drenaj yoludur.

1.sınır koşulunu sağlamak için  $A_n$  katsayısı gereklidir.

$$u_i = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad (2.24)$$

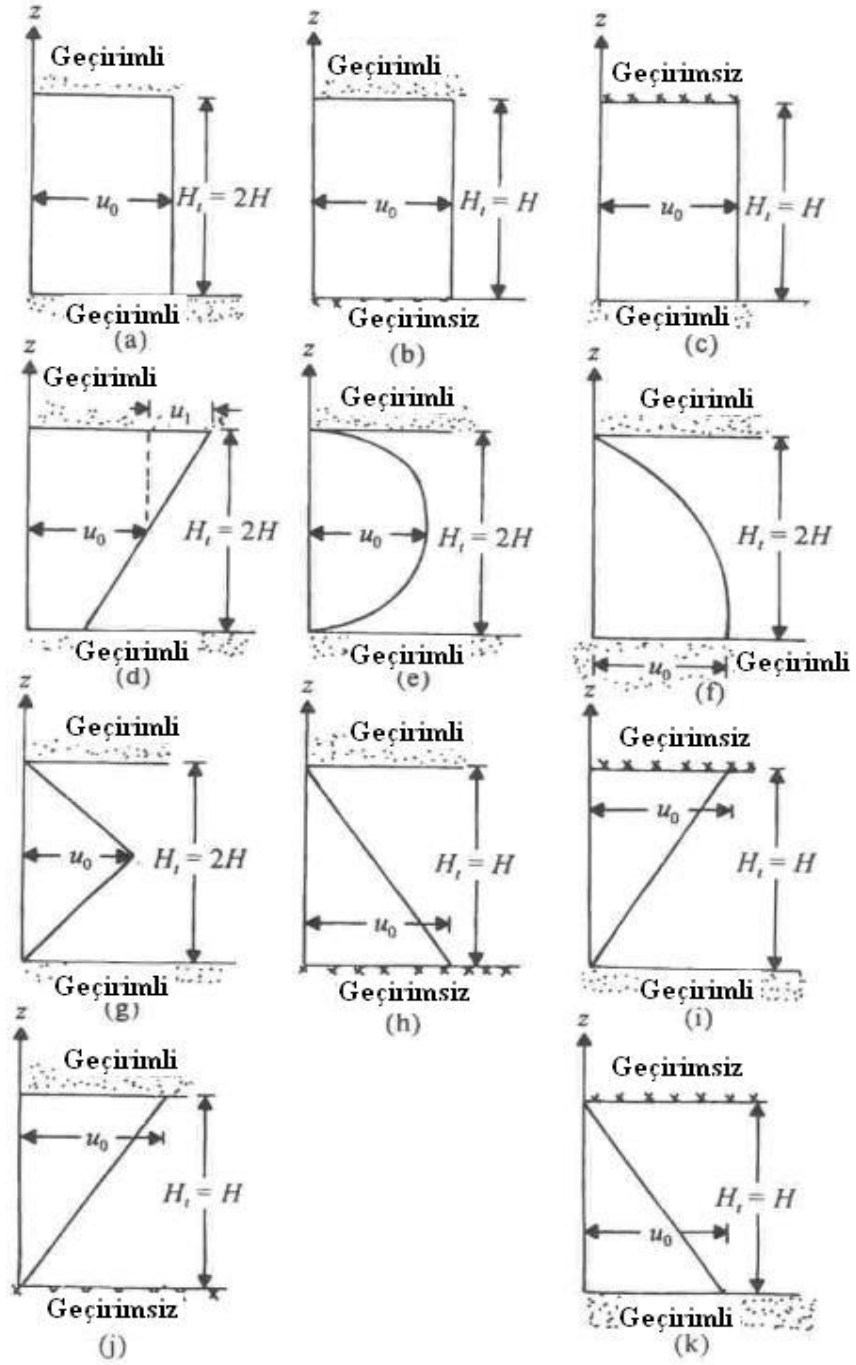
(2.24) eşitliği bir Fourier sinüs serisidir ve  $A_n$  (2.25) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$A_n = \frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \quad (2.25)$$

(2.22) ve (2.25) eşitlikleri birleştirilirse,

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left( \frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} e^{-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (2.26)$$

Konsolidasyona maruz kalan bir zemin tabakasında başlangıç boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi Şekil 2.1 de gösterilen şekillerdeki gibi idealize edilmektedir. Başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımları için diferansiyelin denklemin kapalı çözümünde göz önüne alınması gereken hususlar aşağıda verilmiştir. (Das, 1997)



Şekil 2.1 Derinlikle Başlangıç Boşluk Suyu Basıncı ( $u_i$ ) Dağılımı (Das, 1997)

### 2.1.1 Derinlikle Sabit Boşluk Suyu Basıncı Dağılımı

Boşluk suyu basıncının derinlikle sabit olması durumunda  $u_i=u_0$  dir. (Şekil (2.1.a)) (2.26) eşitliği kullanılarak,

$$\frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz = \frac{2u_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi)$$

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \quad (2.27)$$

(2.27) eşitliğinde  $(1 - \cos n\pi)$  terimi n çift olsa bile sıfırdır bu nedenle u da sıfırdır. Bu terimin sıfır olmaması için n yerine  $2m+1$  yazılır. (m tamsayıdır), (2.27) eşitliği tekrar yazılırsa

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2u_0}{(2m+1)\pi} (1 - \cos(2m+1)\pi) \sin \frac{(2m+1)\pi z}{2H} e^{-\frac{(2m+1)^2 \pi^2 T_v}{4}}$$

veya

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2u_0}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-(M)^2 T_v} \quad (2.28)$$

Burada  $M = (2m+1)\pi/2$  dir. Verilen bir zaman aralığı için herhangi bir z derinliğinde konsolidasyon yüzdesi şu şekilde tanımlanır:

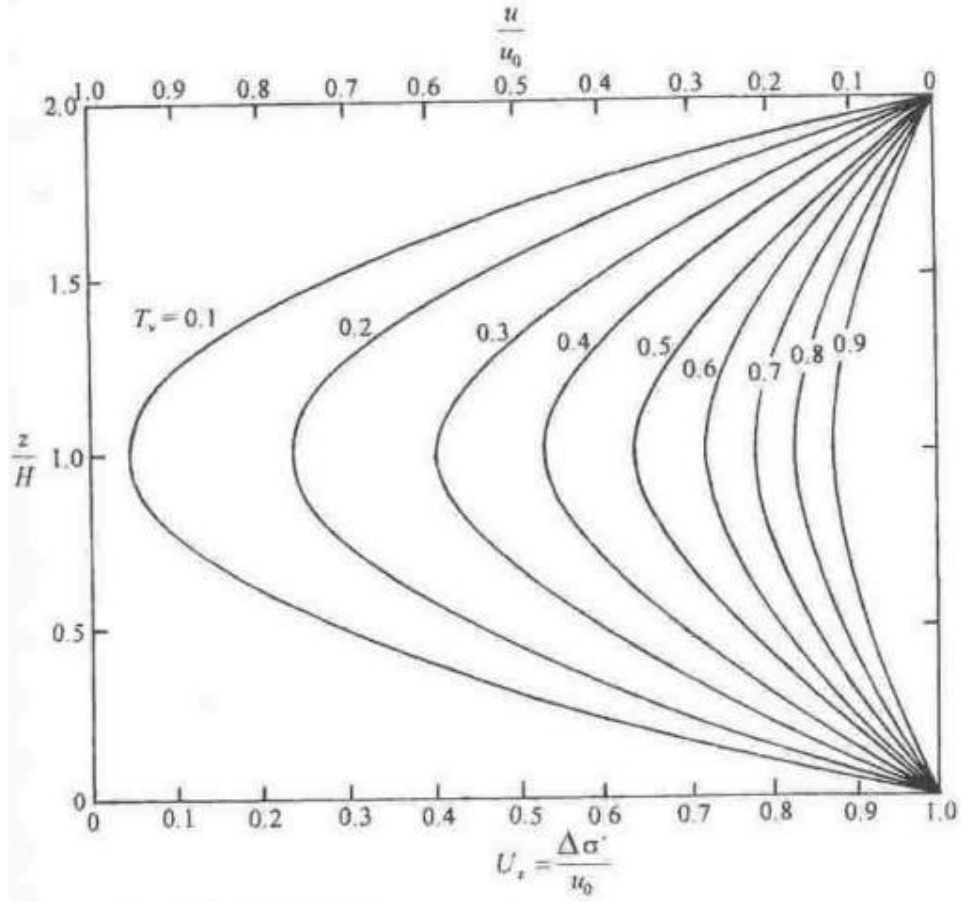
$$U_z = \frac{\text{artık boşluk suyu basıncındaki azalma}}{\text{başlangıç artık boşluk suyu basıncı}}$$

$$U_z = \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i} = \frac{\Delta\sigma'}{u_i} = \frac{\Delta\sigma'}{u_0} \quad (2.29)$$

Burada  $u_i$  uygulanan gerilme artışı nedeniyle oluşan başlangıç artık boşluk suyu basıncını  $\Delta\sigma'$  efektif gerilme artışını göstermektedir. (2.28) ve (2.29) eşitliklerinden,

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-M^2 T_v} \quad (2.30)$$

Şekil 2.2 de boyutsuz zaman faktörü  $T_v$ 'nin farklı değerleri için, konsolidasyon derecesi  $U_z$ 'nin derinlikle olan dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.2 Derinlik faktörü (Z) ve zaman faktörü (T) ye konsolidasyon yüzdesi değişimi (Das, 1997)

Birçok durumda tüm tabaka için ortalama konsolidasyon yüzdesine gerek duyulmaktadır. (2.31) eşitliğinde ortalama konsolidasyon yüzdesi verilmiştir.

$$U_{av} = \frac{(1/H_t) \int_0^{H_t} u_i dz - (1/H_t) \int_0^{H_t} u dz}{(1/H_t) \int_0^{H_t} u_i dz} \quad (2.31)$$

Ortalama konsolidasyon yüzdesi aynı zamanda herhangi bir zamandaki konsolidasyon oturmasının nihai konsolidasyon oturmasına oranıdır. Burada  $H_t=2H$  ve  $u_i= u_0$  dır. (2.28) ve

(2.31) eşitlikleri birleştirilirse,

$$U_{av} = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (2.32)$$

Terzaghi (2.32) eşitliğinden elde edilen değerlere yaklaşık çözümler için aşağıdaki eşitlikleri vermiştir.

$$U_{av} = 0-53\% \text{ için } T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U_{av} \%}{100} \right)^2 \quad (2.33)$$

$$U_{av} = 53-100\% \text{ için } T_v = 1.781 - 0.933 \left[ \log(100 - U_{av} \%) \right] \quad (2.34)$$

Sivaram ve Swamee (1977)  $U_{av}$  için aşağıdakileri eşitlikleri vermiştir.

$$\frac{U_{av} \%}{100} = \frac{(4T_v / \pi)^{0.5}}{\left[ 1 + (4T_v / \pi)^{2.8} \right]^{0.179}} \quad (2.35)$$

veya

$$T_v = \frac{(\pi/4)(U_{av} \% / 100)^2}{\left[ 1 - (U_{av} \% / 100)^{5.6} \right]^{0.357}} \quad (2.36)$$

(2.35) ve (2.36) eşitlikleri  $0\% < U_{av} < 90\%$  aralığında  $T_v$ 'nin 1% küçük değeri için ve  $90\% < U_{av} < 100\%$  aralığında  $T_v$ 'nin 3% ten küçük değeri için hata vermektedir.

Şekil 2.1(b) ve (c)' de gösterilen tek yönlü drenaj durumlarında yine (2.32) eşitliği geçerlidir. Ancak burada drenaj yolu uzunluğu kil tabakasının kalınlığına eşittir.

### 2.1.2 Derinlikle Lineer Boşluk Suyu Basıncı Dağılımı

Şekil 2.1(d)'de gösterilen lineer başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı şöyle yazılabilir:

$$u_i = u_0 - u_1 \frac{H - z}{H} \quad (2.37)$$

(2.37) eşitliği (2.26) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[ \frac{1}{H} \int_0^{2H} \left( u_0 - u_1 \frac{H-z}{H} \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right] \sin \frac{n\pi z}{2H} e^{-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (2.38)$$

Ortalama konsolidasyon yüzdesi (2.38) ve (2.31) eşitlikleri çözülerek elde edilebilir:

$$U_{av} = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$$

Bu eşitlik, derinlikle sabit boşluk suyu basıncı durumunda elde edilen ortalama konsolidasyon yüzdesi eşitliğinin aynısıdır. (2.32)

### 2.1.3 Sinüzoidal Boşluk Suyu Basıncı Dağılımı

Şekil 2.1(e)'de gösterilen sinüzoidal dağılım aşağıdaki gibi verilebilir.

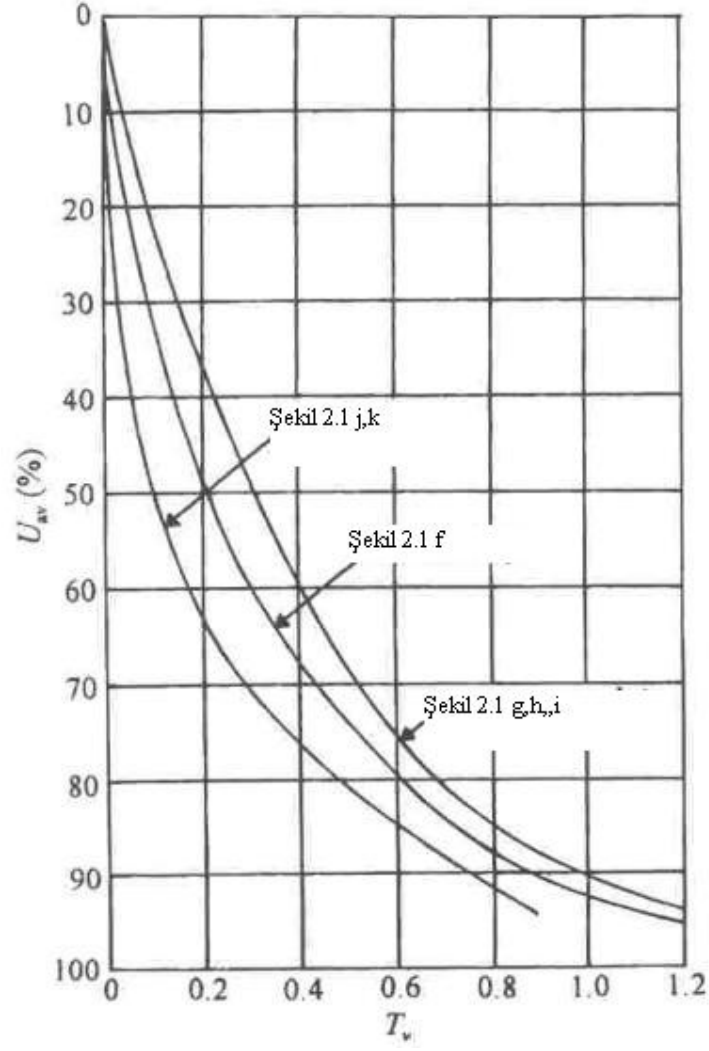
$$u_i = u_0 \sin \frac{\pi z}{2H} \quad (2.39)$$

Bu tür aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı için ortalama konsolidasyon derecesi (2.40) eşitliğindeki gibidir.

$$U_{av} = 1 - e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} \quad (2.40)$$

### 2.1.4 Diğer Boşluk Suyu Basıncı Dağılımları

Şekil 2 de gösterilen farklı boşluk suyu basıncı dağılımı tipleri için Çizelge 2.1 de başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı ve sınır koşulları ilişkisi verilmiştir. Çizelge 2.1 verilen bağıntılar yardımıyla elde edilen ortalama konsolidasyon yüzdesi  $U_{av}$  'nin  $T_v$  ile değişimi, Şekil 2.3 te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Şekil 2.1 de verilen boşluk suyu basıncı dağılımları için ortalama konsolidasyon yüzdesi  $U_{av}$ 'nin zaman faktörü  $T_v$  ile değişimi (Das, 1997)

Çizelge 2.1 Başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı  $u_i$  ve sınır koşulları ilişkisi (Das, 1997)

Referans No	Başlangıç artık boşluk suyu basıncı, $u_i$	Sınır koşulları
Şekil 2.1.f	$u_0 \cos \frac{\pi z}{4H}$	$t=0, u=u_i$ $z=2H u=0$ $z=0 u=0$
Şekil 2.1.g	$z \leq H, \frac{u_0}{H} z$ $z \geq H, 2u_0 - \frac{u_0}{H} z$	$t=0, u=u_i$ $z=2H u=0$ $z=0 u=0$
Şekil 2.1.h	$u_0 - \frac{u_0}{H} z$	$t=0, u=u_i$ $z=H u=0$ $z=0 u=u_0$
Şekil 2.1.i	$\frac{u_0}{H} z$	$t=0, u=u_i$ $z=H u= u_0$ $z=0 u=0$
Şekil 2.1.j	$\frac{u_0}{H} z$	$t=0, u=u_i$ $z=H u= u_0$ $z=0 u=0$
Şekil 2.1.k	$u_0 - \frac{u_0}{H} z$	$t=0, u=u_i$ $z=H u= 0$ $z=0 u= u_0$

## 2.2 Sonlu Şekil Değişirme Konsolidasyon Teorisi (Gibson Eşitliği)

Terzaghi konsolidasyon kuramındaki kısıtlamalardan dolayı bu eşitliğin fazla miktarda deformasyon yapan ve kendi ağırlığı altında konsolide olan zeminlerde uygulanması doğru sonuçlar vermediğinden dolayı, bu tür zeminlerin konsolidasyon davranışını modelleyebilmek için, uygun malzeme bünye bağıntılarını kullanarak meydana gelecek deformasyonları hesaplayabilecek kuramlara ihtiyaç duyulmuştur. Gibson, England ve Hussey (1967) tarafından ortaya konulan kuramla bu ihtiyaç karşılanmıştır. Bu kuramda verilen bir boyutlu nonlinear sonlu şekil değiştirme konsolidasyon eşitliğinde, kalın kil tabakalarının hızlı depolanması, yavaş yavaş biriktirilmesi ve yüklenmesinde oluşacak konsolidasyon davranışı analiz edilebilmektedir. Gibson, England ve Hussey (1967) eşitliği (2.41) de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ g(e) \frac{\partial e}{\partial z} \right] - f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.41)$$

Burada e boşluk oranı, z azalan koordinat, t zamanı göstermektedir.

(2.41) eşitliğinde;

$$g(e) = - \frac{k(e)}{\gamma_w + (1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad (2.42)$$

(2.42) eşitliğinde k permeabilite katsayısı, e boşluk oranı,  $\sigma'$  düşey efektif gerilme,  $\gamma_w$  sıvı kısmın birim hacim ağırlığıdır.

$$f(e) = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[ \frac{k(e)}{(1+e)} \right] \quad (2.43)$$

(2.43) eşitliğinde, e boşluk oranı,  $\gamma_s$  ve  $\gamma_w$  sırasıyla katı ve sıvı kısımların birim hacim ağırlıkları, k permeabilite katsayısı,  $\sigma'$  düşey efektif gerilme, z ise azalan koordinattır. Bu koordinat, referans düzlemi ile Lagrangian (başlangıç) koordinatı arasında kalan katı kısımların birim alana gelen hacmi olarak ifade edilmektedir. Azalan koordinat sistemi yerçekimi yönünde hareket etmektedir.

(2.41) eşitliği difüzyon-adveksiyon türünde lineer olmayan bir diferansiyel denklemdir. Bu

denklem, verilen sınır koşulları altında boşluk oranı-efektif gerilme ve permeabilite arasındaki değişimin belirlenmesi ile çözülebilmektedir.

Bu kuramda, azalan koordinat sisteminin kullanılması sonlu şekil değiştirme yapan kil tabakalarının deformasyon davranışının analizinde daha uygun sonuçlar vermektedir. Euler tipi koordinat kullanılması zemin yüzeyinin yerinin belli olmaması nedeni ile sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, sabit olan sınıra göre koordinat sistemi seçilir. Konsolidasyon süresince yüzey değişmektedir ve problemin bilinmeyenlerinden biridir. Diğer taraftan danelerin hacmi sabit kalmaktadır. Denklemde herhangi bir t anındaki z derinliğinde Euler koordinatı  $\xi$  (2.44) eşitliğindeki ifade edilmektedir.

$$\xi(x, t) = \int_0^z [1 + e(z', t)] dz' \quad (2.44)$$

Burada e boşluk oranını, z derinliği, t zamanı göstermektedir.

Konsolidasyon davranışı; suya doymuş zeminlerin kendi ağırlığı altında ve dışarıdan uygulanan yüklemeler sonucu zemin tabakalarının şekillenmesi olayının bir parçasıdır. Şekillenmenin basit bir başlangıcı, özellikle deniz çökellerinde yağmur sırasında oluşur. Bu olay Stokes (Lamb, 1932) sedimantasyon kanunu ile modellenmektedir. Bu modelde danelerin aşağı doğru hareketi engellenmiş oturma olarak tanımlanır. Bu da ilk defa Kynch (1952) tarafından (2.45) eşitliğindeki gibi ifade edilmiştir;

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{d}{dc} [c v_s(c)] \frac{\partial c}{\partial \xi} = 0 \quad (2.45)$$

Burada c danelerin konsantrasyonu ve  $v_s$  zemin danelerinin hızıdır. Eğer zemin konsantrasyonu sifıra yaklaşma eğiliminde ise Kynch (1952)'in teorisi Stoke (Lamb, 1932) teorisine dönüşür. Efektif gerilmenin sifıra yaklaşmasına izin verildiğinde (2.41) eşitliği aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{\partial e}{\partial t} + f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = 0 \quad (2.46)$$

f(e) (2.43) eşitliğinde verilmiştir. (2.46) eşitliğinde e boşluk oranını, z derinliği, t ise zamanı

göstermektedir.

(2.45) ve (2.46) eşitlikleri arasındaki benzerlik ortadadır ve Been (1980) tarafından da belirtildiği gibi efektif gerilme sifıra yaklaştığında non-lineer sonlu deformasyon konsolidasyon kuramında tam olarak Kynch'in teorisine eşit hale gelir.(Schiffman, Pane ve Gibson, 1984)

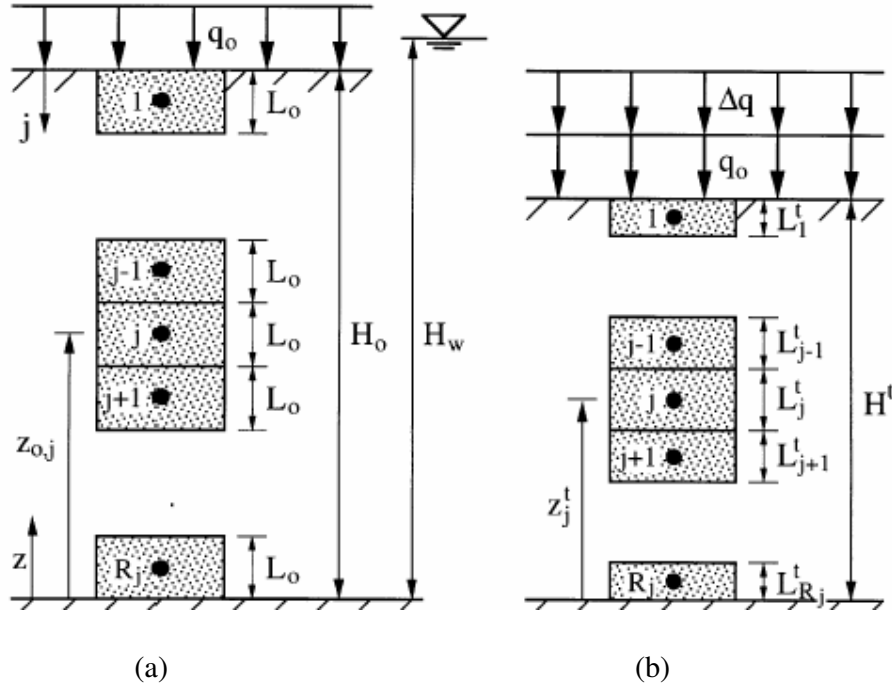
### **2.3 Büyük Şekil Değişirme Konsolidasyonu İçin Bir Nümerik Model, CS2 (Fox ve Berles, 1997)**

Tek boyutlu büyük şekil değişirme konsolidasyonu için en uygun model Gibson vd. (1967) tarafından bulunmuş olmasına rağmen, Townsend ve McVay (1990) adımsal lineer (piecewise-linear) modelin başlangıç koşulları, sınır koşulları ve zemin heterojenliği dikkate alındığında daha iyi sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir. Adımsal lineer yaklaşımda, problem geometrisi, malzeme özellikleri, sıvı akışı ve efektif gerilme ile ilgili tüm değişkenler her zaman adımında sabit Euler koordinat sistemine göre güncellenmektedir. Olson ve Ladd (1979), tarafından Crank-Nicholson yönteminin kullanıldığı bir model geliştirilmiş ve Yong vd. (1983) tarafından geliştirilen kesin sonlu fark yöntemini kullanmıştır.

Fox ve Berles (1997) tarafından bir boyutlu konsolidasyon için adımsal artırılmış lineer bir model geliştirilmiştir. CS2 olarak adlandırılan bu model ile aşırı oturma, zeminin kendi ağırlığı, suyun bağıl hızı, katı safhalar ve değişken permeabilite ve sıkışabilirlik konsolidasyon süresince hesaplanabilmektedir. CS2 modelin hesap aşamaları aşağıda verilmiştir.

#### **2.3.1 CS2 İçin Geometri**

Sıkışabilir tabakanın düşey gerilme uygulanmadan önceki ve sonraki geometrisi Şekil 2.4 de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 CS2 için geometri (a) başlangıç konfigürasyonu ( $t < 0$ ), (b) düşey efektif gerilme artışı uygulanmasından sonraki konfigürasyon ( $t \geq 0$ )

Sonsuz yatay uzunlukta ve  $H_0$  yüksekliğindeki doygun homojen zemin tabakası katı daneler ve boşluk suyu sıkıştırılmaz olduğunda iki fazlı bir malzeme gibi davranmaktadır. Düşey Eulerian koordinatı  $z$ , tabakanın alt kısmıyla çakışan sabit bir başlangıç yüzeyinden yukarı doğru pozitif olarak tanımlanmıştır. Eleman koordinatı  $j$ , üst sınırdan aşağı doğrudur. Tabaka  $R_j$  adet elemana bölünmüş ve her bir elemanın başlangıç yüksekliği  $L_0$  dir. bu elemanların merkezindeki düğüm noktasının koordinatı  $z_{0j}$  dir. Başlangıç boşluk oranları  $e_{0j}$  olup, tabaka içinde jeolojik efektif gerilme  $q_0$  ve zeminin kendi ağırlığı ile dengede olabileceği varsayılmaktadır. Tabakanın alt ve üst sınırları drenajlı veya geçirimsiz olarak belirlenebilmektedir. Drenaj sınırları sabit bir  $H_w$  yüksekliğinde yer altı su seviyesine hidrolik olarak birleştirilir.  $t=0$ , da anlık düşey gerilme artışı  $\Delta q$ , sıkışabilir tabakaya uygulanır. Bundan sonra bir  $t$  zamanında Şekil 2.4 (b) tabaka yüksekliği  $H^t$ ,  $j$ . inci elemanın yüksekliği de  $L_j^t$  olur. Düğümler düşey olarak yer değiştirmekte ve konsolidasyon süresince kendi elemanlarının merkezinde kalmaktadırlar. Düğüm yükseklikleri  $z_j^t$ , sabit başlangıç noktasına göre ele alınmakta ve her adımda güncellenmektedir.

Tabakanın başlangıç konfigürasyonu için diğer boyutsuz değerler aşağıdaki gibidir:

$$H_0^* = \frac{H_0}{H_0} = 1 \quad (2.47)$$

$$H_w^* = \frac{H_w}{H_0} \quad (2.48)$$

$$L_0^* = \frac{L_0}{H_0} \quad (2.49)$$

$$z_{0,j}^* = \frac{z_{0,j}}{H_0}, \quad j = 1, 2, \dots, R_j \quad (2.50)$$

$$q_0^* = \frac{q_0}{H_0 \gamma_w} \quad (2.51)$$

$\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlıdır.

$$\text{Boyutsuz zaman aralığı } \tau = \frac{k_{q_0} t}{H_0} \quad (2.52)$$

$k_{q_0}$   $e_{q_0}$  da düşey permeabilite,  $e_{q_0}$  düşey efektif gerilme  $q_0$  da boşluk oranıdır.

$\tau \geq 0$  için boyutsuz değerler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Herhangi bir  $\tau$  anında tabaka kalınlığı  $H^{*\tau}$ ,

$$H^{*\tau} = \frac{H^\tau}{H_0} \quad (2.53)$$

Herhangi bir zamanda eleman kalınlığı  $L_j^{*\tau}$ ,

$$L_j^{*\tau} = \frac{L_j^\tau}{H_0}, \quad j=1, 2, \dots, R_j \quad (2.54)$$

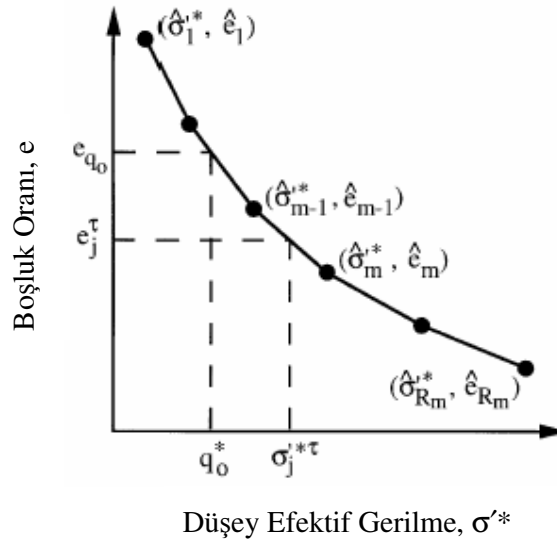
Herhangi bir zamandaki elemanın koordinatı  $z_j^{*\tau}$ ,

$$z_j^{*\tau} = \frac{z_j^\tau}{H_0}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (2.55)$$

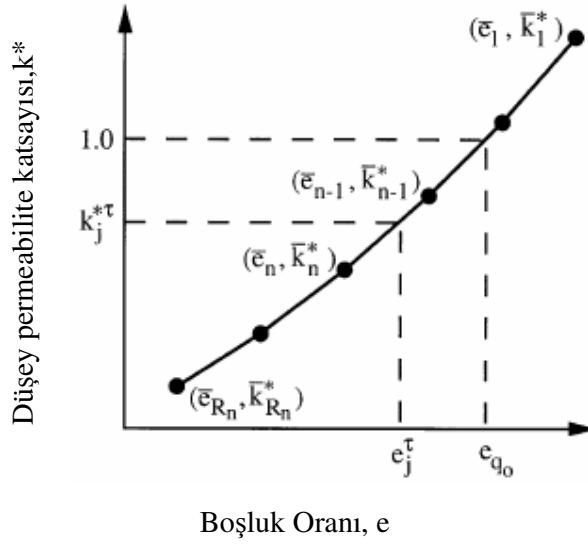
$$\Delta q^* = \frac{\Delta q}{H_0 \gamma_w} \quad (2.56)$$

### 2.3.2 Malzeme Bünye Bağlılıkları:

Sıkışabilir tabaka için sıkışma eğrisi Şekil 2.5 de gösterilen boşluk oranı-düşey efektif gerilme değişimi ile tanımlanmıştır. Şekil 2.6 ise boşluk oranı-permeabilite değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Zemin bünye ilişkileri: sıkışabilirlik



Şekil 2.6 Zemin bünye ilişkileri: permeabilite

Toplam gerilme, efektif gerilme ve boşluk basıncı: düşey toplam gerilme, her düğümde uygulanan jeolojik yük ve sıkışabilir tabakanın kendi ağırlığından hesaplanmaktadır.  $\tau \geq 0$  için, j. inci düğümde boyutsuz toplam gerilme:

$$\sigma_j^{*\tau} = \frac{\sigma_j^\tau}{H_0 \gamma_w} = H_w^* - H^{*\tau} + q_0^* + \Delta q^* + \frac{L_j^{*\tau} \gamma_j^{*\tau}}{2} + \sum_{i=1}^{j-1} L_i^{*\tau} \gamma_i^{*\tau} \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.57)$$

$$\gamma_j^{*\tau} = \frac{\gamma_j^\tau}{\gamma_w} = \frac{G_s + e_j^\tau}{1 + e_j^\tau}, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.58)$$

Burada  $\gamma_j^{*\tau}$  j. elemanınin doygun birim hacim ağırlığı,  $e_j^\tau$  boşluk oranıdır. CS2 de  $G_s$  katların özgül yoğunluğu olup sıkışabilir tabaka için sabittir ve her bir elemanda  $e_j^\tau$  verilen zaman artımı üzerinden sabittir. j. inci düğümde düşey efektif gerilme  $\sigma_j^{*\tau}$ ,  $e_j^\tau$  den hesaplanmaktadır ve sıkışabilirlik eğrisi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_j^{*\tau} = \frac{\sigma_j^\tau}{H_0 \gamma_w} = \hat{\sigma}_{m-1}^* + \frac{\hat{e}_{m-1} - e_j^\tau}{a_{v,j}^{*\tau}}, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.59)$$

Burada  $a_{v,j}^{*\tau}$  sıkışabilirlik katsayısıdır:

$$a_{v,j}^{*\tau} = -\frac{\hat{e}_m - \hat{e}_{m-1}}{\hat{\sigma}_m^{**} - \hat{\sigma}_{m-1}^{**}}, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.60)$$

$\hat{e}_m \leq e_j^\tau \leq \hat{e}_{m-1}$  aralığında  $(\hat{\sigma}_{m-1}^{**}, \hat{e}_{m-1})$  ve  $(\hat{\sigma}_m^{**}, \hat{e}_m)$  noktaları sıkışabilirlik eğrisinin lineer parçasını tanımlar (Şekil 2.5).

$j$ ,  $u_j^{*\tau}$  düğümü için boşluk suyu basıncı, toplam gerilme ile efektif gerilme arasındaki farka eşittir.

$$u_j^{*\tau} = \frac{u_j^\tau}{H_0 \gamma_w} = \sigma_j^{*\tau} - \sigma_j^{*\tau}, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.61)$$

Aşırı boşluk suyu basıncı ise:

$$u_{ex,j}^{*\tau} = \frac{u_{ex,j}^\tau}{H_0 \gamma_w} = u_j^{*\tau} + z_j^{*\tau} - H_w^*, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.62)$$

şeklinde tanımlanır.

(2.59) eşitliğine benzer olarak permeabilite  $j$ ,  $k_j^{*\tau}$  elemanı için şu şekilde hesaplanır:

$$k_j^{*\tau} = \frac{k_j^\tau}{k_{q_0}} = \bar{k}_{n-1}^* + \frac{\bar{k}_n^* - \bar{k}_{n-1}^*}{\bar{e}_n - \bar{e}_{n-1}} (e_j^\tau - \bar{e}_{n-1}), \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.63)$$

$\hat{e}_n \leq e_j^\tau \leq \hat{e}_{n-1}$  aralığında  $(\bar{e}_{n-1}, \bar{k}_{n-1}^*)$  ve  $(\bar{e}_n, \bar{k}_n^*)$  noktaları permeabilite eğrisinin lineer parçasını tanımlar (Şekil 2.6). Bitişik elemanlar için permeabilite genellikle eşit olmayacağından eşit permeabilite serileri kullanılarak eleman içindeki sıvı akışı hesaplanır.

$\tau$  zamanında  $j$  düğümü ve  $j-1$  düğümü arasında eşit permeabilite serileri  $k_{s,j}^{*\tau}$  aşağıdaki şekilde bulunur:

$$k_{s,j}^{*\tau} = \frac{k_{j-1}^{*\tau} k_j^{*\tau} (L_{j-1}^{*\tau} + L_j^{*\tau})}{L_{j-1}^{*\tau} k_j^{*\tau} + L_j^{*\tau} k_{j-1}^{*\tau}}, \quad j=2,3,\dots, R_j \quad (2.64)$$

Kütle ve momentumun korunumu: CS2 de her bir eleman için katıların ağırlığı konsolidasyon süresince sabittir. Böylece zemin daneleri bir elemandan diğerinde geçemez ve eleman ara yüzleri düğümlerde olduğu gibi zemin iskeletine gömülü olarak düşünülebilir. Kütle denge hesabı için her bir elamanın üst ve alt sınırlarına karşı sıvı hızının düşünülmesi yeterlidir.

Atalet kuvvetleri ihmal edilerek katı safhada poroz ortam içindeki sıvı akışı Darcy-Gersevanov yasası ile ifade edilir.

$$n(\tilde{v}_f - \tilde{v}_s) = -ki \quad (2.65)$$

Burada n, porozite;  $\tilde{v}_f$ , sıvının sızıntı hızı;  $\tilde{v}_s$ , katıların hızı; k, permeabilite; i, hidrolik eğimdir.  $\tilde{v}_f$  ve  $\tilde{v}_s$  tabakanın temelinde sabit düzleme göre mutlak hızlardır. Relatif hareket denklemi göz önünde bulundurulsa  $\tilde{v}_f$  aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tilde{v}_f = \tilde{v}_{rf} + \tilde{v}_s = \frac{v_{rf}}{n} + \tilde{v}_s \quad (2.66)$$

(2.66) eşitliğinde katı aşamaya göre;  $\tilde{v}_{rf}$  bağıl sızıntı hızı,  $\tilde{v}_f$  ise bağıl deşarj hızıdır.

(2.66) eşitliği (2.65) eşitliği yerine konulursa, bağıl deşarj hızı (2.67) eşitliğinden bulunur.

$$v_{rf} = -ki \quad (2.67)$$

CS2 'de bağıl deşarj hızı (yukarı doğru pozitif)  $v_{rf,j}^{*\tau}$ ; j ve j-1 nodları arasında aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$v_{rf,j}^{*\tau} = \frac{v_{rf,j}^\tau}{k_{q_0}} = -k_{s,j}^{*\tau} i_j^\tau, \quad j=2,3,\dots, R_j \quad (2.68)$$

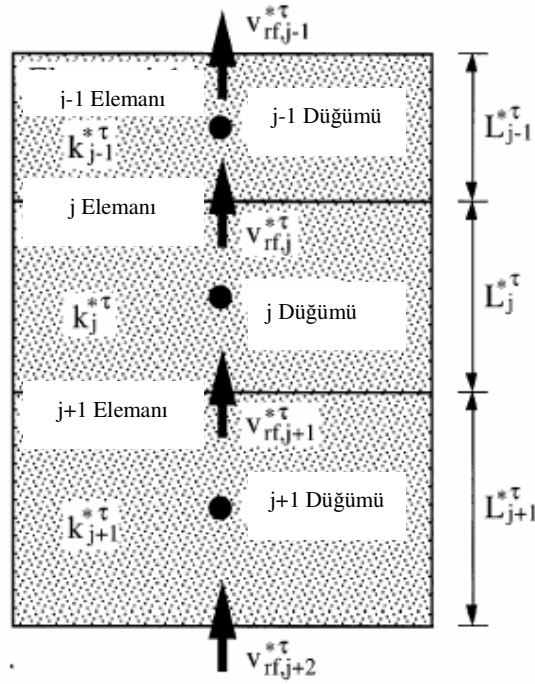
(2.68) eşitliğinde hidrolik eğim  $i_j^\tau$ ;

$$i_j^\tau = \frac{h_{j-1}^{*\tau} - h_j^{*\tau}}{z_{j-1}^{*\tau} - z_j^{*\tau}}, \quad j=2,3,\dots,R_j \quad (2.69)$$

$j$ ,  $h_j^{*\tau}$  düğümü için,

$$h_j^{*\tau} = \frac{h_j^\tau}{H_0} = z_j^{*\tau} + u_j^{*\tau}, \quad j=1,2,\dots,R_j \quad (2.70)$$

olarak belirlenir.



Şekil 2.7 Bitişik elemanlar arasındaki sıvı akışı

Tabakanın alt ve üst sınırlarında gerekli eşitlikler aşağıda verilmiştir:

$$i_1^\tau = \frac{H_w^* - h_1^{*\tau}}{H^{*\tau} - z_1^{*\tau}} \quad \text{üst sınırdaki hidrolik eğim (drenajlı)} \quad (2.71)$$

$$i_1^\tau = 0 \quad \text{üst sınırdaki hidrolik eğim (drenajsız)} \quad (2.72)$$

$$i_b^\tau = \frac{h_{R_j}^{*\tau} - H_w^*}{z_{R_j}^{*\tau}} \quad \text{alt sınırdaki hidrolik eğim (drenajlı)} \quad (2.73)$$

$$i_b^\tau = 0 \quad \text{alt sınırdaki hidrolik eğim (drenajsız)} \quad (2.74)$$

$$v_{rf,1}^{*\tau} = -k_1^{*\tau} i_1^\tau \quad \text{üst sınırdaki bağlı deşarj hızı} \quad (2.75)$$

$$v_{rf,b}^{*\tau} = -k_{R_j}^{*\tau} i_b^\tau \quad \text{alt sınırdaki bağlı deşarj hızı} \quad (2.76)$$

Crank-Nicholson zaman integrasyon metodu kullanılarak  $\tau + \Delta\tau$  anında  $j$  elemanın yüksekliği bulunur.(2.77)

$$L_{R_j}^{*\tau+\Delta\tau} = L_{R_j}^{*\tau} - (v_{rf,j}^{*\tau} - v_{rf,j+1}^{*\tau})\Delta\tau, \quad j=1,2,\dots, R_j-1 \quad (2.77)$$

Burada  $\Delta\tau$  zaman artımıdır. Tabakanın altında (2.77) eşitliği  $R_j$  elemanı için:

$$L_{R_j}^{*\tau+\Delta\tau} = L_{R_j}^{*\tau} - (v_{rf,R_j}^{*\tau} - v_{rf,b}^{*\tau})\Delta\tau \quad (2.78)$$

şeklinde ifade edilir.

$\tau + \Delta\tau$  zamanında her bir eleman için yeni boşluk oranı aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır:

$$e_j^{\tau+\Delta\tau} = \frac{L_j^{*\tau+\Delta\tau} (1 + e_{0,j})}{L_0^*} - 1, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.79)$$

Katıların ağırlığının yerini tutan,  $W_{s,j}^{*\tau+\Delta\tau}$

$$W_{s,j}^{*\tau+\Delta\tau} = \frac{W_{s,j}^{*\tau+\Delta\tau}}{H_0 \gamma_w} = \frac{G_s}{1 + e_j^{\tau+\Delta\tau}} L_j^{*\tau+\Delta\tau}, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.80)$$

(2.79) ve (2.80) eşitlikleri birleştirilse;

$$W_{s,j}^{*\tau+\Delta\tau} = \frac{G_s}{1+e_{0,j}} L^*, j=1,2,\dots, R_j \quad (2.81)$$

j elemanı için katıların başlangıç ağırlığına eşit duruma gelir. Böylece, konsolidasyon süresince katı kütle her bir elaman için değişmez değerdedir.

Her adımda sıkışabilir tabakanın yüksekliği, oturma ve konsolidasyon yüzdesi sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle verilir:

$$H^{*\tau} = \sum_{j=1}^{R_j} L_j^{*\tau} \quad (2.82)$$

$$S^{*\tau} = \frac{S^\tau}{H_0} = 1 - H^{*\tau} \quad (2.83)$$

$$U_{avg}^\tau = \frac{S^{*\tau}}{S^*} \quad (2.84)$$

$S^{*\tau}$ ,  $\tau$  anındaki oturma,  $S^*$  sıkışabilir tabakanın nihai şekil değiştirmesi ( $=S/H_0$ ),  $S$  ise konsolidasyon sonundaki oturmadır. Yerel konsolidasyon derecesi boşluk oranı  $U_{e,j}^\tau$ , ve aşırı boşluk basıncı  $U_{u,j}^\tau$ , ye göre tanımlanmaktadır.

$$U_{e,j}^\tau = \frac{e_{0,j} - e_j^\tau}{e_{0,j} - e_{f,j}}, j=1,2,\dots, R_j \quad (2.85)$$

$$U_{u,j}^\tau = 1 - \frac{u_{ex,j}^{*\tau}}{\Delta q^*}, j=1,2,\dots, R_j \quad (2.86)$$

Burada  $e_{f,j}$  j elemanı için konsolidasyon sonundaki nihai boşluk oranıdır.

CS2 her adımda zaman artımını hesaplamak için 2 kriter kullanır. Bunlardan birincisi, Terzaghi konsolidasyon eşitliğinin sonlu farklar metoduyla çözümünün kararlı olması şartı

$$\Delta t = \frac{\alpha(\Delta z)^2}{c_v} \quad (2.87)$$

(2.87) eşitliğinde;  $\alpha \leq 0.5$  bir sabittir,  $c_v$  konsolidasyon katsayısı ve  $\Delta z$  düşey düğüm aralığıdır.  $j$  elemanı için konsolidasyon katsayısı  $c_{v,j}^{*\tau}$  (2.88) eşitliğindeki gibi tanımlanır.

$$c_{v,j}^{*\tau} = \frac{c_{v,j}^\tau}{k_{q_0} H_0} = \frac{k_j^{*\tau} (1 + e_j^\tau)}{a_{v,j}^{*\tau}}, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.88)$$

(2.87) ve (2.88) eşitlikleri birleştirilip  $\Delta z = L_j^{*\tau} H_0$  a yaklaştırılırsa,  $j$ . inci eleman için zaman artımı  $\Delta \tau_j$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta \tau_j = \frac{k_{q_0} \Delta t}{H_0} = \frac{\alpha a_{v,j}^{*\tau} (L_j^{*\tau})^2}{k_j^{*\tau} (1 + e_j^\tau)}, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.89)$$

Nümerik çalışmalar CS2 nin  $\alpha < 0.5$  için kararlı,  $\alpha \approx 0.4$  için en doğru çözümü verdiğini göstermesine rağmen  $\Delta q^*$  değerine bağlı olarak, zaman artımının (2.89) eşitliğinden hesaplanması durumunda drenaj sınırları yanında yüksek başlangıç deşarj hızına uygun şekilde çözmek için aşırı büyük değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu nedenle, konsolidasyonun ilk aşamalarında modelin doğruluğunu artırmak için ikinci bir zaman artımı kriteri tanımlanmıştır.

$$\Delta \tau_j = \left| \frac{0.01 L_0^* (e_{0,j} - e_{f,j})}{(1 + e_{0,j}) (v_{rf,j}^{*\tau} - v_{rf,j+1}^{*\tau})} \right|, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.90)$$

$$\Delta \tau_{R_j} = \left| \frac{0.01 L_0^* (e_{0,R_j} - e_{f,R_j})}{(1 + e_{0,R_j}) (v_{rf,R_j}^{*\tau} - v_{rf,b}^{*\tau})} \right|, \quad j=1,2,\dots, R_j \quad (2.91)$$

CS2; konsolidasyon süresince büyük deformasyonlar, kendi ağırlığı altında davranış katı ve sıvıların birbirlerine göre bağıl hızları ve değişken permeabilite ve sıkışabilirlik etkilerini dikkate alarak hesap yapan adimsal lineer sonlu farklar yöntemini esas alan bir konsolidasyon modelidir.

## 2.4 Bir Boyutlu Sonlu Şekil Değişirme Konsolidasyon Denklemi İçin Bir Nümerik Çözüm: Condes0

Condes0, kapalı sonlu fark yöntemini kullanarak bir boyutlu konsolidasyon ve desikasyon analizi yapan nümerik bir algoritmadır. Bu model bir boyutlu sıkışma, üç boyutlu büzülme ve yumuşak zeminler içindeki düşey çatlakların oluşumu için formüle edilmiş ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemi çözer. Ayrıca bu algoritma boşluk oranı dağılımı, tabaka kalınlığı ve çatlakların büyüklüğünün bir boyutlu zamana bağlı değişimini bulmaya imkân vermektedir.

Condes0, Abu-Hejleh ve Znidarcic (1994,1995) tarafından geliştirilen bir boyutlu büyük deformasyon ve desikasyon teorisinde yapılan kabuller esas alınarak geliştirilmiş bir modeldir. Bu kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Yumuşak zemin, bir boyutlu sıkışma ve üç boyutlu desikasyonda boşluk oranı büzülme limitine ulaşıncaya kadar suya doygunudur.
- Sadece bir boyutlu düşey akış dikkate alınır ve bunun sonucu olarak bir boyutlu sıkışmada düşey deformasyon, üç boyutlu desikasyonda ise hem düşey hem yatay deformasyonlar dikkate alınır.
- Zemin yatayda homojendir.
- Zemin iskeleti sıkışmayan su nedeniyle etkilenmez ve krip yoktur.
- Desikasyon süresince meydana gelen çatlak derinliği ve yayılımı üniformdur.

Yukarıda sayılan kabullerin yanında, Darcy yasası ve kütlelerin korunumu prensibi bir boyutlu sıkışma ve üç boyutlu desikasyon süresince geçerlidir.

Bir boyutlu sıkışmada boşluk oranı efektif gerilme ilişkisi Liu ve Znidarcic (1991) tarafından verilmiştir.

$$e = A_1 (\sigma' + Z_1)^{B_1} \quad (2.92)$$

Burada  $e$  ve  $\sigma'$  sırasıyla boşluk oranı ve efektif gerilmedir.  $A_1$ ,  $B_1$  ve  $Z_1$  ampirik sabitlerdir.

Üç boyutlu desikasyonda boşluk oranı efektif gerilme ilişkisi Abu-Hejleh ve Znidarcic (1995) tarafından verilmiştir.

$$e = A_2(\sigma' + Z_2)^{B_2} \quad (2.93)$$

$A_2, B_2$  ve  $Z_2$  ampirik sabitlerdir.

Bir boyutlu sıkışma ve üç boyutlu desikasyon için permeabilite boşluk oranı ilişkisi (Somogyi, 1971);

$$K = Ce^D \quad (2.94)$$

(2.94) eşitliğinde K permeabilite, C ve D ampirik sabitlerdir.

(2.92), (2.93) ve (2.94) eşitlikleri hız bağıntıları ve kütlenin korunumu ile birlikte Lagrange koordinat sisteminde formüle edilerek bünye bağıntıları oluşturulmuştur. Hız bağıntısı ve kütle bünye denklemleri aşağıda verilmiştir:

Tek boyutlu sıkışmada, hız bağıntısı;

$$v_u = \frac{K(G_s - 1)}{1 + e} + \frac{K(1 + e_0)}{\gamma_w(1 + e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \quad (2.95)$$

Bünye denklemi;

$$\frac{\partial v_u}{\partial a} = \frac{-1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.96)$$

Üç boyutlu desikasyonda, hız bağıntısı;

$$v_c = -K + \frac{K(e\gamma_w + \gamma_s)}{\gamma_w(1 + e)} \left( 1 - \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e_{cr}} \frac{de_{cr}}{d\sigma'_v} \right) + \frac{K\alpha(1 + e_{cr})}{\gamma_w(1 + e)} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial a_1} \quad (2.97)$$

Bünye denklemi;

$$\frac{\partial(\alpha v_c)}{\partial a_1} + \eta E \frac{\partial \alpha}{\partial a_1} = \frac{-1}{1 + e_i} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.98)$$

Bu eşitliklerde  $k$  permeabilite,  $t$  zaman,  $a, a_1$  Lagrange koordinat sistemi,  $e_{cr}$  çatlama boşluk oranı,  $e_0$  sıfır efektif gerilme değerine karşılık gelen boşluk oranı,  $G_s$  zemin özgül yoğunluğu,  $v_c$  çatlak zeminde hız bağıntısı,  $v_u$  çatlak olmayan zeminde hız bağıntısı,  $\alpha$  elemanın alanın yüksekliğine oranı,  $\gamma_s$  ve  $\gamma_w$  sırasıyla zeminin ve suyun birim hacim ağırlığı,  $E$  zemin üst yüzeyinden itibaren buharlaşma oranı,  $\eta$  çatlak duvarlarındaki buharlaşmayı belirleyen ampirik bir parametredir.

## 2.5 Değişken Sıkışma Katsayısı ve Permeabiliteli Konsolidasyon Davranışı İçin Sonlu Fark Yaklaşımı (Abbasi, Rahimi, Fakher, 2006)

Bu yaklaşımda, sıkışabilirlik ve permeabilite değişimini dikkate alan konsolidasyon davranışı için non-lineer kısmi diferansiyel denklem verilmiştir. Bu çalışmada zemin homojen kabul edilmiş, krip ve zeminin kendi ağırlığının etkisi ihmal edilmiş, gerilme tarihçesi dikkate alınmamıştır. Bu model sadece normal konsolide yumuşak killer için uygulanabilmektedir.

Verilen non-lineer eşitliğin çözümü için sonlu fark yöntemi kullanılmıştır. Zeminin karakteristik özelliklerinin efektif gerilme ile değişimini belirlemek için  $C_n$  ve  $\alpha$  katsayıları tanımlanmıştır. Böylece konsolidasyon süresince hacimsel sıkışma katsayısı ve permeabilite değişimi göz önüne alınmış olmaktadır. Bu nedenle bu metot  $c_v$  nin değişkenliği ve var olan ampirik  $c_v$  tanımlamalarının sınırlamalarını ortadan kaldırmaktadır.

### 2.5.1 Temel Eşitlik

Boşluk basıncındaki değişimin efektif gerilmedeki değişime eşit olduğu düşünülerek, sabit toplam gerilme altında zemin kütlesi için süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left( \frac{1}{1+e_0} \right) \frac{\partial e}{\partial t} = - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} \quad (2.99)$$

Burada  $k$  permeabilite katsayısı,  $\sigma'$  efektif gerilme,  $e_0$  başlangıç boşluk oranı ve  $e, t$  anındaki boşluk oranıdır.

### 2.5.2 Boşluk Oranı Efektif Gerilme ve Boşluk Oranı Permeabilite İlişkisi

Boşluk oranı efektif gerilme değişimi yarı logaritmik ortamda lineer kabul edilir ( $e$ -Log  $\sigma'$ )

ve bu eğrinin eğimi sıkışma indisi ( $C_c$ ) olarak adlandırılır. Çeşitli araştırmalar lineer e-Log  $\sigma'$  ilişkisinin yumuşak killeri iyi tanımladığını göstermiştir. Herhangi bir efektif gerilme değerine karşılık gelen boşluk oranı, likit limitle ilgili boşluk oranının artmasıyla artar. Boşluk oranı efektif gerilme ilişkisi (2.100) eşitliğinde verilmiştir.

$$e = a - C_c \log \sigma' \quad (2.100)$$

Burada  $C_c$ , e-Log  $\sigma'$  eğrisinin eğimidir ve sıkışma indisi olarak adlandırılır, e  $\sigma'$  efektif gerilme değerindeki boşluk oranıdır ve  $a$  eğrinin kesişim noktasıdır. Gerçekte  $a$  birim efektif gerilmeye karşılık gelen boşluk oranıdır ve genellikle verilen zemin için sabit bir değerdir. Benzer ilişki boşluk oranı ile permeabilite arasında yazılırsa;

$$e = b + M \log k \quad (2.101)$$

(2.101) eşitliğinde e boşluk oranı, k permeabilite, M e-Logk eğrisinin eğimi b ise kesişim noktasıdır. b birim permeabiliteye karşılık gelen boşluk oranıdır ve verilen zemin için sabit bir değerdir. (2.100) ve (2.101) eşitlikleri birleştirilip yeniden düzenlenirse;

$$k = 10^{(a-b)/M} (\sigma')^{C_c/M} \quad (2.102)$$

a ve b katsayıları sırasıyla birim k ve  $\sigma'$  ne seçilmelidir.

### 2.5.3 Bünye Bağntısı

(2.100) eşitliğinin t' ye göre türevi alınır;

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{-2.3C_c}{\sigma'} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (2.103)$$

(2.102) ve (2.103) eşitlikleri (2.99) eşitliğinde yerine konulursa;

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{2.3(1+e_0)}{C_c \gamma_w} 10^{(a-b)/M} (\sigma')^{(1-C_c)/M} \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} \quad (2.104)$$

Burada;

$$\alpha = 1 - \frac{C_c}{M} \quad (2.105)$$

$$C_n = \frac{2.3(1 + e_0)}{C_c \gamma_w} 10^{(a-b)/M} \quad (2.106)$$

kabulleri yapılarak (2.104) eşitliği yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = C_n (\sigma')^\alpha \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} \quad (2.107)$$

(2.107) eşitliği efektif gerilme değişimini zaman ve yere göre tanımlayan kısmi diferansiyel denklemdir. Lineer boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisi kabul edilirse, aşırı boşluk suyu basıncı  $u$  (2.108) eşitliğinden hesaplanır.

$$\sigma' = \sigma_t - u \quad (2.108)$$

Burada  $\sigma'$  efektif gerilme,  $\sigma_t$  uygulanan toplam yük,  $u$  boşluk suyu basıncıdır.

(2.107) eşitliği tekrar yazılırsa;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_n (\sigma_t - u)^\alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.109)$$

başlangıç ve sınır koşulları iki yönlü drenaja açık tabaka kalınlığı  $2H$  olmak üzere aşağıda gösterildiği gibidir.

$$u(0,t)=0 \quad (2.110)$$

$$u(2H,t)=0 \quad (2.111)$$

$$u(z,0)=u_0 = \sigma_t \quad (2.112)$$

Burada H drenaj yolu uzunluğu,  $\sigma_t$  uygulanan toplam yük,  $u$  boşluk suyu basıncıdır. (2.113) eşitliği yazılırsa, (2.109) eşitliği Terzaghi eşitliğine dönüşür

$$C_n (\sigma_t - u)^\alpha = c_v \quad (2.113)$$

(2.113) eşitliği konsolidasyon katsayısı  $c_v$  nin konsolidasyon süresince sabit olmadığını, aşırı boşluk suyu basıncına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Ayrıca konsolidasyon katsayısı efektif gerilmeyle non-linear olarak değişir. (2.105) eşitliğinde  $\alpha$  boyutsuz bir katsayı olup, zeminin sıkışabilirlik ve permeabilite özelliklerine ( $C_c$  ve  $M$ ) bağlıdır. (2.106) eşitliğinde verilen  $C_n$  ise, zeminin sıkışabilirlik ve permeabilite özelliklerine ( $a$ ,  $b$ ,  $C_c$ ,  $M$ ), başlangıç boşluk oranına ( $e_0$ ) v suyun birim hacim ağırlığına bağlıdır. (2.106) eşitliğine göre,  $C_n$  'in birimi  $L^{2\alpha+2}T^{-1}F^\alpha$  dir. Burada L verilen uzunluk, T zaman, F kuvvettir. Bu çalışmada  $\alpha$  ve  $C_n$  sırasıyla non-linearite faktörü ve konsolidasyonun temel katsayısıdır. Özel bir durum olarak,  $\alpha=0$  (veya  $C_c/M =$ ) olduğu zaman,  $c_v$  sabit ve  $C_n$  eşit olacak böylece (2.109) eşitliği Terzaghi teorisine dönüşür.

#### 2.5.4 Non-linear Denklemin Çözümü

Yukarıda verilen (2.109) eşitliği non-linear kısmi bir diferansiyel denklemdir. Genellikle bu tür denklemler için kapalı form ve kesin analitik sonuç yoktur. Analitik çözümler bağımsız değişkenlerin kritik değerlerinde son derece kullanışlı çözüm vermesine rağmen, birçok kısmi non-linear kısmi diferansiyel denklemin çözümü için uygulamak daha zor hatta imkânsız olmaktadır. Bununla beraber, nümerik yaklaşımda sınırlı hata kabulü ile daha karmaşık ve non-linear kısmi diferansiyel denklemler çözülebilmektedir. Bu çalışmada non-linear konsolidasyon denklemini çözümü için sonlu fark yaklaşımı kullanılmıştır. Non-linear denklemlerin nümerik çözümünde en basit ve en yaygın yöntem iteratif veya tahmin ve düzeltme yöntemidir. Bu yaklaşımda, 2.5.3'te verilen (2.109) eşitliğinin sağ tarafındaki katsayı ( $C_n (\sigma_t - u)^\alpha$ ), verilen küçük zaman adımları için sabit kabul edilir. Böylece sunulan non-linear kısmi diferansiyel denklem ısı transfer eşitliğine veya yaygın olarak kullanılan Terzaghi eşitliğine dönüşür.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.114)$$

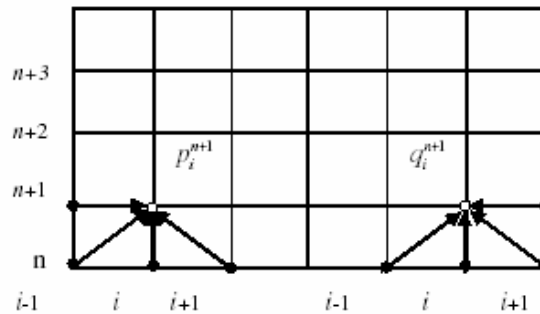
(2.114) eşitliği parabolik, bir boyutlu ve lineer bir kısmi diferansiyel denklemdir. Bu eşitlik çeşitli açık veya kapalı sonlu fark algoritmalarıyla çözülebilir. Bu yaklaşımda, en kesin ve basit yöntemlerden biri olan Barakat-Clark metodu kullanılmıştır. Bu metod değişen yönlü açık (ADE) metottur. Hesaplama işlemi uzaysal iki karşı yönün her zaman adımında eş zamanlı olarak ilerlemesi bulunan  $p_i^{n+1}$  ve  $q_i^{n+1}$  değerlerinin ortalaması alınarak son boşluk suyu basıncı değeri bulunur.(2.117)

$$\frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} = c_v \frac{p_{i-1}^{n+1} - p_i^{n+1} - p_i^n + p_{i+1}^n}{(\Delta x)^2} \quad (2.115)$$

$$\frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} = c_v \frac{q_{i-1}^n - q_i^n - q_i^{n+1} + q_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad (2.116)$$

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{2}(p_i^{n+1} + q_i^{n+1}) \quad (2.117)$$

(2.115), (2.116) ve (2.117) eşitliklerinde denklemin çözümü p ve q sırasıyla, soldan sağa ve sağdan sola ilerlemeyle elde edilir. Üst indis n zaman, alt indis i ise konumu göstermektedir.  $\Delta t$  ve  $\Delta z$  sırasıyla zaman ve yer aralığıdır. (2.115) eşitliğinde çözüm, sol sınırdan sağ sınıra ilerleme ile bulunur.  $p_{i-1}^{n+1}$  değeri her zaman bilindiğinden (sınır durumu  $i=1$ )  $p_i^{n+1}$  değeri belirlenir. Benzer olarak (2.116) eşitliğinde çözüm, sağ sınırdan sol sınıra ilerleme ile bulunur. Sonuç olarak  $q_{i+1}^{n+1}$  her zaman bilindiğinden,  $q_i^{n+1}$  değeri belirlenir. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8 Barakat-Clark algoritması (Abbasi, Rahimi, Fakher, 2006)

Sonuç olarak, yukarıda bahsedilen nümerik algoritma kullanılarak farklı derinlik ve zaman

adımlarında boşluk basıncı ( $u(z,t)$ ) belirlenir. Ayrıca diğer ilgili parametreler ortalama konsolidasyon yüzdesi ve zaman faktörü de her bir zaman seviyesinde belirlenir.

### 3. BİR BOYUTLU KONSOLIDASYON DENKLEMİNİN NÜMERİK ÇÖZÜMÜ (VERRULJT, 1995)

Jeolojik ortamların analizinde, ortamın kompleks oluşu ve zemin davranışının birçok etkene bağlı olarak değişiminden dolayı çoğu durumda ampirik bağıntılardan yararlanılmaktadır. Bu durum özellikle nümerik yöntemlerin ve bilgisayarların gelişmediği yaygınlaşmadığı dönemlerdedir. Geoteknik mühendisliğinin birçok uygulamasında ampirik bağıntıların kullanılması ile yapılan analizler genelde çok yaklaşık bazen de gerçek değerden çok uzak olabilir. Bununla beraber problemlerin analizinde aynı anda birçok karakteristik özellik göz önünde bulundurulamaz. Bu yüzden jeolojik ortamlar sürekli bir ortam gibi düşünülerek çeşitli etkiler karşısında davranışı (yükleme, sızıntı, konsolidasyon v.b.) fiziksel bir temele dayanan teoriler ileri sürülmüştür. Bu konuda Terzaghi (1943) önderlik etmiş ve geliştirdiği konsolidasyon teorisi geoteknik mühendisliğinde bu esasa dayanan önemli bir örnektir. Geliştirilen bu teoriler genelde matematiksel olarak diferansiyel denklemlerden ibaret olup kapalı çözümlere ulaşmak için bir takım basit kabuller yapmak gerekmektedir. Bu yaklaşım çoğu pratik durumlar için yeterli çözümü sağlamasına rağmen jeolojik ortamların homojen olmayan yapısı, non-lineer malzeme davranışı, gelişigüzel geometrisi, içerisindeki süreksizlikler, malzeme özelliklerinin zaman ve ortama bağlı olarak değişimi v.b. karmaşık özellikler nedeniyle problemin gerçekçi çözümlere ulaşmasına olanak vermez. Bu nedenle geomekanik problemlerin analizinde yukarıda adı geçen faktörlerin birçoğunu aynı anda göz önüne alan nümerik yöntemler geliştirilmiş olup bunların çoğu yukarıda sözü edilen teorilerin matematiksel ifadesi olan diferansiyel denklemlerin çözümünde nümerik analiz yöntemlerinin uygulanmasıdır. Nümerik analiz yöntemlerinin gelişmesi ve birçok özelliği aynı anda göz önüne alabilmesi bilgisayarların gelişmesine bağlı olmuştur.

Bu bölümde, homojen tabakalar için bir boyutlu konsolidasyon problemi için geliştirilmiş bir nümerik çözüm verilecektir. Bu nümerik model, sonlu farklar metoduna dayanmaktadır.

Temel eşitlik;

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

Daha önce u ile gösterilen boşluk suyu basıncı bu bölümde p ile gösterilmesi tercih edilmiştir. Burada  $c_v$  konsolidasyon katsayısını, p boşluk suyu basıncını, t zamanı, z ise derinliği

göstermektedir.

Başlangıç koşulu,

$$t=0 : \quad p = p_0 = \frac{\alpha}{\alpha + n\beta} q \quad (3.2)$$

ve sınır koşulları,

$$z=0 : \quad p=0 \quad (3.3)$$

$$z=2h : \quad p=0 \quad (3.4)$$

Burada  $q$  uygulanan yük,  $\alpha$  zeminin sıkışabilirliği,  $\beta$  boşluk suyunun sıkışabilirliği,  $n$  porozite,  $2h$  sıkışabilir tabakanın yüksekliğidir.

Sonlu fark metodunun prensibi (3.1) eşitliğindeki kısmi diferansiyel denklemin bölümlerini sonlu fark bölümlerine yaklaştırmaktır. (3.1) eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{p(z, t + \Delta t) - p(z, t)}{\Delta t} = c_v \frac{p(z + \Delta z, t) - 2p(z, t) + p(z - \Delta z, t)}{\Delta z^2} \quad (3.5)$$

Bu denklemde eşitliğin sol tarafı  $\Delta t \rightarrow 0$  limit durumu ihmal edildiğinde  $\frac{\partial p}{\partial t}$  kısmi türevini tanımlar. Bu yaklaşım  $\Delta t$  pozitif kabul edildiğinden ileri yönde sonlu fark olarak adlandırılır. (3.5) eşitliğinin sağ kısmı ise 2. türevin 1. türevin türevi olduğu düşünülerekten, 1. dereceden türev  $z + \frac{1}{2}\Delta z$  ve  $z - \frac{1}{2}\Delta z$  noktalarında merkezi sonlu fark yöntemi kullanılarak hesaplanır.

(3.5) eşitliğinde  $p(z, t) = p_i(t)$ ,  $p(z + \Delta z, t) = p_{i+1}(t)$  ve  $p(z - \Delta z, t) = p_{i-1}(t)$  yazılarak (3.6) eşitliği elde edilir.

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) + \delta \{p_{i+1}(t) - 2p_i(t) + p_{i-1}(t)\} \quad (3.6)$$

Burada;

$$\delta = \frac{c_v \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (3.7)$$

(3.6) eşitliği  $t$  anındaki boşluk suyu basıncı biliniyorsa  $t+\Delta t$  anındaki boşluk basıncını hesaplamaya imkân sağlayan bir algoritmadır.  $t=0$  anındaki başlangıç koşulları belirlendiğinde, adım adım ilerleme işlemi kullanılarak, boşluk suyu basıncı sonraki zaman değerlerinde hesaplanabilir. Bu yöntem açık sonlu farklar yöntemidir.

Sıkışabilir tabaka  $n$  adet  $\Delta z$  kalınlığında ara tabakalara bölünürse (3.6) eşitliği ile  $i=1, \dots, n-1$  katmanlarındaki yeni boşluk suyu basıncı değerleri hesaplanabilir.  $p_0$  ve  $p_n$  değerleri sınır şartlarına uyar.

Nümerik algoritma (3.6)'da  $\delta$  parametresi ancak yeteri kadar küçük olduğu durumda dengededir. Eğer bu parametre büyük seçilirse, yöntem dengesiz olacaktır ve bu da devamlı artan değerleri doğuracaktır. Denge kriteri pratik olarak sıfır boşluk suyu basıncından türetilir ve bunun böyle kalmasını sağlar.  $t$  zamanında  $p_{i-1} = \varepsilon$ ,  $p_i = -\varepsilon$  ve  $p_{i+1} = \varepsilon$  olarak alınır (3.6) eşitliği aşağıdaki şekle dönüşür:

$$p_i(t + \Delta t) = (1 - 4\delta)\varepsilon \quad (3.8)$$

$\delta > 0$  olduğu takdirde (3.8) eşitliği daima  $\varepsilon$  dan küçüktür. Bunun anlamı, zaman adımının pozitif olmasıdır. Ayrıca  $p_i$  değeri  $-\varepsilon$  dan büyük olmalıdır. Bu da

$$\delta < 0,5 \quad (3.9)$$

eşitliğini sağlar.

(3.9) eşitliğinden zaman adımı için aşağıdaki koşul çıkarılır;

$$\Delta t < \frac{(\Delta z)^2}{2c_v} \quad (3.10)$$

#### 4. TERZAGHI KONSOLIDASYON DENKLEMİNİN NONLİNEER PROBLEMLER İÇİN NÜMERİK ÇÖZÜMÜ (KP1)

Bu tez çalışmasında Terzaghi konsolidasyon denklemini esas alarak, non-linear konsolidasyon için bir yöntem geliştirmek amaçlanmıştır. Bunun için Visual Basic programlama dilinde bir program yazılmış ve bu program KP1 (Konsolidasyon Programı 1) olarak adlandırılmıştır. KP1 programında öncelikle zemin istenilen sayıda elemana bölünmekte, bu elemanların başlangıç ve sınır koşulları belirlenmektedir. Sıkışabilir tabakanın yüksekliği, uygulanan gerilme artışı ve malzemenin gerilme-boşluk oranı davranışı, zeminin özgül yoğunluğu “input” data olarak verilmektedir. KP1 programı tarafından belirlenen sınır koşulları altında uygulanan gerilme artışı sonrasında, elemanlarda oluşacak nihai gerilme hesaplanarak nihai boşluk oranları bulunmaktadır. Her bir eleman için nihai oturma, boşluk oranı değişiminden hesaplanarak; sıkışabilir tabakanın nihai oturması eleman oturmalarının toplamından bulunmaktadır.

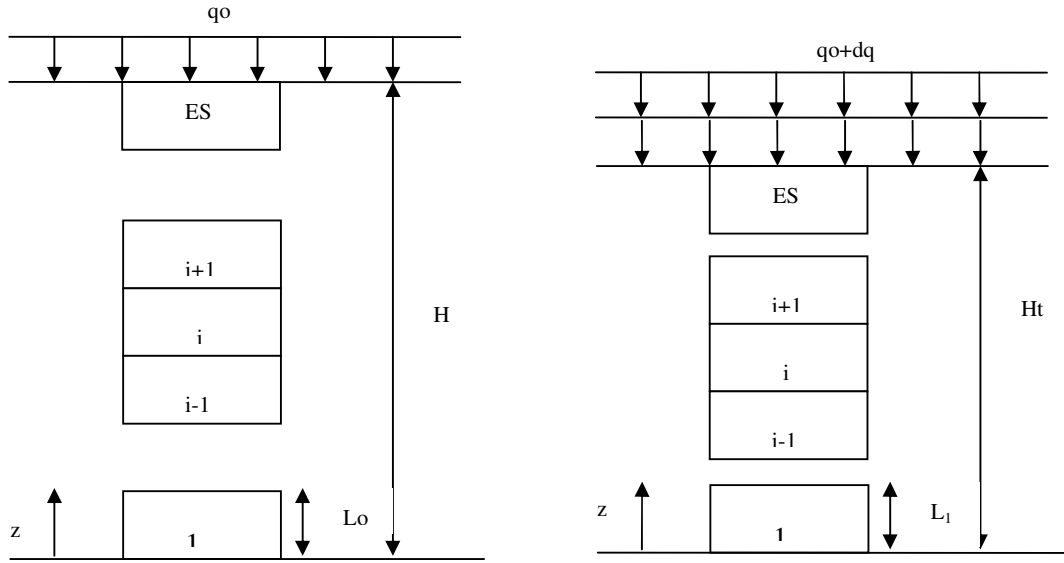
Uygulanan yükten dolayı bir boyutlu zemin kolonunda meydana gelen artık boşluk suyu basıncı dağılımı programa başlangıç koşulu olarak girilmektedir. Bu başlangıç koşulu için programda seçilen eleman boyutu ve konsolidasyon katsayısı gözönüne alınarak uygun (yakınsamayı sağlayan) zaman artışları hesaplanır ve Bölüm 3’ de açıklanan hesap adımlarıyla boşluk suyu basıncı sönümlenmesi gerçekleştirilir. Boşluk suyu basıncındaki değişimin efektif gerilmedeki değişime eşit olduğu prensibiyle, her adımda elemanların efektif gerilmesi bulunmakta ve efektif gerilmeye karşılık gelen boşluk oranları efektif gerilme-boşluk oranı değişiminden hesaplanmaktadır. Konsolidasyon süresince permeabilite katsayısı da boşluk oranına bağlı olarak değiştirilmektedir. Her zaman adımında elemanın boşluk oranı güncellenmekte ve zeminin oturması hesaplanmaktadır.

Yukarıda özetlenen hesap adımları ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

##### 4.1 KP1 İçin Geometri

KP1 programı için zemin geometrisi Şekil 4.1 de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşey Eulerian koordinatı  $z$ , tabakanın alt kısmıyla çakışan sabit bir başlangıç yüzeyinden yukarı doğru pozitif olarak tanımlanmıştır. Eleman koordinatı  $i$ , alt sınırdan yukarı doğrudur.  $H$  yüksekliğindeki doygun homojen zemin tabakası  $ES$  adet elemana bölünmüş ve her bir elemanın başlangıç yüksekliği  $L_0$  dir. Bu elemanların düğüm noktalarının koordinatı  $z$  dir. Başlangıç boşluk oranları  $e_i$  olup, tabaka içinde jeolojik efektif gerilme  $q_0$  ve zeminin kendi

ağırlığı ile dengede olabileceği varsayılmaktadır. Tabakanın alt ve üst sınırları drenajlıdır.  $t=0$ , da anlık düşey gerilme artışı  $dq$ , sıkışabilir tabakaya uygulanır. Bundan sonra bir  $t$  zamanında tabaka yüksekliği  $H_t$ ,  $i$ . inci elemanın yüksekliği de  $L_i$  olur. Düğüm yükseklikleri  $z$  sabit başlangıç noktasına göre ele alınmakta ve her adımda güncellenmektedir.



Şekil 4.1 KP1 için geometri

$$L_0 = \frac{H}{ES} \quad (4.1)$$

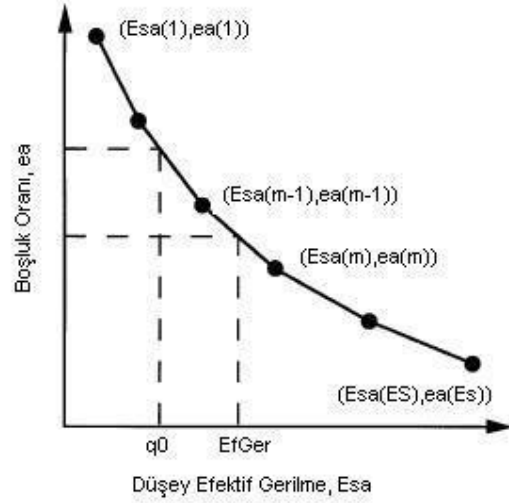
(4.1) eşitliğinde  $L_0$  elemanın başlangıç yüksekliği,  $H$  sıkışabilir tabakanın kalınlığı,  $ES$  ise eleman sayısıdır.

$$\text{Zaman artımı } dt = \delta \frac{L^2}{c_v} \quad (4.2)$$

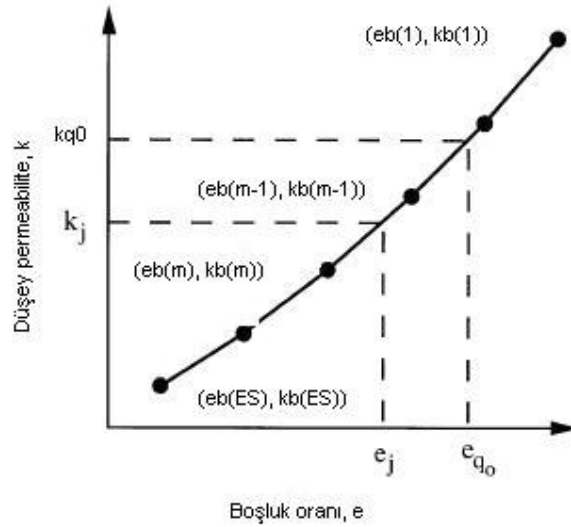
Burada  $\delta$  zaman parametresi,  $L$  elemanın herhangi bir andaki yüksekliği,  $c_v$  ise konsolidasyon katsayısıdır.

## 4.2 Malzeme Bünye Bağlıları

Sıkışabilir tabaka için sıkışma eğrisi Şekil 4.2 de gösterilen boşluk oranı-düşey efektif gerilme değişimi ile tanımlanmıştır.



Şekil 4.2 Zemin bünye ilişkileri: sıkışabilirlik



Şekil 4.3 Zemin bünye ilişkileri: permeabilite

Düşey efektif gerilme: Düşey efektif gerilme, her düğümde uygulanan jeolojik yük ve sıkışabilir tabakanın kendi ağırlığından hesaplanmaktadır.

$t=0$  anında ES inci elemanın başlangıç efektif gerilmesi:

$$(\sigma'_{v_0})_{ES} = q_0 + \left( (\gamma_{ES} - \gamma_w) \frac{L_{ES}}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$(\sigma'_{v_0})_i = \left( (\gamma_i - \gamma_w) \frac{L_i}{2} \right) + \left( (\gamma_i - \gamma_w) \frac{L_{i+1}}{2} \right) + (\sigma'_{v_0})_{i+1} \quad i=1,2,\dots, ES-1 \quad (4.4)$$

$q_0$  zemin üzerindeki yük,  $\gamma_i$  elemanın doygun birim hacim ağırlığı,  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı,  $L_i$  i. elemanın yüksekliğidir.

$$\gamma_i = \frac{G_s + e_i}{1 + e_i}, i=1,2,\dots, ES \quad (4.5)$$

Burada  $\gamma_i$  elemanın doygun birim hacim ağırlığı,  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı,  $e_i$  düşey efektif gerilme  $q_0$  da boşluk oranıdır.  $e_i$  boşluk oranına karşılık gelen permeabilite katsayısı  $k_i$  dir. KP1 de  $G_s$  katıların özgül yoğunluğu olup sıkışabilir tabaka için sabittir ve her bir elemenda  $e_i$  verilen zaman artımı üzerinden sabittir. i. inci elemanın ortasında nihai gerilme:

$$(NiGer)_i = (\sigma'_{v_0})_i + dq, i=1,2,\dots, ES \quad (4.6)$$

$\sigma'_{v_0}$  düşey efektif gerilme,  $dq$  uygulanan gerilme artışıdır.

(4.6) eşitliğinde hesaplanan nihai gerilmeden her bir eleman için nihai boşluk oranı  $e_f$  hesaplanarak sıkışabilir tabakanın  $dq$  yükü altındaki nihai oturması hesaplanır.

$$a_v(i) = \frac{ea(m) - ea(m-1)}{Esa(m) - Esa(m-1)}, i=1,2,\dots, ES \quad (4.7)$$

$a_v(i)$  i. elemanın sıkışma katsayısı,  $e_f(i)$  i. elemanın nihai boşluk oranıdır.

$$e_f(i) = ea(m-1) + (a_v(i) * ((NiGer)_i - Esa(m-1))), i=1,2,\dots, ES \quad (4.8)$$

$$Hf = Hf + \left[ Lo - \left( Lo * \frac{(e_o(i) - e_f(i))}{1 + eo(i)} \right) \right], i=1,2,\dots, ES \quad (4.9)$$

$$S = H - H_f \quad (4.10)$$

Burada  $a_v$  sıkışabilirlik katsayısı,  $e_f$  nihai boşluk oranı,  $H_f$  tabakanın nihai yüksekliği,  $S$  ise sıkışabilir tabakanın nihai oturmasıdır.

Boşluk suyu basıncı dağılımı başlangıçta lineer kabul edilmiştir.

$$u(0)=0 \quad (4.11)$$

$$u(ES)=0 \quad (4.12)$$

$$u(i)=dq \quad i=1,2,\dots,ES-1 \quad (4.13)$$

Boşluk suyu basıncı, her zaman adımında Bölüm 3'te anlatılan sonlu fark yöntemiyle bulunmaktadır.

$$u_i = u_i + \delta((u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1})) , \quad i=1,2,\dots, ES-1 \quad (4.14)$$

(4.14) eşitliğinde delta bir sabittir ve çözümün yakınsaması için uygun değerlerin saptanması gereklidir. Lineer problemler için 0.4-0.5 arasında olması beklenirken yapılan çalışmalarda KP1 programında 0.03 alınmasının uygun olduğu kanısına varılmıştır.

Elemanların orta noktasında boşluk suyu basıncı ise;

$$us_i = \frac{(u_{i-1} + u_i)}{2} , \quad i=1,2,\dots, ES \quad (4.15)$$

Boşluk basıncındaki değişim (4.16) eşitliğindeki gibi hesaplanır.

$$du_i = u_i - us_i , \quad i=1,2,\dots, ES \quad (4.16)$$

Sıkışabilir tabakaya  $dq$  yükü yüklenmesinden  $t$  süre sonra efektif gerilme, boşluk suyu basıncının değişiminden hesaplanır.

$$(\sigma'_v)_{ES} = (NiGer)_{ES} - (u)_{ES} \quad (4.17)$$

$$(\sigma'_v)_i = (EfGero)_i + du_i \quad i=1,2,\dots,ES-1 \quad (4.18)$$

Burada  $(\sigma'_v)_i$  i.elemanın t zaman sonra efektif gerilmesi,  $du_i$  i. elemandaki boşluk suyu basıncı değişimidir. Her adımda bütün elamanlar için  $(\sigma'_v)_i$  efektif gerilmesi hesaplanarak e- $\sigma$  değişiminden her bir elemanın boşluk oranı e hesaplanır.

$$e(i) = ea(m-1) + \left( a_v(i) * ((\sigma'_v)_i - Esa(m-1)) \right) , \quad i=1,2,\dots, ES \quad (4.19)$$

(4.19) eşitliğinden bulunan boşluk oranlarına karşılık gelen permeabilite değerleri e-k değişiminden hesaplanır.(4.20)

$$k(i) = kb(m-1) + \left[ \left( \frac{kb(m) - kb(m-1)}{eb(m) - eb(m-1)} \right) * e(i) - eb(m-1) \right] \quad i=1,2,\dots, ES \quad (4.20)$$

Konsolidasyon katsayısı  $c_v$  her adımda güncellenmekte ve (4.21) eşitliğindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$c_v(i) = k(i) * \frac{(1 + e(i))}{\gamma_w * (-a_v(i))} \quad i=1,2,\dots,ES-1 \quad (4.21)$$

(4.21) eşitliğinde  $k$  elemanın permeabilite katsayısıdır, e boşluk oranı,  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı,  $a_v$  zeminin sıkışma katsayısıdır. Permeabilite katsayısı her adımda güncellenmektedir.

Sıkışabilir tabakanın konsolidasyon oturması her adımda boşluk oranı değişiminden hesaplanmaktadır. (4.22)

$$dL(i) = \frac{(eold(i) - e(i))}{1 + eold(i)} * L(i) \quad i=1,2,\dots,ES \quad (4.22)$$

$$L(i) = L(i) - dL(i) \quad i=1,2,\dots,ES \quad (4.23)$$

$$Ht = \sum L(i) \quad i=1,2,\dots,ES \quad (4.24)$$

$$S_t = H - H_t \quad (4.25)$$

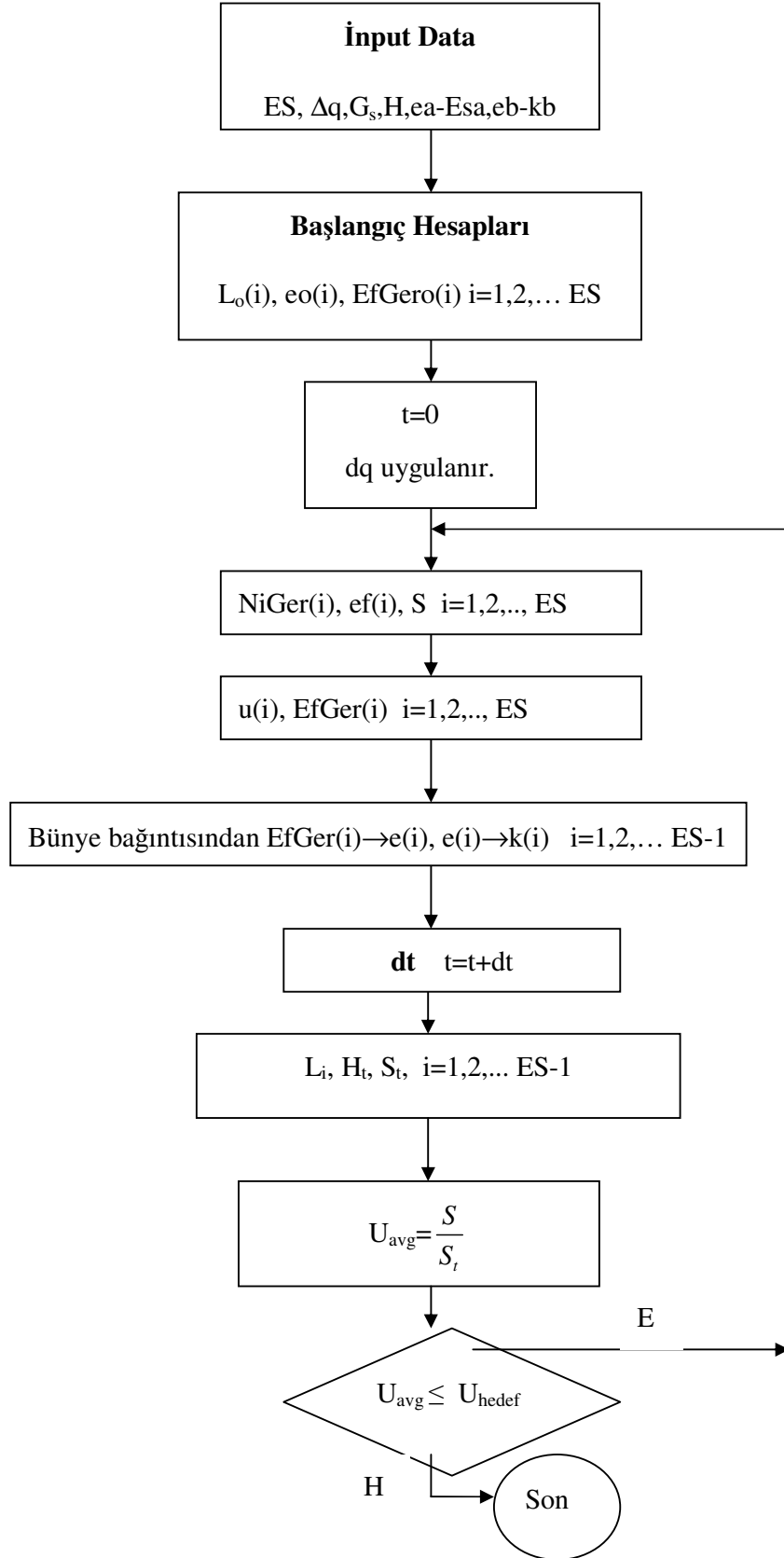
Her bir zaman adımında,  $dL$  her bir elemanın oturması,  $L$  her bir elemanın yüksekliği,  $H_t$  sıkışabilir tabakanın kalınlığı,  $S_t$  sıkışabilir tabakanın oturmasını göstermektedir.

Ortalama konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}$  (4.26) eşitliğinden hesaplanır.

$$U_{avg} = \frac{S_t}{S} \quad (4.26)$$

Burada  $S_t$  sıkışabilir tabakanın  $t$  anındaki oturmasını,  $S$  ise nihai oturmayı göstermektedir.  $U_{avg}$  her zaman adımında hesaplanmakta ve programda girilen hedef konsolidasyon yüzdesine ulaşıncaya kadar bu işlemler devam etmektedir.

Yukarıda ayrıntıları verilen algoritmanın bir özeti Şekil 4.4' deki akış şemasında sunulmuştur.



Şekil 4.4 KP1 programı için akış şeması

## 5. KP1 PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZLER

Bu bölümde KP1 programı ile yapılan analizler ve bunların Terzaghi yöntemiyle ve CS2 programı ile karşılaştırılmaları verilmiştir.

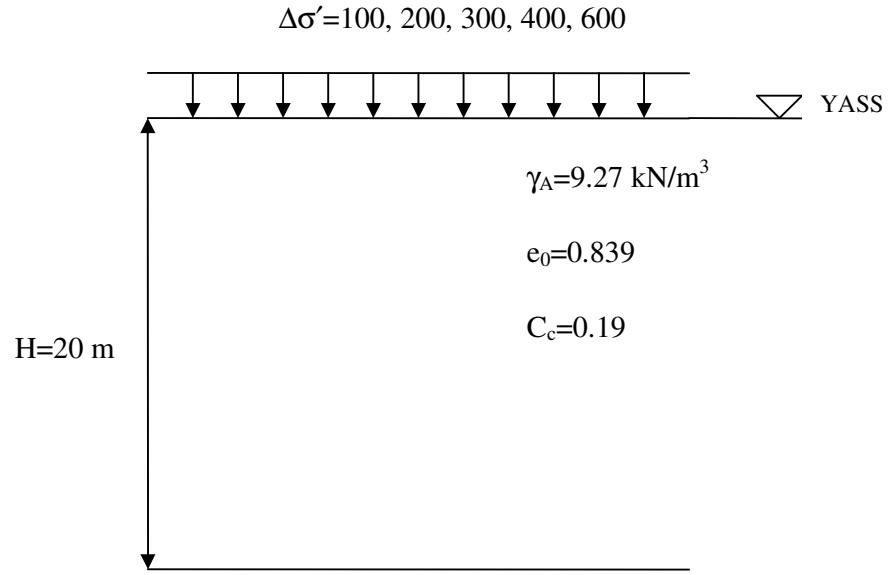
### 5.1 KP1 Programında Yapılan Lineer Analizlerin Terzaghi Yöntemiyle Karşılaştırılması

Bu bölümde zemin numunesi üzerinde yapılan ödometre deney sonuçları verilmiştir. Bu deney sonuçları kullanılarak, Terzaghi yöntemiyle farklı sürşarj yükleri altında zeminin oturma değerleri hesaplanmış ve bu değerler KP1 programında yapılan lineer konsolidasyon analizleri sonucunda elde edilen oturma değerleri ile karşılaştırılarak grafikler halinde sunulmuştur.

#### 5.1.1 Örnek 1 İçin Zemin Özellikleri ve Problem Geometrisi

Şekil 5.1 de Örnek 1'in zemin özellikleri ve problem geometrisi verilmiştir. Örnek 1 'de çift yönlü drenaja sahip H=20 m kalınlığında bir zemin tabakası olup 10 adet eşit yükseklikte elamana bölünerek her bir elemanın  $\Delta\sigma' = 100, 200, 300, 400$  ve  $600$  kPa' lık sürşarj yükleri altında nihai konsolidasyon oturması hesaplanarak tabakanın toplam oturma değerleri el ile ve KP1 programı ile bulunmuştur. Analizlerde sıkışma parametresi YTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılan bir ödometre deneyi sonucundan alınmıştır. Deney sonucu Çizelge 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.

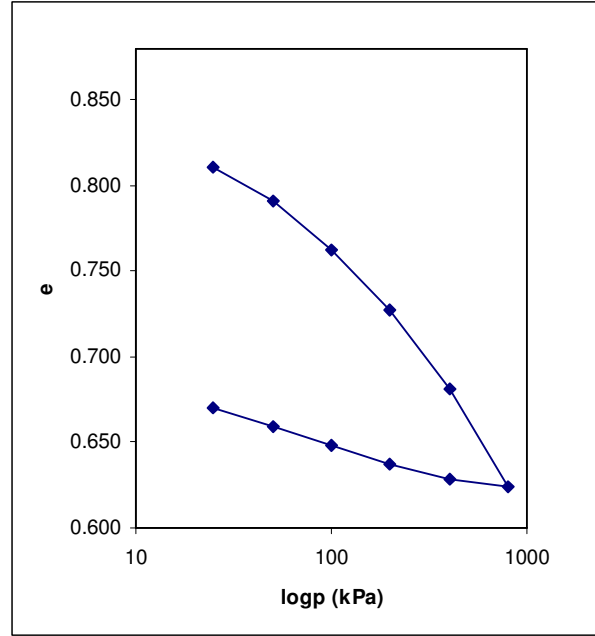
Elle yapılan nihai oturma sonuçları Çizelge 5.2 'de, KP1 ile elde edilen çözüm ise bunlarla karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.3'de ve Şekil 5.3' de verilmiştir. Çizelge ve Şekil 5.3' de verildiği gibi her iki çözüm üst üste düşmektedir.



Şekil 5.1 Örnek 1 için problem geometrisi

Çizelge 5.1 Örnek 1 için ödometre deneyi sonuçları

Basınç (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	$\Delta H = \Delta H_1 - \Delta H_2$ (*0,001) (mm)	$\Delta e$	Boşluk Oranı $e = e_0 - \Delta e$	Sıkışma Katsayısı $a_v = \Delta e / \Delta\sigma$ (*0,01) (mm <sup>2</sup> /N)
0	0	0	0	0,839	0
25	25	304,8	0,028	0,811	0,112
50	25	213,36	0,020	0,791	0,078
100	50	307,34	0,028	0,763	0,057
200	100	391,16	0,036	0,727	0,036
400	200	497,84	0,046	0,681	0,023
800	400	622,3	0,057	0,624	0,014
400	400	-50,8	-0,005	0,629	-
200	200	-96,52	-0,009	0,637	-
100	100	-119,38	-0,011	0,648	-
50	50	-116,84	-0,011	0,659	-
25	25	213,36	-0,011	0,671	-



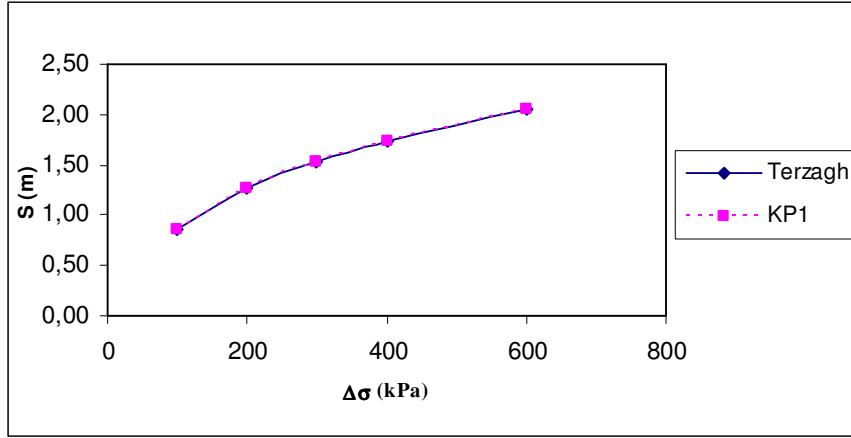
Şekil 5.2 Örnek 1 için laboratuvar sıkışma eğrisi

Çizelge 5.2 Örnek 1 için farklı sürşarj yükleri altında Terzaghi yöntemiyle bulunan oturma değerleri

$\Delta\sigma$ (kPa)	$S_c = H \frac{C_c}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vo}}\right)$
100	0.86446
200	1.26114
300	1.53181
400	1.73848
600	2.04685

Çizelge 5.3 Örnek 1 için farklı yük kademelerinde Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerleri

$\Delta\sigma$ (kpa)	Nihai Oturma (m)	
	Terzaghi	KP1
100	0.86446	0.86446
200	1.26114	1.26114
300	1.53181	1.53181
400	1.73848	1.73848
600	2.04685	2.04685

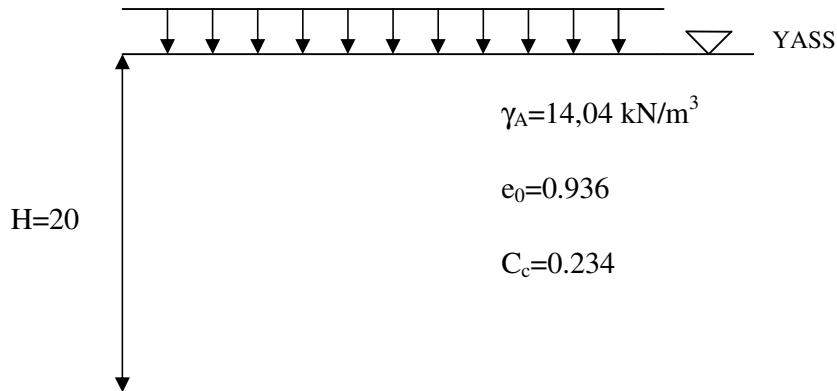


Şekil 5.3 Örnek 1 için farklı yükler altında Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerlerinin değişimi

### 5.1.2 Örnek 2 İçin Zemin Özellikleri ve Problem Geometrisi

Şekil 5.4 de Örnek 2'in zemin özellikleri ve problem geometrisi verilmiştir. Örnek 2 'de çift yönlü drenaja sahip H=20 m kalınlığında bir zemin tabakası olup 10 adet eşit yükseklikte elamana bölünerek her bir elemanın  $\Delta\sigma'=100, 200, 300, 400$  ve  $600$  kPa'lık sürşarj yükleri altında nihai konsolidasyon oturması hesaplanarak tabakanın toplam oturma değerleri el ile ve KP1 programı ile bulunmuştur. Analizlerde sıkışma parametresi YTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılan bir ödometre deneyi sonucundan alınmıştır. Deney sonucu Çizelge 5.4 ve Şekil 5.5'de verilmiştir.

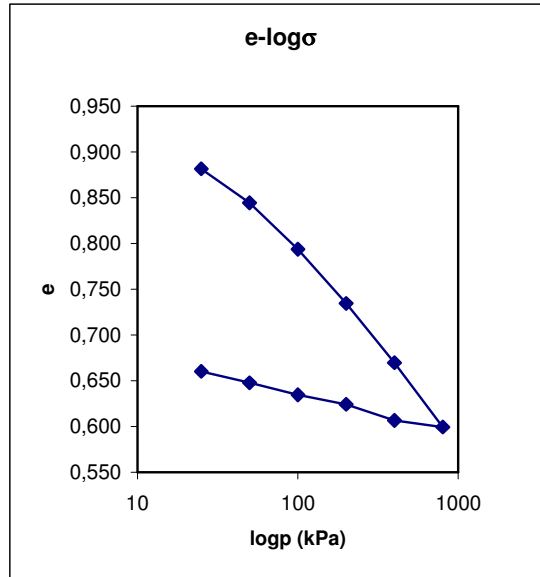
Elle yapılan nihai oturma sonuçları Çizelge 5.5 'de, KP1 ile elde edilen çözüm ise bunlarla karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.6'de ve Şekil 5.6' de verilmiştir. Çizelge ve Şekil 5.6' da verildiği gibi her iki çözüm üst üste düşmektedir.



Şekil 5.4 Örnek 2 için problem geometrisi

Çizelge 5.4 Örnek 2 için ödometre deneyi sonuçları

Basınç (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	$\Delta H = \Delta H_1 - \Delta H_2$ (*0,001) (mm)	$\Delta e$	Boşluk Oranı $e = e_0 - \Delta e$	Sıkışma Katsayısı $a_v = \Delta e / \Delta\sigma$ (*0,01) (mm <sup>2</sup> /N)
0	0	0	0	0,936	0
25	25	563,88	0,055	0,882	0,218
50	25	383,54	0,037	0,845	0,149
100	50	523,24	0,051	0,794	0,101
200	100	612,14	0,059	0,735	0,059
400	200	668,02	0,065	0,670	0,032
800	400	726,44	0,070	0,600	0,018
400	400	-73,66	-0,007	0,607	-
200	200	-182,88	-0,018	0,624	-
100	100	-106,68	-0,010	0,635	-
50	50	-134,62	-0,013	0,648	-
25	25	-129,54	-0,013	0,660	-



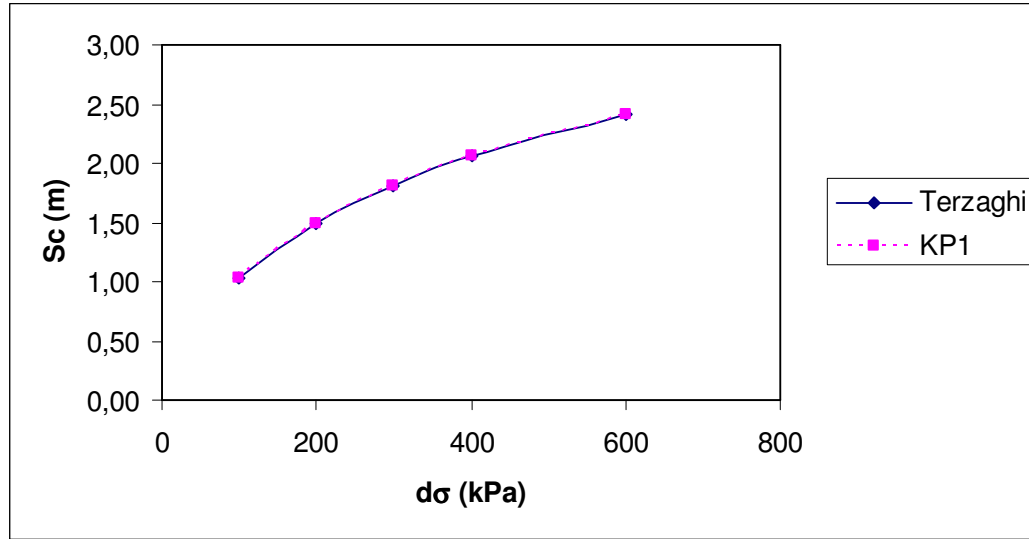
Şekil 5.5 Örnek 2 için laboratuvar sıkışma eğrisi

Çizelge 5.5 Örnek 2 için farklı sürşarj yükleri altında Terzaghi yöntemiyle bulunan oturma değerleri

$d\sigma$ (kPa)	$S_c = H \frac{C_c}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vo}}\right)$
100	1.02827
200	1.49658
300	1.81534
400	2.05840
600	2.42063

Çizelge 5.6 Örnek 2 için farklı yük kademelerinde Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerleri

$d\sigma$ (kPa)	Nihai Oturma (m)	
	Terzaghi	KP1
100	1.02827	1.02827
200	1.49658	1.49658
300	1.81534	1.81534
400	2.05840	2.05840
600	2.42063	2.42063



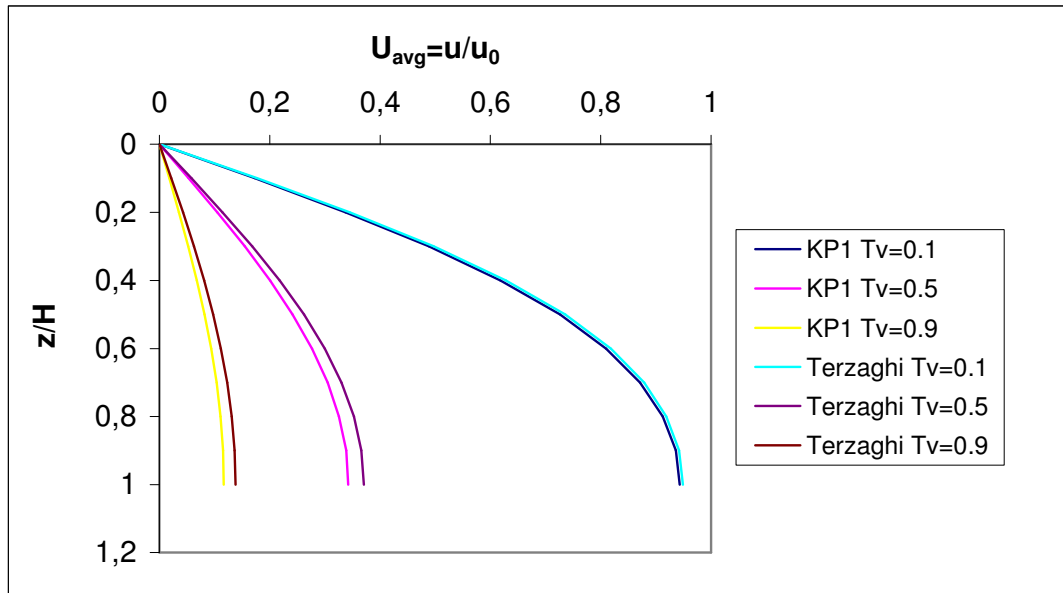
Şekil 5.6 Örnek 2 için farklı yükler altında Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen oturma değerlerinin değişimi

## 5.2 Tek ve Çift Yönlü Drenaj Durumları İçin Ortalama Konsolidasyon Yüzdesinin Değişimi

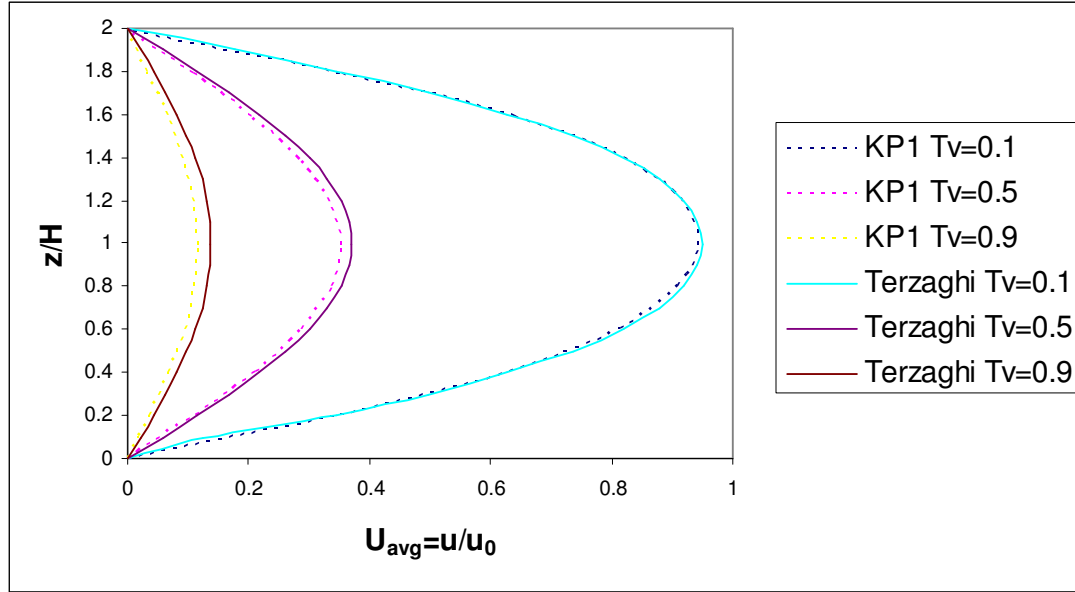
Tek ve çift yönlü drenaj durumları için ortalama konsolidasyon yüzdesi değişimi, farklı  $T_v$  değerleri için Terzaghi çözümüyle ve KP1 programı ile hesap edilmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7’de verilmiştir. Şekil 5.7’ de tek yönlü drenaj durumu için, Şekil 5.8 ’ de ise çift yönlü drenaj durumu için konsolidasyon yüzdesinin zaman ve derinlik faktörü ile değişimi verilmiş ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.7 Ortalama konsolidasyon yüzdesinin zaman faktörü ve derinlik faktörü ile değişimi  
\*( $U_{avg}=u/u_0$ )

z/H	Tv=0.1		Tv=0.5		Tv=0.9	
	( $U_{avg}$ )* Terzaghi	( $U_{avg}$ )* KP1	( $U_{avg}$ )* Terzaghi	( $U_{avg}$ )* KP1	( $U_{avg}$ )* Terzaghi	( $U_{avg}$ )* KP1
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1	0.0000	0.1727	0.0580	0.0532	0.0216	0.0181
0.2	0.3452	0.3379	0.1146	0.1052	0.0427	0.0358
0.3	0.4975	0.4883	0.1683	0.1548	0.0627	0.0527
0.4	0.6286	0.6187	0.2180	0.2006	0.0812	0.0682
0.5	0.7357	0.7261	0.2622	0.2415	0.0977	0.0822
0.6	0.8185	0.8099	0.3000	0.2766	0.1118	0.0941
0.7	0.8788	0.8713	0.3304	0.3050	0.1231	0.1038
0.8	0.9191	0.9126	0.3526	0.3258	0.1314	0.1109
0.9	0.9419	0.9363	0.3662	0.3387	0.1365	0.1152
1	0.9493	0.9431	0.3708	0.3426	0.1382	0.1166
1.1	0.9419	0.9425	0.3662	0.3387	0.1365	0.1152
1.2	0.9191	0.9196	0.3526	0.3361	0.1314	0.1106
1.3	0.8788	0.8713	0.3304	0.3050	0.1231	0.1038
1.4	0.8185	0.8257	0.3000	0.2849	0.1118	0.0937
1.5	0.7357	0.7261	0.2622	0.2415	0.0977	0.0822
1.6	0.6286	0.6386	0.2180	0.2063	0.0812	0.0678
1.7	0.4975	0.4883	0.1683	0.1548	0.0627	0.0527
1.8	0.3452	0.3516	0.1146	0.1080	0.0427	0.0355
1.9	0.1769	0.1727	0.0580	0.0532	0.0216	0.0181
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



Şekil 5.7 Tek yönlü drenaj durumu için Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen ortalama konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}$ 'nin derinlik ve zaman faktörü ile değişimi

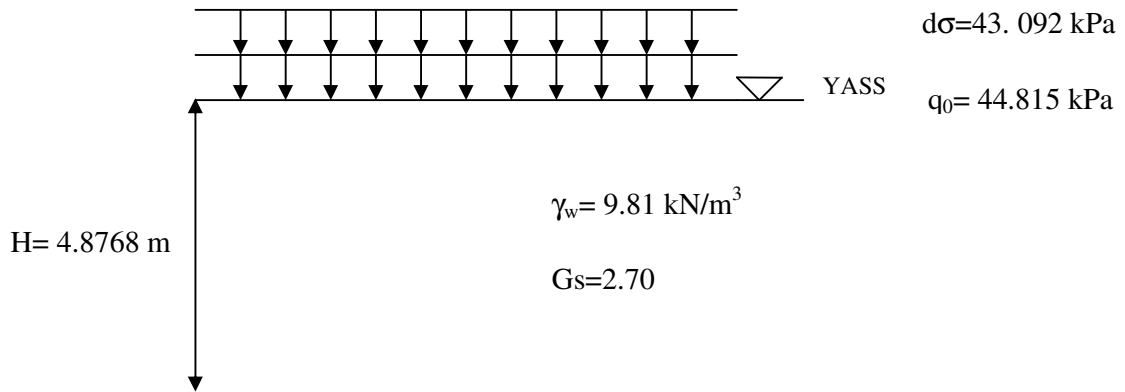


Şekil 5.8 Çift yönlü drenaj durumu için Terzaghi yöntemi ve KP1 programından elde edilen ortalama konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}$  'nin derinlik ve zaman faktörü ile değişimi

### 5.3 KP1 Programı ile Yapılan Analizlerin CS2 Programı ile Yapılan Analizlerle Karşılaştırılması

#### 5.3.1 Örnek 3

Şekil 5.9 'de problem geometrisi verilen (Örnek 3) çift yönlü drenaja sahip  $H= 4.8768$  m kalınlığında üzerinde  $q_0= 44.815$  kPa yük bulunan bir kil tabakası üzerinde  $d\sigma= 43.092$  kPa yük artışı olması durumunda farklı konsolidasyon yüzdesi değerleri için oturma analizleri yapılmıştır.



Şekil 5.9 Örnek 3 için problem geometrisi

KP1 programında input olarak girilen boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisi Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 Örnek 3 için malzeme bünye ilişkisi (a) boşluk oranı-efektif gerilme (b) boşluk oranı permeabilite

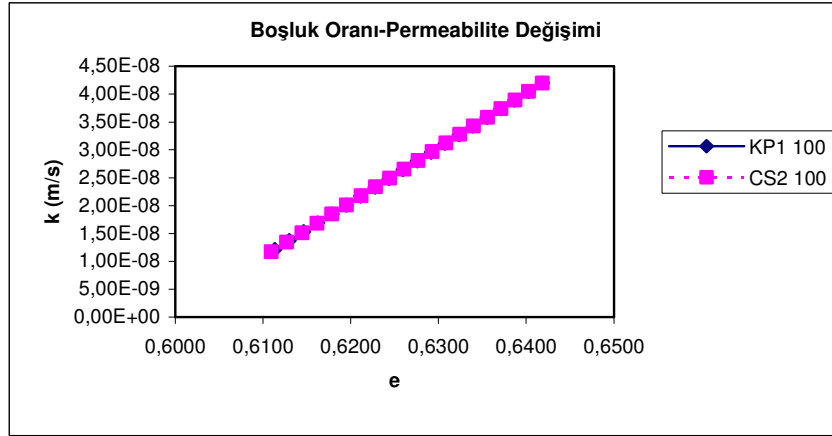
e	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	e	k (m/s)
0.65	38,30	0.65	4,99E-08
0.6	114,91	0.6	9,99E-10
0.53	229,82	0.53	1,99E-10

(a) (b)

Örnek 3 'e  $d\sigma=4,788$  kPa uygulanması durumunda boşluk oranı ve permeabilite değerleri KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış, bulunan değerler Çizelge 5.9 'de verilmiştir. Şekil 5.10'da boşluk oranı- permeabilite değişimi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. KP1 ve CS2 programlarından elde değerlerin birbirleriyle son derece uyumlu olduğu Şekil 5.10 'da görülmektedir.

Çizelge 5.9 Örnek 3 için  $d\sigma=4,788$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerleri

d $\sigma= 4.788$ kPa			
KP1		CS2	
e	k (m/s)	e	k (m/s)
0,6114	1,21E-08	0,6109	1,17E-08
0,6130	1,37E-08	0,6127	1,34E-08
0,6146	1,53E-08	0,6144	1,52E-08
0,6163	1,69E-08	0,6162	1,68E-08
0,6179	1,85E-08	0,6179	1,85E-08
0,6195	2,01E-08	0,6195	2,01E-08
0,6211	2,17E-08	0,6212	2,18E-08
0,6227	2,33E-08	0,6228	2,34E-08
0,6244	2,49E-08	0,6245	2,50E-08
0,6260	2,64E-08	0,6261	2,66E-08
0,6276	2,80E-08	0,6277	2,81E-08
0,6292	2,96E-08	0,6293	2,97E-08
0,6308	3,11E-08	0,6309	3,12E-08
0,6323	3,27E-08	0,6324	3,28E-08
0,6339	3,43E-08	0,6340	3,43E-08
0,6355	3,58E-08	0,6356	3,59E-08
0,6371	3,74E-08	0,6372	3,74E-08
0,6387	3,89E-08	0,6387	3,89E-08
0,6403	4,05E-08	0,6403	4,05E-08
0,6418	4,20E-08	0,6418	4,20E-08

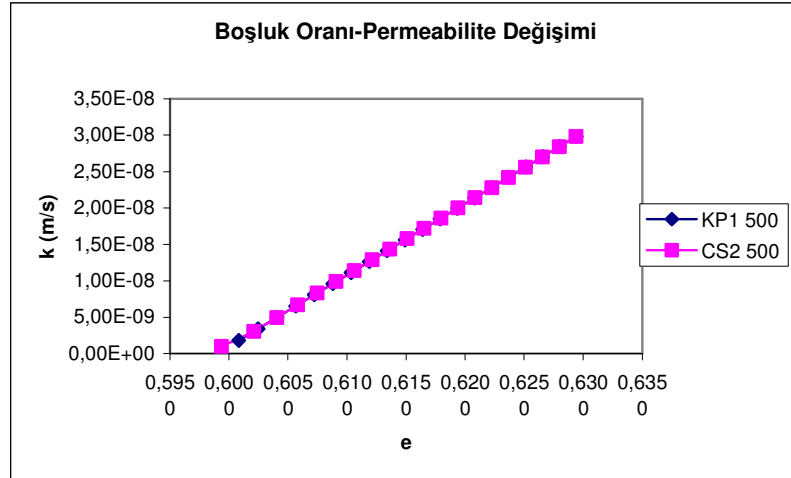


Şekil 5.10 Örnek 3 için  $d\sigma=4,788$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerlerinin değişimi

Örnek 3 'e  $d\sigma=23,940$  kPa uygulanması durumunda boşluk oranı ve permeabilite değerleri KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış bulunan değerler Çizelge 5.10 'da verilmiştir. Şekil 5.11' de boşluk oranı- permeabilite değişimi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. KP1 ve CS2 programlarından elde değerlerin birbirleriyle son derece uyumlu olduğu Şekil 5.11 'da görülmektedir.

Çizelge 5.10 Örnek 3 için  $d\sigma=23,940$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerleri

$d\sigma=23,940$ kPa			
KP1		CS2	
e	k (m/s)	e	k (m/s)
0,6008	1,81E-09	0,5994	9,93E-10
0,6025	3,41E-09	0,6021	3,06E-09
0,6041	4,98E-09	0,6041	4,98E-09
0,6057	6,55E-09	0,6058	6,71E-09
0,6072	8,09E-09	0,6075	8,34E-09
0,6088	9,63E-09	0,6091	9,90E-09
0,6104	1,11E-08	0,6106	1,14E-08
0,6119	1,26E-08	0,6121	1,29E-08
0,6134	1,41E-08	0,6136	1,43E-08
0,6149	1,56E-08	0,6151	1,58E-08
0,6164	1,71E-08	0,6165	1,72E-08
0,6179	1,85E-08	0,6180	1,86E-08
0,6193	2,00E-08	0,6194	2,00E-08
0,6208	2,14E-08	0,6208	2,14E-08
0,6223	2,28E-08	0,6223	2,28E-08
0,6237	2,42E-08	0,6237	2,42E-08
0,6251	2,56E-08	0,6251	2,56E-08
0,6266	2,70E-08	0,6265	2,70E-08
0,6280	2,84E-08	0,6280	2,84E-08
0,6294	2,98E-08	0,6294	2,98E-08

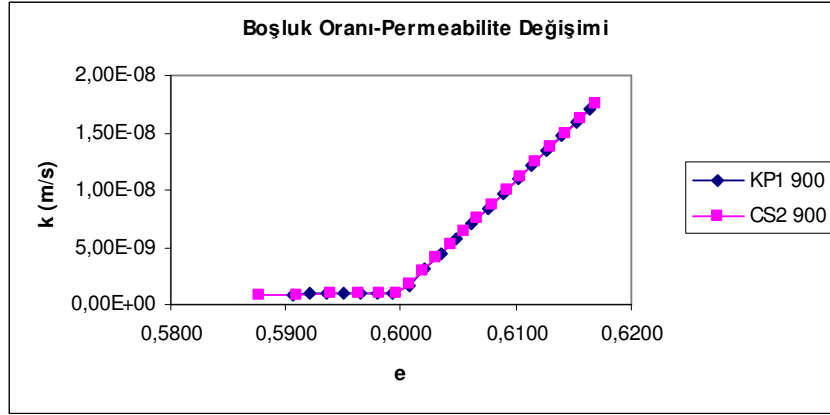


Şekil 5.11 Örnek 3 için  $d\sigma=23,940$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerlerinin değişimi

Örnek 3 'e  $d\sigma=43,092$  kPa uygulanması durumunda boşluk oranı ve permeabilite değerleri KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış bulunan değerler Çizelge 5.11 'de verilmiştir. Şekil 5.12' de boşluk oranı- permeabilite değişimi karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. KP1 ve CS2 programlarından elde değerlerin birbirleriyle son derece uyumlu olduğu Şekil 5.12 'de görülmektedir.

Çizelge 5.11 Örnek 3 için  $d\sigma=43,092$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerleri

$d\sigma = 43,092$ kPa			
KP1		CS2	
e	k (m/s)	e	k (m/s)
0,5906	8,93E-10	0,5877	8,60E-10
0,5922	9,10E-10	0,5910	8,97E-10
0,5936	9,27E-10	0,5939	9,30E-10
0,5951	9,44E-10	0,5963	9,58E-10
0,5965	9,60E-10	0,5982	9,79E-10
0,5979	9,76E-10	0,5996	9,96E-10
0,5993	9,92E-10	0,6008	1,75E-09
0,6007	1,65E-09	0,6019	2,89E-09
0,6021	3,04E-09	0,6031	4,04E-09
0,6035	4,40E-09	0,6043	5,21E-09
0,6048	5,75E-09	0,6055	6,38E-09
0,6062	7,07E-09	0,6067	7,57E-09
0,6075	8,37E-09	0,6079	8,77E-09
0,6088	9,66E-09	0,6092	9,98E-09
0,6101	1,09E-08	0,6104	1,12E-08
0,6114	1,22E-08	0,6117	1,25E-08
0,6127	1,34E-08	0,6130	1,37E-08
0,6140	1,47E-08	0,6143	1,50E-08
0,6152	1,59E-08	0,6156	1,63E-08
0,6165	1,71E-08	0,6170	1,76E-08

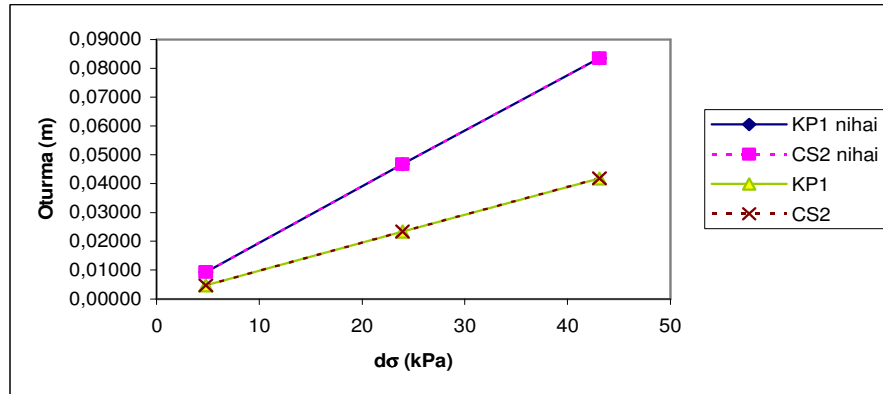


Şekil 5.12 Örnek 3 için  $d\sigma=43,092$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk oranı permeabilite değerlerinin değişimi

Örnek 3 'de  $d\sigma=4,788, 23,940, 43,092$  kPa yük altında konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.50$  olması durumunda oturma değerleri KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış bulunan değerler Çizelge 5.12 'de verilmiş bu değerler grafik halinde sunulmuştur. (Şekil 5.13). Sonuçların üst üste düştüğü Şekil 5.13'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 5.12 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.50$  için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerleri

$d\sigma$ (kPa)	KP1		CS2	
	$S_f$ (m/s)	$S_t$ (m/s)	$S_f$ (m/s)	$S_t$ (m/s)
4.788	0.00935	0.00468	0.00935	0.00469
23.940	0.04675	0.02339	0.04675	0.02342
43.092	0.08349	0.04176	0.08349	0.04188

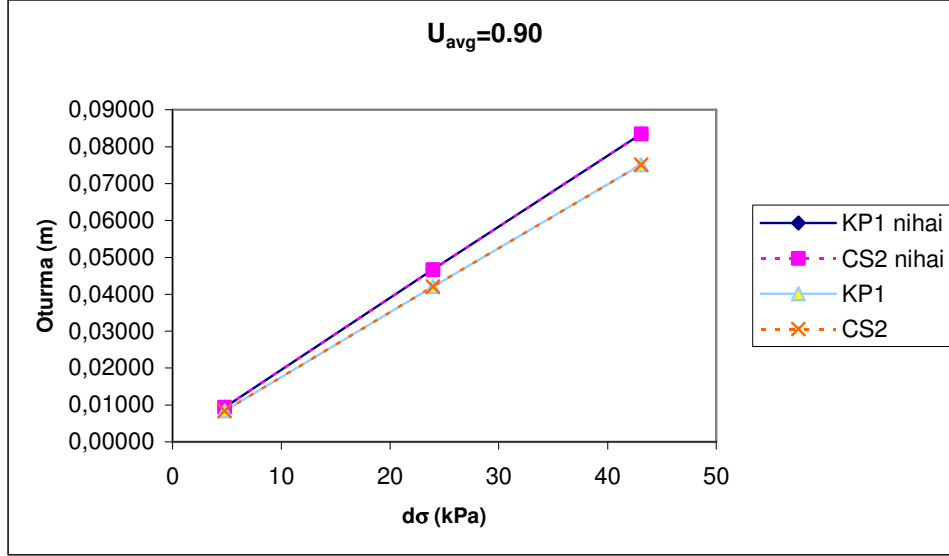


Şekil 5.13 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.50$  olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi

Örnek 3 'de  $d\sigma=4,788, 23,940, 43,092$  kPa yük altında konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.90$  olması durumunda oturma değerleri KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış bulunan değerler Çizelge 5.13 'de verilmiş bu değerler grafik halinde sunulmuştur. (Şekil 5.14). Sonuçların birbirine yakın olduğu Şekil 5.14'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 5.13 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.90$  için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerleri

dσ (kPa)	KP1		CS2	
	S (m)	St (m)	S (m)	St (m)
4,788	0,00935	0,00842	0,009353	0,008419
23,94	0,04675	0,04208	0,046747	0,042084
43,092	0,08349	0,07515	0,083491	0,075148



Şekil 5.14 Örnek 3 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.90$  olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi

Örnek 3 için  $d\sigma=43,092$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri, konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.90$  için Çizelge 5.14'de,  $U_{avg}=0.50$  için Çizelge 5.15'de,  $U_{avg}=0.10$  için Çizelge 5.16'de verilmiştir. Şekil 5.15'te elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. KP1 ve CS2 programlarında taban sınır koşulu farklı olduğundan dolayı boşluk suyu basınçlarında farklılık gözlenmiştir.

Çizelge 5.14 Örnek 3 için  $d\sigma=43,092$  kPa sürşarj yükü altında  $U_{avg}=0.90$  10 KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

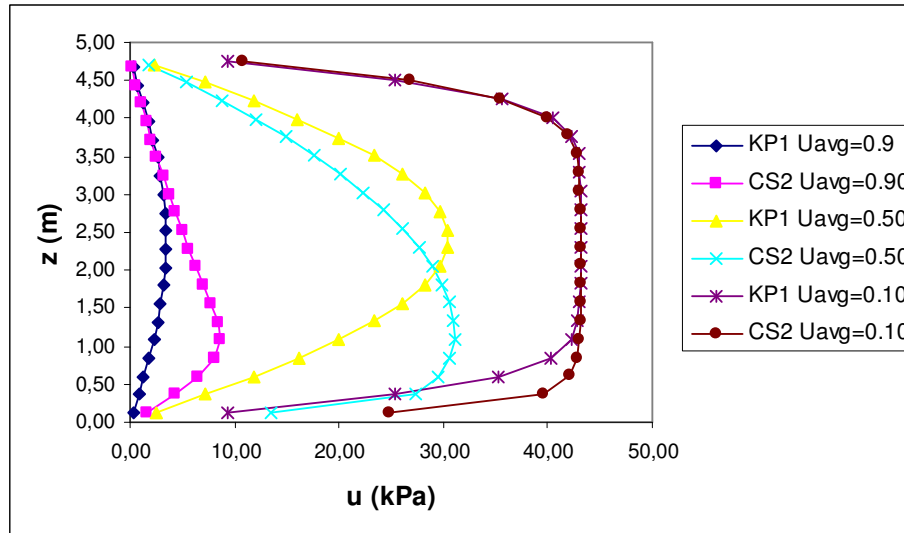
KP1		CS2	
u (kPa)	z (m)	u (kPa)	z (m)
0,27	0,12	1,53	0,12
0,81	0,36	4,35	0,36
1,33	0,60	6,56	0,60
1,82	0,84	8,01	0,84
2,26	1,08	8,63	1,08
2,64	1,32	8,45	1,32
2,96	1,56	7,76	1,56
3,21	1,80	7,02	1,80
3,37	2,04	6,33	2,04
3,46	2,28	5,65	2,28
3,45	2,52	4,99	2,52
3,37	2,76	4,36	2,76
3,20	3,00	3,74	3,00
2,95	3,24	3,15	3,24
2,63	3,48	2,59	3,48
2,25	3,72	2,05	3,72
1,81	3,96	1,55	3,96
1,32	4,20	1,07	4,20
0,81	4,44	0,62	4,44
0,27	4,68	0,20	4,68

Çizelge 5.15 Örnek 3 için  $d\sigma=43,092$  sürşarj yükü altında  $U_{avg}=0.50$  için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

KP1		CS2	
u (kPa)	z (m)	u (kPa)	z (m)
2,43	0,12	13,52	0,12
7,22	0,36	27,25	0,36
11,82	0,60	29,50	0,60
16,10	0,84	30,58	0,85
19,97	1,08	31,03	1,09
23,33	1,32	31,01	1,33
26,10	1,57	30,63	1,58
28,23	1,81	29,92	1,82
29,68	2,05	28,93	2,06
30,40	2,29	27,66	2,30
30,40	2,54	26,14	2,54
29,68	2,78	24,37	2,79
28,23	3,02	22,36	3,03
26,10	3,26	20,11	3,27
23,32	3,51	17,63	3,51
19,95	3,75	14,91	3,75
16,08	3,99	11,97	3,99
11,80	4,23	8,80	4,23
7,20	4,47	5,42	4,48
2,42	4,71	1,84	4,72

Çizelge 5.16 Örnek 3 için  $d\sigma=43,092$  sürşarj yükü altında  $U_{avg}=0.10$  KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

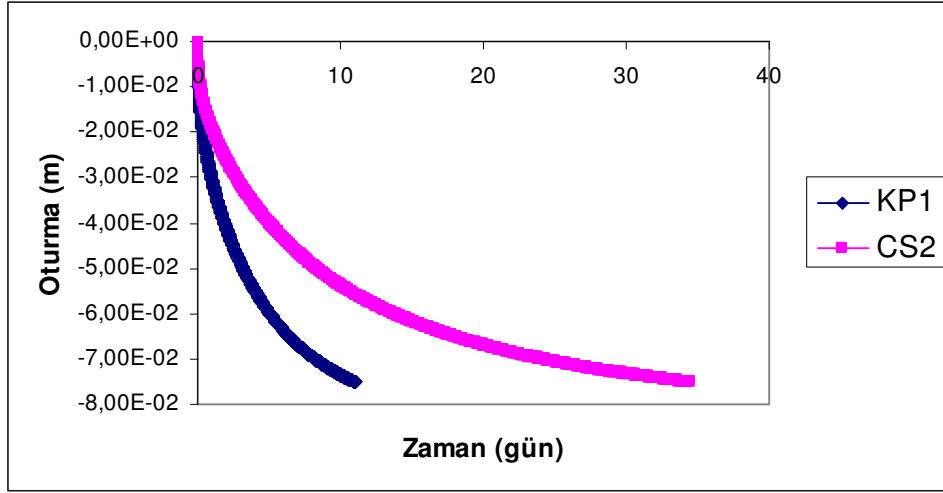
KP1		CS2	
u (kPa)	z (m)	u (kPa)	z (m)
9,35	0,12	24,91	0,12
25,28	0,36	39,62	0,36
35,34	0,60	42,11	0,61
40,26	0,85	42,86	0,85
42,21	1,09	43,04	1,10
42,85	1,33	43,08	1,34
43,03	1,58	43,09	1,58
43,08	1,82	43,09	1,83
43,09	2,07	43,09	2,07
43,09	2,31	43,09	2,31
43,09	2,55	43,09	2,56
43,09	2,80	43,09	2,80
43,09	3,04	43,07	3,05
43,05	3,29	43,00	3,29
42,91	3,53	42,75	3,53
42,34	3,77	41,96	3,78
40,48	4,02	39,92	4,02
35,56	4,26	35,46	4,26
25,37	4,50	26,82	4,51
9,35	4,75	10,82	4,75



Şekil 5.15 Örnek 3  $d\sigma=43,092$  kPa için  $U_{avg}=0.90, 0.50, 0.10$  olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerlerinin derinlikle değişimi

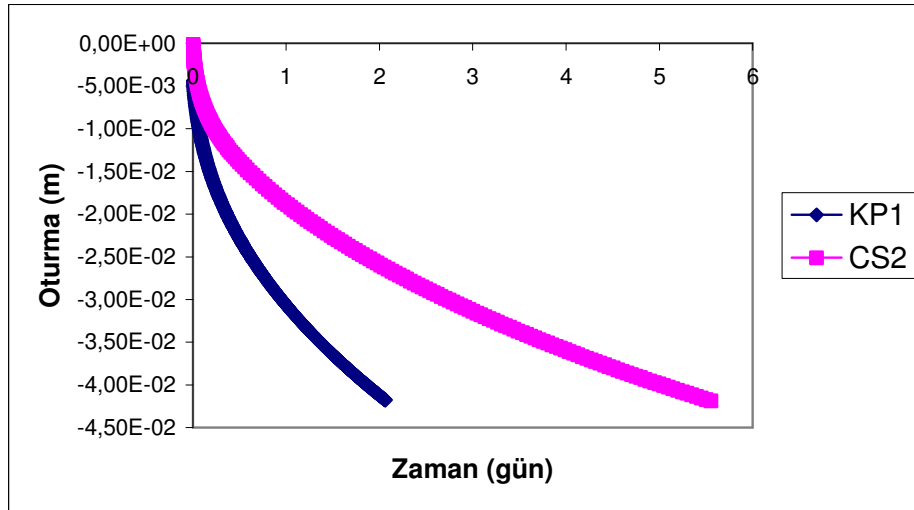
Örnek 3 'de  $d\sigma=43,092$  kPa yük artışı olması durumunda ortalama konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.90$ 'a ulaşmaya kadar oturma-zaman değişimi KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış Şekil 5.16 'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değeri  $St=0,075$  m, KP1 programında konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.90$

değerine ulaşması için geçen süre 11.09 gün, CS2 programında ise 34.53 gündür.



Şekil 5.16 Örnek 3  $d\sigma=43,092$  kPa için  $U_{avg}=0.90$  olması durumunda KP1 ve CS2 programlarının ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi

Örnek 3'de  $d\sigma=43,092$  kPa yük artışı olması durumunda %50 ortalama konsolidasyon yüzdesine ( $U_{avg}=0.50$ ) ulaşmak için zamanla oturma değişimi KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış Şekil 5.17 'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değeri  $St=0,041$  m, KP1 programında konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.50$  değerine ulaşması için geçen süre 2.06 gün, CS2 programında ise 5.55 gündür.

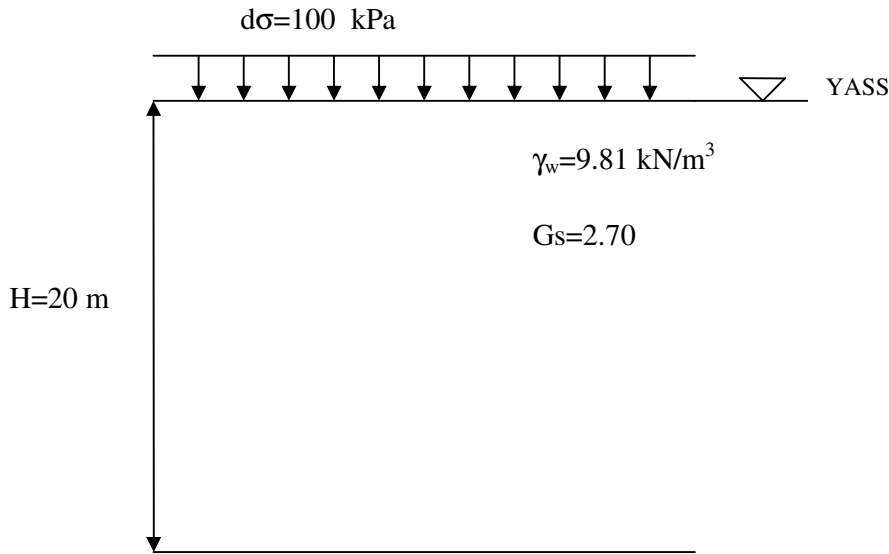


Şekil 5.17 Örnek 3  $d\sigma=43,092$  kPa için  $U_{avg}=0.50$  olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi

Örnek 3' de farklı konsolidasyon yüzdeleri için KP1 ve CS2 programın ile elde edilen oturma değerlerinin aynı olduğu gözlenmiştir. Oturma sürelerindeki fark ise programlarda kabul edilen zemin tabanındaki farklı sınır koşullarından kaynaklanmaktadır.

### 5.3.2 Örnek 4 İçin Zemin Özellikleri ve Problem Geometrisi

Şekil 5.18 'da problem geometrisi verilen (Örnek 4) alt sınır drenajsız üst sınır drenajlı H=20 m kalınlığında üzerinde bir kil tabakası üzerinde  $d\sigma=100$  kPa yük artışı olması durumunda farklı konsolidasyon yüzdesi değerleri için oturma analizleri yapılmıştır.



Şekil 5.18 Örnek 4 için problem geometrisi

KP1 programında data olarak girilen boşluk oranı-efektif gerilme ve boşluk oranı-permeabilite ilişkisi Çizelge 5.17'de verilmiştir.

Çizelge 5.17 Örnek 4 için malzeme bünye ilişkisi (a) boşluk oranı-efektif gerilme (b) boşluk oranı permeabilite

e	$\sigma'_{v0}$ (kPa)
0.839	0
0.791	50
0.763	100
0.727	200
0.681	400
0.624	800

(a)

e	k (m/s)
0.839	2.606E-07
0.791	2.487E-07
0.763	2.415E-07
0.727	2.324E-07
0.681	2.206E-07
0.624	2.056E-07

(b)

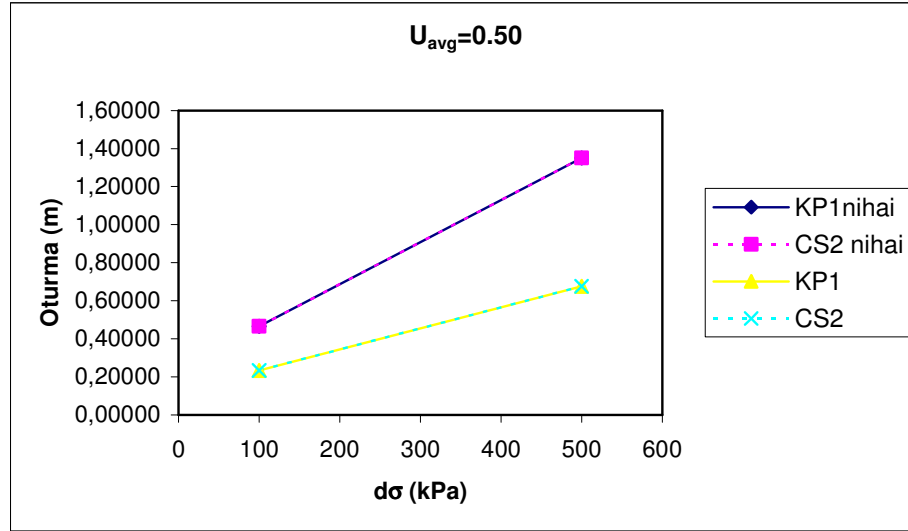
Örnek 4 'de  $d\sigma=100, 500$  kPa yük altında konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.50$  olması durumunda oturma değerleri KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış değerler Çizelge 5.18 'de verilmiş bu değerler grafik halinde Şekil 5.19'da nihai oturma değerleri ile birlikte sunulmuştur. Sonuçların üst üste düştüğü Şekil 5.19'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 5.18 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.50$  için KP1 ve CS2 programı ile elde edilen oturma değerleri

$d\sigma$ (kPa)	KP1		CS2	
	Sf (m)	St (m)	Sf (m)	St (m)
100	0.46540	0.23272	0.46540	0.23271
500	1.35048	0.67546	1.35050	0.67565

(a)

(b)

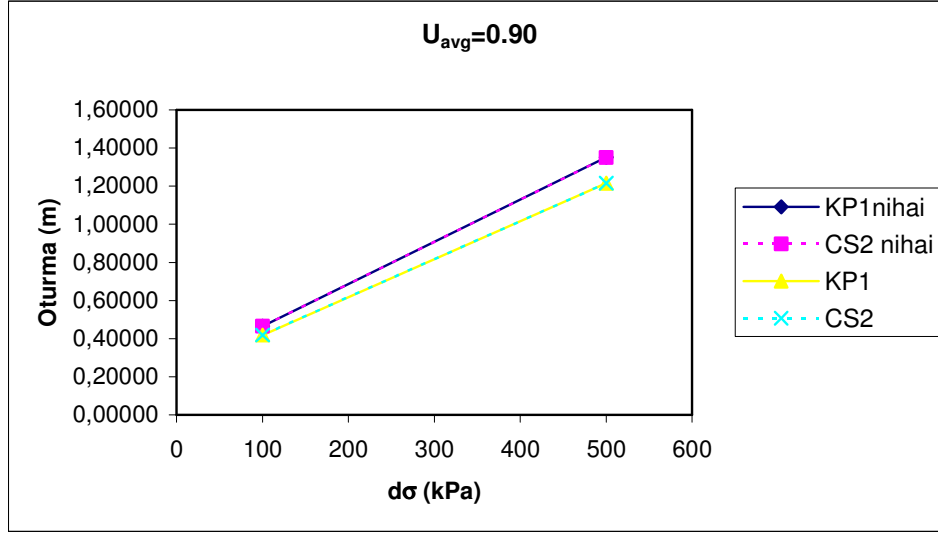


Şekil 5.19 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.50$  olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi

Örnek 4 'de  $d\sigma=100, 500$  kPa yük altında konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.90$  olması durumunda oturma değerleri KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış bulunan değerler Çizelge 5.19 'da verilmiş bu değerler grafik halinde Şekil 5.20'de nihai oturma değerleri ile birlikte sunulmuştur. Sonuçların üst üste düştüğü Şekil 5.20'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 5.19 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.50$  için KP1 ve CS2 programı ile elde edilen oturma değerleri

$d\sigma$ (kPa)	KP1		CS2	
	Sf (m)	St (m)	Sf (m)	St (m)
100	0.46540	0.41886	0.46540	0.41894
500	1.35048	1.21544	1.35050	1.21550



Şekil 5.20 Örnek 4 için farklı sürşarj yükleri altında  $U_{avg}=0.90$  olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin değişimi

Örnek 4 için  $d\sigma=100$  kPa sürşarj yükü altında KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.90$  için Çizelge 5.20'da,  $U_{avg}=0.50$  için Çizelge 5.21'de,  $U_{avg}=0.10$  için Çizelge 5.22 verilmiştir. Çizelge 5.20, 5.21 ve 5.22 ile Şekil 5.21' de verildiği gibi her iki çözüm üst üste düşmektedir.

Çizelge 5.20 Örnek 4 için  $d\sigma=100$  kPa sürşarj yükü altında  $U_{avg}=0.90$  için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

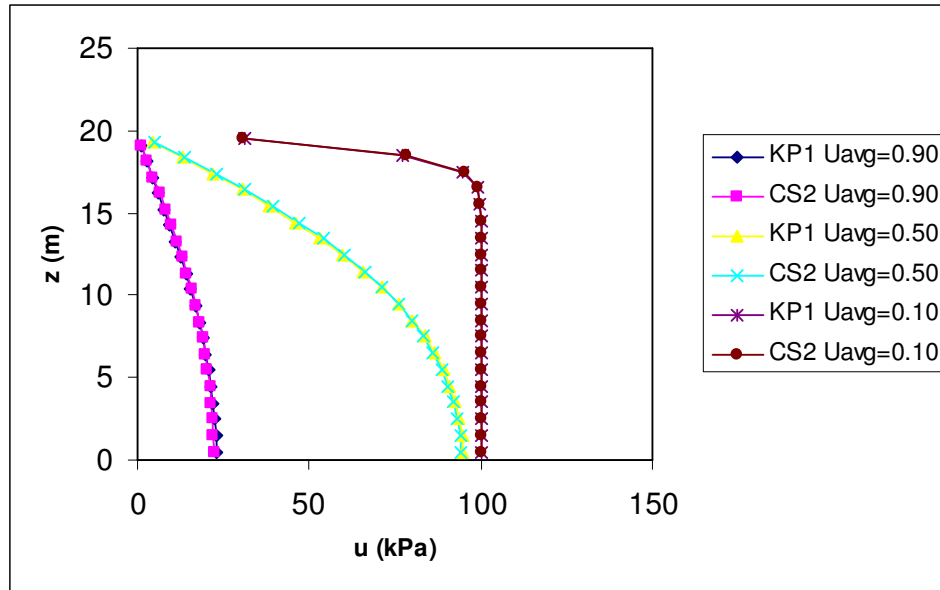
KP1		CS2	
u (kPa)	z (m)	u (kPa)	z (m)
22.88	0.49	22.29	0.49
22.74	1.48	22.16	1.48
22.45	2.47	21.93	2.47
22.03	3.46	21.57	3.46
21.48	4.44	21.10	4.44
20.79	5.43	20.51	5.43
19.97	6.41	19.82	6.41
19.03	7.40	19.03	7.40
17.97	8.38	18.08	8.38
16.80	9.36	16.99	9.36
15.53	10.34	15.76	10.34
14.16	11.33	14.42	11.33
12.71	12.30	12.97	12.30
11.18	13.28	11.42	13.28
9.57	14.26	9.79	14.26
7.91	15.23	8.09	15.23
6.21	16.21	6.34	16.21
4.46	17.17	4.55	17.17
2.69	18.14	2.73	18.14
0.90	19.10	0.91	19.10

Çizelge 5.21 Örnek 4 için  $d\sigma=100$  kPa sürşarj yükü altında  $U_{avg}=0.50$  için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

KP1		CS2	
u (kPa)	z (m)	u (kPa)	z (m)
94.92	0.50	94.92	0.50
94.55	1.50	94.55	1.50
93.81	2.50	93.81	2.50
92.67	3.50	92.67	3.50
91.11	4.49	91.11	4.49
89.11	5.49	89.11	5.49
86.63	6.49	86.63	6.49
83.62	7.49	83.62	7.49
80.06	8.48	80.06	8.48
75.92	9.48	75.92	9.48
71.18	10.47	71.18	10.47
65.82	11.46	65.82	11.46
59.85	12.45	59.85	12.45
53.29	13.44	53.29	13.44
46.16	14.43	46.16	14.43
38.53	15.41	38.53	15.41
30.46	16.38	30.46	16.38
22.02	17.36	22.02	17.36
13.32	18.32	13.32	18.32
4.46	19.29	4.46	19.29

Çizelge 5.22 Örnek 4 için  $d\sigma=100$  kPa sürşarj yükü altında  $U_{avg}=0.10$  için KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

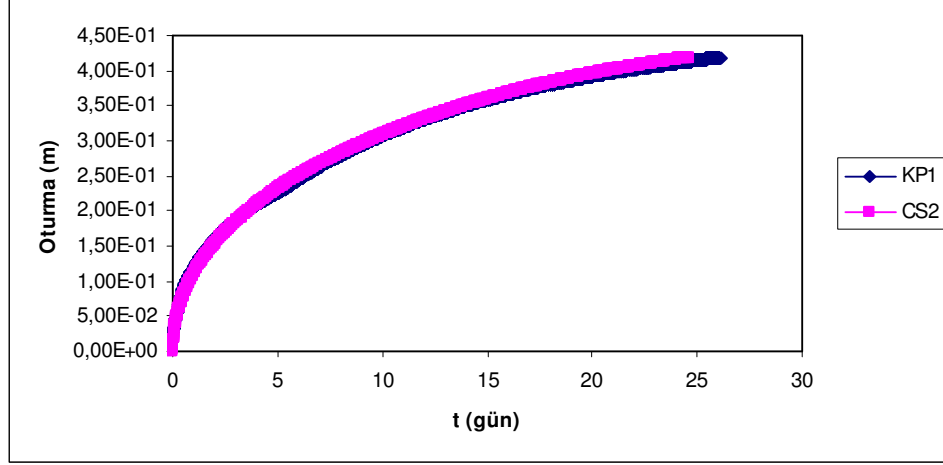
KP1		CS2	
u (kPa)	z (m)	u (kPa)	z (m)
100.00	0.50	100.00	0.50
100.00	1.50	100.00	1.50
100.00	2.50	100.00	2.50
100.00	3.50	100.00	3.50
100.00	4.50	100.00	4.50
100.00	5.50	100.00	5.50
100.00	6.50	100.00	6.50
100.00	7.50	100.00	7.50
100.00	8.50	100.00	8.50
100.00	9.50	100.00	9.50
100.00	10.50	100.00	10.50
100.00	11.50	100.00	11.50
100.00	12.50	100.00	12.50
100.00	13.50	99.99	13.50
99.99	14.50	99.97	14.50
99.90	15.50	99.88	15.50
99.15	16.50	99.14	16.50
94.78	17.50	95.04	17.50
76.96	18.49	78.08	18.49
31.42	19.47	30.43	19.47



Şekil 5.21 Örnek 4  $d\sigma=100$  kPa için  $U_{avg}=0.10, 0.50, 0.90$  olması durumunda KP1 ve CS2 programları ile elde edilen boşluk suyu basıncı değerlerinin derinlikle değişimi

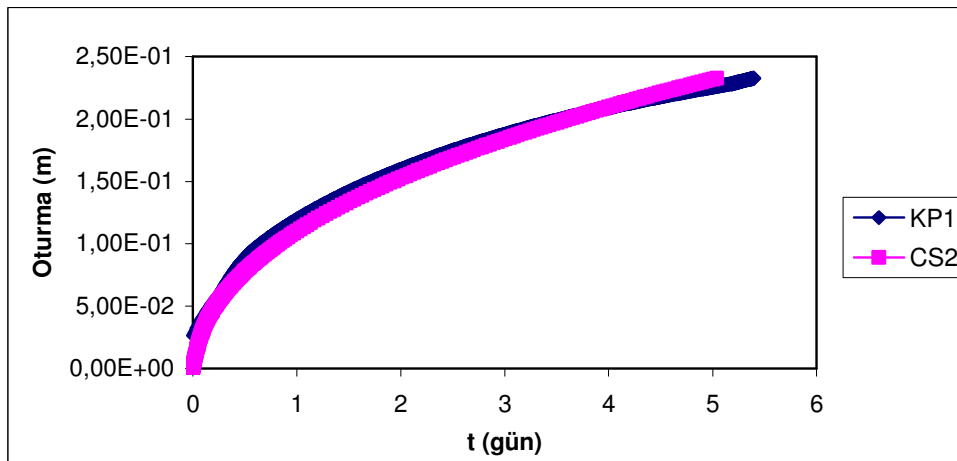
Örnek 4'de  $d\sigma=100$  kPa yük artışı olması durumunda ortalama konsolidasyon yüzdesi %90' a ulaşınca kadar oturma-zaman değişimi KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış ve Şekil

5.22 'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. KP1 ve CS2 programlarından elde edilen oturma değeri  $St=0.418$  m, konsolidasyon yüzdesi  $U_{avg}=0.90$  değerine ulaşması için geçen süre KP1 programı ile 26.104 gün, CS2 programı ile ise 24.64 gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.22 Örnek 4  $d\sigma=100$  kPa için %90 konsolidasyona ulaşmaya kadar KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi

Örnek 4'de  $d\sigma=100$  kPa yük artışı olması durumunda ortalama konsolidasyon yüzdesi %50'ye ulaşmaya kadar oturma-zaman değişimi KP1 ve CS2 programları ile hesaplanmış Şekil 5.23 'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. KP1 ve CS2 programlarından elde edilen oturma değeri  $St=0.232$  m, konsolidasyon yüzdesinin  $U_{avg}=0.50$  değerine ulaşması için geçen süre KP1 programı ile 5.39 gün, CS2 programı ile ise 5.04 gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.23 Örnek 4  $d\sigma=100$  kPa için %50 konsolidasyona ulaşmaya kadar KP1 ve CS2 programları ile elde edilen oturma değerlerinin zamanla değişimi

Örnek 4' de farklı konsolidasyon yüzdeleri için KP1 ve CS2 programından elde edilen oturma değerlerinin aynı olduğu, hesaplanan oturma sürelerinde ortalama %7 oranında bir fark bulunduğu gözlenmiştir.

## 6. SONUÇLAR

Fazla miktarda deformasyon yapan ve kendi ağırlığı altında konsolide olan zeminlerde klasik konsolidasyon analizlerinin uygulanmasının gerçekçi sonuçlar vermemesinden dolayı, bu tür zeminlerin konsolidasyon davranışını modelleyebilmek için, uygun malzeme bünye bağıntılarını kullanarak meydana gelecek deformasyonları hesaplayabilecek non-lineer analiz yöntemleri kullanılmalıdır.

Bu tez çalışmasında, homojen yumuşak zemin tabakalarının kendi ağırlığı altında ve/veya sürşarj yükleri altındaki konsolidasyon davranışını analiz edebilmek için nümerik bir model geliştirilmiştir. Bu bağlamda Visual Basic programında yazılan bilgisayar kodu (KP1) ile yapılan lineer analiz sonuçları elle yapılan çözümler ile, non-lineer analiz sonuçları ise CS2 (Fox ve Berles, 1997) model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar ile geliştirilen modelin doğruluğu ispatlanmıştır.

İleride yapılacak çalışmalarda KP1 programı tabakalı zeminler ve/veya zamanla değişen yükleme durumları altında konsolidasyon davranışının analizi için geliştirilebilir.

.

**KAYNAKLAR**

Abbasi, N., Rahimi, H., Javadi, A.A., Fakher, A. (2006), "Finite Difference Approach For Consolidation With Variable Compressibility And Permeability", Computers And Geotechnics, 34(2007) 41-52

Berilgen, M.M. (1996), "Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkileşimin İncelenmesi" Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.

Berilgen, S.A. (2003), "Yumuşak Killerin Konsolidasyon Davranışı" Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.

Das, B. M., (1997), Advanced Soil Mechanics, Taylor&Franci, New York

Fox, P.J. ve Berles J.D. (1997), "CS2: Piecewise-Linear Model For Large Strain Consolidation ", International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics,21,453-475.

Özaydın, K., (1997), Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul

Verruijt, A. (1995), Computational Geomechanics Kluwer, Academic Pub, Netherlands.

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.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	26.08.1980	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993 - 1997	Nişantaşı Kız Lisesi
M. Yüksek Okulu	1998-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi M.Y.O İnşaat Bölümü
Lisans	2000 - 2004	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004 - 2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Geoteknik Anabilim Dalı

**Çalıştığı kurumlar**

2006-Devam ediyor Beşiktaş Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü