

**T.C.**  
**DİCLE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİNDE GERİLME DAĞILIŞININ ÜÇ PARAMETRELİ  
ANİZOTROPİ TANIMLAMASI İLE ARAŞTIRILMASI**

**Hüseyin AY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DIYARBAKIR**

**Şubat 2011**

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ  
DİYARBAKIR

Hüseyin AY tarafından yapılan “ Zeminde gerilme dağılışının üç parametrelili anizotropi tanımlaması ile araştırılması ” konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof Dr. M. Sedat HAYALİOĞLU

Üye : Doç. Dr. Hanifi ÇANAKÇI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Taha TAŞKIRAN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 25/02/2011

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

25/02/2011

Prof. Dr. Hamdi TEMEL  
Enstitü Müdürü

## TEŐEKKÖR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, baŐlangıcından sonuna kadar, gerekli bÖtÖn yardım, tavsiye ve yÖnlendirmeleri yapan, karŐılaŐtıđım problemlerin özÖmÖnde deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Taha TAŞKIRAN'a katkılarından dolayı teŐekkÖr ederim.

YÖksek Lisans çalıŐmalarım sırasında yardım aldığım Dr. Salih KESKİN'e teŐekkÖr ederim.

Ayrıca, aileme Özellikle annem ve babama bana gÖsterdikleri Özveri ve desteklerinden dolayı teŐekkÖrÖ bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	I
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	II
<b>ÖZET</b> .....	V
<b>ABSTRACT</b> .....	VII
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	IX
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	X
<b>KISALTMA VE SİMGELER</b> .....	XII
<b>1.GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı .....	1
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	7
2.1. Anizotropik Elastisite.....	7
2.2. Anizotropi'nin Üç Eksenli Deneyler İle Araştırılması.....	9
2.3. Anizotropi'nin Üç Parametre ile İfade Edilmesi.....	12
2.4. Beş Parametrelili Anizotropi'nin Üç Eksenli Deneyler İle Araştırılması .....	16
2.5. Bender Elemanlar Kullanarak Anizotropi'nin Araştırılması .....	23
2.6. İçi Boş Silindirik Burulmalı Kesme Deneyi ile Anizotropi'nin Araştırılması .....	35
2.7. Anizotropi'nin Ödometre Koşullarında Araştırılması .....	36
2.8. Graham ve Houlsby Yöntemi ile Anizotropik Elastik Parametrelerin Elde Edilmesi .....	37
2.9. Anizotrop Ortamda Gerilme Yayılımı.....	47

2.10. Tekinsoy Yöntemi ile Düzlem Anizotropik Ortamda Gerilme Dağılımının Bulunması .....	49
<b>3.MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>59</b>
3.1. Hesaplamalarda Kullanılan Zeminlerin Özellikleri .....	59
3.1.1. Tarsus Yenice Kilinin Özellikleri .....	59
3.1.2. Winnipeg Kilinin Özellikleri .....	60
3.1.3. Speswhite Kaolen Kilinin Özellikleri .....	61
3.2. Kullanılan Bilgisayar Programları .....	62
3.2.1 Sonlu Eleman Çözümleri İçin Yararlanılan Bilgisayar Programı .....	62
3.2.2. Origin Pro Bilgisayar Programı .....	63
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>65</b>
4.1. Hesaplarda Kullanılan Zeminlere Ait Anizotropik Parametreler.....	65
4.1.1. Hesaplarda Kullanılan Yenice Kiline Ait Anizotropik Parametreler.....	65
4.1.2.Hesaplarda Kullanılan Winnipeg Kiline ait Anizotropik Parametreler.....	67
4.1.3 Hesaplarda Kullanılan Speswhite Kaolen Kiline ait Anizotropik Parametreler .....	69
4.2. Gerilme ve Deformasyonlar İçin Sonlu Elemanlar Analizleri .....	70
4.2.1.Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	70
4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Değerlendirme .....	73
4.3.1. Yenice Kili Analiz Sonuçları ve Değerlendirme .....	76
4.3.2. Winnipeg Kili İçin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Değerlendirme .....	82
4.4. Speswhite Kaolen Kili İçin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Değerlendirme .....	86

<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>89</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>91</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>93</b>

## ÖZET

### ZEMİNDE GERİLME DAĞILIŞININ ÜÇ PARAMETRELİ ANİZOTROPI TANIMLANMASI İLE ARAŞTIRILMASI

#### YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin AY

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2011

Aslında, düzlemsel anizotropik ortamda gerilmeler ve deplasmanlar için nümerik yada analitik çözüm sunan yeterli sayıda araştırma mevcuttur. Bu araştırmalar, genellikle anizotropik parametrelerin gerilme ve deplasmanlara etkisini değerlendirmektedirler. Bununla beraber, bu çözümlerle, zemindeki yükleme, deplasman vb. değişimleri dikkate alan gerçekçi analizler de yapılabilir. Bunun için, zemindeki değişiklikleri yansıtan gerçekçi parametre setlerine (deneysel olarak elde edilenler gibi) gerek vardır. Bu çalışmada, daha gerçekçi gerilme ve deplasman analizleri yapılmasına olanak sağlayan bu tür veri setleri elde edilme olasılığı araştırılmıştır. Graham ve Housby tarafından önerilen üç parametrelİ anizotropi tanımından yararlanarak ve geniş bir anizotropi aralığında, yeni veri setleri oluşturulmuştur. Bu bağlamda, belirli bir düşey Young modülü  $E_v$  için  $\alpha$  parametresi ( $\sqrt{E_h / E_v}$ ) kontrol edilerek yeni boyutsuz düzlemsel anizotropik parametreler ( $n$ ,  $m$ ,  $\nu_{VH}$  ve  $\nu_{HH}$ ) elde edilmişlerdir. Yenice/Tarsus kilinin düzlemsel anizotropik parametrelerini elde etmek için büyük çaba harcanmış ve yeni anizotropik veri setleri oluşturulmuştur. Elde edilen anizotropik veri setleri kullanılarak elastik

homojen yarı ortam analizleri gerçekleştirilmiş ve anizotropinin türü ve derecesiyle gerilme/deplasman değişimi araştırılmıştır. Ayrıca, üç-parametrelili anizotropiyle elde edilen gerilme/deplasmanlar, diğerleri tipik olarak sabit kalırken bir parametrenin değiştiği mutlak parametrik yolla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmışlardır.

Sonuç olarak, tüm anizotropik parametrelerin birbirleriyle ilişkili olarak değiştiği ve gerilme/deplasmanların hem  $n$ 'deki ve hem de  $m$ 'deki değişimlere hassas olduğu ve  $n$  ve  $m$  modül oranlarındaki gerçekçi aralıkta değişimin önemli olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra, mutlak parametrik yolla elde edilen gerilme ve deplasmanlardan daha küçük düşey gerilme ve deplasmanlar, anizotropinin  $n > 1$  türü için geçerli iken daha büyük olanlar  $n < 1$  tipinde anizotropi türüne işaret etmektedir.

**Anahtar Kelimeler :** Anizotropi, Gerilme Dağılışı, Üç Parametrelili Anizotropi



## ABSTRACT

### INVESTIGATING STRESS DISTRIBUTION IN THE SOIL VIA THE IDENTIFICATION OF THREE-PARAMETER ANISOTROPY

MSc THESIS

Hüseyin AY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
UNIVERSITY OF DICLE

2011

There has actually been sufficient number of precious studies, which offers numerical or analytical solution for the stress and displacements in cross-anisotropic media. These studies have mostly evaluated the effect of anisotropic parameters on stresses and displacements. However, these solutions are also capable of performing realistic analyses considering the change that the soil experienced due to loading, compaction etc. For this, realistic anisotropic parameter sets (such as experimentally obtained), reflecting the changes that the soil undergoes, are needed. Therefore, in the content of this study, the possibility of obtaining such data sets were investigated to be able to perform more realistic stress and displacement analyses. Benefiting from three-parametric description of anisotropy, proposed by Graham and Houlsby, new data sets were produced considering the change in wide range of anisotropy that the soil can have. In this context, new sets of dimensionless cross-anisotropic parameters ( $n$ ,  $m$ ,  $\nu_{VH}$  and  $\nu_{HH}$ ) were produced by controlling  $\alpha$  parameter ( $\sqrt{E_h / E_v}$ ), for a given vertical Young's modulus,  $E_v$ . Great experimental effort were spent to obtain anisotropic parameters of Yenice/Tarsus clay and new data sets of anisotropic parameters were then produced. Thus

herein, analyses were carried out for elastic homogenous halfspace and the variation of stresses/displacements with type and degree of anisotropy were investigated using those produced anisotropic data sets. Additionally, the stresses/displacements obtained by three-parametric anisotropy were compared with the results obtained by the usual parametric way in which one parameters is changed as the others have typical constant values.

Consequently, it was found that all anisotropic parameters are interrelated thus they change accordingly and stresses/displacements are sensitive to both variations in  $n$  and  $m$  and the order of change is considerable in realistic range in both  $n$  and  $m$  moduli ratios. Besides, smaller vertical stresses and displacements are evident for the  $n > 1$  type of anisotropy while it is larger for  $n < 1$  type of anisotropy than the stresses and displacements obtained by usual parametric way.

**Key Words :** Anisotropy, Stress Distribution, Three-Parameter Anisotropy

## ÇİZELGE LİSTESİ

<b><u>Çizelge No</u></b>		<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 2.1.</b>	Deneysel çalışmaya ait sonuçlar, kullanılan denklem ve Yöntemler (Kuвано ve ark. 1999) .	29
<b>Çizelge 2.2.</b>	Deneysel olarak ölçülen ve “ Graham ve Houlsby ”(1983) Yöntemi ile elde edilen parametrelerin karşılaştırılması (Lings ve ark. 2000).	31
<b>Çizelge 3.1.</b>	Zemin parametrelerine ait değişim aralıkları	59
<b>Çizelge 3.2.</b>	Zemin parametrelerine ait değişim aralıkları	60
<b>Çizelge 4.1.</b>	Yenice kiline ait parametreler	66
<b>Çizelge 4.2.</b>	Winnipeg kiline parametreler	68
<b>Çizelge 4.3.</b>	Speswhite kaolen kiline ait parametreler	69

## ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	Yerel deformasyon ölçerli büyük hacimli üç eksenli deney örneği (Hoque ve ark. 1996).	22
Şekil 2.2.	Üç eksenli zemin örneği ve bender elemanlar (Kuwano ve ark. 1999).	28
Şekil 2.3.	Piezoelektrik transduser'lerle iletilen polarize kütle dalgaları (Fioravante ve Capoferri 2001).	33
Şekil 2.4.	Sonsuz küçük "c" uzaklığına etkiyen tekil yük ve koordinat Eksenleri (Tekinsoy ve Laman 2000)	
Şekil 3.1.	Speswhite Kaolen kilina ait Young modül ve Kayma modülleri	61
Şekil 3.2.	Speswhite Kaolen kiline ait Poisson oranları	62
Şekil 4.1.	Plaxis'te oluşturulmuş sonlu eleman Modülü	70
Şekil 4.2.	Yenice kiline ait Boyutsuz düşey gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	76
Şekil 4.3.	Yenice kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	77
Şekil 4.4.	Yenice kiline ait Deplasmanların Derinliğe göre dağılımı	78
Şekil 4.5.	Yenice kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	79
Şekil 4.6.	Yenice kiline ait Boyutsuz düşey gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	80
Şekil 4.7.	Yenice kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	80

<b><u>Şekil No</u></b>		<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Şekil 4.8.</b>	Yenice kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	81
<b>Şekil 4.9.</b>	Yenice kiline ait Deplasmanların derinliğe göre dağılımı	82
<b>Şekil 4.10.</b>	Winnipeg kiline ait Boyutsuz düşey gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	82
<b>Şekil 4.11.</b>	Winnipeg kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	83
<b>Şekil 4.12.</b>	Winnipeg kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	84
<b>Şekil 4.13.</b>	Winnipeg kiline ait Deplasmanların derinliğe göre dağılımı	85
<b>Şekil 4.14.</b>	Speswhite Kaolen kiline ait Boyutsuz düşey gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	86
<b>Şekil 4.15.</b>	Speswhite Kaolen kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	87
<b>Şekil 4.16.</b>	Speswhite Kaolen kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin Derinliğe göre dağılımı	87
<b>Şekil 4.17.</b>	Speswhite Kaolen kiline ait Deplasmanların Derinliğe göre dağılımı	88

## KISALTMA VE SİMGELER

$c$	: Sıklık
$E_H$	: Düzlemsel anizotropik malzemede yatay young modülü
$E_V$	: Düzlemsel anizotropik malzemede düşey young modülü
$G_{VH}$	: Düzlemsel anizotropik malzemede kayma modülü
$G^*$	: Değiştirilmiş kayma modülü
$J$	: Düzlemsel modül
$K^*$	: Değiştirilmiş burulma modülü
$K_I$	: İlk yanal gerilme katsayısı
$\delta p'$	: Ortalama etkin gerilme artışı
$\delta q$	: Kayma gerilmesi artışı
$P_C$	: Ön konsolidasyon basıncı
$S$	: Anizotropik parametre
$v^*$	: Değiştirilmiş poisson oranı
$V_{VH}$	: Düzlemsel anizotropik malzemede poisson oranı
$V_{HH}$	: Düzlemsel anizotropik malzemede poisson oranı
$\delta_v$	: Hacimsel gerilme artışı
$\delta \epsilon$	: Kayma gerilmesi artışı
$\sigma_v$	: Kayma gerilmesi
$\alpha$	: Anizotropi faktörü

## 1.GİRİŞ

### 1.1.Giriş ve Çalışmanın Amacı

Zeminlerin çoğu; geniş bir yayılıma sahip yatay alanlar üzerinde birikmişlerdir. Birikim sırasında ve sonrası, genellikle düşey doğrultuda konsolidasyona uğrarlar. Uzun bir zaman süresince tek yönlü konsolidasyon ile dispersif bir yapı kazanmaya çalışırlar. Bunun sonucu olarak; zeminler, yatay ve düşey yönlerde, farklı mekanik özellikler kazanırlar. Bu nedenle, elastisitede yapılan izotropi tanımı sapma gösterir. Sonuç olarak zemin mekaniğinde, özellikle gerilme dağılımı problemlerinde, anizotropi kavramı ve bunun araştırılması önemli bir yer tutar. Bu konuda ileri sürülen değişik anizotropi tanımları bulunmaktadır. Bunlar içinde, aksel simetriye sahip, “ düzlem anizotropi ” kavramı (cross-anisotropy), zeminlerde daha uyumlu ve özel öneme sahiptir (Lings ve ark. 2000). Oysa düzlem anizotropik davranışın tanımlanabilmesi için, beş bağımsız elastik parametreye gerek duyulmaktadır. Bu parametrelerin ölçümü ise, en temel noktayı oluşturmaktadır. Anizotropik parametrelerin elde edilmesindeki yeni deneysel teknikler ve bu tekniklere dayanarak geliştirilen yeni kurumsal analizler hala devam etmektedir.

Bugüne kadar yapılan araştırmalar, zeminlerin gerilme ve deformasyon ilişkilerinin, aynı zamanda mukavemet davranışlarının da anizotropi içinde ele alınması gerektiği sonucunu vermiştir. Zemin anizotropisi üzerinde çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Gerrard 1977, Yong and Silvestri 1979, Kirkgard and Lade 1991). Ancak bu araştırmalar, zeminlerin elastik bir cisim ve deformasyonların küçük olduğu varsayımı altında yapılmaktadır. Bu konudaki çalışmalar, hala devam etmektedir. Fakat anizotropi'nin doğası gereği, ortaya konulan ölçme işlemleri ve bununla ilgili hesap yöntemleri, pratik olmaktan uzaktır. Bu nedenle hem anizotropi tanımına uyan, hem de gerilme dağılımını gerçeğe yakın veren bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Böyle bir yöntemin verilebilmesi, zemin mekaniği açısından, ölçme ve hesap kolaylığı sağlayacaktır.

Yüklemeler sonucu zemin kütlesi içinde oluşan gerilme artımlarının hesabı, zemin mekaniğinin en temel problemlerinden birini oluşturmaktadır. Bu yönde yapılan çalışmalar, zeminin izotropik bir malzeme olduğu varsayımına dayanmaktadır. Elde edilen ifadeler, kullanım kolaylığı ve daha az parametreye ihtiyaç duyması nedeniyle, yaygın kabul görmüştür.

Oysaki zeminlerin anizotropik bir malzeme olarak ele alınması ve gerilme dağılımlarının bulunması, daha gerçekçi olacaktır. Aynı zamanda anizotropi kavramı, zemin oturmaları içinde geçerlidir. Örneğin, zemin anizotropisi'nin dikkate alınmasıyla hesaplanan yüzey oturmaları, arazi ölçümleri ile de uyumlu sonuçlar vermiştir (Simpson ve ark. 1996).

İzotrop olarak kabul edilen ortama kıyasla, anizotropik ortamdaki gerilme yayılımı birçok etmene bağlı olarak değişmektedir. Çalışmalar bu etmenler üzerinde yoğunlaşmıştır. Etmenlerden en önemlileri yüklü alanın boyutları, yükleme şekli, zeminin anizotropi niteliği ve derecesidir. Bu etmenlerden biri veya bir kaçını dikkate alarak geliştirilmiş, analitik ve kapalı çözümler bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, bilgisayar yazılımlarına paralel, nümerik çözümler de elde edilmiştir.

Doğal zeminler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, bunların anizotrop gerilme-deformasyon ve dayanım davranışı sergilediklerini göstermektedir. Öte yandan, zeminlerin düzlemsel anizotropik malzemeler olduğunu gösteren çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Gerrard 1977, Yong and Silvestri 1979, Kirkgard and Lade 1991).

Anizotropik parametrelerin elde edilmesi ve değişiminin hangi etkenlere bağlı olduğu ile ilgili, çok sayıda çalışma mevcuttur. Anizotropik modüllerin, deformasyonlar ile non-lineer değiştiği ve en büyük değerlerine, en küçük deformasyonlarda sahip olduğu, "çok küçük birim deformasyon" ölçme tekniklerinin gelişimine paralel olarak ortaya konulmuştur (Atkinson and Salfors 1991). Logaritmik ölçeğe sahip deformasyonlar kullanılarak oluşturulan modüllere ait eğrilerin, % 0.001 deformasyonundan daha küçük bölgenin, lineer elastik bölge olduğu düşünülmektedir.

Düzlemsel anizotropik davranışın tam olarak tanımlanması için, beş bağımsız elastik sabite ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerin ölçülmesi ise, bu tip zeminler ile ilgilenirken, en temel noktayı teşkil etmektedir. Anizotropik parametrelerin elde edilmesine yönelik yeni deneysel süreç ve teknikler ve ayrıca mevcut tekniklere dayanılarak geliştirilen, yeni kuramsal analizler hala sürmektedir.

Gerçekte, birçok doğal zemin, birikim yolu, dane şekli ve gerilme geçmişi yüzünden düşey ve yatay yönlerde farklı elastik özelliklere sahip olduklarından bir dereceye kadar anizotropi gösterir. Kil, katmanlı alüvyon veya kum gibi zeminler, genellikle belirli bir zaman diliminde jeolojik bir sedimantasyon süreciyle birikirler. Birikim etkisine ilaveten, aşırı yüklenme, kuruma ve benzerleri de, zamanla anizotropik özellikler gösteren jeolojik bir ortama yol açabilirler. Dönüşümlü alüvyon ve kil katmanlarından meydana gelen tabakalı killer de, anizotropik malzeme sayılırlar ve davranışları, genellikle eşdeğer homojen bir anizotropik malzemeye temsil edilebilir.



Halen, anizotropi, birçok türde zemin davranışını gerçekçi bir şekilde açıklamada önemli bir özellik olarak bilinmektedir. Araştırmacılar, zeminleri anizotropik malzeme olarak içine alan geoteknik sorunların modellenmesiyle daha fazla ilgilenmeye başlamışlar ve sonuçların arazi ölçümleriyle uyumlu olduklarını göstermişlerdir

İzotropik elastik bir malzeme, sadece iki bağımsız elastik sabitle tanımlanırken (örneğin, Young modülü,  $E$  ve Poisson oranı) elastik düzlemsel anizotropik bir malzemenin gerilme-yük ilişkisini tam olarak açıklamak için beş parametre gereklidir: Düşey yönde Young modülü,  $E_v$ , yatay yönde Young modülü,  $E_H$ ; ( $E_H = n * E_v$ ); yatay gerinimde düşey gerinim etkisi için Poisson oranı,  $\nu_{vH}$ ; karşıt yatay gerilmelerde yatay gerilme etkisi için Poisson oranı,  $\nu_{HH}$ ; ve herhangi bir düşey yani, malzemenin simetrisine dik eksene paralel bir düzlemde kaymayla ilgili kayma modülü  $G_{vH} = G_{Hv}$ ,  $G_{vH} = m * E_v$ . Burada, izotropik malzemelerin,  $n=1$  i.e.,  $E_H = E_v = E$ ,  $\nu_{vH} = \nu_{HH} = \nu$  ve  $1/m = 2(1 + \nu)$  ile tanımlanan düzlemsel anizotropik malzemelerin sadece belirli bir alt-seti olduğu kolayca görülebilir (Gazetas 1983). “m” ve “n” parametreleri, elastik modül oranını gösterdiğinden, bunlara “modül oranı” veya bazen de boyutsuz parametreler denir.

Zeminler doğal olarak, “tür ve derecesi” bakımından farklı anizotropik özelliklere sahiptirler ve bu açıdan değerlendirilmeleri gerekir. Bir zeminin anizotropi derecesinin bir ölçüsü olarak yatay ve düşey yönlerdeki elastik Young modülü oranı kullanılabilir  $n = E_h / E_v$ . Normal ve hafif aşırı konsolide killer için tipik “n” değerleri, 0.9 ila 1.35 arasında değişebilir (Gazetas 1982, Kirkpatrick and Rennie 1972, Kirkgard and Lade 1991). Aşırı konsolide killer, 1.35 ila 2.4 arasında rapor edilen tipik “n” değerleriyle, güçlü bir anizotropik davranış geliştirebilirler (Ward ve ark. 1959, Atkinson 1975, Gerard 1977). Ancak, rötre sınırına yakın ya da altında nem içeriklerine kadar kuruma üzerine Franklin, ve Matson, ‘n’ değerinin 4’e kadar bile yükselebileceğini bulmuşlardır. Bu da, ön konsolidasyonun anizotropiyi kuvvetle etkilediğini onaylamaktadır (Gazetas 1982).

Zeminleri anizotropik malzeme sayarak gerilme ve deplasman analizleri yapmanın, bazı sebepleri ve avantajları vardır. Bunlardan birkaçı şöyledir:

1) Geoteknik uygulamalar sırasında, zemin endeks özellikleri ve dolayısıyla zeminin tüm özellikleri, yükleme adımlarıyla değişir. (indüklenmiş anizotropi). Bu nedenle, yüklemenin etkisiyle zemin kitesindeki gerilme/deplasmanlar ve dolayısıyla anizotropik parametreler değişirler. Gerilme/deplasmanlardaki değişiklikler bazı durumlarda önemli olabilir. Örneğin, kompaksiyon sürecinde  $E_h$  ve sonra “n” oranı genellikle, diğer tüm anizotropik

parametrelerdeki değişimlerle birlikte önemli ölçüde artar. Bunun sonucunda, gerilme/deplasmanlar, başlangıç değerlerinden saparlar.

2) Bazı zeminlerde, izotropik ve anizotropik çözümlerle elde edilen gerilme/deplasmanlar arasındaki fark büyük olabilir (örneğin ağır aşırı konsolide killer, gevşek kumlar). Böyle durumlarda, tasarım ve ekonomi açısından bu iki çözüm arasındaki farkın boyutunu bilmek önemli olabilir.

3) Geoteknik sorunların daha gerçekçi anlamda modellenmesi. Örneğin, palplanş duvarlar, tüneller üzerinde gerilme/deplasman hesaplamaları, anizotropik zeminlerde temel taşıma kapasitesinin hesaplanması vb.

Zeminleri düzlemsel anizotropik farz ederek çeşitli yükler ve çeşitli “anizotropik tür ve derecesi” için gerçekleştirilen gerilme/deplasmanlar hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Bunlardan birkaçı şöyledir:

Barden, düzlemsel anizotropik zeminlerin uygulanan yüklere tepkilerinin değerlendirildiği ilk araştırmalardan birini gerçekleştirerek ‘n’ modül oranının, gerilme/deplasmanda etkili tek önemli parametre olduğuna karar vermiştir. Ayrıca, kendisi, ortamın yük dağılım kapasitesinin iyileşmesi sonucu, ‘n’ değerlerindeki artışla, eksenel simetrik problem için, simetri eksenini boyunca düşey gerilme konsantrasyonunun azaldığını bulmuştur.

Gazetas (1982), zemin düzlemsel anizotropisinin, yüzey deplasmanı ve hem drenajlı hem de drenajsız koşullarda eksenel simetrik parabolik yüzey yüklemesine maruz kalan zeminin (yarı ortam), gerilme dağılımlarına etkisi hakkında analitik bir araştırma sunmuştur. Belirli bir Young modülü ( $E_v$ ) için,  $E_H$ ,  $G_{vH}$  ve  $\nu_{vH}$  ‘nin, tüm gerilme ve deplasman bileşenlerine büyük etkileri olduğunu bulmuş ve ayrıca,  $\nu_{HH}$  ‘nin etkisinin çok az ve ikincil öneme sahip olduğunu göstererek daha önceki araştırmacılarla hemfikir olmuştur. Ayrıca, daha kapsamlı bir parametrik çalışmada yaparak, Barden’in ulaştığı sonuçtan farklı olarak, ‘m’ ve  $\nu_{vH}$  ‘nin, gerilme ve deplasman üzerinde en az ‘n’ kadar etkili olduklarını göstermiştir. Bu araştırmacı, ayrıca, uygun düzlemsel anizotropik parametre setleri kullanarak ağır aşırı konsolide Londra kilindeki ani ve uzun vadeli deformasyonlar ve gerilmeler hakkında bir vaka çalışması da yapmış ve ani ve uzun vadeli (birincil konsolidasyonun sonunda) deformasyonlar arasında önemli farklar bulunduğu sonucuna ulaşmış ve uzun vadede düşey gerilmelerin ( $\sigma_z$ ) başlangıç değerlerinin yaklaşık 2/3’üne kadar gerilediğini göstermiştir.

Wang C.D. ve çalışma arkadaşları (2004), üçgen dağılıma sahip üç boyutlu gömülü non-lineer yüklemeye maruz kalan düzlemsel anizotropik yarı ortamdaki deplasman/gerilmeler

için bir çözüm sunmuşlar ve ‘anizotropinin tür ve derecesinin’ gerilme/deplasmana etkisini göstermişlerdir. Bu araştırmacılar  $E_h/E_v$ ,  $\nu_{hh}/\nu_{vh}$  ve  $G_{hh}/G_{vh}$  temsilci anizotropik parametreler seçerek anizotropinin gerilme/deplasmana etkisini değerlendirmişlerdir. Her bir parametrenin gerilme/deplasmana katkısını görmek için, parametrik bir çalışma gerçekleştirmişler ve sonuç olarak,  $E_h/E_v$ ,  $G_{hh}/G_{vh}$  oranlarındaki artışın, deplasman ve gerilme üzerinde büyük etkileri bulunduğunu fakat  $\nu_{hh}/\nu_{vh}$ ’nin etkisinin pek az olduğunu bulmuşlardır.

Y.M. Hou ve ark. (2007), Şanghay’ın yumuşak alüvyonlarında gerçekleştirilen derin metro kazısı için 3 boyutlu bir sonlu eleman modellemesi yapmışlardır. Bu çalışmada, sırasıyla zeminin anizotropik ve izotropik zemin rijitliğe sahip olduğu farz edilerek iki nümerik analiz yapılmıştır. Sayısal yolla tahmin edilen diyafram duvar deplasman ve yer değiştirmeleri, arazi ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve zemin rijitlik anizotropisinin, Şanghay’ın yumuşak birikimlerinde derin kazının çevresindeki diyafram duvar deplasmanlarının tahmininin doğruluğuna önemli bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, zeminin anizotropik modellenmesi ile elde edilen yer değiştirmelerin, arazi ölçümleriyle iyi uyduğu da bulunmuştur.

Bazı araştırmacılar, gerilme ve deplasmanlara anizotropinin etkisini değerlendirmek için, anizotropinin tür ve derecesinin göstergesi olarak  $n$ ,  $m$ ,  $\nu_{VH}$  ve  $\nu_{HH}$  gibi boyutsuz parametrelerden yararlanmışlardır (Barden 1963, Gazates 1982, Koning 1960). Araştırmacılar, her bir parametrenin etkisini görmek için boyutsuz parametreler kullanarak “parametrik araştırmalar” yapmışlardır (bir parametreyi kontrol ederken diğerlerine sabit tipik değerler vermişlerdir). Ancak, parametrik araştırmalar, her bir parametrenin gerilme/deplasmana etkisini ve genel eğilimi (artış yada azalış) göstermekle beraber, gerilme/deplasmanın büyüklüğü ve anizotropiyle değişimi hakkında yeterince doğru bilgi veremezler.

Parametrik yolda izlenen yöntemin aksine, tüm anizotropik parametreler birbirleriyle ilişkilidirler ve birini değiştirmek diğerlerinin de değişmesine sebep olur. Bu nedenle, bunu göz önüne alarak, daha gerçekçi analizler yapabilmek için çok sayıda deneysel parametre setleri kullanılmalıdır (bu tür anizotropik parametre setlerine yönelik özel test programları gereklidir). Buradaki set deyimi, beş anizotropik parametre içeren bir malzemenin anizotropi halini açıklamak için kullanılmaktadır (Çizelge 4.1’de , her sırada bir set anizotropik parametre bulunmaktadır). Ancak, görünüşe göre, yayınlanmış geoteknik literatürde bu tür setler bulunmamaktadır ve bunların deneysel yollarla elde edilmeleri, oldukça zahmetli bir iştir.

Bu nedenle, bu çalışmada, daha gerçekçi gerilme ve deplasman analizleri yapılmasına olanak sağlayan bu tür veri setleri elde edilme olasılığı araştırılmıştır. Bunu yapmak için, Graham ve Houlsby tarafından önerilen zeminin anizotropisinin beş yerine üç parametreyle tanımlandığı “üç parametrelî düzlemsel anizotropi” tanımından yararlanılmıştır. Bu tekniğin avantajı, sadece bir parametreyi yani  $\alpha$  parametresiyle ( $\sqrt{E_h/E_v}$ ) tüm anizotropik elastik parametrelerin kontrol edilebilmesine olanak sağlamasıdır. Bu nedenle, bu bağlamda, yeni anizotropik setleri oluşturulmuş ve gerilme/deplasmanın anizotropiyle değişimini görmek için sonlu eleman analizleri (FEM) gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin ayrıntıları, ileriki bölümlerde açıklanacaktır.

## 2.KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Anizotropik Elastisite

Zeminlerin, çok geniş bir yayılıma sahip alanlar üzerinde birikmeleri ve sonrasında tek eksenli deformasyon yapmaları nedeniyle, yatay ve düşey yönlerde, farklı malzeme özellikleri kazanırlar. Buna bağlı olarak izotrop malzeme kabulü geçerliliğini kaybetmeye başlar. Tek bir simetri eksenine sahip, farklı anizotropi türleri, zemin mekaniği kaynaklarında “düzlem anizotropi” (cross-anisotropy) olarak adlandırılmıştır (Lings ve ark. 2000). Düzlemsel anizotropiye sahip, lineer elastik bir malzeme için, efektif gerilme ve deformasyon artımları arasındaki ilişki, Love (1927), tarafından matris formunda, aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{xx} \\ \delta\varepsilon_{yy} \\ \delta\varepsilon_{zz} \\ \delta\varepsilon_{yz} \\ \delta\varepsilon_{zx} \\ \delta\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_h & \nu_{hh}/E_h & \nu_{vh}/E_v \\ -\nu_{hh}/E_h & 1/E_h & -\nu_{vh}/E_v \\ -\nu_{vh}/E_h & -\nu_{hv}/E_h & 1/E_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma'_{xx} \\ \delta\sigma'_{yy} \\ \delta\sigma'_{zz} \\ \delta\tau_{yz} \\ \delta\tau_{zx} \\ \delta\tau_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/G_{hv} \\ 1/G_{hv} \\ 1/G_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\tau_{yz} \\ \delta\tau_{zx} \\ \delta\tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) de yer alan parametreler için; z düşey, x ve y yatay doğrultuları göstermek üzere,

$E_v$  : Düşey elastik modül (z doğrultusu)

$E_h$  : Yatay elastik modül (x ve y doğrultularındaki)

$\nu_{vh}$  : Düşey doğrultudaki gerilme nedeniyle yatay doğrultudaki Poisson oranı

$v_{hv}$  : x-y düzlemindeki gerilme nedeniyle düşey doğrultudaki Poisson oranı

$v_{hh}$  : x ve y düzlemindeki gerilme nedeniyle, x-y düzlemindeki Poisson oranı

$G_{hv}$  : z-x ve z-y düzlemindeki kayma modülü

$G_{hh}$  : x-y düzlemindeki kayma modülü

Elastik sabitler arasında, simetriden dolayı, aşağıdaki ilişkiler de geçerlidir. Bu ilişkilerden dolayı, bağımsız elastik parametre sayısı beşe indirgenmektedir.

$$\frac{v_{vh}}{E_v} = \frac{v_{hv}}{E_h} \quad (2.2)$$

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1 + v_{hh})} \quad (2.3)$$

Düzlem-simetrik malzemelerde, her ne kadar beş bağımsız elastik parametre varsa da, deformasyon enerjisinin pozitif olmasını gerektiren termodinamik koşullardan dolayı, bu sabitlerin alabilecekleri değerler sınırlıdır. Pickering (1970), tarafından yapılan çalışmada,  $E_v$ ,  $E_h$  ve  $G_{vh}$  in pozitif ve  $-1 < v_{hh} < 1$  koşullarının sağlanması gerektiği gösterilmiştir. Aynı araştırmacı, Raymond (1970) tarafından verilen eşitsizliklerin de gerçekleşmesi gerektiğini ifade etmiştir. Her iki araştırmacı tarafından verilen koşul, denklem (2.4) de özetlenmiştir.

$$\frac{E_v}{E_H} (1 - v_{hh}) - 2v_{vh}^2 \geq 0 \quad (2.4)$$

Raymond (1970),  $G_{hv}$  değerinin, aşağıda verilen denklem tarafından, sınırlandırılması gerektiğini göstermiştir.

$$G_{hv} \leq \frac{E_v}{2v_{vh}(1+v_{hh}) + 2\sqrt{(E_v/E_h)(1-v_{hh}^2)}[1 - (E_h/E_v)v_{vh}^2]} \quad (2.5)$$

## 2.2. Anizotropi'nin Üç Eksenli Deneyler İle Araştırılması

Üç eksenli basınç deneylerinde, gerilme hali değişkenleri için, ortalama efektif gerilme,  $p'$  ve deviatorik gerilme,  $q$ , kullanılmaktadır. Bunların, düşey ve yatay efektif gerilmeler ile ilişkileri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} p' \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 2/3 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_v \\ \sigma_h \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Bu gerilme hali değişkenlerine karşılık gelen, deformasyon hali değişkenleri ise, sırası ile hacimsel deformasyonlar ( $\varepsilon_p$ ) ve kayma deformasyonları ( $\varepsilon_q$ ) dir. Bunlar da yatay ve düşey deformasyonlar ile, aşağıda verildiği gibi ilişkilidirler.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ \varepsilon_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2/3 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_v \\ \varepsilon_h \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Anizotropi'nin laboratuvar koşullarında araştırılması için, zemin örneği üzerinde geniş aralıklarda gerilme durumu oluşturabilen ve zeminin bu gerilmelere tepkisini ölçebilen, oldukça gelişmiş cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Laboratuvarlarda kullanılan klasik üç eksenli deney düzenekleri, bu ihtiyacı görememektedirler. Bilindiği üzere, üç-eksenli deney düzenekleri, bu bağlamda, bazı kısıtlamalara ve sınırlamalara sahiptirler. Bunlar, Kuwano ve ark. (1999), tarafından aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Maksimum asal gerilmenin ( $\sigma_1$ ) düşey veya yatay olması
- 2) Ara asal gerilme ( $\sigma_2$ )'nin yönünün, her zaman yatay alınması

Öte yandan üç eksenli basınç deneyi koşullarında, anizotropik parametrelerin ölçümlerini etkileyen, 2 etmen mevcuttur

1) Düşey düzlemde oluşan kayma rijitliği ( $G_{vh}$ )'nin ölçülmemesi

2) Yatay rijitlik özellikleri, ( $E_h, \nu_{hh}$ ) tek eksenli ve yatay yüklemenin oluşturulması nedeniyle, doğrudan elde edilmemesi.

Öte yandan, Graham ve Houlsby (1983), tarafından, üç eksenli basınç deneyleri ile, gerilme ve deformasyonlar arasındaki ilişkiler kullanılarak, anizotropiyi ifade eden modüllerin, aşağıda verilen matris formunda yazılabileceği belirtilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^* & J \\ J & G^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \varepsilon_p \\ \delta \varepsilon_q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Burada,  $K^*$  ve  $G^*$  parametreleri, sırasıyla değiştirilmiş hacim elastisite modülü ve değiştirilmiş kayma modüllerini temsil etmektedir.  $J$  ise çaprazlama modülü olarak tanımlanmış olup, kayma deformasyonlarının, ortalama efektif gerilme ile ve hacimsel deformasyonların, deviatorik gerilme ile karşılıklı bağımlılığını ifade etmektedir. Burada izotrop malzeme için  $J=0$  dır.  $G^*$  modülü, hacimsel deformasyonların olmadığı ( $\delta p'=0$ ) koşullarda yapılacak olan, drenajsız üç eksenli deneylerden bulunabilir.

Farklı gerilme izlerine sahip üç eksenli basınç deneyleri ile hacim elastisite modülü  $K$ , kayma modülü  $G$  ve çaprazlama modülü  $J$  nin tespit edilmesi mümkündür. Atkinson ve ark. (1990), zemin örnekleri üzerine uygulanan küçük gerilme artımlarına karşılık gelen deformasyon artımlarının ölçülmesi ile modüllerin, aşağıdaki, matris formunda verilen ilişki kullanılarak, elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ \varepsilon_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K'} & \frac{1}{J_{qp}} \\ \frac{1}{J_{pq}} & \frac{1}{3G'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9) de yer alan modüller  $p'$  yada  $q$  'nun sabit tutulması ile drenajlı koşullarda gerçekleştirilecek olan, üç eksenli deneylerden elde edilebilirler. Ayrıca; elastik malzemedeki



uygunluk matrisinin simetrik olması koşulu gereğince,  $J'_{pq} = J'_{qp} = J$  olmalıdır. İzotrop malzemelerde hacimsel deformasyonlar ile kayma deformasyonları birbirinden tamamen bağımsızdır. Bu nedenle  $J=0$  dır.

Üç eksenli basınç deneyleri ile beş bağımsız elastik sabitin, doğrudan bulunması imkânsızdır. Düzlem anizotrop malzeme kabul edilecek bir zemin örneği üzerinde, üç eksenli basınç deneyinin gerçekleştirilmesi halinde, örnek üzerinde herhangi bir kayma gerilmesi ( $\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ ) uygulanamayacağı için, herhangi bir kayma deformasyonu da ( $\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$ ) ölçülemez. Bu nedenle; Denklem (2.1)' de verilen uygunluk matrisi ve bu bölüme ait parametreler, işin içine katılamayacaklarından elde edilemezler. Bu durumda, uygunluk matrisinin sadece sol üst 3x3 elemanının elde edilmesine yönelik araştırmalar yapılabilir. Üç eksenli deney koşullarında  $\delta\varepsilon_{xx} = \delta\varepsilon_{yy} = \delta\varepsilon_{hh}$  ve  $\delta\sigma'_{xx} = \delta\sigma'_{yy} = \delta\sigma'_h$  olması nedeni ile, denklem (2.1) aşağıdaki gibi basitleştirilebilir (Lings ve ark. 2000). Burada, x, y ve h sembolleri, yatay yönü ifade etmektedirler.

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_v \\ \delta\varepsilon_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_v} & \frac{-2\nu_{hv}}{E_h} \\ -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & \frac{1-\nu_{hh}}{E_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma'_v \\ \delta\sigma'_h \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$\varepsilon_v$  = Düşey deformasyon

$\varepsilon_h$  = Yatay deformasyon

$\sigma'_v$  = Efektif düşey gerilme

$\sigma'_h$  =Efektif yatay gerilme

Özel birtakım üç eksenli deneyler gerçekleştirilerek, beş elastik bağımsız sabitten bazıları, aşağıda izlenecek yolla elde edilebilir. Drenajlı koşullarda yapılacak olan, sabit çevre basınçlı ( $\delta\sigma'_h = 0$ ) ve eksenel yüklemeli üç eksenli basınç deneyi ile,  $E_v$  ve  $\nu_{vh}$  elastik parametreler aşağıda verilen denklemler kullanılarak elde edilebilirler.

$$\delta\varepsilon_v = \frac{1}{E_v} \delta\sigma'_v \quad (2.11)$$

$$\delta\varepsilon_h = \frac{-\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_v \quad (2.12)$$

Öte yandan; sabit eksenel yüklü ( $\delta\sigma'_v = 0$ ) üç eksenli basınç deneyleri ile, eksenel ve radyal yönlerdeki deformasyonlar ölçülebilir. Bu ölçümlerden yararlanarak, aşağıda verilen ilişkiler kullanılabilir.

$$\delta\varepsilon_v = \frac{-2\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma'_h \quad (2.13)$$

$$\delta\varepsilon_h = \frac{1-\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_h \quad (2.14)$$

Ancak ilave bir bilgi olmadan (2.13) ve (2.14) eşitlikleri çözülemez. Bu durumda,  $\nu_{hv}$ ,  $\nu_{hh}$  ve  $E_h$  sabitlerinin elde edilmesi mümkün değildir.

### 2.3 Anizotropi'nin Üç Parametre ile İfade Edilmesi

Graham ve Houlsby (1983), bilinmeyen sayısını indirgeyen,  $E^*$ ,  $\nu^*$  ve  $\alpha$  dan oluşan, üç parametrelili bir tanımlama önermişlerdir. Burada  $E^*$  değiştirilmiş elastisite modülü,  $\nu^*$  değiştirilmiş Poisson oranı ve  $\alpha$  ise anizotropik faktör olarak ifade edilmiştir. Beş elastik parametre ile, Graham ve Houlsby (1983) tarafından verilen üçlü parametreler arasındaki ilişki, aşağıda verilmiştir.

$$E_v = E^* \quad (2.15)$$

$$E_h = \alpha^2 E^* \quad \text{ve} \quad \alpha = \sqrt{\frac{E_h}{E_v}} \quad (2.16)$$

$$v_{vh} = v^* / \alpha \quad (2.17)$$

$$v_{hh} = v^* \quad (2.18)$$

$$G_{hv} = \alpha E^* / 2(1 + v^*) \quad (2.19)$$

$$G_{hh} = \alpha^2 E^* / 2(1 + v^*) \quad (2.20)$$

Bu yöntemle ilgili bir diğer dikkat çekici nokta; elastisite modülleri, Poisson oranları ve kayma modülü oranlarının sadece  $\alpha$  parametresine bağlı olarak ifade edilebilmesidir. Söz konusu yöntem, bu tez kapsamında kullanıldığı için, yöntemin esasları, daha sonra ayrıntılı olarak verilecektir.

Graham ve Houlsby (1983) tarafından,  $G^*$ ,  $K^*$  ve  $J$  parametreleri ile, anizotropik davranışı ifade eden diğer tanımlamalar da mevcuttur. Lings ve ark. (2000) tarafından, denklem (2.7) ve denklem (2.10)' un kullanılması ile denklem (2.8) de verilen  $G^*$ ,  $K^*$  ve  $J$  parametreleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$G^* = \frac{E_v}{6} \left[ \frac{2(1 - v_{hh})E_v + (1 - 4v_{vh})E_h}{(1 - v_{hh})E_v - 2v_{vh}^2 E_h} \right] \quad (2.21)$$

$$K^* = \frac{E_v}{9} \left[ \frac{(1 - v_{hh})E_v + 2(1 + 2v_{vh})E_h}{(1 - v_{hh})E_v - 2v_{vh}^2 E_h} \right] \quad (2.22)$$

$$J = \frac{E_v}{3} \left[ \frac{(1 - \nu_{hh})E_v - (1 - \nu_{vh})E_h}{(1 - \nu_{hh})E_v - 2\nu_{vh}^2 E_h} \right] \quad (2.23)$$

$G^*$ ,  $K^*$  ve  $J$  modüllerini veren kapalı çözüm Wood (1990), tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu denklemlerin, (2.21)-(2.23) denklemleri ile birlikte değerlendirilmesi ile yukarıda verilen  $E^*$ ,  $\nu^*$ ,  $\alpha$  üçlü parametreleri aşağıda verildiği gibi yazılabilirler (Lings ve ark. 2000).

$$E^* = E_v \quad (2.24)$$

$$\nu^* = \frac{\nu_{vh} E_h \left[ \nu_{vh} + \sqrt{\nu_{vh}^2 + 4 \left( \frac{E_v}{E_h} \right) (1 - \nu_{hh})} \right]}{2E_v (1 - \nu_{hh})} \quad (2.25)$$

$$\alpha = \frac{E_h \left[ \nu_{vh} + \sqrt{\nu_{vh}^2 + 4 \left( \frac{E_v}{E_h} \right) (1 - \nu_{hh})} \right]}{2E_v (1 - \nu_{hh})} \quad (2.26)$$

Anizotropik davranışı tanımlayan başka bir üç parametrelili formülasyon ise, denklem (2.7) ve denklem (2.10)' un kullanılması ile, denklem (2.9) da verilen  $G'$ ,  $K'$  ve  $J'$  parametrelerini içeren ifadelerdir. Bu ifadeler Lings ve ark (2000) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$G' = \frac{3}{4 \left[ (1 + 2\nu_{vh})/E_v + (1 - \nu_{hh})/2E_h \right]} \quad (2.27)$$

$$K' = \frac{1}{\left[ (1 - 4\nu_{hh})/E_v + 2(1 - \nu_{hh})/E_h \right]} \quad (2.28)$$

$$J' = \frac{3}{2[(1 - \nu_{vh})/E_v - (1 - \nu_{hh})/E_h]} \quad (2.29)$$

Yine üç eksenli deney koşullarında, gerilme ve deformasyon değişkenleri kullanılarak, düzlem anizotrop malzeme için, anizotropiyi tanımlayan bir diğer üç parametrelili formülasyon söz konusudur. Lings ve ark (2000) tarafından, üç eksenli deneyler kullanılarak, sabit düşey gerilme ( $\delta\sigma'_v = 0$ ) ve sabit yatay gerilmeli ( $\delta\sigma'_h = 0$ ) üç eksenli basınç deneyleri yapılarak, deformasyon ve gerilmeler arasında ilişkiler kurulmuştur.

$$E_v = \left( \frac{\delta\sigma'_v}{\delta\varepsilon_v} \right)_{\delta\sigma'_h=0} \quad (2.30)$$

$$\nu_{vh} = - \left( \frac{\delta\varepsilon_h}{\delta\varepsilon_v} \right)_{\delta\sigma'_h=0} \quad (2.31)$$

$$\frac{E_h}{(1 - \nu_{hh})} = \left( \frac{\delta\sigma'_h}{\delta\varepsilon_h} \right)_{\delta\sigma'_v=0} \quad (2.32)$$

$$\frac{2\nu_{hv}}{(1 - \nu_{hh})} = - \left( \frac{\delta\varepsilon_v}{\delta\varepsilon_h} \right)_{\delta\sigma'_v=0} \quad (2.33)$$

Denklem (2.32)'nin sol tarafının  $F_h$  olarak aşağıda verildiği gibi tanımlanması durumunda,  $E_v$ ,  $\nu_{vh}$  ve  $F_h$ ' a bağımlı, yeni bir üç parametrelili tanımlama yapılmıştır.

$$F_H = \frac{E_h}{1 - \nu_{hh}} \quad (2.34)$$

$G'$ ,  $K'$ ,  $J'$  rijitlik modülleri ile üç eksenli deneylerden elde edilen ve yukarıda tanımlanan üç parametre arasındaki ilişki, aynı araştırmacılar tarafından, aşağıda verildiği gibi kurulmuştur.

$$G' = \frac{3E_v F_h}{4F_h + 8v_{vh} + 2E_v} \quad (2.35)$$

$$K' = \frac{E_v F_h}{F_h - 4v_{vh} F_h + 2E_v} \quad (2.36)$$

$$J' = \frac{3E_v F_h}{2F_h - 2v_{vh} F_h - 2E_v} \quad (2.37)$$

### 2.4 Beş Parametrelili Anizotropi'nin Üç Eksenli Deneyler İle Araştırılması

Düzlem anizotrop malzemeleri tanımlayan beş bağımsız elastik parametrenin, klasik türden yüklemeler yapan, üç eksenli deney düzenekleri ile doğrudan ölçülmesi mümkün değildir. Bunların ölçülebilmesi için, altı gerilme bileşenin bağımsız olarak uygulanabildiği ve kontrol edildiği, gerilmelere karşılık gelen, altı deformasyon bileşenin de bağımsız olarak ölçülebildiği, gelişmiş deney düzeneklerine ihtiyaç vardır. Ancak farklı deneysel süreç ve yöntemler kullanılarak, söz konusu parametrelerden bazıları elde edilebilir. Aşağıda bu konuda yapılmış çalışmalardan bazıları verilmiştir.

Malzeme eksenini ile farklı açılar yapacak şekilde (örneğin düşey, yatay, eğik v.s), alınan örselenmemiş örnekler üzerinde gerçekleştirilen, drenajlı ve drenajsız üç-eksenli deneyler ile, anizotrop rijitlik parametrelerinin bir kısmının elde edilmesi mümkündür.

Kirkgard ve Lade (1991), San Fransisco Körfezi çamurundan aldıkları, örselenmemiş örnekler üzerinde gerçekleştirdikleri CU deneyleri ile, bu zeminin anizotropik davranışını

araştırmışlardır. Söz konusu zeminden alınan ve kübik olarak hazırlanan, düşey ve yatay (malzeme eksenini referans alınarak) örnekler üzerinde, üç-eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, gerilme-deformasyon, konsolidasyon, dayanım karakteristikleri ve birbirine dik her iki yanal doğrultulardaki deformasyon özellikleri elde edilmiştir. Deneysel veriler, zeminin ortotropik bir malzeme olduğunu, ancak her iki yatay yöndeki özelliklerinin birbirine çok yakın olması nedeni ile, pratik amaçlar için düzlem-anizotrop olarak kabul edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca düzlem anizotrop beş bağımsız elastik parametrenin dördü ölçülmüş ve bunlar efektif gerilme izinin başlangıç eğimleri ile, düşey ve yatay örnekler için ayrı ayrı ilişkilendirilmiştir. Yöntemin ne şekilde gerçekleştirildiği, aynı çalışmadan alınarak, aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Üç eksenli basınç koşullarında yapılacak olan drenajlı deney sonuçları ile  $p' - q$  eksen takımlarında gerilme izleri oluşturulacak olursa, elde edilen bu gerilme izlerinin eğimi ve yönü, zeminin anizotropisi hakkında fikir vermektedir. İzotrop malzemede,  $p' - q$  düzleminde elde edilen gerilme izinin başlangıç kısmı,  $p'$  eksenine dik elde edilmektedir. Öte yandan, herhangi bir zemin için çizilecek olan gerilme izinin dik olma durumundan sapması, zeminin anizotropisi'nin bir göstergesidir. Efektif gerilme izinin eğimi, aşağıda verildiği şekilde, hesap ile elde edilebilir.

Eğer  $n = \frac{E_h}{E_v}$  olarak tanımlanacak olursa  $v_{vh} = \frac{v_{hv}}{n}$  bulunur. Bu durumda üç eksenli basınç koşullarında, deformasyon-gerilme ilişkisi, aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_h} \begin{bmatrix} n & -v_{hv} & -v_{hv} \\ -v_{hv} & 1 & -v_{hh} \\ -v_{hv} & -v_{hh} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \sigma'_x \\ \Delta \sigma'_y \\ \Delta \sigma'_z \end{Bmatrix} \quad (2.38)$$

Doymun koşullarda gerçekleştirilen, drenajsız bir üç eksenli deney için, hacimsel deformasyon değişimi:

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_x + \Delta \varepsilon_y + \Delta \varepsilon_z = 0 \quad (2.39)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.38) de verilen deformasyonların, denklem (2.39) da yerine konulması ile efektif gerilme oranları aşağıdaki gibi elde edilebilir.

Üç eksenli deneye tabi tutulmuş düşey zemin örneği için,  $\Delta\sigma'_x > \Delta\sigma'_y = \Delta\sigma'_z$  yazılabilir ve bu durumda asal efektif gerilme oranları arasındaki ilişki aşağıda verilen (2.40) numaralı denklem ile ifade edilebilir.

$$\frac{\Delta\sigma'_1}{\Delta\sigma'_3} = \frac{\Delta\sigma'_x}{\Delta\sigma'_{zx}} = \frac{2(v_{hh} + v_{hv} - 1)}{n - 2v_{hv}} \quad (2.40)$$

Öte yandan,  $\Delta q = (\Delta\sigma'_1 - \Delta\sigma'_3)$  ve  $\Delta p' = \frac{1}{3}(\Delta\sigma'_1 + 2\Delta\sigma'_3)$  olduğu göz önünde bulundurularak,  $p' - q$  düzlemindeki efektif gerilme izi oranı, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\Delta q}{\Delta p'} = 3 \frac{\left(\frac{\Delta\sigma'_1}{\Delta\sigma'_3}\right) - 1}{\left(\frac{\Delta\sigma'_1}{\Delta\sigma'_3}\right) + 2} \quad (2.41)$$

Denklem (2.40) ın, denklem (2.41) de yerine konulması ile, düşey örnek için, gerilme izinin eğimi elde edilebilir.

$$\frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{3}{2} \left( \frac{2v_{hh} + 4v_{hv} - n - 2}{v_{hh} - v_{hv} + n - 1} \right) \quad (2.42)$$

Benzer şekilde, yatay konumda alınmış zemin örnekleri için de efektif gerilme izinin eğimi elde edilebilir. Yatay zemin örnekleri için efektif gerilme izinin eğimi, aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\Delta q}{\Delta p'} = -3 \left( \frac{2v_{hh} + 4v_{hv} - n - 2}{v_{hh} - v_{hv} + n - 1} \right) \quad (2.43)$$



Buna göre; düşey ve yatay örneklerin efektif gerilme izi eğimlerinin oranı aşağıda verildiği gibi ilişkilendirilebilir.

$$\left(\frac{\Delta q}{\Delta p'}\right)_{\text{yatay örnek}} = -2 \left(\frac{\Delta q}{\Delta p'}\right)_{\text{düşey örnek}} \quad (2.44)$$

Kirkgard ve Lade (1991), tarafından yapılan çalışmada, yukarıda verilen ilişkiler kullanılarak, dört elastik parametre elde edilmiştir. Malzeme eksenine ile düşey ve yatay konuma gelecek şekilde hazırlanan örnekler üzerinde, üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve daha sonra bu deneylere ait, gerilme-deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Duncan ve Chang (1970) tarafından önerilen yöntem kullanılarak, düşey ve yatay elastisite modülleri  $E_v$  ve  $E_h$  hesaplanmıştır. Düşey örneğe ait yanıl deformasyon-düşey eksenel deformasyon ( $\varepsilon_h - \varepsilon_v$ ) ilişkisi kullanılarak,  $\nu_{vh}$ ; yatay örneklere ait ve birbirine dik yüzlerin yanıl deformasyon ( $\varepsilon_h - \varepsilon_h$ ) ilişkileri kullanılarak,  $\nu_{hh}$  ve  $\nu_{vh}$  Poisson oranları bulunmuştur. Ayrıca Eşitlik (2.44) kullanılarak, yatay örneklere ait  $p' - q$  düzleminde çizilen, gerilme izi eğrisinin başlangıç eğimi hesaplanmış ve bu değerin, eğri üzerinden ölçülen eğim değeri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Aynı çalışmada  $\nu_{vh}$  değerinin bulunması için bir diğer yol ise şu şekilde açıklanmıştır: Düşey örneğe ait gerilme izi eğrisinin başlangıç eğimi, eğri üzerinden ölçülmüş ve daha önce elde edilmiş olan,  $\nu_{hv}$  ve  $\nu_{hh}$  değerleri ile, denklem (2.42) den yararlanarak  $n$  değeri hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise,  $\nu_{vh} = \frac{\nu_{hv}}{n}$  ilişkisi kullanılarak,  $\nu_{vh}$  değeri hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen Poisson oranlarının uygun olduğu, araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Kirkgard ve Lade (1991)'in çalışmalarındaki bir diğer önemli nokta ise, farklı başlangıç izotropik konsolidasyon basınçlarına maruz bırakılarak ( $1.25 \text{ kg/cm}^2$ ,  $1.75 \text{ kg/cm}^2$  ve  $3 \text{ kg/cm}^2$ ) hazırlanan örneklere ait Poisson oranı değerlerinin hemen hemen aynı olmalarıdır. Örneklerin kesilme aşamasında ölçülen “deformasyon anizotropisinin”, örneklerin önceden maruz kaldıkları konsolidasyon basıncından bağımsız olduğu, araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır.

Düzlemsel anizotropik özelliklere sahip malzemeler için, düzlem şekil değiştirme probleminde ait Hooke yasası,  $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$  olduğu göz önünde bulundurularak, aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir (Bowles 1988).

$$\varepsilon_x = A\sigma_x + B\sigma_y \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_y = B\sigma_x + C\sigma_y \quad (2.46)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G'_v} \quad (2.47)$$

$$\text{Burada, } A = \frac{1 - \mu_1^2}{E_h} \quad B = \frac{-\mu_2 - \mu_1\mu_2}{E_v}$$

$$C = \frac{1 - n\mu_2^2}{E_v} \quad n = \frac{E_h}{E_v}$$

olarak deyimlenmişlerdir.

Chowdhury (1972), tarafından, düzlem anizotropiye sahip, elastik malzemelerin düzlem şekil değiştirme koşullarında, elastik anizotropik parametrelerini veren bir yöntem önerilmiştir. Chowdhury (1972), A, B, C ve  $G'_v$  parametrelerinin; malzeme eksenini referans alınarak düşey, yatay ve 45 derecelik açılar ile alınacak olan zemin örnekleri kullanılarak, aşağıda verilen yöntem ile bulunabileceğini belirtmiştir.

- 1- Simetri düzlemi yatay olacak şekilde, düzlem-deformasyon koşullarına sahip, sabit çevre basınçlı bir üç eksenli basınç deney takımını gerçekleştir.
- 2- Deviatorik gerilme-eksenel deformasyon değerlerini işaretleyerek bir eğri oluştur.
- 3- Deviatorik gerilme-yanal deformasyon değerlerini işaretleyerek bir eğri oluştur.
- 4- Aşağıdakileri hesapla:

$$\frac{1}{B} = 3 \text{ ncü adımda oluşturulan eğrinin eğimidir.}$$

$$\frac{1}{C} = 2 \text{ nci adımda oluşturulan eğrinin eğimidir.}$$

5- Simetri düzlemi düşey olacak şekilde, düzlem-deformasyon koşullarına sahip, sabit çevre basınçlı bir üç eksenli basınç deneyi setini gerçekleştir.

6- İkinci ve üçüncü adımda verilen işlemleri tekrar uygulayarak yeni bir takım eğri oluştur.

7- Aşağıdakileri hesapla:

$\frac{1}{B} = 3$  ncü adımda oluşturulan eğrinin eğimidir (B değeri yukarıda elde edilen ile uyumlu olmalıdır).

$\frac{1}{A} = 2$  nci adımda oluşturulan eğrinin eğimidir.

8- Simetri düzlemi, yatay ile 45 derecelik açı yapacak şekilde alınan zemin örneği üzerinde deney gerçekleştir.

9- Deviatorik gerilme-eksenel deformasyon değerlerini işaretleyerek bir eğri oluştur ve bu eğrinin eğimini hesapla ( $\alpha$ ). Elde edilen eğim değerini aşağıda verilen formülde kullanarak  $G'_v$  parametresini hesapla

$$G'_v = \frac{1}{\frac{4}{\alpha} - (A - 2B + C)}$$

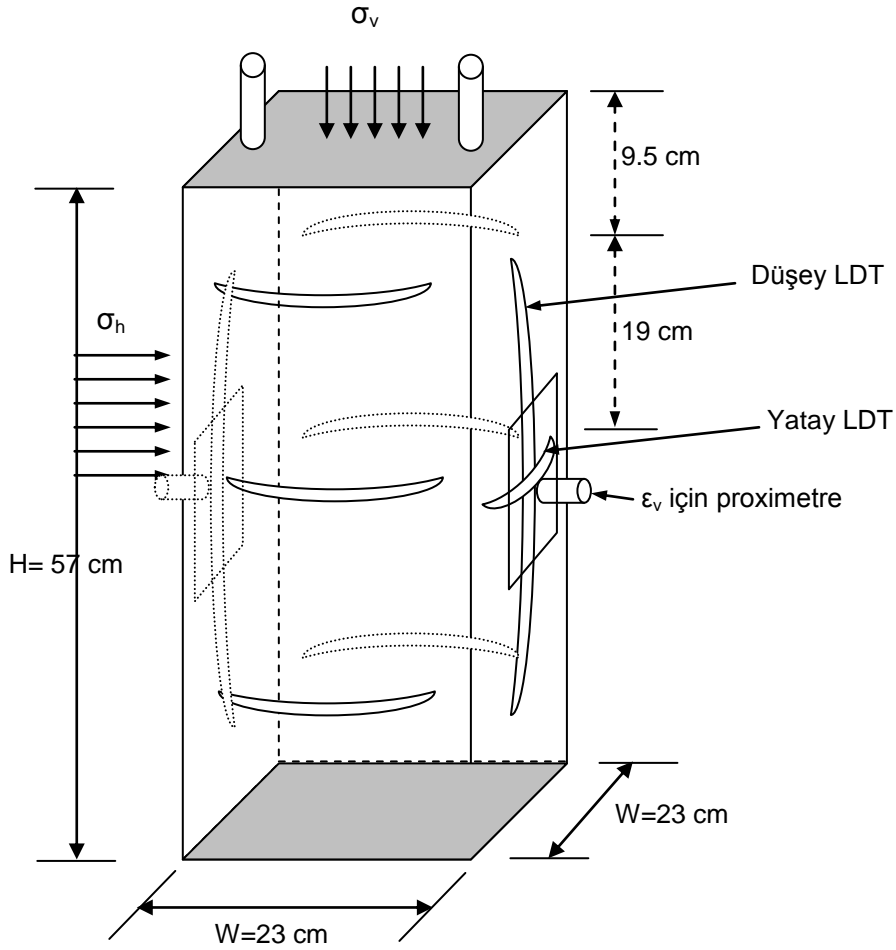
Hoque ve ark. (1996), zeminin elastik davranışını karakterize etmek için, otomatik kontrollü, gelişmiş bir üç-eksenli deney düzeneği oluşturmuşlardır. Bu çalışmada, yüksek silika içeriğine sahip, kötü derecelenmiş Ticino kumundan hazırlanmış, büyük hacimli dikdörtgen prizmatik kum örnekler üzerinde, deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Zemin örnekleri üzerine farklı gerilme izleri uygulayarak, örnekler üzerindeki deformasyonlar “yerel deformasyon ölçerler” ile ölçülmüştür. Bu sırada örnek üzerine, eksenel yük ve çevre basınçları, belirli gerilme izlerini oluşturacak şekilde, otomatik kontrollü bir düzener ile uygulanmıştır. Bu çalışmada; kumlu zemine ait dört adet düzlem anizotrop elastik parametre ölçülmüştür. Elastik modülün, maksimum asal deformasyon artımının olduğu yöndeki normal gerilmenin, tek değerli bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Anizotropik gerilme koşullarında da kuma ait elastik deformasyon karakteristiklerinin anizotropi'ye sahip olduğu görülmüştür.

Aynı çalışmada, elastik parametreler, lineer regresyon analizi yapılarak, aşağıda verilen formülasyonlar ile elde edilmişlerdir.

$$E_v = \frac{d\sigma_v}{d\varepsilon_v}, \nu_{vh} = \frac{-d\varepsilon_h}{d\varepsilon_v} \quad (\text{Düşey periyodik yüklemelerden}) \quad (2.48)$$

$$E_h = (1 - \nu_{hh}) \frac{d\sigma_h}{d\varepsilon_h} \quad (\text{Yatay periyodik yüklemelerden}) \quad (2.49)$$

Ancak burada; Eşitlik (2.49) ile verilen  $E_h$  yatay elastisite modülünün doğrudan elde edilmesi,  $\nu_{hh}$  parametresi bilinmediği için, mümkün olmamıştır. Bu nedenle Eqramul Hoque ve ark. (1996), çalışmalarında, söz konusu problemi aşmak için, zeminlerde izotropik koşullar olduğunu varsayarak ( $\nu_{hh} = \nu_{hv} = \nu_{vh}$ ), Eşitlik (2.49) un çözümünü mümkün kılmışlardır. Kullanılan büyük hacimli örnekler ve yerel deformasyon ölçerler Şekil 2.1. de verilmiştir.



Şekil 2.1. Yerel deformasyon ölçerli büyük hacimli üç eksenli deney örneği (Hoque ve ark. 1996)

## 2.5. Bender Elemanlar Kullanarak Anizotropi'nin Araştırılması

Daha önceden de ifade edildiği gibi; düzlem anizotropik elastik parametrelerin, klasik türden yüklemeler yapan üç eksenli deney düzenekleri ile, doğrudan ölçülmesi mümkün değildir. Söz konusu problemi aşmak için, diğer bir çözüm yolu da, üç eksenli basınç deney düzeneklerinde, bender elemanların kullanılması ve düzlem anizotrop malzeme sabitlerinin bir kısmının doğrudan ve bir kısmının da dolaylı olarak hesap edilmesidir.

Bender elemanlar, zeminlerin dinamik elastik modülü  $G_{max}$  ı ölçmek için, bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Kullanım kolaylıkları ve tahribatsız ölçüm yapmaya imkan verdikleri için, yaygın kullanım alanına sahip olmuşlardır. Üç eksenli deney düzenekleri ile birlikte kullanımları ilk başlangıçta, düşey kayma dalgalarını ölçmeye yönelik olmuştur. Ancak daha sonraları, düşey ve yatay kayma dalgası ölçümlerinin aynı anda yapılabildiği düzenekler, yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bellotti ve ark. (1996), tarafından Ticiono nehir kumunun başlangıçtaki mevcut dokusal (inherent) ve indüklenmiş (stress induced) anizotropik özellikleri, sismik dalgaların yayılım hızlarının ölçülmesi ile araştırılmıştır. Sismik dalgaların; düşey, yatay ve eğik düzlemlerde yayılabildiği dikkate alınarak kurulan cross-anizotrop elastik model ile 5 bağımsız sabit ilişkilendirilmiştir. Zemin örnekleri üzerinde iletken PS dalgaları, zeminin ( $M_0$ ) ve kayma ( $G_0$ ) modüllerinin çok küçük deformasyonlarda ölçülmesine olanak sağlamaktadır.

Bellotti ve ark. (1996), tarafından yapılan çalışmada, iki eğik kütle dalgası ( $V_{45,V}^S, V_{45}^P$ ) hızları,  $\theta = 45^\circ$  lik açı ile ölçülmüştür. Bellotti ve ark. (1996), tarafından anizotropik elastik parametreleri elde etmeye yönelik, kullanılan yöntem şu şekilde açıklanmıştır:

Yatay simetri düzlemine sahip, anizotrop elastik bir malzeme için, bünye denklemi Love (1959), tarafından verildiği şekliyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_Z \\ \tau_{ZX} \\ \tau_{ZY} \\ \tau_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} \\ & & & C_{44} \\ & & & & C_{44} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \\ \gamma_{ZX} \\ \gamma_{ZY} \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Burada;

$$C_{11} = M_h \text{ (Yatay yönde sınırlandırılmış(constrained) modül)}$$

$$C_{13} = M_v \text{ (Düşey yönde sınırlandırılmış(constrained) modül)}$$

$$C_{44} = G_{vh} \text{ (Simetri düzlemini de içeren düşey kayma modülü)}$$

$$C_{66} = G_{hh} \text{ (Yatay düzleme ait kayma modülü)}$$

$$C_{12} = M_h^2 - 2G_{hh}$$

Bağımsız malzeme sabitleri olan  $C_{11}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{66}$  ve  $C_{13}$  ün bilinmesi halinde anizotropik parametreler, aynı araştırmacılar tarafından, aşağıda verilmiştir (Not: sismik dalgalar ile modüller arasındaki ilişki için Fioravante ve Capoferri'nin. 2001 yılı çalışmasına bakılabilir).

$$v_{hh} = \frac{C_{12}M_v - C_{13}^2}{M_H M_v - C_{13}} \quad (2.51)$$

$$v_{vh} = \frac{C_{13}M_H - C_{12}C_{13}}{M_H^2 - C_{12}^2} \quad (2.52)$$

$$v_{hv} = \frac{C_{13}M_H - C_{12}C_{13}}{M_v M_H - C_{13}^2} \quad (2.53)$$

$$E_v = \frac{|C|}{M_H^2 - C_{13}^2} \quad (2.54)$$

$$E_h = \frac{|C|}{M_v M_H - C_{13}^2} \quad (2.55)$$

$|C|$  teriminin değeri, aşağıdaki ifadeden elde edilebilir.

$$|C| = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} \end{vmatrix}$$

Bellotti ve ark. (1996), çalışmasında Ticono kumundan alınan örnekler, laboratuvarında,  $K_0 = 0.5, 1, 1.5$  ve  $2$  koşullarına sahip olacak şekilde, anizotropik gerilmelere maruz bırakılarak ve her  $K_0$  değeri için, altı farklı yoğunlukta hazırlanmış ve her zemin örneğine ait beş bağımsız düzlem anizotrop malzeme sabiti, yukarıda verilen (2.51)-(2.55) numaralı ifadeler kullanılarak hesaplanmışlardır. Aynı araştırmacılar, küçük deformasyonlar için Ticino kumunun, gerilme-deformasyon davranışının, düzlem anizotrop davranış sergilediğini belirtmişlerdir.

Pennington ve ark. (1997), tarafından  $100$  mm yükseklikli deney örnekleri üzerinde, düşey ve yatay polarizasyon ile, yatay kayma dalgası iletebilen ve toplayabilen bir düzenek geliştirilmiştir. Yatay olarak konumlandırılan bir bant içine gömülmüş bender elemanlar kullanılarak  $G_{vh}$ ,  $G_{hv}$  ve  $G_{hh}$  kayma modülleri ölçülmüştür. Doğal ve yapılandırılmış Gault kilinin farklı rijitlik modülleri elde edilmiş ve  $G_{hv}$  nin  $G_{vh}$  'a göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada,  $G_{hh}/G_{hv}$  oranlarının gerilme durumuna bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca örselenmemiş örnekler kullanılarak elde edilen değerlerin, arazide ölçülen değerler ile uyumlu olduğu, aynı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Kuwano ve ark. (2000), tarafından değişik gerilme izleri takip edilerek gerçekleştirilen üç-eksenli basınç deneyleri ile anizotropik rijitlikler ölçülmüştür. Bu çalışmada; zemin örneği, hassas ölçüm yapabilen yerel birim deformasyon ölçerler ile donatılmış ve lineer elastik bölge geçilerek, % 15 birim deformasyon düzeyine kadar yükleme gerçekleştirilmiştir. Zemin örneği üzerinde çok yönlü kayma dalgaları oluşturulmuş ve elde edilen veriler, statik yüklemelerden elde edilen veriler ile klasik elastisite teorisi kullanılarak, bir arada değerlendirilmiştir. Yöntemin kum, silt ve killi zeminlerde kullanılabilmesine dikkat çekilmiştir. Kuwano ve ark. (1999), tarafından kullanılan bu yöntem, aynı makaleden alınarak aşağıda verilmiştir.

Bölüm (2.5.) de verilen, (2.10) numaralı ifade esas alınarak elde edilen (2.11) ve (2.12) numaralı eşitliklerin kullanılması ile yapılan çözüm sonunda,  $E_v$  ve  $\nu_{vh}$  elastik parametreleri elde edilebilir. Ancak ilave bir bilgi olmaksızın, Eşitlik (2.13) ve (2.14) ile  $E_h$ ,

$v_{hv}$  ve  $v_{hh}$  parametrelerinin elde edilmesine imkan yoktur. Burada gerekli olan bir ilave bilgi, bender eleman kullanımı ile elde edilen,  $G$  kayma modülünden, aşağıda verildiği gibi bulunabilir:

Herhangi bir yatay düzleme ait yatay kayma modülü  $G_{hh}$ , yalancı elastik bölge için, bender elemanlardan yararlanarak saptanabilir.  $G_{hh}$  değeri elde edildikten sonra,

$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1 + v_{hh})}$  ilişkisinden yararlanarak, bilinmeyen  $E_h$  ve  $v_{hv}$  parametreleri, aşağıda verildiği gibi elde edilebilirler.

$$E_h = \frac{4AG_{hh}}{A + 2G_{hh}} \quad (2.56)$$

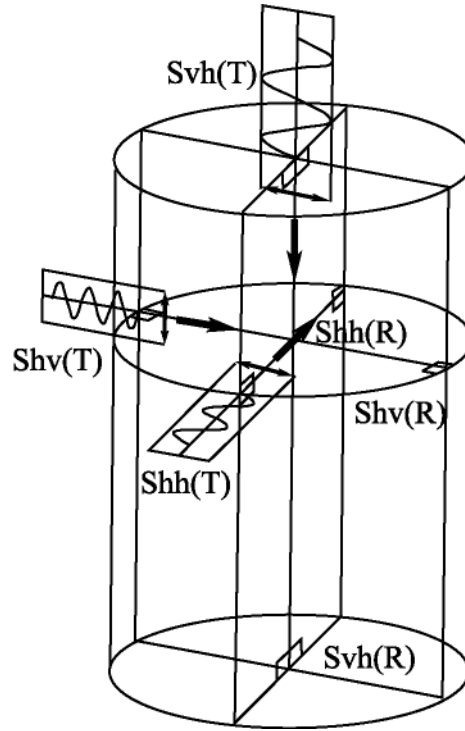
$$v_{hh} = \frac{A - 2G_{hh}}{A + 2G_{hh}} \quad (2.57)$$

burada  $A$  parametresi,  $\delta\sigma'_h$  statik çevre basınçlı deneylerden ( $\delta\sigma'_v = 0$ ) elde edilebilir. Burada

$$A = \frac{\delta\sigma'_h}{\delta\varepsilon_h} \text{ olarak ifade edilmiştir.}$$

Kuwano ve ark. (1999), çalışmalarında Imperial College'da, standart deneylerde kullanılan uniform, quartz içerikli Ham nehrinden alınan kum üzerinde, deneyler gerçekleştirilmiştir. Örnekler 200 kPa ortalama efektif gerilme ( $p'$ ) ve  $K_0 = 0.45$  koşullarında, anizotropik gerilmeler altında konsolide edilerek, deneye hazırlanmış ve daha sonra farklı gerilme izlerini sağlayacak bir takım üç eksenli deneylere tabi tutmuşlardır. Üç eksenli basınç deneylerinden bazıları, sabit çevre basıncı altında ( $\delta\sigma'_h = 0$ ), bir kısmı da sabit düşey gerilme ( $\delta\sigma'_v = 0$ ) koşullarında gerçekleştirilmiştir. Zemin örneği üzerine yerleştirilen bender elemana ait şekil, aşağıda verilmiştir (Şekil 2.2).





Şekil 2.2. Üç eksenli zemin örneği ve bender elemanlar (Kuвано ve ark. 1999).

Aynı çalışmaya ait sonuçlar, kullanılan deneysel yöntem ve denklemler Çizelge 2.1. de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Deneysel çalışmaya ait sonuçlar, kullanılan denklem ve yöntemler (Kuwano ve ark. 1999).

Elastik Sabitler	$\sigma'_v = 316$ kPa $\sigma'_h = 142$ kPa	Test türü	Kullanılan Denklemler
$E_v$	500 MPa	Düşey yüklemeli ( $\Delta\sigma'_v < 0$ veya $>0$ , $\Delta\sigma'_h = 0$ )	Denklem 2.11
$E_h$	280 MPa	Yatay yüklemeli $\Delta\sigma'_h < 0$ veya $>0$ , $\Delta\sigma'_v = 0$ )	Denklem 2.56 ( $G_{hh}$ BE deneylerinden)
$v_{vh}$	0.35	Düşey yüklemeli ( $\Delta\sigma'_v < 0$ veya $>0$ , $\Delta\sigma'_h = 0$ )	Denklem 2.12
$v_{hh}$	0.06	Yatay yüklemeli $\Delta\sigma'_h < 0$ veya $>0$ , $\Delta\sigma'_v = 0$ )	Denklem 2.57 ( $G_{hh}$ BE deneylerinden)
$v_{hv}$	0.2		Denklem 2.2 ( $E_v$ , $E_h$ ve $v_{vh}$ önceki deneylerden)
$G_{vh}$	164	Bender eleman kullanılarak	$G_{vh} = \rho V_{hv}^2$
$G_{hh}$	134		$G_{hh} = \rho V_{hh}^2$
$G_{hv}$	147		$G_{hv} = \rho V_{hv}^2$

Lings ve ark. (2000), farklı araştırmacılar tarafından verilen, değişik anizotropik rijitlik parametreleri arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Bu çalışmada, farklı gerilme izleri takip edilerek, 100 mm çaplı örnekler üzerinde, drenajlı üç-eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sabit evre basınçlı ve sabit düşey basınçlı deneylerin bir takım avantajlarına dikkat çekilmiştir. Çalışmada, Gault kili olarak adlandırılan katı kilden, altıncı ve sekizinci metrelerden, temin edilen örselenmemiş zemin örnekleri kullanılmıştır. Deney başlangıcında  $K_0=2$  alınarak, killi örnekler, arazi koşullarındaki gerilmelere hazırlanmışlardır. Bunu gerçekleştirmek için başlangıçta, yerindeki (in-situ) gerilmeye eşdeğer, ortalama efektif gerilme altındaki izotropik basınca maruz bırakılarak, örnekler konsolide edilmiş ve daha sonra düşey gerilme sabit tutularak,  $K_0=2$  değerine ulaşılıncaya kadar, yatay efektif gerilmeler artırılarak  $K_0$  koşulu sağlanmıştır.

Öte yandan, aynı örnek üzerine yerleştirilen bender elemanlar kullanılarak, iki anizotrop elastik parametre llmüştür ( $E_h, \nu_{hh}$ ). Üç-eksenli basınç deneyleri ve bender elemanlardan elde edilen veriler bir arada değerlendirilerek, üç-eksenli deneyler ile doğrudan elde edilemeyen, diğer  anizotropik elastik parametre ( $E_v, \nu_{vh}$  ve  $F_h$ ) bulunmuştur. Diğer üç parametrenin llmesine yönelik olarak, Lings ve ark. (2000), tarafından uygulanan yöntem şu şekilde açıklanmıştır.

Gerçekleştirilen sabit yanal basınçlı ( $\delta\sigma'_h=0$ ) -eksenli deneylere ait gerilme izi elde edilerek, (2.30) ve (2.31) numaralı denklemlere gidilecek olursa,  $E_v$  ve  $\nu_{vh}$  sabitleri saptanabilir. Benzer şekilde, sabit düşey basınçlı ( $\delta\sigma'_v=0$ ) -eksenli deneylere ait gerilme izi belirlenerek, (2.32) ve (2.34) numaralı denklemlere gidilecek olursa,  $F_h$  parametresi elde edilebilir. Sonuç olarak, üç-eksenli deneyler ile üç parametre ( $E_v, \nu_{vh}$  ve  $F_h$ ) ve bender eleman kullanılarak da iki parametre ( $G_{vh}, G_{hh}$ ) bulunabilir. Verilen her iki grup denklem içinde ortak elemanlar olduğu için, denklemler bir arada çözülebilirler. Bender eleman kullanılarak elde edilen  $G_{hh} = \frac{E_{oh}}{2(1+\nu_{oh})}$  ve üç-eksenli deneylerden bulunan  $F_{oh} = E_{oh}(1-\nu_{oh})$  denklemleri için, ortak çözüm yapılırsa

$$E_{oh} = \frac{4F_{oh}G_{ohh}}{F_{oh} + 2G_{ohh}} \quad (2.58)$$

$$\nu_{ohh} = \frac{F_{oh} - 2G_{ohh}}{F_{oh} + 2G_{ohh}} \quad (2.59)$$

elde edilebilir. Denklemlerde görülen “o” alt indisi, gerilme-deformasyon ilişkilerine ait başlangıçtaki elastik bölgeyi vurgulamak amacıyla yönelik olarak kullanılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada önemli bir diğer nokta ise, küçük deformasyonlarda elde edilen anizotropik parametrelerin, Graham ve Housby (1983), tarafından verilen model ile saptanan anizotropik parametrelerin karşılaştırılmış olmasıdır. Ölçülen  $E_v$ ,  $\nu_{vh}$  ve  $F_h$  parametreleri, (2.24), (2.25) ve (2.26) numaralı Denklemler kullanılarak  $E^*$ ,  $\nu^*$  ve  $\alpha$  parametrelerine dönüşüm sağlanmıştır. Bu dönüşümde  $E_v$  ve  $\nu_{vh}$  sabitleri değişmezken, diğer parametrelerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ölçülen parametreler ile, dönüşüm yapılarak elde edilen sabitler arasında yapılan karşılaştırmaya ait sonuçlar Çizelge 2.2. de verilmiştir. Graham

ve Housby (1983), modelinde  $\sqrt{\frac{E_h}{E_v}}$  ve  $\frac{G_{hh}}{G_{hv}}$  oranlarını temsil eden ve sabit olan  $\alpha$  katsayısı,

Gault kili için 1.95 olarak saptanmıştır. Lings ve ark. (2000), tarafından yapılan deneysel çalışmada aynı oranlar, sırası ile 2 ve 2.25 olarak elde edilmişlerdir.

**Çizelge 2.2.** Deneysel olarak ölçülen ve “Graham ve Housby (1983)” yöntemi ile elde edilen normalleştirilmiş parametrelerin karşılaştırılması (Lings ve ark. 2000).

Araştırılan Parametre	Ölçülen (küçük deformasyon ve BE ile)	Hesaplanan (Denklem 2.24-2.26 ile )	Hesaplanan (Denklem 2.15-2.20 ile)	Fark
$E_{ov}$	550		550	-
$E_{oh}$	2186		2100	% 4
$v_{ovh}$	0		0	-
$v_{ohh}$	-0.04		0	% 4
$G_{ohv}$	507		537	% 6
$G_{ohh}$	1140		1050	% 9
$E^*$		550		
$v^*$		0		
$\alpha$		1.95		

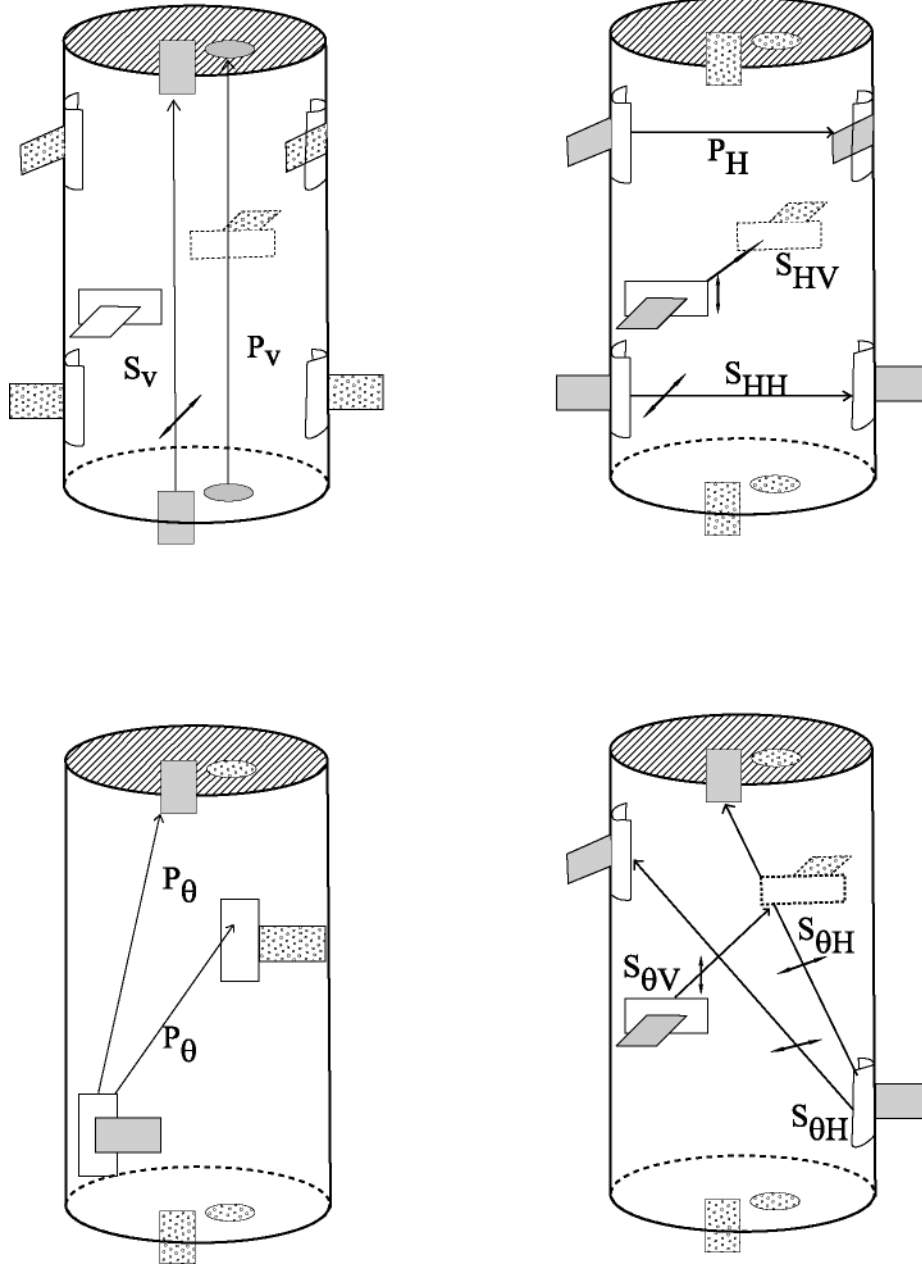
Sismik dalga kütle hızları ve modüller arasındaki ilişki; zeminin homojen ve elastik bir ortam olduğu kabulü ile, aşağıdaki gibi verilebilir.

$$M = \rho V_p^2 \quad \text{ve} \quad G_0 = \rho V_s^2$$

burada  $\rho$  ortamın yoğunluğunu,  $V_p$  basınç dalga hızını (compression wave velocity) ve  $V_s$  ise, kayma dalgası hızını temsil etmektedir.

Fioravante ve Capoferri, (2001), çok-yönlü piezoelektrik transduserleri, üç eksenli basınç deneylerinde kullanarak, anizotropik elastik parametreleri elde etmişlerdir. Yöntem, bender eleman kullanımına benzer şekilde, üç eksenli deney düzeneğine yerleştirilen örnekler üzerinde, yatay ve eğik düzlemlerde iletilen sismik dalga hızlarının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Söz konusu yöntem kullanılarak Ticino kumuna ait, mevcut (inherent) ve indüklenmiş (induced) anizotropik parametreler ölçülmüştür.

Mevcut anizotropiyi incelemek amacıyla; Ticonu kumundan alınan örnekler, laboratuvar koşullarında, yağmurlama yöntemiyle, yerindeki sıkılıkta hazırlanmış ve daha sonra bir dizi izotropik basınç kademelerine maruz bırakılmışlardır. Her yükleme kademesi sonrasında, 10 dakika civarında beklenmiş ve daha sonra örnek üzerinde düşey, yatay ve eğik dalga hızları ölçülmüştür. Yerleştirilen piezoelektrik transduser'lere ait şema Şekil 2.3 de verilmiştir.



Şekil 2.3. Piezoelektrik transduser'lerle iletilen polarize kütle dalgaları (Fioravante ve Capoferri 2001).

Aynı çalışmada, indüklenmiş anizotropi'yi incelemek amacıyla, yine Ticono kumu kullanılarak, gevşek sıklıkta deney örnekleri hazırlanmış ve bunlar üzerinde, sabit çevre basınçlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çevre basıncı,  $\sigma_r$ , 300 kPa da sabit tutularak, düşey eksenel basınç 200 kPa değerinden 700 kPa'a kadar artırılmıştır.

Fioravante ve Capoferri (2001), tarafından anizotropik elastik parametreleri elde etmeye yönelik kullanılan yöntem, şu şekilde açıklanmıştır: Yatay simetri düzlemine sahip, anizotrop elastik bir malzeme için bünye denklemi Love (1959), tarafından verildiği gibi, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \sigma_Z \\ \tau_{ZX} \\ \tau_{ZY} \\ \tau_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_H & M_H - 2G_{HH} & C_{13} \\ M_H - 2G_{HH} & M_H & C_{13} \\ C_{13} & C_{13} & M_V \\ & & & G_{VH} \\ & & & & G_{VH} \\ & & & & & G_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \\ \gamma_{ZX} \\ \gamma_{ZY} \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Beş bağımsız elastik malzeme sabitinden dördü, asal gerilme doğrultularında ölçülen, sismik dalga hızları kullanılarak aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$M_H = \rho V_{PH}^2$  : Yatay  $P_H$  dalgasından elde edilen yatay modül (constrained modulus)

$M_V = \rho V_{PV}^2$  : Düşey iletilen  $P_V$  dalgasından elde edilen düşey modül (constrained modulus)

$G_{VH} = \rho V_{S,VH}^2$  : Zemin danelerine yatay titreşim yaptıran, düşey iletimli  $S_{VH}$  dalgasından elde edilen ve simetri eksenini de içeren düzlem için kayma modülü

$G_{HH} = \rho V_{S,HH}^2$  : Zemin danelerine yatay titreşim yaptıran, yatay iletimli  $S_{HH}$  dalgasından elde edilen, yatay simetri düzlemine ait kayma modülü

Beşinci bağımsız malzeme sabiti  $C_{13}$  ü bulmak için, karşılıklı olarak eğik duruma gelecek şekilde yerleştirilen, piezoelektrik transduserlerden yararlanılmıştır. Söz konusu parametrenin elde edilebilmesi için, deneylerden bulunan dalga hızlarının, faz hızlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Stakoe ve ark. (1991-1995), tarafından önerilen bir

dönüşüm yönteminden yararlanılmaktadır. Faz hızlarının hesaplanması sonrasında,  $C_{13}$  parametresi aşağıda verilen denklem (2.61) veya denklem (2.62) kullanılarak saptanabilir.

$$V_{S,\theta V} = \left[ \frac{(A - B)}{2\rho} \right]^{0.5} \quad (2.61)$$

$$V_{P,\theta} = \left[ \frac{(A + B)}{2\rho} \right]^{0.5} \quad (2.62)$$

Burada;

$$A = M_H \sin^2 \theta + M_V \cos^2 \theta + G_{VH} ,$$

$$B = \left\{ (M_H - G_{VH}) \sin^2 \theta - (M_V - G_{VH}) \cos^2 \theta \right\}^2 + 4(C_{13} - G_{VH})^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \Big\}^{0.5}$$

$S_{\theta V}$  - dalgası: Simetri eksenine ile  $\theta$  açısı yapan düşey düzlemden iletilen dalga

$P_{\theta}$  - dalgası : Simetri eksenine ile  $\theta$  açısı yapacak şekilde iletilen dalga

### 2.6. İçi Boş Silindirik Burulmalı Kesme Deneyi ile Anizotropi'nin Araştırılması

İçi boş silindirik burulmalı kesme deney aleti (Hallow Cylindrical Test Aparatus) olarak adlandırılan aygıt son zamanlarda, geoteknik mühendisliğinde, farklı amaçlar için daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, gerek üç asal gerilmenin birbirinden bağımsız olarak uygulanması, kontrol edilebilmesi ve gerekse zemin örneği üzerine kayma gerilmelerinin uygulanamayışı ve kayma deformasyonlarının elde edilememesi sonucu, üç eksenli deney düzenekleri ile, düzlemsel anizotropiye sahip malzemelerde, anizotropik parametrelerin doğrudan bulunması, deneysel yol ile mümkün değildir. Gelişmiş, “içi boş silindirik burulmalı kesme deney aleti” ile; üç asal gerilme, birbirinden bağımsız olarak uygulanabilmekte ve maksimum asal gerilme yönünde kontrol olanağı bulunmaktadır. Bu şekilde üç eksenli basınç düzeneklerinin bazı kısıtlamaları aşılabilmektedir.

Söz konusu deney aleti ile, anizotrop rijitlik karakteristiklerinin, genel gerilme koşulları altında değerlendirilebilmesi için,  $\sigma[sb,z]$ ,  $\sigma[sb,r]$ ,  $\sigma[sb,\theta]$  ve  $\tau[sb,z\theta]$  gerilme bileşenleri ve  $\varepsilon[sb,z]$ ,  $\varepsilon[sb,r]$ ,  $\varepsilon[sb,\theta]$  ve  $\gamma[sb,z\theta]$  deformasyon bileşenleri, bağımsız olarak kontrol



edilebilirler. Zdravovic ve Jardine (1997), 254 mm çaplı HCA ile kuvarslı silt örnekleri kullanarak ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirerek, lineer olmayan bölgede anizotropik rijitlikleri araştırmışlardır. Araştırmacılar, rijitlik parametrelerinin gerilme izi doğrultusuna ve maksimum asal gerilme ekseninin eğimine bağlı olduğunu göstermişlerdir.

## 2.7 Anizotropi'nin Ödometre Koşullarında Araştırılması

Doğal zeminlerin birikim ve çökme süreçlerine bağlı olarak, zeminlerin oluşum süreçleri boyunca, anizotropik karakter kazandıkları ve zeminlerin çoğunun sahip oldukları anizotropi'nin, düzlemsel anizotropiye oldukça yakın olduğu daha önce ifade edilmişti. Bu duruma bağlı olarak zeminler, düşey ve yatay yönlerde farklı mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, zeminlerin düşey ve yatay yönlerde farklı hacim değiştirme özelliklerine sahip olduklarını göstermektedir. Tekinsoy (1999), tarafından zeminlerin farklı düşey ve yatay hacimsel sıkışma katsayısına sahip olduğunu ( $m_{vz} \neq m_{vx}$ ) dikkate alarak, yeni bir anizotropi tanımı yapılmıştır. Düşey ve yatay hacimsel sıkışma özelliklerinin farklılığı, zeminlere ait tabakalaşmanın bir göstergesi olarak ele alınmış ve bu iki değer oranı, yatay ve düşey yöndeki zemin tabakalarının hacim değiştirme özelliklerinin veya tabakalaşma etkisinin derecesini gösterdiği ifade edilmiştir. Buna göre anizotropi oranı olarak tanımlanan ve  $s$  ile gösterilen tanımlama, (2.63) numaralı eşitlik ile aşağıda verilmiştir. Bu tanımlama, Graham ve Houlsby (1983), tarafından verilen (2.16) numaralı eşitlik ile benzer özellikler içermektedir.

$$s = \sqrt{\frac{m_{vz}}{m_{vr}}} \quad (2.63)$$

Gareau ve ark. (2005), tarafından düşey yükleme süresince, yatay gerilmelerin ölçülmesine olanak tanıyan ödometre düzenekleri ile, tüm anizotropik parametrelerin ölçümlerinin olanaklı olduğu gösterilmiştir. Bu araştırmada, farklı açılardan alınan zemin örnekleri üzerinde, üç adet ödometre deney sonuçlarının, hesaplamalar için yeterli olacağı belirtilmiştir. Sonuç olarak yanal gerilmeleri ölçebilen, yeni bir ödometre deney düzeneği imal edilmiş ve laboratuvarında hazırlanan kaolen örneklerine ait anizotrop parametreler ölçülmüştür.

Konsolide edilmiş kaolin örnekleri için elde edilen elastik modül ve Poisson oranlarının, kaynaklarda verilenler ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Geniş bir yükleme aralığı için, elastik parametrelerin elde edilebilmesi ve test aygıtlarının ucuz olması, yöntemin avantajları olarak belirtilmiştir.

### **2.8. Graham ve Hously Yöntemi ile Anizotrop Elastik Parametrelerin Elde Edilmesi**

Graham ve Hously (1983), tarafından bilinmeyenlerin sayısını indirgeyen ve  $E^*$ ,  $\nu^*$  ve  $\alpha$  dan oluşan, üç parametrelili bir çözüm önerilmiştir. Bu yöntem kullanılarak, farklı gerilme izi eğimine sahip, üç eksenli deneyler ile, beş bağımsız elastik parametrenin elde edilmesi olanaklıdır. Söz konusu yöntem, aşağıda açıklanmıştır.

Farklı killi zeminler üzerinde gerçekleştirilen, “akma” davranışı çalışmaları, bunların akma gerilmesine kadar, dikkate değer bir aralıkta, lineer gerilme-deformasyon davranışı sergilediğini ortaya koymuştur (Graham ve Hously 1983).

Crooks ve Graham (1976), zeminin aldığı gerilme düzeyinin, başlangıç akma noktasını aşması durumunda; deformasyonların arttığı, yüksek boşluk suyu basıncı oluştuğu, boşluk suyu sönümlenme hızının azaldığı ve sünme hızının arttığını belirtmişlerdir.

Killerin akma öncesi gösterdikleri lineer gerilme-deformasyon davranışı, bu yöntemin dayandığı, ana esası oluşturmaktadır. Winnipeg kili üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ait bilgiler, Çizelge 3.2 de verilen grafiklerde akma noktalarını açıkça görülebilir.

Anizotrop malzemelerde; altı bağımsız gerilme bileşeni ile, altı bağımsız deformasyon bileşeni arasında lineer bir ilişki yazılabilir. Bu ilişkide, 6x6 boyutuna sahip ve malzeme sabitlerini içeren, bir matris yer almaktadır. Termodinamik gerekliliklerden dolayı, bu malzeme matrisinin simetrik olması gerektiği dikkate alınır, 36 elamanlı bu matris, 21 parametre ile ifade edilebilir (Love 1927).

Öte yandan; zeminlerin elastik özellikleri, çökme koşulları ve gerilme tarihçeleri ile yakından ilgilidir. Düşey yönde çökelmeleri ve daha sonra eşit yanal gerilmelere maruz kalmaları nedeni ile zeminler, düşey “malzeme simetri eksenine” sahip olurlar ve düzlem anizotrop (cross-anisotropy) malzeme özelliği kazanırlar. Düzlem anizotrop malzemeler, beş bağımsız elastik parametre ile aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \\ \delta\sigma_{33} \\ \delta\sigma_{23} \\ \delta\sigma_{31} \\ \delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & B \\ B & C & D \\ B & D & C \\ & & C-D \\ & & & F \\ & & & & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \\ \delta\varepsilon_{33} \\ \delta\varepsilon_{23} \\ \delta\varepsilon_{31} \\ \delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Burada; gerilme ve deformasyonlar, kartezyen koordinatlar referans alınarak ifade edilmiş ( $x_1, x_2, x_3$ ) ve bu yazılımda düşey eksen  $x_1$  ile gösterilmiştir.

Düzlem anizotropi'ye sahip bir malzeme üzerinde, üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilecek olursa (düşey olarak alınan bir zemin örneği için), bu durumda zemin örneği üzerine herhangi bir kayma gerilmesi uygulanamayacağı için, kayma deformasyonları da ölçülemez. Sonuçta 6x6 olan modül matrisinin, sadece sol üst 3x3 lük kısmı araştırılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \\ \delta\sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & B \\ B & C & D \\ B & D & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \\ \delta\varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Verilen (2.65) numaralı eşitlik ile, (2.64) numaralı ifadede görülen F parametresi, işin içine katılamayacağı için, bununla ilgili herhangi bir bilgi elde edilmesi de söz konusu olamayacaktır. Ayrıca üç eksenli basınç deneyinde, yatay yöndeki gerilmelerin ve yatay deformasyonların eşit olduğu varsayılabileceği için,  $\delta\sigma_{22} = \delta\sigma_{33}$  ve  $\delta\varepsilon_{22} = \delta\varepsilon_{33}$  nedeniyle (2.65) numaralı eşitlik aşağıda verilen forma indirgenir.

$$\begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 2B \\ B & C + D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Üç eksenli deneyler ile; ancak A, B ve (C+D) parametrelerinin elde edilmeleri mümkün olacaktır.

Laboratuarda gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyi uygulamalarında, çoğunlukla düşey zemin örnekleri kullanılmaktadır. Bu durumda (2.65) numaralı eşitlik ile verilen daha genel gerilme durumu için, bazı ek kabullerin yapılması gerekmektedir. Bunun için şöyle bir yöntem izlenebilir. İlk izotrop bir malzemeye ait rijitlik matrisi, genel ifadelerle, aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \\ \delta\sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & B \\ B & A & B \\ B & B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \\ \delta\varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Eşitlik (2.65) ve Denklem (2.67) karşılaştırılacak olursa, izotrop bir malzeme için,  $C=A$  ve  $D=B$  olduğu görülebilir. Şimdi yatay yöndeki rijitliğin  $\alpha$  gibi bir sabit sayı ile çarpılarak artırıldığını ve bu şekilde bir anizotropik özellik elde edildiğini varsayalım. Bu durumda rijitlik matrisinin ikinci ve üçüncü satırları  $\alpha$  katsayısı ile çarpılarak, aşağıda verilen matris elde edilir.

$$\begin{bmatrix} A^* & B^* & B^* \\ \alpha B^* & \alpha A^* & \alpha B^* \\ \alpha B^* & \alpha B^* & \alpha A^* \end{bmatrix}$$

Matriste  $A$  ve  $B$  parametrelerinin  $A^*$  ve  $B^*$  ile değiştirilmesinin nedeni, bu parametrelerin farklı kullanımlarını vurgulamak içindir. Ancak elde edilen matrisin simetrik olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için, örneğin ikinci ve üçüncü sütunlar, tekrar  $\alpha$  parametresi ile çarpılarak, aşağıdaki şekilde verildiği gibi simetrik bir matris elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \\ \delta\sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & \alpha B^* & \alpha B^* \\ \alpha B^* & \alpha^2 A^* & \alpha^2 B^* \\ \alpha B^* & \alpha^2 B^* & \alpha^2 A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \\ \delta\varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Böyle bir matrisin seçilmesi tamamen gelişigüzedir. Buna benzer şekilde, seçilebilecek ve simetri koşulunun sağlanacağı, alternatif matrislere örnekler aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A & B & B \\ B & \alpha A & B \\ B & B & \alpha A \end{bmatrix} \text{ veya } \begin{bmatrix} A & B & B \\ B & \alpha A & \alpha B \\ B & \alpha B & \alpha A \end{bmatrix} \text{ veya } \begin{bmatrix} A & \alpha B & \alpha B \\ \alpha B & \alpha A & \alpha B \\ \alpha B & \alpha B & \alpha A \end{bmatrix}$$

Ancak Denklem (2.68) ile verilen ilişki, zemin davranışını bazı yönlerden daha iyi temsil ettiği için, diğerlerine tercih edilmiştir. Denklem (2.68) gereğince,  $\alpha=1$  olduğunda malzeme izotropdur.  $\alpha>1$  olduğunda, malzeme yatay yönde daha rijittir.  $\alpha<1$  durumunda ise düşey rijitlik daha fazladır.  $\alpha^2$  ise doğrudan, yatay ve düşey arasındaki rijitlik oranını göstermektedir. Bu nedenle  $\alpha$  katsayısı, zeminin anizotropisinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Bu kabuller altında, anizotrop malzeme davranışını tanımlayan 6x6 lık matris, izotrop malzeme için tanımlanan matrisden hareketle, aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \\ \delta\sigma_{33} \\ \delta\sigma_{23} \\ \delta\sigma_{31} \\ \delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E^*}{(1+v^*)(1-2v^*)} \begin{bmatrix} 1-v^* & \alpha v^* & \alpha v^* & & & \\ \alpha v^* & \alpha^2(1-v^*) & \alpha^2 v^* & & & \\ \alpha v^* & \alpha^2 v^* & \alpha^2(1-v^*) & & & \\ & & & \alpha^2(1-2v^*) & & \\ & & & & \alpha^2(1-2v^*) & \\ & & & & & \alpha(1-2v^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \\ \delta\varepsilon_{33} \\ \delta\varepsilon_{23} \\ \delta\varepsilon_{31} \\ \delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

Eşitlikte, izotropik malzeme için geçerli olan E ve v parametreleri, anizotrop malzeme için  $E^*$  ve  $v^*$  olarak değiştirilmiştir. Denklem (2.69) da verilen matrisin tersi alınarak, Denklem (2.70) ile, aşağıdaki uygunluk matrisi cinsinden ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \\ \delta\varepsilon_{33} \\ \delta\varepsilon_{23} \\ \delta\varepsilon_{31} \\ \delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E^*} \begin{bmatrix} 1 & -\nu^*/\alpha & -\nu^*/\alpha \\ -\nu^*/\alpha & 1/\alpha^2 & -\nu^*/\alpha^2 \\ -\nu^*/\alpha & -\nu^*/\alpha^2 & 1/\alpha^2 \\ (1^*\nu^*)/\alpha^2 & & \\ & (1^*\nu^*)/\alpha & \\ & & (1^*\nu^*)/\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \\ \delta\sigma_{33} \\ \delta\sigma_{23} \\ \delta\sigma_{31} \\ \delta\sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{11} \\ \delta\varepsilon_{22} \\ \delta\varepsilon_{33} \\ \delta\varepsilon_{23} \\ \delta\varepsilon_{31} \\ \delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_v & -\nu_{vv}/E_v & -\nu_{vv}/E_v \\ -\nu_{vv}/E_v & 1/E_h & -\nu_{vh}/E_h \\ -\nu_{vv}/E_v & -\nu_{vh}/E_h & 1/E_h \\ (1+\nu_{vh})/E_h & & \\ & 1/2G_{vh} & \\ & & 1/2G_{vh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma_{11} \\ \delta\sigma_{22} \\ \delta\sigma_{33} \\ \delta\sigma_{23} \\ \delta\sigma_{31} \\ \delta\sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Denklem (2.69) ile Denklem (2.65) in karşılaştırılması sonucu A, B, C, D ve F parametreleri arasında aşağıdaki ilişkiler kurulabilir.

$$\left[ \frac{D}{B} \right]^2 = \frac{C}{A} = \left[ \frac{(C-D)}{F} \right]^2 \quad (2.72)$$

Burada, düzlem anizotrop malzeme için tanımlanan rijitlik matrisi (Denklem (2.70) ile, daha genel kullanım alanına sahip olan, Denklem (2.71) in karşılaştırması, beş bağımsız elastik sabit, üç parametreye bağlı olarak aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir.  $E_v = E^*$  ,  $E_h = \alpha^2 E^*$  ,  $\nu_{vv} = \nu^*/\alpha$  ,  $\nu_{vh} = \nu^*$  ,  $2G_{vh} = \alpha E^*/(1+\nu)$

Öte yandan zeminlerin elastik özelliklerinin, üzerlerine doğrudan uygulanan gerilmeler ile değil de, hacim ve şekil değiştirme özellikleri için içine katılarak araştırılması bazı avantajlar sağlar. Üç eksenli basınç deneyleri ile gerilme-deformasyon özellikleri  $p'$ ,  $q$ ,  $v$  ve  $\varepsilon$  kullanılarak, aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$p' = (\sigma'_{11} + 2\sigma'_{33})/3$$

$$q = \sigma'_{11} - \sigma'_{33}$$

$$v = \varepsilon_{11} + 2\varepsilon_{33}$$

$$\varepsilon = 2(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33})/3$$

İzotrop malzeme için,

$$\begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v \\ \delta \varepsilon \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

yazılabilir. Düzlem anizotrop bir malzeme için ise

$$\begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^* & J \\ J & 3G^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v \\ \delta \varepsilon \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

ilişkisi verilebilir.  $K^*$ ,  $G^*$  ve  $J$ , düzlem anizotropi'ye sahip malzemenin, üç eksenli deney koşullarındaki davranışını tanımlayan parametreler olarak düşünülebilir (Denklem (2.66) gibi). Öte yandan,  $p'$ ,  $q$ ,  $v$  ve  $\varepsilon$  parametrelerine ait ifadelerden yararlanarak  $K^*$ ,  $G^*$  ve  $J$  rijitlik katsayıları  $A^*$ ,  $B^*$  ve  $\alpha$  parametreleri ile aşağıda verildiği gibi ilişkilendirilebilir.

$$K^* = \left[ A^* + 4\alpha B^* + 2\alpha^2 (A^* + B^*)/9 \right] \quad (2.75)$$

$$G^* = \left[ \frac{A^* - 2\alpha B^* + \alpha^2 (A^* + B^*)}{2} \right] / 3 \quad (2.76)$$

$$J = \left[ \frac{A^* + \alpha B^* - 2\alpha^2 (A^* + B^*)}{3} \right] \quad (2.77)$$

Ayrıca Denklem (2.74)'deki ifadenin tersi alınarak, uygunluk matrisi cinsinden bir tanımlama yapılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta v \\ \delta \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C1 & C2 \\ C2 & C3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Burada  $C1 = 3G^* / \text{Det}$   $C2 = -J / \text{Det}$   $C3 = K^* / \text{Det}$  ve  $\text{Det} = (3K^*G^* - J^2)$  ifade etmektedir.

Anizotropik Elastik Parametrelerin elde edilmesi:

Bir üç eksenli basınç deneyinde,  $\delta\sigma'_{11}$ ,  $\delta\sigma_{33}$  ve  $\delta\varepsilon_{11}$ ,  $\delta\varepsilon_{33}$  ölçümlerinden yararlanarak  $\delta p'$ ,  $\delta q$ ,  $\delta v$  ve  $\delta \varepsilon$  artımları hesaplanabilir. Bu artımların, Denklem (2.74) de yerine konulması ile, üç bilinmeyenli iki denklem elde edilir. Bu durumda, bilinmeyenler elde edilemezler. Farklı  $\frac{\delta q}{\delta p'}$  oranına sahip, en az iki deney yapılması, anizotropik parametrelerin bulunması için asgari koşuldur. İki adet, üç eksenli deney yapılması durumunda ise, üç bilinmeyenli dört denklem elde edilecektir. Deney sayısının ikinin üzerine çıkması durumunda, gereğinden fazla bilgi söz konusu olacaktır. Öte yandan kilin gerçek davranışının (2.68) numaralı denklem ile verilen ideal koşullardan bir miktar farklı olması, deneye maruz kalan örneklerin tamamen aynı olmamaları ve deneysel ölçümlerdeki hatalar nedeniyle, deney verileri kullanılarak oluşturulan denklemlerin bir ölçüde uyumsuz olmaları söz konusu olacaktır. Benzer denklem takımları kullanılarak, amaçlanan parametrelerin en olası değerlerinin elde edilmesi için, kabul gören yöntemlerden birisi de “en küçük kareler” yöntemidir.

En küçük kareler yöntemi ile çözümde; gerilmelerin, deformasyonların ya da gerilme-deformasyon kombinasyonlarının, bağımsız değişken olarak alınması mümkündür. Burada verilen çözüm yönteminde, gerilmeler bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Üç eksenli



basınç deneyinden  $\delta p'$  ve  $\delta q$  ölçüm değerlerinin elde edilmesi ile, (2.78) numaralı denklem kullanılarak, buna karşılık gelen “hesaplanmış” hacimsel deformasyonların elde edilmesi mümkündür.

$$\delta v_c = C_1 \delta p' + C_2 \delta q \quad (2.79)$$

Öte yandan  $\delta p'$  ve  $\delta q$  gerilme artımlarına karşılık gelen, hacimsel deformasyon  $\delta v$  değeri ise, gerçekte deney sırasında ölçülmüştür. Hacimsel deformasyondaki bu hata  $\delta v_e$  olarak ifade edilirse, hata miktarı, hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki fark alınarak, aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\delta v_e = \delta v_c - \delta v = C_1 \delta p' + C_2 \delta q - \delta v \quad (2.80)$$

Benzer şekilde, hesaplanan kayma deformasyonu hatası ise, aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\delta \varepsilon_e = \delta \varepsilon_c - \delta \varepsilon = C_2 \delta p' + C_3 \delta q - \delta \varepsilon \quad (2.81)$$

Yapılan deneylerden bulunan deformasyon hatalarının kareleri toplamı, şu şekilde yazılabilir.

$$e = (C_1 \delta p' + C_2 \delta q - \delta v)^2 + (C_2 \delta p' + C_3 \delta q - \delta \varepsilon)^2 \quad (2.82)$$

Burada,  $C_1, C_2, C_3$  parametrelerinin elde edilmesi için, hataların kareleri toplamının, bilinmeyenlere göre türevlenip sifira eşitlenmesi gerekmektedir.

$$\frac{\partial e}{\partial C_1} = \sum 2(C_1 \delta p' + C_2 \delta q - \delta v) \delta p = 0 \quad (2.83)$$

$$\frac{\partial e}{\partial C_2} = \sum 2(C_1 \delta p' + C_2 \delta q - \delta v) \delta q + 2(C_2 \delta p' + C_3 \delta q - \delta \varepsilon) \delta p = 0 \quad (2.84)$$

$$\frac{\partial e}{\partial C_3} = \sum 2(C_2 \delta p' + C_3 \delta q - \delta \varepsilon) \delta p = 0 \quad (2.85)$$

Elde edilen sisteminin çözümü, aşağıda verilen matrisin çözümü olarak ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sum \delta v \delta p \\ \sum \delta v \delta q + \delta \varepsilon \delta p \\ \sum \delta \varepsilon \delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \delta p^2 & \sum \delta q \delta p & 0 \\ \sum \delta p \delta q & \sum \delta q^2 + \delta p^2 & \sum \delta q \delta p \\ 0 & \sum \delta p \delta q & \sum \delta q^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

Daha genel bir çözüm ise, Denklem (2.87) olarak verilen ve  $\delta v, \delta \varepsilon$  ölçümlerine sırası ile uygulanan  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlık katsayılarını içeren, matris çözümüdür.

$$\begin{bmatrix} \sum w_1 \delta v \delta p \\ \sum w_1 \delta v \delta q + w_2 \delta \varepsilon \delta p \\ \sum w_2 \delta \varepsilon \delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w_1 \delta p^2 & \sum w_1 \delta q \delta p & 0 \\ \sum w_1 \delta p \delta q & \sum w_1 \delta q^2 + w_2 \delta p^2 & \sum w_2 \delta q \delta p \\ 0 & \sum w_2 \delta p \delta q & \sum w_2 \delta q^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

Denklem (2.87) kullanılarak  $C_1, C_2, C_3$  değerleri saptanabilir. Daha sonra  $K^*, G^*$  ve  $J$ , parametreleri, aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

$$K^* = \frac{C_3}{(C_1 C_3 - C_2^2)} \quad (2.88)$$

$$G^* = \frac{C_1}{(C_1 C_3 - C_2^2)} \quad (2.89)$$

$$J^* = \frac{-C_2}{(C_1 C_3 - C_2^2)} \quad (2.90)$$

Daha genel bir karşılaştırma için, Denklem (2.68) de verilen  $A^*$ ,  $B^*$  ve  $\alpha$  parametrelerine dönüşüm yapılabilir. Bu durumda, aşağıda verilen ifadeler yazılabilir.

$$A^* = K^* + \frac{4}{3}G^* + \frac{4}{3}J \quad (2.91)$$

$$\alpha = \frac{\left[ \sqrt{9\left(K^* - \frac{2}{3}G^* + \frac{1}{3}J\right)^2 + 8(3K^*G^* - J^2)} - \left(K^* - \frac{2}{3}G^* + \frac{1}{3}J\right) \right]}{2A^*} \quad (2.92)$$

$$B^* = \frac{\left(K^* - \frac{2}{3}G^* + \frac{1}{3}J\right)}{\alpha} \quad (2.93)$$

İzotrop bir malzemede  $\nu = \frac{B}{A+B}$  olduğu için benzer şekilde anizotrop bir malzemede  $\nu^* = \frac{B^*}{A^* + B^*}$  büyüklüğü tanımlanabilir. Son olarak, denklem (2.69) ile verilen  $E^*$ , aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$E^* = \frac{(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)}{(1 - \nu^*)} \quad (2.94)$$

Öte yandan Lings ve ark (2000), tarafından Graham ve Houlsby (1983), yöntemi ile yukarıda elde edilen  $\alpha$ ,  $\nu^*$  ve  $E^*$  parametrelerinin, anizotropik beş elastik parametre ile ilişkisi, kaynaklarda yaygın kullanılan gösterimle, aşağıda verilmiştir.

$$E_v = E^*$$

$$E_h = \alpha^2 E^*$$

$$\nu_{vh} = \frac{\nu^*}{\alpha}$$

$$\nu_{hh} = \nu^*$$

$$G_{hv} = \frac{\alpha E^*}{2(1 + \nu^*)}$$

$$G_{hv} = \alpha^2 E^* / 2(1 + \nu^*) \quad (2.95)$$

### 2.9. Anizotrop Ortamda Gerilme Yayılışı

Zemin üzerine uygulanan yükler nedeni ile oluşan gerilme artımlarının hesaplanması, zemin mekaniğinin en temel problemlerinden birini oluşturmaktadır. Zeminlerin izotrop olduğu varsayımına dayanan, çok sayıda elastik çözüm mevcuttur. Gerek kullanım kolaylığı ve gerekse daha az parametreye ihtiyaç duyması nedeni ile bu çözümler, yaygın kabul görmüşlerdir. Oysa, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, yapılan araştırmalar, düzlem anizotrop olarak modellenmelerinin daha gerçekçi olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle zeminlerin anılan şekilde modellenmeleri ve mühendislik problemlerinin yeniden ele alınması, giderek artan bir eğilim göstermektedir.

İzotrop olarak kabul edilen ortama kıyasla, anizotropik ortamda gerilme yayılışı, bir çok etmene bağlı olarak değişmekte ve çalışmalar bu değişim etmenleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Etmenlerden en önemlileri; yüklü alanın boyutları, yükleme tipi, malzemenin anizotropisinin niteliği ve derecesidir. Bu etmenlerin biri veya bir kaçını dikkate alarak geliştirilmiş analitik ve kapalı çözümler olduğu kadar, bilgisayar kapasiteleri ve yazılımlarının gelişimine paralellik gösteren, nümerik çözümler de mevcuttur. Bu çalışmalardan bir kısmı hakkında izleyen paragraflarda bilgiler verilecektir.

Gazates (1982), düzlem anizotrop ortam (cross-anisotropic media) için; yükün temel merkezinde, kenarlara oranla yoğunlaştığı parabolik, üniform yüklü simetrik bir düzlemin, simetri eksenini etrafında çevrilerek elde edilen bir yük dağılımı için, analitik bir çözüm önermiştir. Bu çözümde, ortamın homojen ve kalınlığı fazla yarı sonsuz bir ortam olduğu varsayılmıştır. Aynı çalışmada, drenajlı ve drenajsız koşullar için seçilen, gerçekçi beş elastik parametrenin, gerilmelerin değişimine olan etkileri araştırılmıştır. Verilen bir düşey elastisite modülü için; yatay elastik modül, düşey düzlemlere ait kayma modülü, yatay düzleme ait Poisson oranı (düşey düzlem deformasyonuna bağlı olarak), özellikle drenajsız koşullarda, gerilmelerin değişimi üzerinde etkilerinin daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada önemli bir diğer sonuç ise, izotropik elastisite'nin aksine, düşey gerilmelerin malzeme özelliklerine bağlı olduğu ve özellikle Poisson oranlarından birine bağımlı kaldığı belirtilmiştir.

Gerrard (1982), yatay simetri düzlemine sahip elastik, yarı sonsuz bir ortama etkileyen farklı yüklemeler için çözümler önermiştir. Bu yükleme çeşitleri; düşey kuvvet, yatay kuvvet,

yatay eksen etrafında moment, düşey eksen etrafında moment ve radyal kayma gerilmeleridir. Bu çalışmada, anılan beş tür yüklemenin, düzlem anizotrop elastik, yarı sonsuz ortamda yer alan, dairesel bir alana uygulandığı varsayılarak çözümler sunulmuştur.

Öte yandan söz konusu ortama etkiyen farklı yükleme çeşitleri ve alan geometrileri için, bilgisayar kapasiteleri ve yazılımlarının gelişmesine paralel olarak, nümerik çözümlere bir yönelim olmuştur. Millovic ve Todorovic (1985), sonlu kalınlıkta sıkışabilir bir tabakaya oturan, halka şeklinde, bükülebilir bir temel etkisiyle oluşan gerilme ve şekil değişimleri incelemiştir. Rijit bir taban üzerine oturan söz konusu tabakanın homojen, elastik izotrop ve anizotrop olma durumlarını ele almışlardır. Gerilme ve şekil değiştirmeler, simetri nedeniyle, 340 eleman ile, yarısı alınarak, sonlu elemanlar ağı ile hesaplanmıştır. Elde edilen gerilme ve şekil değiştirmeler, boyutsuz katsayılar cinsinden ifade edilerek, sonuçlar sunulmuştur.

Pan (1989), tarafından düzlemsel anizotrop sonsuz uzaya etkiyen, tekil yük durumu için gerilme ve şekil değiştirmeler için tam kapalı bir çözüm sunulmuştur.

Wu ve ark. (2000), Hu ve Lekhnitskii'nin sonuçlarına dayanarak, düzlemsel anizotrop ve izotrop yarı-sonsuz ortam için, ilave düşey gerilme katsayıları kullanarak, birleştirilmiş bir çözüm sunmuşlardır. Bu çalışmada beş çeşit yükleme türü için çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme türleri düşey dairesel üniform yük, dikdörtgen üniform yük, lineer dağılımlı dikdörtgen yük, üniform-lineer ve şerit yüklerdir. Bu çalışmada verilen nümerik örnekler, ortamın anizotropi'sine bağlı olarak, gerilme katsayılarının değiştiğini göstermiştir.

İzotrop ortamlar için yapılan işleme benzer olarak, tekil yük için verilen gerilme ifadelerinin integrasyonu ile, farklı geometrilere sahip alanlar ve değişken yükleme türleri için, yarı sonsuz düzlemsel anizotrop ortam için, bazı çözüm önerileri sunulmuştur. Gelişigüzel bir geometriye sahip yüklü alanın, dikdörtgen ve üçgen gibi düzgün geometriye sahip, alt alanlara bölünmesi ile, toplam gerilmeler elde edilebilmektedir. Wang ve Liao (2002), tarafından dikdörtgen bir alan üzerine etkiyen; lineer artan yük, lineer azalan yük, üniform yük, konkav parabolik yük ve konveks parabolik yükleme türleri için çözümler önerilmiştir.

Wang (2003), düzlem anizotrop yarı sonsuz bir ortamdaki aksel yüklü bir kazığa uygulanan ve farklı yüklemeler sonucunda meydana gelen, gerilme ve şekil değiştirmeler için analitik bir çözüm sunmuştur. Yükleme tipleri: uç kazığı durumu için gömülü tekil kuvvet, üniform çevre sürtünmesi, lineer dağılımlı çevre sürtünmesi ve lineer olmayan dağılıma sahip kazık yanal sürtünmeleri durumudur. Çözümler, tekil kuvvetin kartezyen koordinat sisteminde integre edilmesi ile elde edilmiştir. Önceki çalışmalara benzer olarak, düzlem anizotrop ortamda oluşan gerilmeler ve şekil değiştirmelerin, malzemenin anizotropi derecesine, türüne ve yükleme türüne bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Wang ve ark. (2004), tarafından düzlem anizotrop ve yarı sonsuz bir ortam içine gömülü, dik üçgen şeklindeki bir alana, lineer olmadan etkiyen yükleme türleri için, tekil yükün integre edilmesi ile, çözüm sunulmuştur. Uygulanan lineer olmayan yükleme tipleri: x-y yükün etkilediği yatay düzlemi göstermek üzere, x yönünde değişken kuadratik değişken yük, y yönünde değişken kuadratik değişken yük, x yönünde kare-kök değişimli yük ve y yönünde kare-kök değişimli yüklerdir. Yükün zemin içine belirli bir derinlikte etkidiği dikkate alınarak, dik üçgen geometrisine sahip bir alan altındaki gerilme ifadeleri elde edilmiştir. Wang ve ark. (2004), ilave gerilmelerin; ortamın anizotropi derecesi ve türü, yüklü alanın boyutları ve yükleme türünden etkilendiğini belirtmişlerdir.

Gerilmeler zemin özellikleri ve başlangıç koşullarından etkilenirler. Oysa elastik çözümler, zemin özelliklerine (porozite, compasite v.s) yada başlangıç gerilme koşullarına herhangi bir bağımlılığı öngörmezler. Son zamanlarda, konu ile ilgili bazı araştırmalar mevcuttur. Gerilmelerin, zemin yoğunluğana bağımlılığı (titreşim etkisi ile) Zhu ve Clark (1994), tarafından araştırılmıştır. Zhu ve Clark, yanal gerilmelerin ölçülebildiği bir düzenek kullanarak, titreşim süresi ile yanal gerilmeler arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu araştırmaya göre, titreşim süresinin artması, yanal gerilmeler üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olmaktadır. Bu etkinin nedenini, zemin yoğunluğundaki artma ile açıklamışlardır.

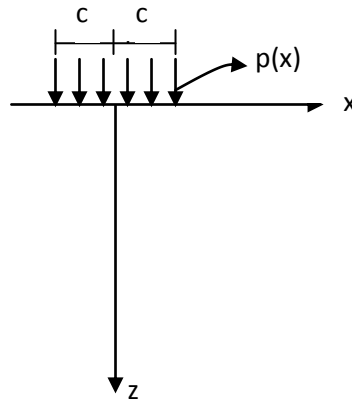
Schmertmann (2005), tarafından başlangıç gerilme koşullarının, ilave düşey gerilme artımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Schmertmann, yanal sınır gerilmelerinin kontrol edilebildiği, geniş bir kum kasası kullanarak, farklı başlangıç yanal gerilme düzeyleri için, kum yüzeyine uygulanan temel yükleri altında meydana gelen ilave gerilme artımlarını, gömülü basınç transduser'ler kullanarak ölçmüştür.  $K_0$ 'ın artması (yanal yükün artması) ile  $(\Delta\sigma_v/q)$  oranının (ilave gerilme artımının uygulanan temel gerilmesine oranı) arttığını bulmuştur.

### **2.10 Tekinsoy Yöntemi ile Düzlem Anizotropik Ortamda Gerilme Dağılımının Bulunması**

Zeminlerin oldukça geniş alanlarda yayılıma sahip olmaları nedeni ile, yanal deformasyonların ihmal edilebilecek mertebede olduğu ve  $K_0$  koşullarının geçerli bulunduğu varsayılabilir.  $K_0$  koşulları, zeminin kırılma durumundan çok denge durumuna işaret etmektedir.

Bu bölümde, ayrıntılı olarak verilecek olan çözümün daha anlaşılır olması için problem, başlangıçta “düzlem şekil değiştirme problemi” olarak ele alınacak ve daha sonra problemin

eksenel simetriye sahip olması özelliği kullanılarak, üç boyutlu genel hal için çözüm elde edilecektir. Ayrıca, problemin çözümü başlangıçta, tekil yük için gerçekleştirilecek ve daha sonra dairesel yük için gerilme ifadesi, tekil yükün entegrasyonu ile elde edilecektir. Gerilme yayılımı probleminde kullanılacak olan koordinat eksenleri ve tekil yükün sonsuz küçük bir  $c$  uzaklığında etkidiği varsayılarak, elde edilen uniform gerilme Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** Sonsuz küçük “ $c$ ” uzaklığına etkiyen tekil yük ve koordinat eksenleri (Tekinsoy ve Laman 2000).

Daha önce de belirtildiği gibi, zemin tabakalarının yatay yönde sonsuza gitmeleri nedeni ile, yatay yer değiştirmeler ihmal edilebilecek mertebede kalırlar. Bu nedenle  $K_0$  koşullarının geçerli olduğu kabul edilebilir. Bu durumda  $\varepsilon_1$  düşey yöndeki ve  $\varepsilon_2$  de yanal yöndeki asal deformasyonları göstermek üzere,  $\varepsilon_2 = 0$  olarak alınabilir. Deformasyonların küçük ve lineer oldukları varsayılırsa, ikinci deformasyon envaryantı, aşağıdaki gibi yazılabilir (Timoshenko 1951).

$$\varepsilon_x \cdot \varepsilon_z - \frac{\gamma_{xz}^2}{4} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (2.96)$$

$$\varepsilon_x \cdot \varepsilon_z - \frac{\gamma_{xz}^2}{4} = 0 \quad (2.97)$$

Bu eşitliklerden

$$\gamma_{xz} = 2\sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_z} \quad (2.98)$$

kayma deformasyonu ilişkisi bulunabilir.

Şimdi de zeminin sürekli bir ortam olduğu, fakat yatay ve düşey yönde farklı deformasyon özellikleri gösterdiği varsayılırsa, her iki yöndeki hacımsal sıkışma katsayısı farklı olur. Bu durumda aşağıdaki eşitlikler yazılabilirler.

$$m_{vx} = \frac{\Delta x}{x \Delta \sigma_x} \quad \text{ve} \quad m_{vz} = \frac{\Delta z}{z \Delta \sigma_z} \quad (2.99)$$

Burada  $\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x}$  ve  $\varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z}$ , olduğu düşünülürse, deformasyonların gerilme artımına bağlı olarak değişimi

$$\varepsilon_x = m_{vx} \Delta \sigma_x \quad \text{ve} \quad \varepsilon_z = m_{vz} \Delta \sigma_z \quad (2.100)$$

eşitlikleri ile ifade edilebilir. Bir konsolidasyon deneyinde, zemin örneğine ait z ve x kalınlığı, sırası ile  $z_0$  ve  $x_0$  gibi başlangıç kalınlığı olarak alınır ve toplam  $\sigma_x$  ve  $\sigma_z$  gerilmeleri cinsinden deformasyonlar

$$\varepsilon_x = m_{vx} \sigma_x \quad (2.101 a)$$



$$\varepsilon_z = m_{vz} \sigma_z \quad (2.101 \text{ b})$$

eşitlikleri ile verilebilir.  $m_{vx}$  ve  $m_{vz}$  'ye ait değerlerin konsolidasyon deneyleri ile bulunma olanağı vardır. Oysa konsolidasyon deneyinde  $K_0$  koşulları geçerlidir. Bu nedenle  $K_0$  koşulu için, basit kayma durumu, özellikle göz önüne alınacak olur ve yukarıda verilen bu eşitlikler, (2.98) numaralı eşitlikte yerine konular ve basit kayma durumu için  $\sigma_x = -\sigma_z = \tau_{xz}$  olduğu göz önüne alınır, kayma deformasyonu için

$$\gamma_{xz} = 2\tau_{xz} \sqrt{m_{vx} \cdot m_{vz}} \quad (2.102)$$

eşitliği elde edilir. Aynı eşitlik malzemenin lineer elastik varsayılması durumunda da geçerli olup, iki boyutlu gerilme durumunda, bilinen kayma gerilmesi ifadesi elde edilir.

Öte yandan söz konusu problem için, genel olarak uygunluk koşulu, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} \quad (2.103)$$

Verilen bu koşullarda,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_z$  ve  $\gamma_{xz}$  değerlerinin Eşitlik (2.101) ve Eşitlik (2.102) den alınarak, (2.103) numaralı uygunluk koşulunda yerine konulması ile

$$2\sqrt{m_{vx}^2 \left( \frac{m_{vz}}{m_{vx}} \right)} \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x \partial z} = m_{vx} \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial z^2} + m_{vz} \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial x^2} \quad (2.104 \text{ a})$$

ayrıca,  $s = \sqrt{\frac{m_{vz}}{m_{vx}}}$ , olduğu göz önünde bulundurularak

$$2s \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial z^2} + s^2 \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial x^2} \quad (2.104 \text{ b})$$

eşitlikleri elde edilir. Burada s parametresi, iki dik doğrultudaki zeminin sıkışabilme oranlarını göstermesi nedeni ile, zeminin anizotropik özelliğini temsil etmekte olup, (anisotropic ratio) tabakalaşmayı ifade eden bir özelliğe sahiptir (Tekinsoy ve Laman, 2000).

Airy gerilme fonksiyonu  $\phi$  ile gösterilirse, gerilme ifadelerinin aşağıdaki gibi alınması, diferansiyel denge denklemini sağlar.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad \tau_{xz} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} \quad \sigma_z = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (2.105)$$

Bu gerilme ifadelerinin (2.104b) numaralı Eşitlikte yerine konulması sonucu aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir.

$$s^2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2s \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial z^4} = 0 \quad (2.106 a)$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{s} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{1}{s} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.106 b)$$

Tsitovich (1976)'ya göre, zeminlerin çoğu taşınarak oluştuğu ve tabakalı bir yapı gösterdiği için, indeks ve mekanik özellikleri yatay yönde yaklaşık aynı kalırken, düşey yönde değişim göstermektedir. Bu durumda, her iki yatay yöndeki hacimsel sıkışma katsayıları eşit olarak alınabilir ( $m_{vx} = m_{vy}$ ). Öte yandan, problemin eksenel simetri özelliği içermesi nedeniyle, üç boyutlu durum için biharmonik denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{1}{s} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{1}{s} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.107)$$

burada x ve y, yatay koordinat eksenleri temsil etmektedir.

Benzer şekilde, problemin ekstenel simetriye sahip olması nedeni ile, silindirik koordinatlarda çalışmak kolaylık sağlayacaktır. Buna göre aşağıdaki diferansiyel denklem yazılabilir.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{s} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{s} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.108)$$

Burada,  $Z = \sqrt{s}z$  dönüşümü yapılırsa, biharmonik denklem elde edilir. Bunun çözümü ise Airy gerilme fonksiyonunu verecektir (Tekinsoy ve Laman 2000).

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (2.108)$$

$$\phi = A(r^2 + Z^2)^{1/2} \quad (2.109)$$

Eğer gerilmeler, aşağıda verildiği gibi alınırsa

$$\sigma_z = \frac{1}{s} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (2.110 a)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right) \quad (2.110 b)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{s} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z} \right) + \left( \frac{1}{z} \frac{\partial^2 \phi}{r^2} \right) \quad (2.110 c)$$

diferensiyel denge denklemleri sağlanır. Yukarıda verilen (2.109) numaralı Airy gerilme fonksiyonu'nun türevleri alınıp (2.110) numaralı gerilme ifadelerinde yerine konulursa, tekil yüke ait gerilme ifadeleri için, aşağıdaki eşitlikler bulunur.

$$\sigma_z = -3As \frac{z^3}{(r^2 + sz^2)^{5/2}} \quad (2.111 \text{ a})$$

$$\tau_{rz} = -3As \frac{rz^2}{(r^2 + sz^2)^{5/2}} \quad (2.111 \text{ b})$$

$$\sigma_r = -2A \frac{z}{(r^2 + sz^2)^{3/2}} + 3A \frac{s^2 z^3}{(r^2 + sz^2)^{5/2}} \quad (2.111 \text{ c})$$

İntegrasyon katsıysı A'yı bulmak için, aşağıdaki sınır koşulu kullanılırsa,

$$P = \int_0^{\infty} 2\pi r \sigma_z dr \quad (2.112)$$

$$A = \frac{\sqrt{sP}}{2\pi} \text{ olarak bulunur.}$$

Bu durumda  $\sigma_z$  düşey gerilmesi için, aşağıda verilen denklem elde edilir.

$$\sigma_z = \frac{3s^{3/2}P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + sz^2)^{5/2}} \quad (2.113)$$

Tekil kuvvet için bulunan bu ifade, değişik geometriye sahip yükler için integre edilirse, birbirinden farklı gerilme ifadeleri çıkar.

Dairesel bir alana etkiyen, uniform yayılı bir yükün oluşturduğu gerilme dağılımını bulmak için, Eşitlik (2.113) ile verilen ifadenin, Green fonksiyonu kabul edilerek, yarıçap R'ye göre integre edilmesi gerekmektedir. Bu durumda,

$$d\sigma_z = \frac{3s^{3/2}}{2\pi} dP \frac{z^3}{(r^2 + sZ^2)^{5/2}}$$

$$dP = 2\pi r q_0 dr$$

$$\sigma_z = 3s^{3/2} q_0 z^3 \int_{r=0}^{r=R} \frac{r dr}{(r^2 + sZ^2)^{5/2}}$$

İntegral işleminin yapılması ile, daireSEL bir alana etkiyen uniform yüklü bir alan için, gerilme deyiimi aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\sigma_z = q_0 \left[ 1 - \frac{s^{3/2} z^3}{(R^2 + sZ^2)^{3/2}} \right] \quad (2.114)$$

Ancak bulunan bu gerilme, ortamın sürekli bir ortam olarak kabul edilmesi ile elde edilmiştir. Daha önceden de ifade edildiği gibi elastik çözümler, gerilmeye maruz kalan ortam özelliklerinin gerilmelere etkisine yönelik, herhangi bir ilişkiyi içermezler. Poroz ortamda gerilme dağılımının ortama ait boşluk miktarı, geometrisi ve zemin iskeletinin değme mekanizması gibi faktörlerden etkileneceği tahmin edilmektedir. Bu konuda yapılan bazı araştırmalar, zemin içinde meydana gelen ilave gerilme artımlarının, zeminin yoğunluğu ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Zemin yoğunluğunun artması, meydana gelen ilave gerilmelerin artmasına neden olmaktadır (Zhu and Clark 1994, Keskin 2004).

Zeminlerde danelerin sıkışmadığı ve sıkışmanın boşluk hacmindeki değişmeden ileri geldiği varsayılmaktadır. Bu durumda şekil değiştirmeler, porozitenin değişimi ile oluşur. Buna göre kompasite (doluluk oranı) aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\Psi = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} \quad (2.115)$$

Burada V ve V<sub>v</sub> sırası ile, toplam hacim ve boşluk hacmini simgelemektedir. V<sub>v</sub>=zA<sub>v</sub> ve V=zA eşitliklerinin yukarıdaki denklemde yerlerine konulması ile, kompasite, aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\psi = 1 - n = 1 - \frac{A_v}{A} \quad (2.116)$$

eşitlikte n poroziteyi, A ve A<sub>v</sub> ise, sırası ile toplam kesit alanı ve boşluk kesit alanını göstermektedir. Bu durumda daneler tarafından aktarılan gerilme için, yukarıda verilen ifade göz önüne alınarak, aşağıdakiler yazılabilir.

$$\sigma_a = \frac{P}{A - A_v} = \frac{P}{A \left( 1 - \frac{A_v}{A} \right)} \quad (2.117)$$

$$\sigma_a = \frac{P}{A\psi} = \frac{\sigma}{\psi} \quad (2.118)$$

Denklem (2.118), zemin içinde oluşan ilave gerilmelerin, kompasiteden etkilendiğini göstermektedir. Burada  $\sigma_a$  sürekli ortama ait gerçek gerilme olarak düşünülebilir ve  $\sigma$  ise nominal gerilmeyi ifade eder.  $\psi$  kompasitesinin değeri, zemin parametreleri cinsinden, kuru birim hacim ağırlığının dane birim hacim ağırlığına oranı olarak yazılabilir ( $\frac{\gamma_k}{\gamma_s}$ ).

Öte yandan (2.114) nolu ifade ile bulunan  $\sigma_z$  gerilmesi, ortamın sürekli bir ortam olduğu varsayımı ile elde edilmiş gerilmedir. Ancak, zemin mekaniği hesaplamalarında nominal gerilmeler kullanılmaktadır. Buna göre (2.114) numaralı ifadede verilen gerilme değeri, (2.118) numaralı ifadede yerine konulmakla, aşağıdaki düşey gerilme eşitliği bulunmuş olur.

$$\sigma_z = \frac{\gamma_k}{\gamma_s} q_o \left[ 1 - \frac{s^{3/2} z^3}{(R^2 + s z^2)^{3/2}} \right] \quad (2.119)$$

burada  $\sigma_z$  deneylerde ölçülen nominal düşey gerilmeyi göstermektedir.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Hesaplamalarda Kullanılan Zeminlerin Özellikleri

##### 3.1.1. Tarsus Yenice Kilinin Özellikleri

Deneyisel çalışmada kullanılan Yenice kili, yüksek plastik (CH) türde bir kil olup, yeşilimsi-kahverengine sahiptir. Söz konusu zemin üzerinde kıvam limitleri ve elek analizleri gerçekleştirilmiştir. Alınan zemin örnekleri kullanılarak elde edilen deney sonuçlarına ait değişim aralıkları Çizelge 3.1. de verilmiştir (Taskiran 2006).

**Çizelge 3.1.** Zemin parametrelerine ait değişim aralıklar

<i>Zemin Özellikleri</i>	<b>Değişim Aralığı</b>
Doğal Su İçeriği, %	54-63
Likit Limit, %	65-85
Plastik Limit, %	13.7-22.5
Plastisite Indisi, %	27.6-44.8
# 4 Elekten Geçen, %	99.5-100
# 200 Elekten Geçen, %	78.3-99.7
Tek Eksenli Basınç Dayanımı, $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	94.9-140.9
Doğal Birim Hacim Ağırlığı, gr/cm <sup>3</sup>	1.90-1.96
Özgül Ağırlık, $G_s$	2.61-2.63
Grup Sembölü	CI- CH



#### 3.1.2. Winnipeg Kilinin Özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılan Winnipeg kili, Graham ve ark. (1983), tarafından üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan parametreler kullanılmıştır. Alınan zemin örnekleri kullanılarak elde edilen deney sonuçlarına ait değişim aralıkları Çizelge 3.2. de verilmiştir.

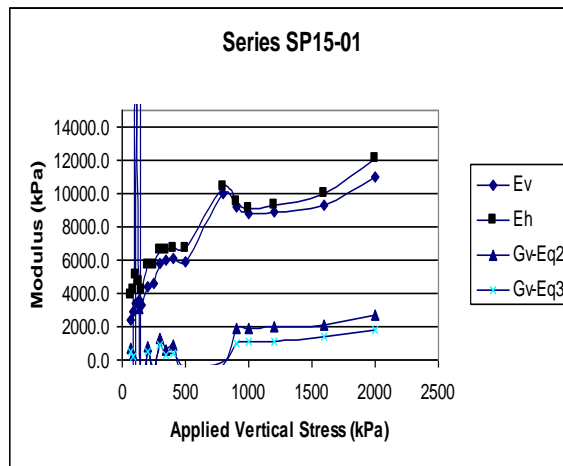
**Çizelge 3.2.** Zemin parametrelerine ait değişim aralıkları

<b>Zemin Özellikleri</b>	<b>Değişim Aralığı</b>
Doğal Su İçeriği, %	24.4-28.2
Likit Limit, %	41.3-67.3
Duyarlılık	3-4
Plastisite Indisi, %	35-60
Drenajsız Kayma Gerilmesi K <sub>pa</sub>	50-75
Sıkıştırma İndeksi	0.6-1.1
Kil kısmı	70-80
Normal Konsolide	17-5

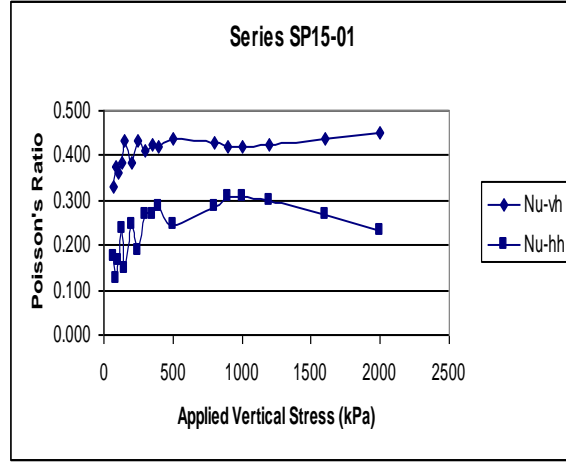
### 3.1.3 Speswhite Kaolen Kilinin Özellikleri

Gareau, ve ark. (2005), Speswhite kaolen kilinde, özel bir düzenek kullanarak yanal gerilme ve deformatsiyon ölçümlü gerçekleştirdikleri konsolidasyon deneyi ile elde ettikleri anizotropik parametreleri gösteren deney sonuçları aşağıda şekil 3.1.ve 3.2. de verilmiştir. Zeminler genel olarak geoteknik uygulama anizotropik varsayırlırlar.

Geoteknik uygulama alanında, zeminlerin anizotrop oldukları hususunda genel bir farkındalık söz konusudur. Ayrıca, zemindeki gerilme-şekil değiştirme bağıntısının doğrusal yönlü olmadığı; ancak, daima çok küçük çaplı basınç artışları olduğu ve elasto-plastik oldukları kabul edilmektedir. Dahası, şekil değiştirme (gerilim) sertleşmesi ve sertliğin zamana bağımlılığını örneklemek açısından karmaşık zemin modelleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte, kabul gören birçok tasarım metotları, en azından üstü kapalı bir şekilde, doğrusal yönlü elastik, izotropik davranışı varsaymaktadır. Bu şekilde ortaya çıkmasının temel nedeni, anizotropi yönteminin tasarım uygulaması ile birleştirilmesinin karmaşık, zaman alan ve her durumda oldukça maliyetli bir işlem olmasıdır. Ayrıca, anizotropi pek çok farklı şekilde tanımlanabilir ve buna bağlı olarak, anizotrop toprak davranışı için tasarım standartlarını belirlemek güçtür. Sonuç olarak, anizotrop materyaller için elastik parametrelerin ölçümü, hem teknik açıdan hem de maliyet bakımından oldukça zordur.



Şekil 3.1. Young modül ve kayma modülleri



Şekil 3.2. Poisson oranları

## 3.2 Kullanılan Bilgisayar programları

### 3.2.1 Sonlu Elemanlar Çözümleri İçin Yararlanılan Bilgisayar Yazılımı

Bu çalışmada, zeminin anizotrop-elastik bir ortam olduğu kabul edilerek gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizleri gerçekleştirmek için, sayısal modellerden yararlanarak çözümlere yapan, bilgisayar programlarından yararlanılmıştır. Sayısal modellerin oluşturulması amacıyla, sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözümlere yapabilen Geo Studio programı kullanılmıştır. Geo Studio, pek çok mühendislik dalında kullanılan ve birçok mühendislik probleminin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmış, bir bilgisayar yazılımıdır. Program 8 farklı alanlarda çözümler yapmaktadır. Bunlar Şev, Yer altı sızıntıları, Deformasyon ve Gerilmeler, Dinamik analizler, Zemin ısı değişimleri, Yer altı hava etkileşim analizleri, Çevresel atık analizleri yapmaktadır. Bu çalışmada, modelimizi deformasyon ve gerilmeler modülü kullanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2 Orjigin Pro Bilgisayar Programı

Origin Pro programı 1991 yılından bu yana kolay kullanımından dolayı birçok bilim adamı ve mühendislerce kullanılan ve profesyonel mevcut veriler için kapsamlı bir çözüm sağlayan, Eğri uydurma, Bazal ve pik analizi uydurma, Sinyal işleme, Matematik, İstatistik hesaplamalar, grafik analizleri çözen ve oluşturan bir yazılım programıdır. Bu çalışmada Speswhite kaolen kiline ait parametreleri, şekil 3.1 ve şekil 3.2 verilen değerleri grafikten bulabilmek için Origin Pro programı kullanılmıştır.

## 4.BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1.1 Hesaplarda Kullanılan Yenice Kiline Ait anizotropik Parametreler

Bu kısımda, yüzeyde dairesel bir alana dağılmış normal aksenal simetrik yük taşıyan elastik, düzlemsel anizotropik yarı uzay sürekli ortamında gerilme ve deplasman dağılımını değerlendiren analizler yapılmıştır. Düşey ve yatay normal gerilmelerin yük merkezi altında dağılımı, geniş bir modül oranı aralığında maksimum kayma gerilmeleri ve deplasmanların;  $n$ ,  $m$ , ve Poisson oranı;  $\nu_{vh}$ , incelenmiştir.

Gerilme/deplasman analizlerini gerçekleştirmek için, düzlemsel anizotropik ortam için sonlu eleman yöntemi (FEM) kullanılmıştır. Sorunun geometrisi ve FEM çözüm örgüsü, Şekil 4.1.'de verilmiştir. Çözüm olarak 1 m yarıçapında ve 100 kPa taşıyan dairesel bir alan için aksenal simetrik analizler benimsenmiştir. Tüm FEM analizleri, piyasada Geostudio adıyla mevcut paket programla yapılmıştır. Analizler için Geostudio'nun Sigma/W yazılım ürünü kullanılmıştır. Zemin için, lineer elastik düzlemsel anizotropik malzemeli 2D-aksenal simetrik model varsayılmıştır. Programa girilen giriş parametreleri, düşey yönde Young modülü,  $E_v$ , yatay yöde Young modülü,  $E_H$ , Poisson oranı,  $\nu_{vH}$ ; ve, Poisson oranı  $\nu_{HH}$ , kayma modülü herhangi bir düşey düzlemde yani malzemenin simetrisinin düşey eksenine paralel düzlemde kayma  $G_{vH}$  'dir.

Daha doğru değerler elde etmek için, yükleme alanı altındaki mesh sayısı artırılmıştır. meshler için altı nodlu elemanlar kullanılmıştır.

*Sınır koşulları:* simetri eksenini, modelin sol düşey sınırı, sadece x yönünde (yatay) tutulmuştur ve z yönünde (düşey) serbestçe deplasman yapabilmesi için serbest bırakılmıştır. Burada, x ve y, birbirine dik iki yatay yöndür ve z, düşey yönü gösterir. Modelin sağ ve altı, hem düşey hem de yatay yönlerde tutulmuştur.

Model geometrisinin boyutu, uygun derinlik ve en benimsenerek sınır etkisi ve skala etkisini giderecek şekilde seçilmiştir. Analizin sonunda, elde edilen tüm gerilme değerleri, yüzey gerilmesine ( $P_0$ ) bölünerek boyutsuz olarak sunulmuştur.

Beş düzlemsel anizotropik parametre programa girilerek gerilme/deplasman analizleri gerçekleştirilmiştir. Yenice kili için, daha önceki bölümde açıklanan laboratuvar prosedüründen beş bağımsız parametreyi içeren bir veri seti elde edilmiştir. Bu kile has veri setine dayanarak, çeşitli “anizotropi tür ve derecesine” tekabül eden farklı yeni veri setleri oluşturulmuştur. Bunun için şu prosedür takip edilmiştir: önce, n ve m değerleri için gerçekçi bir aralık seçilmiştir (örneğin n için 0,20, 0,50, 0,90,...3,9). Eşitlik 2.26 ’teki ilişkiye dayanarak ilgili  $\alpha$  değerleri hesaplandı. Hesaplanan  $\alpha$  değerlerine dayanarak, Eşitlik 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20 yardımıyla beş anizotropik elastik parametre hesaplandı (belirli bir düşey Young modülü için). Örneğin: a için seçilen n=0.20 için,  $\alpha$ , 0.447 olarak hesaplandı ( $\alpha = \sqrt{n}$ ) ve sonra Eşitlik 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20’deki ilişkiler kullanılarak ilgili beş anizotropik parametre hesaplandı. Spesifik “n” değerine tekabül eden m değerleri, 0.185 olarak hesaplandı ( $m = \alpha / 2(1 + \nu^*)$ ). Böylece, her seferinde yeni bir n değeri seçerek farklı “tür ve derecelerde” anizotropiye karşılık gelen farklı veri setleri oluşturuldu. Seçilen m değeri için de benzer bir prosedür takip edildi. Elde edilen veri setleri Çizelge 4.1.’de görülmektedir.

**Çizelge 4.1.**Yenice kiline ait parametreler

Yenice Kiline ait Parametreler							
m	n	Alfa	Ev	Eh	Vvh	Vhh	Gvh
0,100	0,059	0,242	3303	193	0,87	0,21	330
0,200	0,234	0,484	3303	774	0,43	0,21	661
0,330	0,638	0,799	3303	2107	0,26	0,21	1090
0,500	1,464	1,210	3303	4836	0,17	0,21	1652
0,750	3,294	1,815	3303	10881	0,12	0,21	2477
1,000	5,856	2,420	3303	19344	0,09	0,21	3303
n	m	Alfa	Ev	Eh	Vvh	Vhh	Gvh
0,200	0,185	0,447	3303	661	0,47	0,21	610
0,500	0,292	0,707	3303	1652	0,30	0,21	965
0,900	0,392	0,949	3303	2973	0,22	0,21	1295
1,000	0,413	1,000	3303	3303	0,21	0,21	1365
2,000	0,584	1,414	3303	6606	0,15	0,21	1930
3,000	0,716	1,732	3303	9909	0,12	0,21	2364
3,500	0,773	1,871	3303	11561	0,11	0,21	2553
3,900	0,816	1,975	3303	12882	0,11	0,21	2695

$$[E_v(1-\nu_{hh})/E_h]-2\nu_{vh}^2 \geq 0 \quad (4.1)$$

Bu prosedürün ardından, elde edilen Eşitlik 4.1’de verilen ilişki kullanılarak tüm veri setlerinin, pozitif gerinim enerjisi koşullarını sağlayıp sağlamadıkları kontrol edildi. Eşitlik 4.1’yi sağlayamayan anizotropik veri setleri hemen elendi.

FEM analizleri sonucu elde edilen gerilme ve deplasmanlar, Şekil 4.2, 4.3..’lerde verilmiştir.

Şekil 4.4, 4.9, 4.13, 4.17 düşey yüzey deplasman profillerini göstermekten Şekil 4.2, 4.3, 4.5, 4.6, 4.7 düşey, radyal ve maksimum kayma gerilimlerinin dağılımını göstermektedir. Bu durumda, iki rakamın da, hem n’deki ve hem de m’deki değişimlere karşı gözle görülür derecede hassasiyet gösterdiği görülmektedir.

#### 4.1.2 Hesaplarda Kullanılan Winnipeg Kiline Ait Anizotropik Parametreler

Beş düzlemsel anizotropik parametre programa girilerek gerilme/deplasman analizleri gerçekleştirilmiştir. Wnlypek kili için, daha önceki bölümde açıklanan laboratuvar prosedüründen beş bağımsız parametreyi içeren bir veri seti elde edilmiştir. Bu kile has veri setine dayanarak, çeşitli “anizotropi tür ve derecesine” tekabül eden farklı yeni veri setleri oluşturulmuştur. Daha sonra şu prosedür takip edilmiştir: önce, n ve m değerleri için gerçekçi bir aralık seçilmiştir (örneğin n için 0,20, 0,50, 0,90,...3,9). Eşitlik 2.26’teki ilişkiye dayanarak ilgili  $\alpha$  değerleri hesaplandı. Hesaplanan  $\alpha$  değerlerine dayanarak, Eşitlik 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20 yardımıyla beş anizotropik elastik parametre hesaplandı (belirli bir düşey Young modülü için). Örneğin: for a seçilen n=0.20 için,  $\alpha$ , 0.447 olarak hesaplandı ( $\alpha = \sqrt{n}$ ) ve sonra Eşitlik 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20’daki ilişkiler kullanılarak ilgili beş anizotropik parametre hesaplandı. Spesifik “n” değerine tekabül eden m değerleri, 0.185 olarak hesaplandı ( $m = \alpha / 2(1 + \nu^*)$ ). Böylece, her seferinde yeni bir n değeri seçerek farklı “tür ve derecelerde” anizotropiye karşılık gelen farklı veri setleri oluşturuldu. Seçilen m değeri için de benzer bir prosedür takip edildi. Elde edilen veri setleri Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Winnipeg kiline ait parametreler

<b>Winnipeg Kilinin Parametreleri</b>							
<b>m</b>	<b>n</b>	<b>Alfa</b>	<b>Ev</b>	<b>Eh</b>	<b>Vvh</b>	<b>Vhh</b>	<b>Gvh</b>
0,100	0,061	0,246	4993	302	0,93	0,23	499
0,200	0,242	0,492	4993	1209	0,47	0,23	999
0,330	0,659	0,812	4993	3290	0,28	0,23	1648
0,500	1,513	1,230	4993	7554	0,19	0,23	2497
0,750	3,404	1,845	4993	16996	0,12	0,23	3745
1,000	6,052	2,460	4993	30216	0,09	0,23	4993
<b>n</b>	<b>m</b>	<b>Alfa</b>	<b>Ev</b>	<b>Eh</b>	<b>Vvh</b>	<b>Vhh</b>	<b>Gvh</b>
0,200	0,182	0,447	4993	999	0,51	0,23	908
0,500	0,287	0,707	4993	2497	0,33	0,23	1435
0,900	0,386	0,949	4993	4494	0,24	0,23	1926
1,000	0,407	1,000	4993	4993	0,23	0,23	2030
2,000	0,575	1,414	4993	9986	0,16	0,23	2870
3,000	0,704	1,732	4993	14979	0,13	0,23	3515
3,500	0,760	1,871	4993	17476	0,12	0,23	3797
3,900	0,803	1,975	4993	19473	0,12	0,23	4008



### 4.1.3 Hesaplarda Kullanılan Speswhite kaolen kiline Kiline Ait parametreler

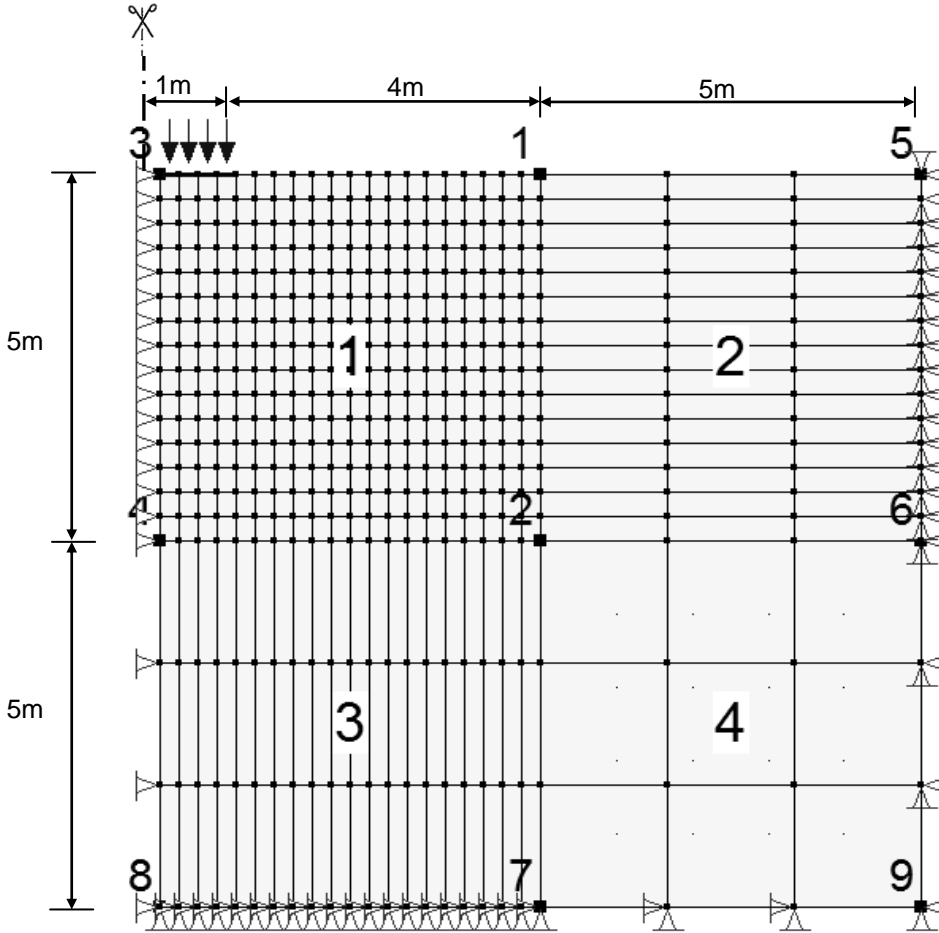
Speswhite kaolen kiline ait veri setlerindeki Ev, Eh, Vvh, Vhh vd Gvh değerleri Orjigin Pro programı yardımı ile tablodan okundu ve kademeli P veri setleri oluşturuldu. Seçilen P değeri için de benzer bir prosedür takip edildi. Elde edilen veri setleri Çizelge 4.3'te görülmektedir.

Çizelge 4.3. Speswhite kaolen kiline Ait Parametreler

P (kN/m <sup>2</sup> )	L.F. Gareau, D.J. Ngan-Tillard, and A. Swart Parametreleri							
	m	n	$\alpha$	E <sub>v</sub>	E <sub>h</sub>	v <sub>vh</sub>	v <sub>hh</sub>	G <sub>vh</sub>
50	0,231	0,298	0,545	2400	4000	0,33	0,18	200
100	0,155	0,123	0,351	3100	4250	0,37	0,13	250
150	0,160	0,138	0,372	3300	4410	0,43	0,16	300
200	0,248	0,379	0,615	4295	5670	0,39	0,24	350
250	0,186	0,195	0,442	4680	5830	0,43	0,19	400
300	0,259	0,434	0,659	5620	6300	0,41	0,27	460
350	0,260	0,444	0,667	5710	6400	0,42	0,28	510
400	0,254	0,424	0,651	5750	6510	0,43	0,28	550
450	0,233	0,338	0,581	5840	6570	0,43	0,25	610
500	0,227	0,323	0,568	5910	6610	0,44	0,25	660
1000	0,282	0,545	0,738	8800	9110	0,42	0,31	1100
1500	0,249	0,405	0,636	9110	9710	0,44	0,28	1300
2000	0,203	0,250	0,500	11000	11980	0,46	0,23	1790

## 4.2 Gerilme ve Deformasyonlar İçin Sonlu Elemanlar Analizleri

### 4.2.1 Sonlu eleman modelinin oluşturulması



Şekil 4.1. Plaxis’de oluşturulmuş sonlu eleman modülü

Sonlu elemanlar yönteminin temeli, gerçek fiziksel problemin, özellikleri bilenen daha basit bir problemle yer değiştirmesi olarak tarif edilebilir. Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1966 yılında Clough ve Woodward tarafından dolgulardaki gerilme ve yer değiştirmeleri elde etmek amacıyla kullanılmıştır. (U.S Army Corps of Engineers

1990) Geoteknik problemlerin analizinde sonlu elemanlar yönteminin yaygın olarak kullanılması, uygulama ve teorideki gelişimi son otuz yılda gerçekleşmiştir. Geoteknik mühendisliğinde yöntemin kullanımının uzay-uçak, makine ve yapı mühendisliklerinin gerisinde kalması incelediği malzemenin kompleks yapısına bağlanabilir. Diğer mühendisliklerden farklı olarak, incelediği malzeme bir betonarme veya çelik yapı elemanı gibi imal edilmemiştir. Bundan dolayı malzemenin mühendislik basitleri her bir zemin için ayrı ayrı bulunmalı ve heterojen yapısı da göz önüne alınmalıdır. Bunların ışığında, yapılan matematiksel modelin arazideki temel altı zeminin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini birebir yansıtmasını beklemek zeminin bütün bilinmeyenlerini göz önüne alırsak mümkün görünmemektedir. Yaygın olarak kullanım alanı bulunmuş zemin modelleri dahi gerçek zeminin bütün karakteristiklerini yansıtamaları nedeniyle elde edilen sonuçların ne kadar gerçekçi olduğu tartışmaya açıktır. Yine de sonlu elemanlar yönteminin, modellenen fiziksel problemdeki çok sayıda parametrenin birbirine ve problemin çözümüne olan etkilerinin hesaba katılmasına olanak sağlaması geoteknik mühendisliğinde tercih sebebi olmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemi ile fiziksel bir problemin analizinde ilk adım fiziksel problemin geometrisinin sonlu elemanlar olarak adlandırılan ve birbirlerine düğüm noktaları ile bağlı bir, iki veya üç boyutlu alt bölgelere ayrılmasıdır. Böylece fiziksel problemin geometrisi idealleştirilmiş olur. Analizdeki detaylı olarak incelenecek bölgede eleman sayısı artırılmalıdır. Ancak literatürdeki bir çok çalışma, eleman sayısının kullanılan eleman tipine bağlı olarak, belli bir limit değeri aşması halinde hatalar birikimiyle analiz sonuçlarının gerçek değerden uzaklaştırdığını göstermiştir. Buna ek olarak eleman sayısını artması ile problemin analizi için gereken süre de artmaktadır (Zienkiewicz, O.C. ve Taylor, R.L. 2000 , Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A. ve Shiomi, T. 1998, Cook, R.D. 1994, Felippa, C.A. 2004, Dumanoğlu, A.A. ve Muvafık, M. 2001).

İkinci adım analizde göz önüne alınacak alan değişkeni olarak yer değiştirmeler, gerilmeler veya her ikisi birlikte seçilmelidir. Geoteknik mühendisliğinde ve rijit cisim mekaniğinde kullanılan paket programların çoğu alan değişkeni olarak yer değiştirme modelini seçmektedir. Bunu nedeni birçok problem için daha az bilinmeyenli denklem takımlarıyla sonuca gitmesi olarak gösterilebilir. Yer değiştirme modelinde eleman sınırlarında bulunan, düğüm noktaları arasında, eleman içinde nasıl değişeceğini öngören yaklaşım belirlenir. Sonlu eleman içinde sürekli fonksiyonların lineer, kuadratik veya kübik kombinasyonu cinsinden ifade edileceği kabulüne dayanan bu yaklaşım gerçekte eleman üzerinde bir çeşit interpolasyondur. Bu çalışmada da alan değişkeni olarak yer değiştirmeler seçilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntem, mühendislik mekaniğinde karşılaşılan fiziksel problemlere, diferansiyel denklemlerden oluşan matematiksel modellerle çözümler sunmaktadır. Geometrisi sonlu elemanlara bölünen fiziksel problemin tümünde geçerli olan diferansiyel denklem veya denklem takımının bu alt bölgelerde de geçerli olduğu kabul edilir. Yöntem incelenecek parametrenin, sonlu elemanlarda ve sistemin tümündeki değişiminin elde edilebilmesi itibarıyla sürekli ortamları modellemede başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Analizde üçüncü adım olarak, dış yükler altında dengede bulunan bir sistemin, kinematik ve geometrik sınır koşullarına uyacak ölçüde deplasman yapması durumunda, uygulanan dış yüklerin yaptığı işin sistemin şekil değiştirme enerjisine eşit olması esasına dayanan minimum potansiyel enerji gibi varyasyon prensipleri ile eleman eşitliklerinin kurulmasıdır. Eleman eşitlikleri çözümünden elde edilen eleman rijitlik ( direngenlik ) matrisleri eleman düğüm noktaları gözetilerek sistem rijitlik matrisi oluşturulur.

Eleman eşitliklerine benzer şekilde sistem eşitliği kurulur. Sınır koşullarının tatbiki ve denklem takımının çözümü ile eleman düğüm noktalarında aranan alan değişkeni elde edilir. Daha sonra ek işlemlerle amaca yönelik olarak düğüm noktalarındaki gerilme, şekil değiştirme, hız vb. değerler elde edilebilir.

Sonlu elemanlar yönteminde fiziksel bir sistem modellendikten sonra aynı fiziksel problemin farklı sınır koşulları kolayca tanımlanabilmekte ve bu sayede değişik sınır koşullarının incelenmesi çok kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile fiziksel bir problemin analizi gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, yöntemin fiziksel problemlerin matematiksel modelleri analizini gerçekleştirdiği ve matematiksel modelin sınırları ötesinde fiziksel problem hakkında veri elde edilemeyeceğidir. Bu nedenle uygulamacı mühendislerin kullandıkları paket programların matematiksel modellerini, hiç olmazsa sınırlarını iyi bilmeleri problemlerin analizinden doğru veriler almaları ve bu verileri yorumlamaları açısından önem taşımaktadır.

### 4.3. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

Araştırmanın bu bölümünde, iki ana çalışma yapılmıştır. Öncelikle, yüzey deplasmanları için FEM analizleriyle elde edilen sonuçlar ve düzlemsel anizotropik bir malzeme farz edilen elastik homojen bir yarı uzayın homojen dağılımlı dairesel yüzey yüklemesinden kaynaklanan gerilme dağılımı sunulmuş ve tartışılmıştır. İkinci olarak, üç parametrelili anizotropi temsiliyle elde edilen gerilmeler / deplasmanlar, sadece bir parametrenin değiştirildiği, diğerlerinin tipik sabit değerlerinin muhafaza edildiği mutlak parametrik yolla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu ikinci kısmın gerçekleştirilme sebebi, bu iki yöntemle elde edilen gerilmeler/deplasmanlar arasındaki farkın derecesini görmektir.

Şekil 4.4 ve 4.13'teki deplasmanlar gibi, yüzey deplasmanlarının, bu çalışmada kullanılan  $n$  ve  $m$  modül oranları gerçekçi aralığında değişimlere karşı neredeyse iki katına çıktığı görülmektedir. Yine,  $n$  ve/veya  $m$  modül oranları arttıkça, daha az deplasman yaşanmıştır. Şekil 4.4 ve 4.13'te kesikli çizgiyle verilen  $n=1$  eğrisi, izotropik koşulu temsil eder.  $n$  ve  $m$  değerleriyle temsil edilen çeşitli tür ve derecedeki anizotropiye tekabül eden yerleşimler arasındaki fark, dikey eksen boyunca derinlikle azalma gösterir. Şekil 4.4 ve 4.13'teki son eğriye ait “ $m, n$ ” çiftinin ( $m=1, n=6.05$ ), daha önce belirtildiği gibi  $n$  değeri 4'ten büyük olduğu için gerçekçi olmadığı görülmektedir.

Şekil 4.2 ve 4.10'da görülen düşey gerilmelerle ilgili olarak, gerilmelerin, hem  $n$ 'deki ve hem de  $m$ 'deki değişimlere hassas olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca,  $n$  yada  $m$  değeri arttıkça düşey eksen etrafındaki gerilme konsantrasyonunun azaldığı da görülmektedir. Yani, daha büyük  $n$  ve  $m$  değerleri için ortamın yük yayılma kapasitesi artmaktadır. Gerilmelerin bu davranışı, Gazates'in 1983 yılında gerçekleştirdiği ve  $n$  veya  $m$  modül oranları arttıkça  $\sigma_z$  gerilmelerinin azaldığını bulduğu parametrik çalışmayla uyusmaktadır. Bu Geo-teknik uygulamalarda, çok aşırı konsolide killer yada sıkıştırılmış zemin gibi nispeten büyük  $n$  değerine sahip zeminler, uygulanan temel yüklerine karşı daha iyi yük yayılma kapasitelerine sahiptirler. Şekil 4.2 ve 4.10'da, seçilen  $n$  değerleri ve her bir  $n$  değeri için hesaplanan  $m$  değerlerinin de, zeminlerin gerçekçi aralığında bulunması dikkate değerdir. Bu çalışmada erişilen en önemli sonuçlardan biri,  $n$  değerlerinin artmasıyla ilgili  $m$  değerlerinin de artmasıdır. Yani, bir toprağın  $n$  değeri artırılmaya çalışıldığında (sıkıştırma gibi)  $m$  değeri de artacaktır (zeminin kayma rijitliği artacaktır). Şekil 4.2 ve 4.10'da görüldüğü gibi, çeşitli  $n$  değerleri için gerilmeler arasındaki fark, yaklaşık 1.33R derinlikte en yüksek değerini almaktadır.

Şekil 4.10 b)'deki  $\sigma_z$  gerilmeleri göz önüne alındığında da, benzer sonuçlar elde edilmektedir. Yani, m değerleri arttıkça, dikey eksen etrafındaki  $\sigma_z$  gerilme konsantrasyonu azalmaktadır ve dolayısıyla, yük yayılma kapasitesi artmaktadır. Şekilde de görüleceği gibi, gerilmelerin, n'deki değişimlere kıyasla m'deki değişimlere daha hassas olduklarını söylemek mümkündür. Şekil 4.2 ve 4.10'na göre, önceki çalışmalarda olduğu gibi seçilen m değerleri gerçekçi aralıkta bulunmakla beraber, zeminler için bunlara karşılık hesaplanan tüm n değerleri gerçekçi aralıkta bulunmamaktadır. m=1 için n 6,05 olarak hesaplanmıştır ve bu, n için gerçekçi bir değer değildir.

Şekil 4.2 ve 4.10'la ilgili olarak, n(1 için derinlikli gerilmelere kıyasla, n>1 (n=1 izotropiyi temsil eder) veya nispeten yüksek m eksilme değerleri için daha hızlı gerilmeler elde edilmiştir. Bu, daha yüksek modül oranlarına n (yatay yönde düşeye kıyasla daha katı) yada daha yüksek kayma rijititesine sahip düzlemsel anizotropik malzemeler, derinliği daha az gerilmeler meydana getirirken, nispeten düşük n veya m değerine sahip toprakların gerilmesi, nispeten daha derin kısımlara ilettiğini gösterir.

Şekil 4.3 ve 4.11'da verilen radyal gerilmelerin,  $\sigma_r$  değerlendirilmesinde, yaklaşık 0,67R'den daha az derinlikler için daha yüksek n değerlerinin, daha yüksek  $\sigma_r$  gerilmelerinin elde edildiği açıkça görülmektedir ve o derinliğin altında bunun tersi doğrudur. Aynı Şekilden görüleceği üzere, radyal gerilmeler, ortamın anizotropik karakterine bakılmaksızın, yaklaşık bir yarıçap derinlikte azalmaktadır. Yine, radyal gerilmelerin n veya m'deki değişikliklere duyarlı oldukları da görülmektedir. Zeminin anizotropik karakteri n veya m azaldıkça,  $\sigma_r$  gerilmelerinin de azaldığı görülmektedir. Ortamın “yanal desteğindeki” bu azalma, yaşanan daha geniş yerleşimi açıklar. Bu sonuçlar, Gazates'in 1983 yılında yaptığı araştırmayla oldukça uyumludur.

Şekil 4.5 ve 4.12'ye göre, sığ yerlerde m ve n arttıkça maksimum kayma gerilmeleri,  $\tau_{max}$ , azalmaktadır ve 0.67R civarında ırak bir pik elde edilmektedir. n arttıkça, maksimum kayma gerilmeleri,  $\tau_{max}$ , sifira daha çok yaklaşır ve bu da,  $\sigma_r$  'ın  $\sigma_z$  'a yaklaşma eğilimini yansıtır. Bu vakada, 'gerilme hali', 'izotropik' koşullara yaklaşmaktadır.

Burada, üç parametrelili anizotropi temsiliyle elde edilen gerilme/deplasman sonuçları, parametrik araştırmalarda mutlak yolla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar, Şekil 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve Şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.13'da sunulmuştur. Parametrik araştırma yapmak için boyutsuz parametreler, modül oranı m 0.413 olarak sabit tutulurken n değeri, sırasıyla 0.2 ve 3.5 olarak değiştirilmek suretiyle elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve Şekil

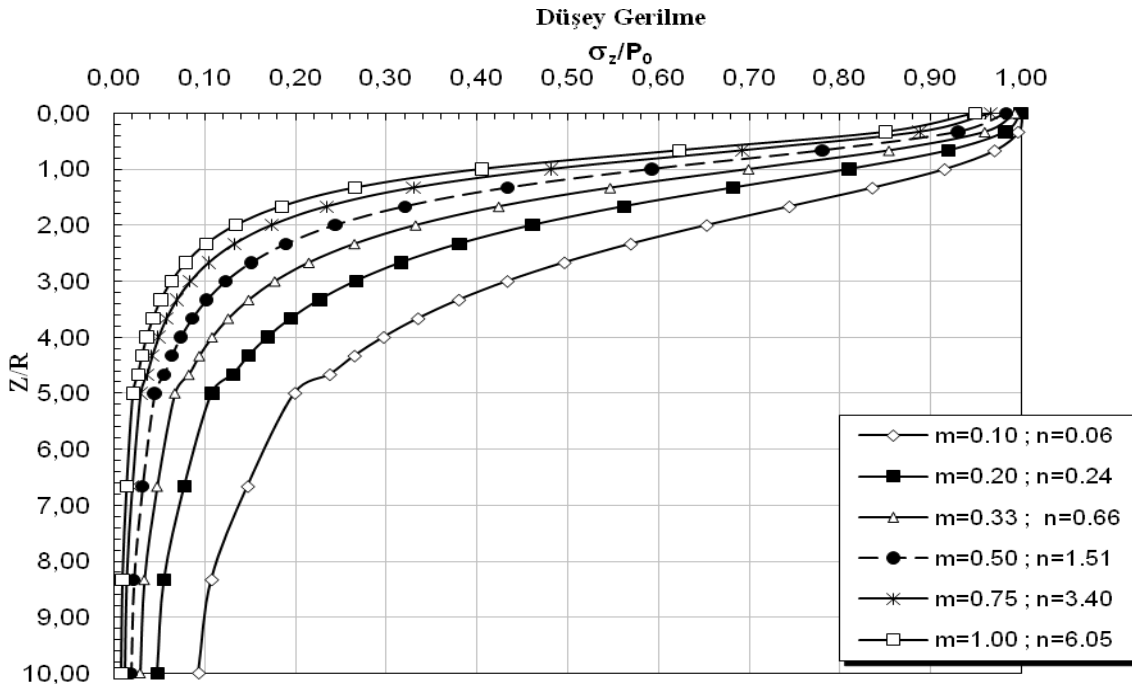
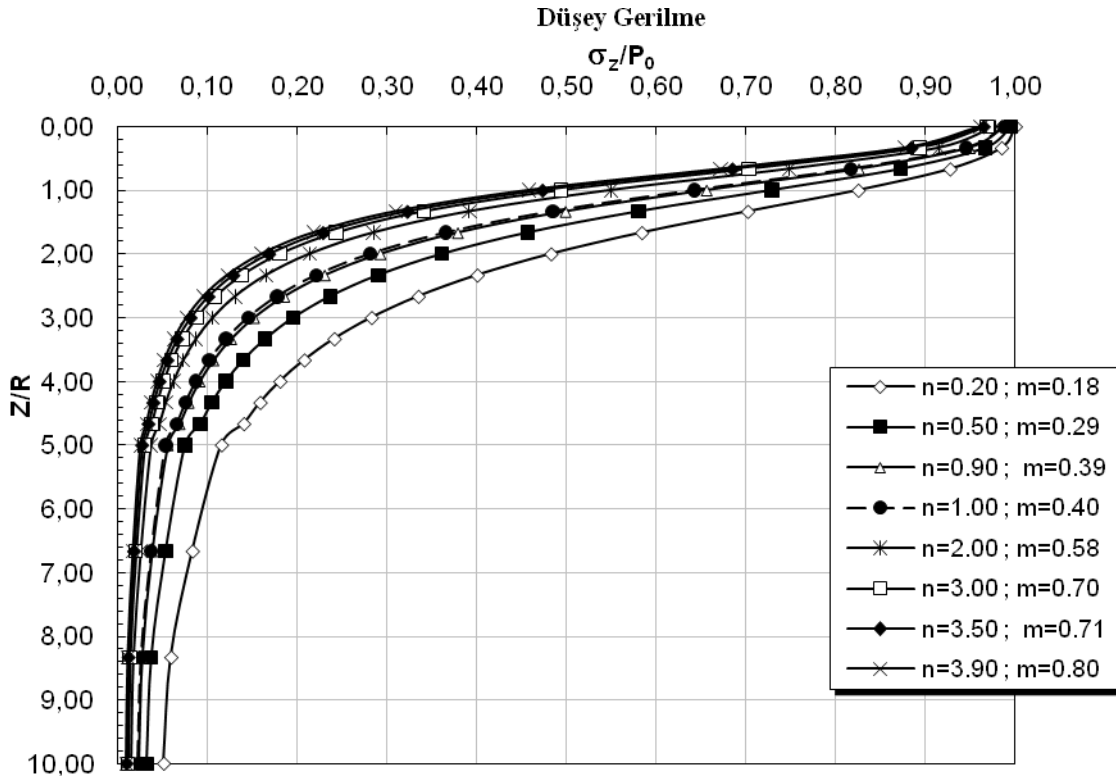
4.9’da beş eğri bulunmaktadır. Ortadaki “ $n=1, m=0,413$ ” değerlerine sahip eğri izotropiyi temsil ederken,  $n=0,2, m=0,413$  ve  $n=3.5, m=0,413$  eğrileri, sabit  $m$  değerleriyle değişik türde iki farklı anizotropiyi temsil etmektedir ( $n>1$  yatayda daha katı ve  $n<1$  dikeyde daha katı). “ $n=0,2, m=0,185$ ” ve “ $n=3.5, m=0.773$ ” eğrileri, hem  $m$  ve  $n$  modül oranları hem de  $v_{vh}$  birlikte değiştirilmiş üç parametrelili anizotropi temsiliyle elde edilmişlerdir.

Şekil 4.6 ve 4.8.’le ilgili olarak,  $n=0.2$  ve  $n=3.5$  değerleriyle ilgili tüm anizotropi aralığında düşey gerilmelerde,  $\sigma_z$ , “gerilme farkı”, mutata parametrik çalışmayla elde edilenden daha yüksek üç parametrelili anizotropi temsiliyle elde edilmiştir. Yine Şekilde görüleceği üzere, mutata yolla elde edilene kıyasla  $n>1$  tipi anizotropi için daha küçük dikey gerilmeler elde edilirken ( $n=3.5$  için iki eğriye bakınız),  $n<1$  zemin tipi için yaşanan düşey gerilmeler daha büyüktür ( $n=0.2$  için iki eğriye bakınız). Bu farkın sebebi, gerilmelerin,  $n$  ve  $m$ ’deki değişimlere hassas olması yani gerilmelerin iki parametrenin de katkısıyla meydana gelmesidir. Nispeten sık yerlerde “gerilme farkı” küçüktür fakat derinlikle artarak  $n=3.5$  için neredeyse maksimum %10’a ve  $n=0.2$  için maksimum % 8’e çıkabilir.

İki  $n$  değeri için radyal gerilmelerdeki fark,  $\sigma_r$ , bu çalışmada kullanılan üç parametrelili anizotropiyle daha küçük elde edilmiştir. Düşey gerilmelerin aksine, şekilden de görülebileceği gibi, mutata parametrik yolla elde edilene kıyasla  $n>1$  tipi anizotropi için daha küçük radyal gerilmeler elde edilirken  $n<1$  tipi anizotropiyle daha büyük radyal gerilmeler elde edilmiştir. Yüzeydeki “gerilme farkı”,  $n=3.5$  için yaklaşık %7 ve  $n=0.2$  için ihmal edilebilir düzeydedir.

Şekil 4.7 ve 4.9’daki deplasmanları incelediğimizde, üç parametrelili anizotropi temsiliyle elde edilen iki modül oranına ( $n=3.5$  ve  $n=0.2$ ) tekabül eden deplasmanlar arasındaki fark daha büyüktür. Şekilden de görüleceği gibi, mutata parametrik yolla elde edilen deplasmanlara kıyasla,  $n>1$  tipi anizotropiyle elde edilen deplasmanlar daha küçükken  $n<1$  tipi zeminler için daha büyüktür. Üç parametrelili ve mutata parametrik yollarla elde edilen yüzey “yerleşim farkı”,  $n=3.5$  için % 9 ve  $n=0.2$  için % 12’dir.

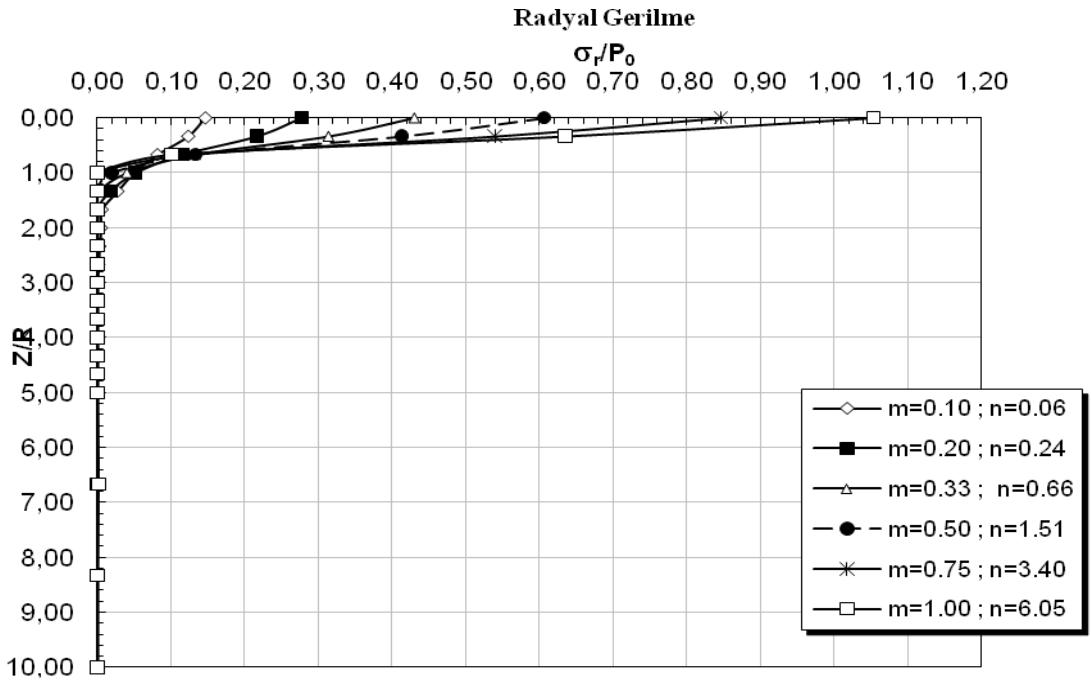
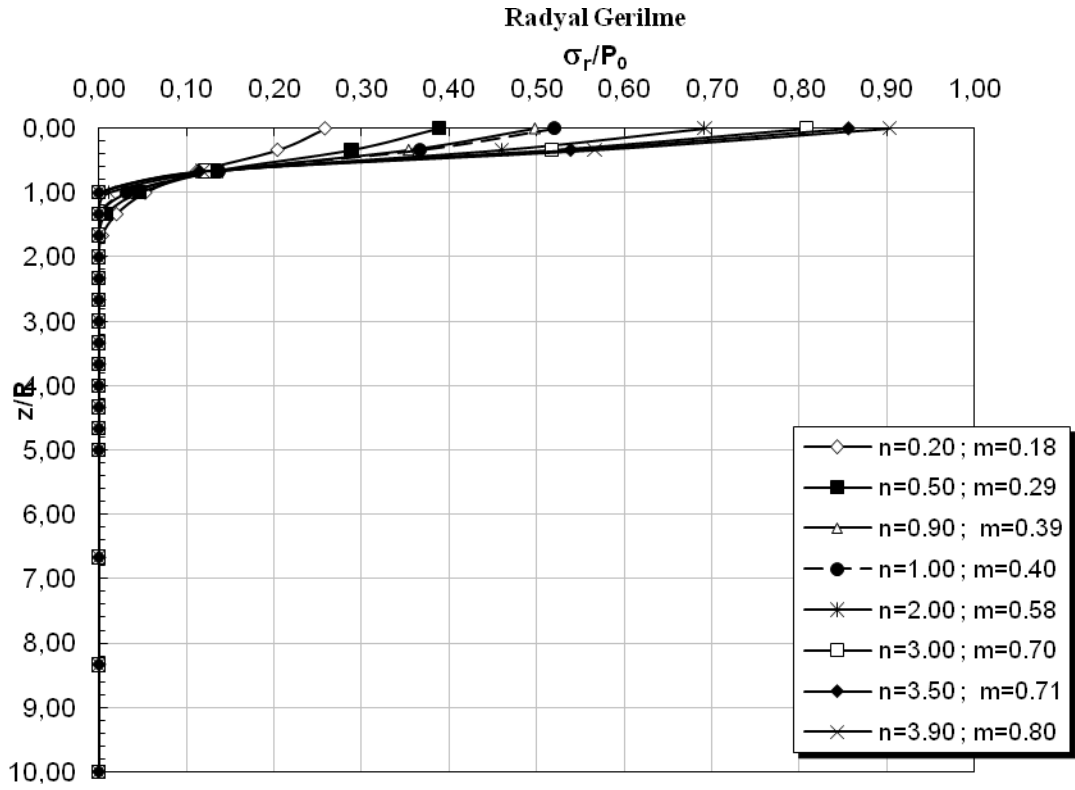
## 4.3.1 Yenice Kili İçin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Değerlendirme



Şekil 4.2. Yenice kiline ait Boyutsuz düşey gerilmelerin derinliğe göre dağılımı

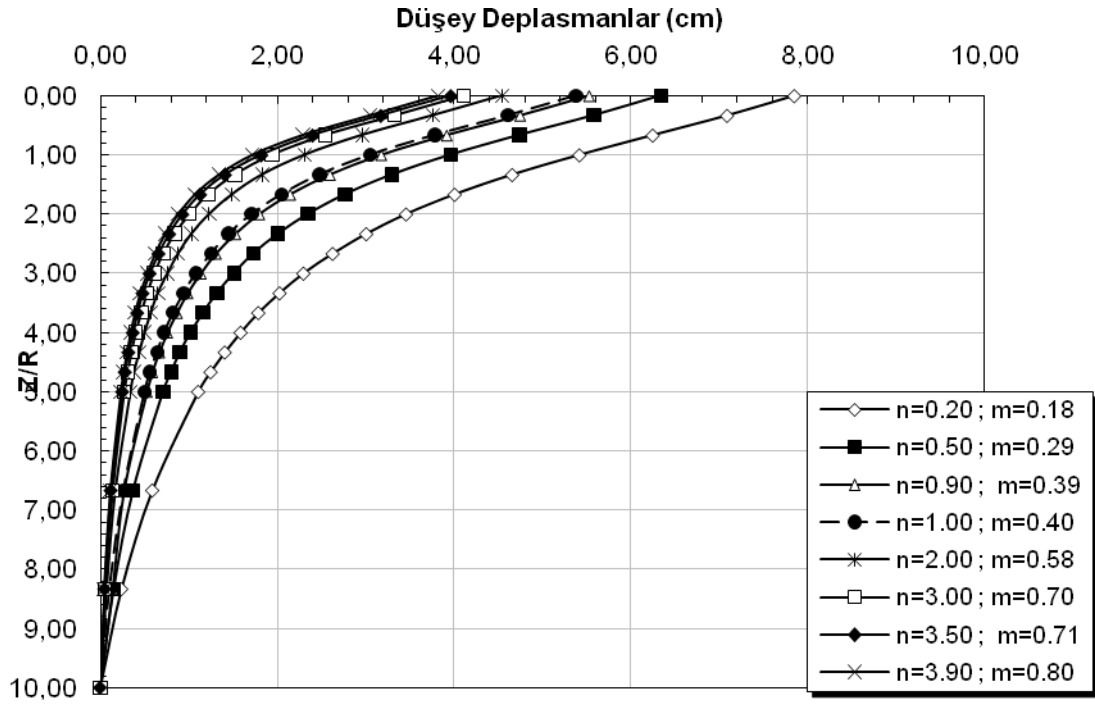
a) n için değerleri b) m için Değerleri



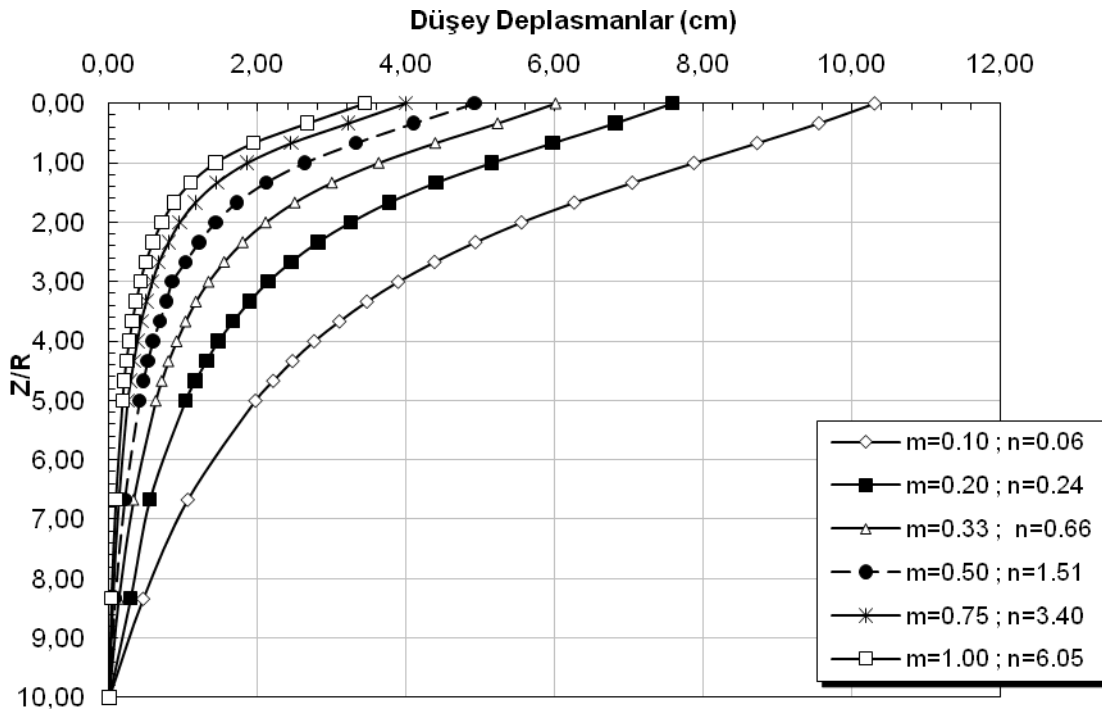


Şekil 4.3. Yenice kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin derinliğe göre dağılımı

a) n için değerleri b) m için Değerleri



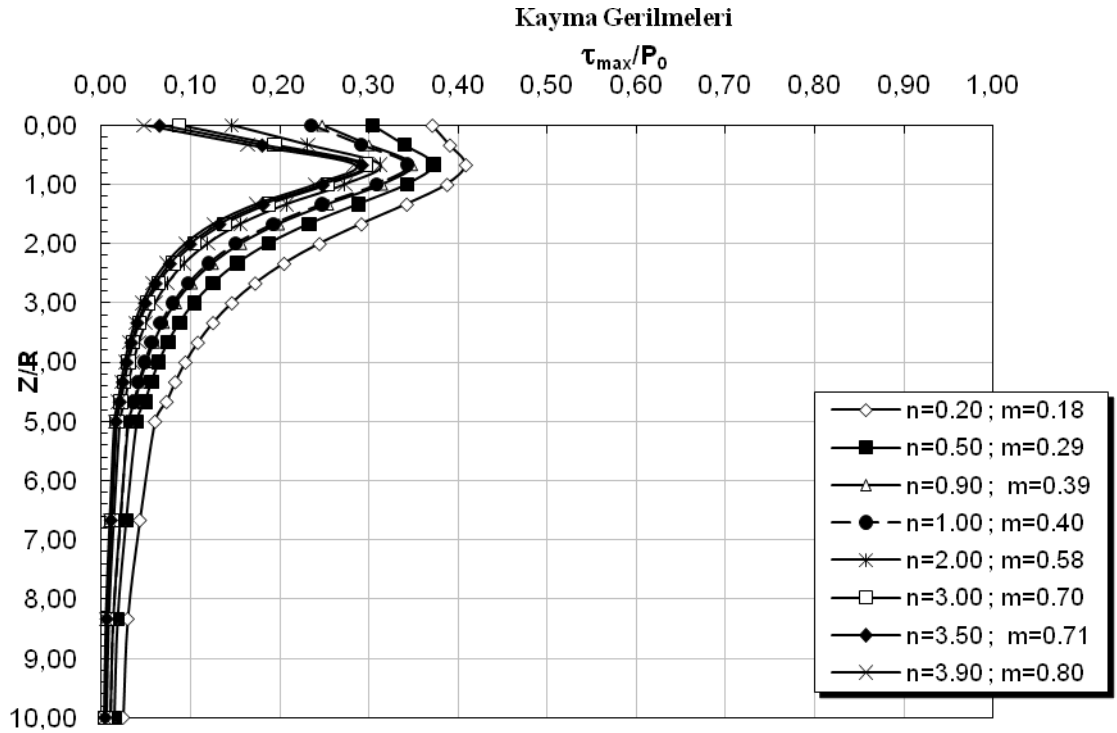
a)



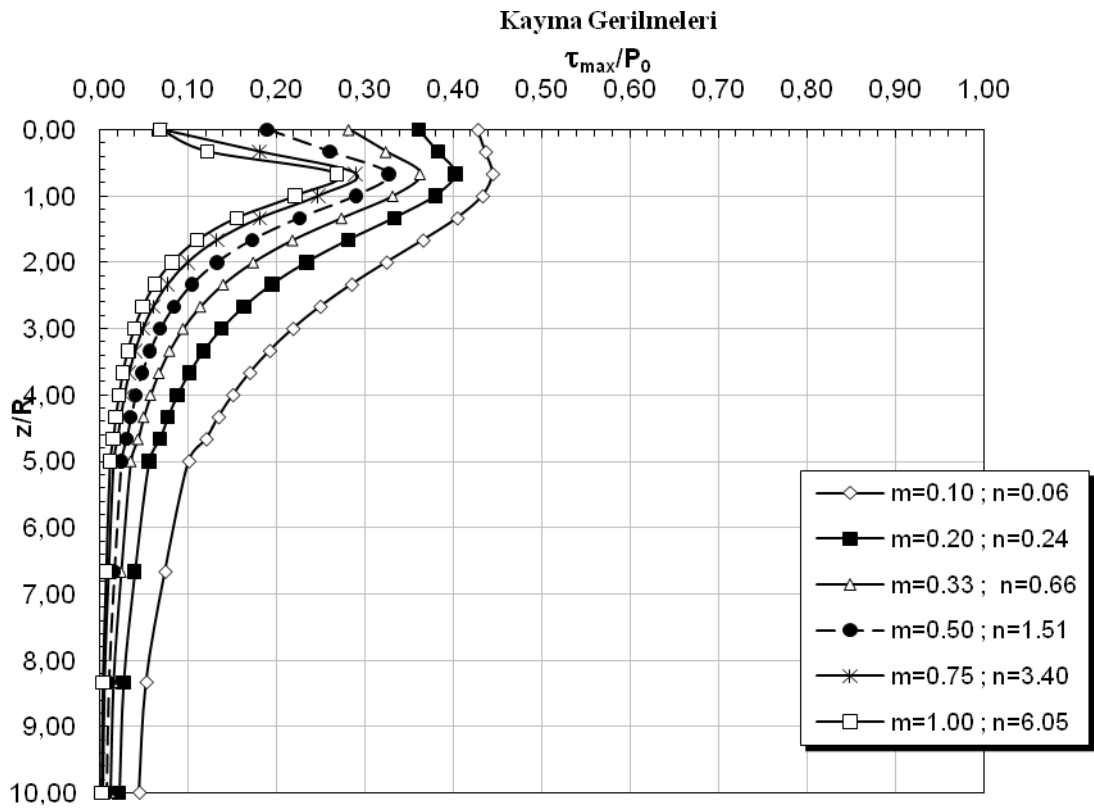
b

Şekil 4.4. Yenice kiline ait Deplasmanların derinliğe göre dağılımı

a) n için değerleri b) m için Değerleri



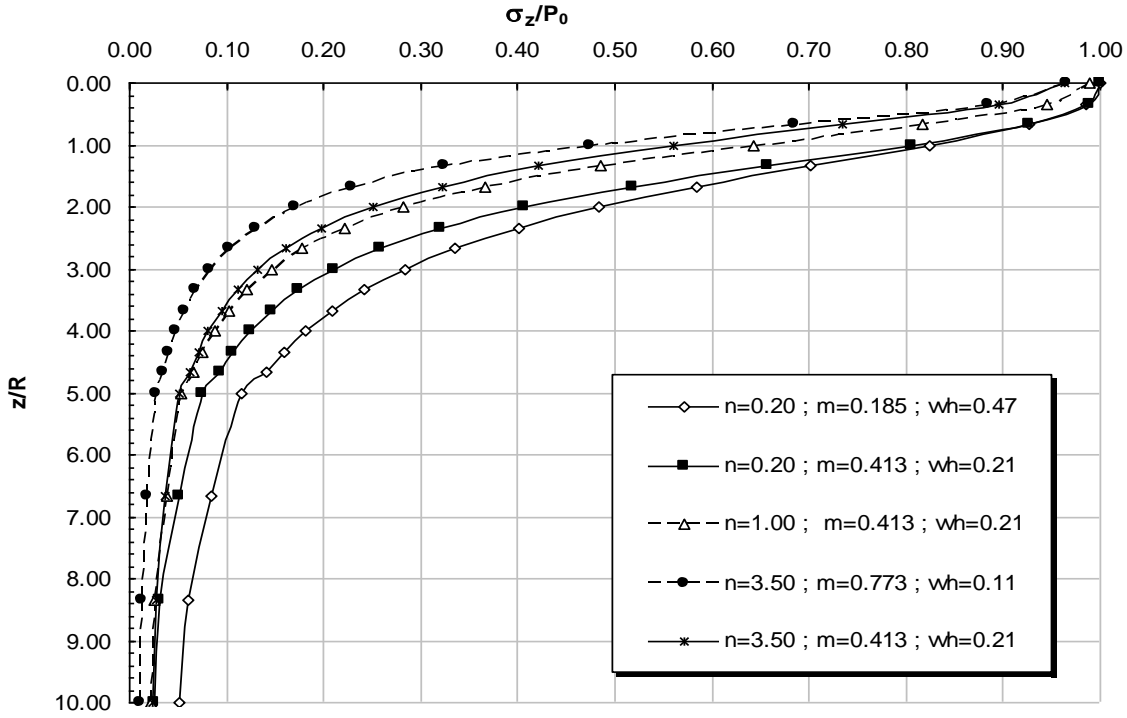
a)



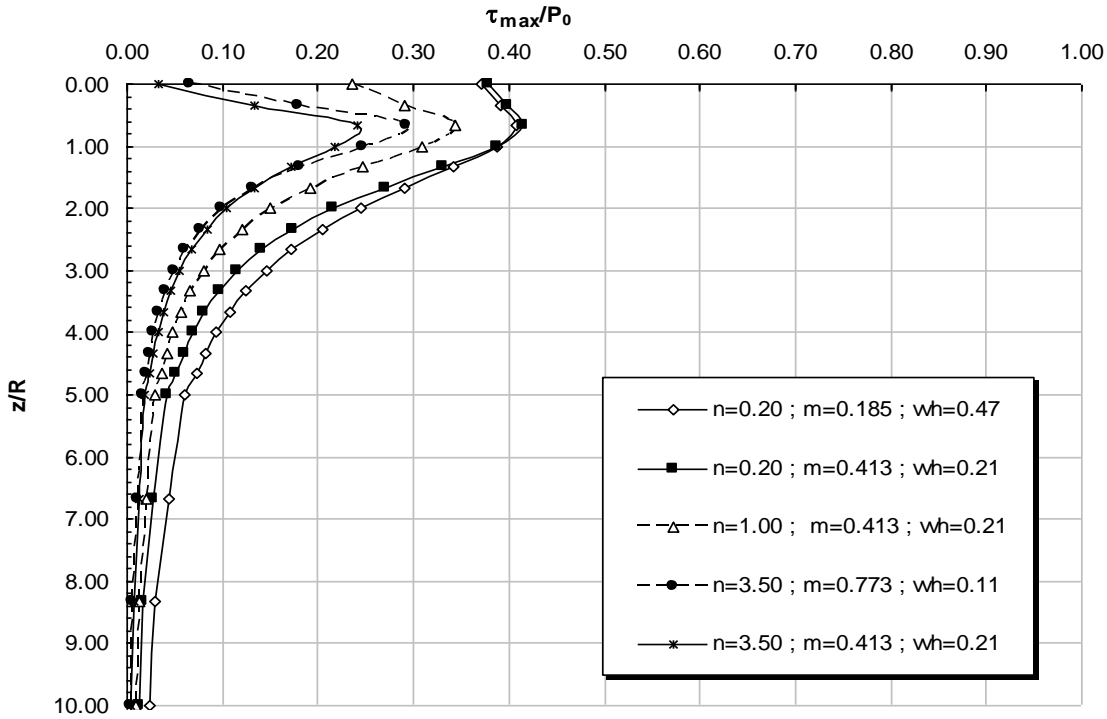
b)

Şekil 4.5. Yenice kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin derinliğe göre dağılımı

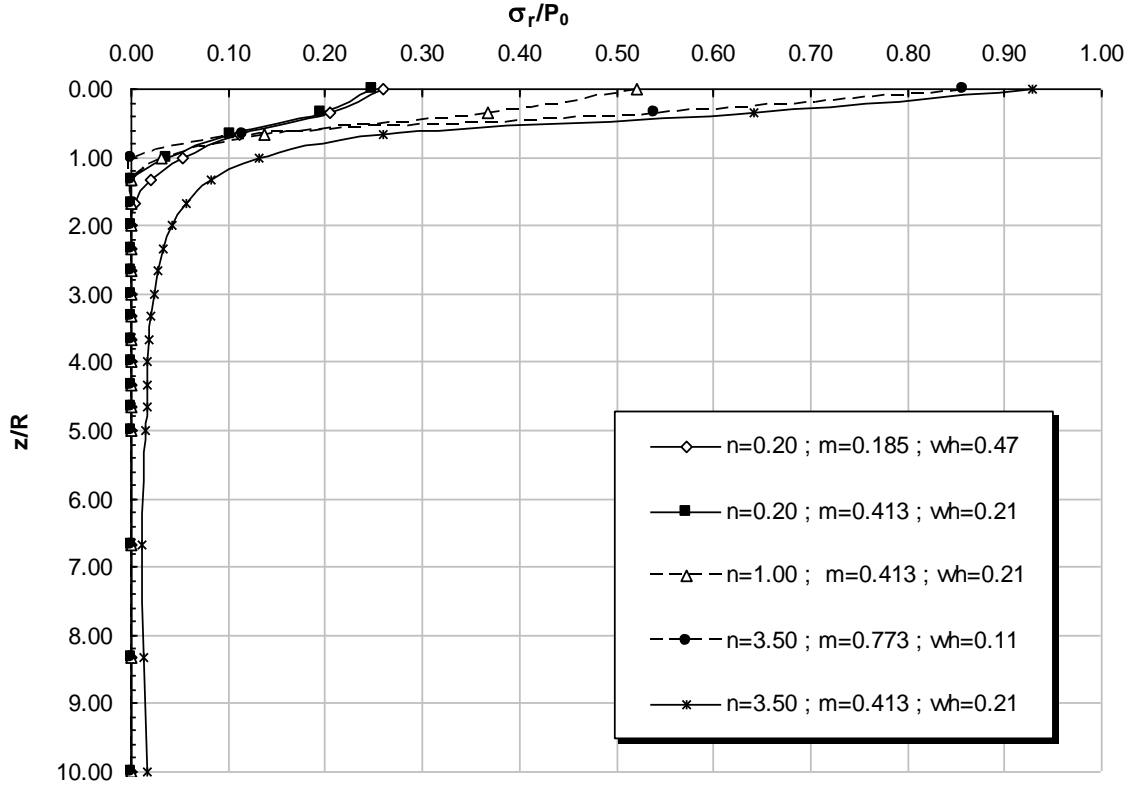
a) n için değerleri b) m için Değerleri



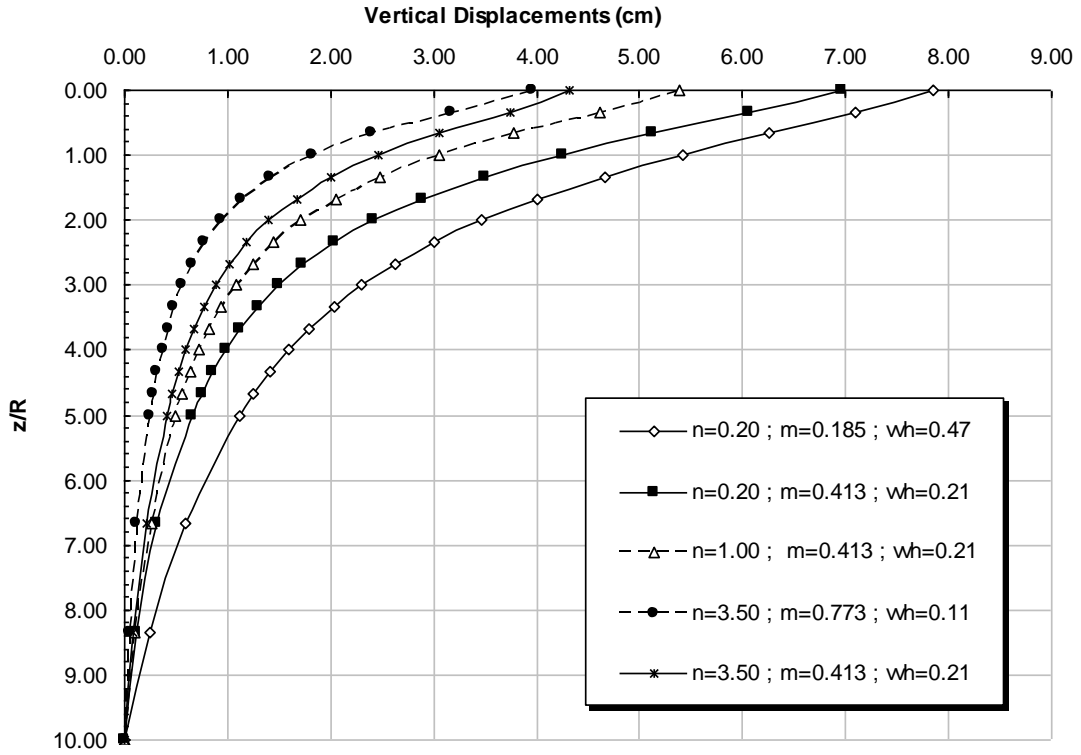
Şekil 4.6.Yenice kiline ait Boyutsuz Düşey Gerilmelerin Derinliğe Göre Dağılımı



Şekil.4.7.Yenice kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin derinliğe göre dağılımı

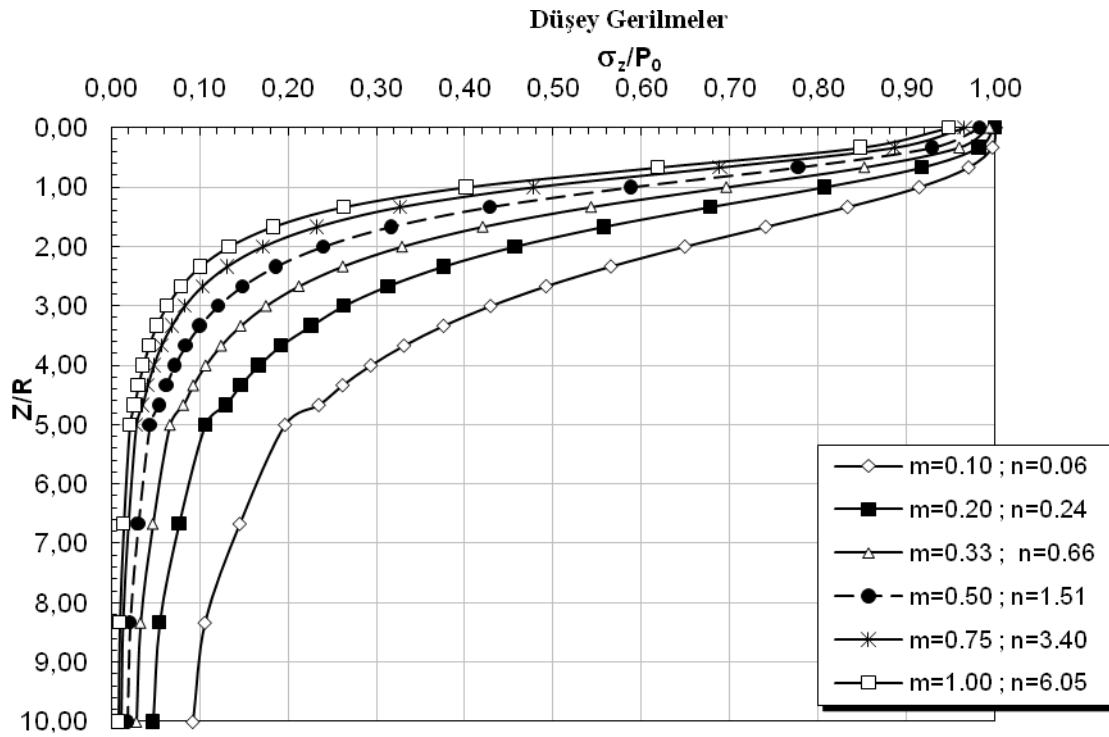
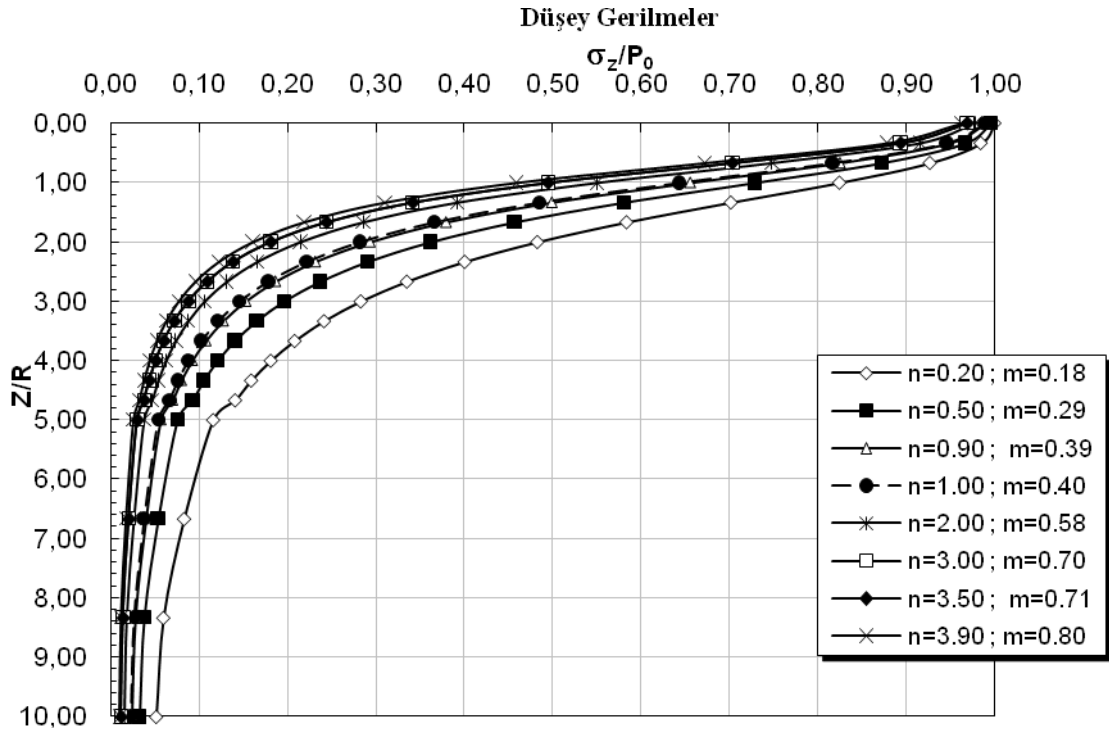


Şekil 4.8. Yenice kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin derinliğe göre dağılımı



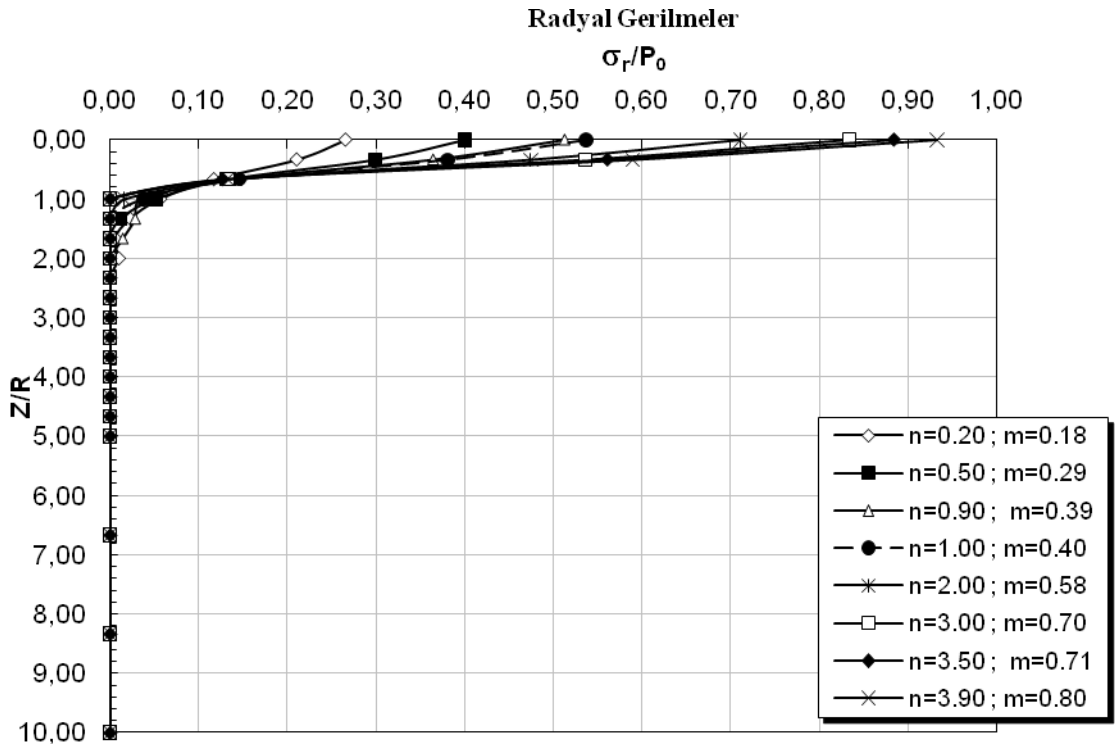
Şekil 4.9. Yenice kiline ait Deplasmanların derinliğe göre dağılımı

## 4.3.2. Winnipeg Kili İçin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

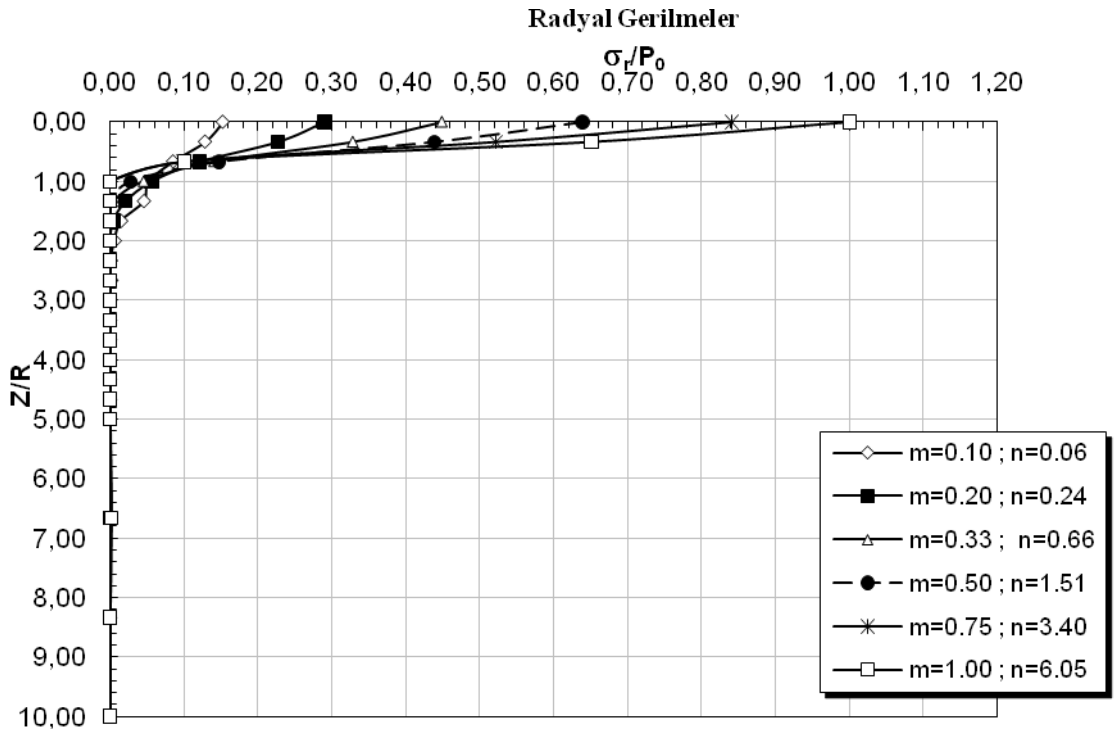


Şekil 4.10. Winnipeg kiline ait Boyutsuz düşey gerilmelerin derinliğe göre dağılımı

a) n için değerleri b) m için Değerleri



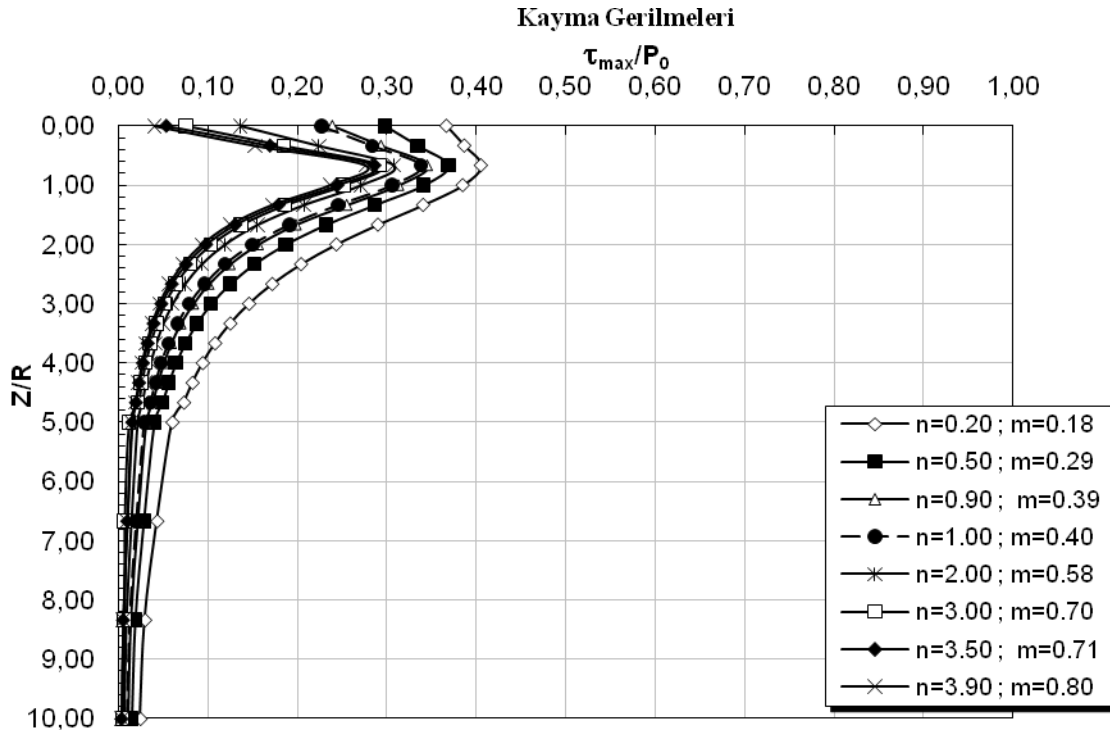
a)



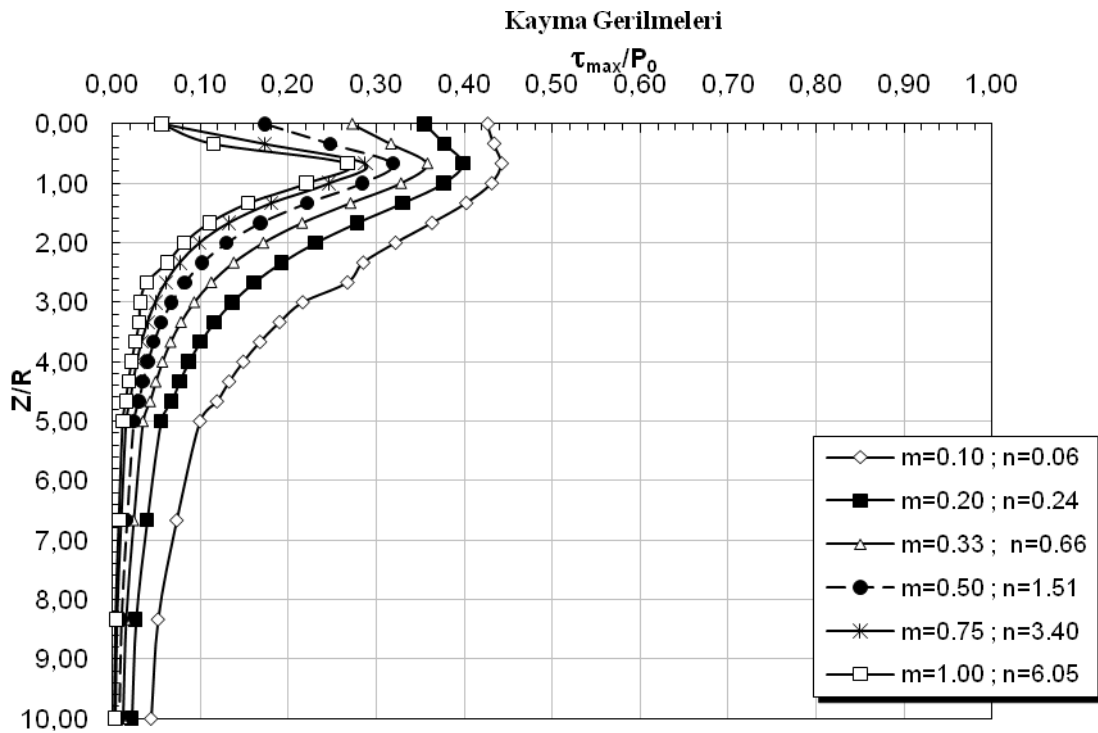
b)

Şekil 4.11. Winnipeg kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin derinliğe göre dağılımı

a) n için değerleri b) m için Değerleri



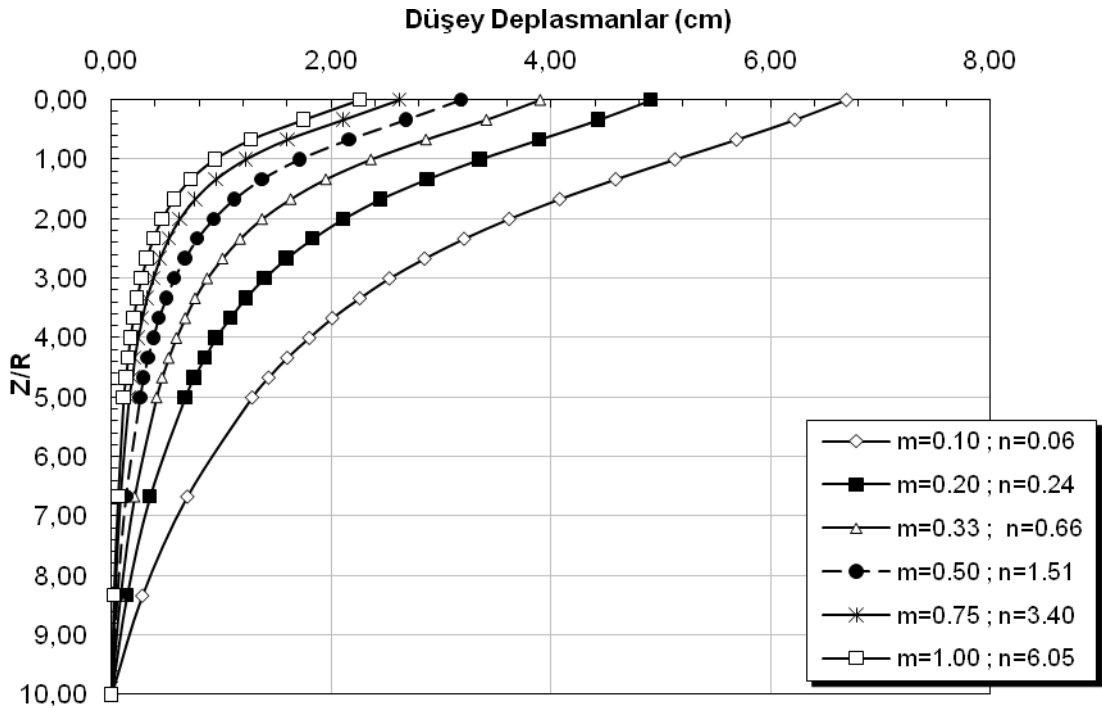
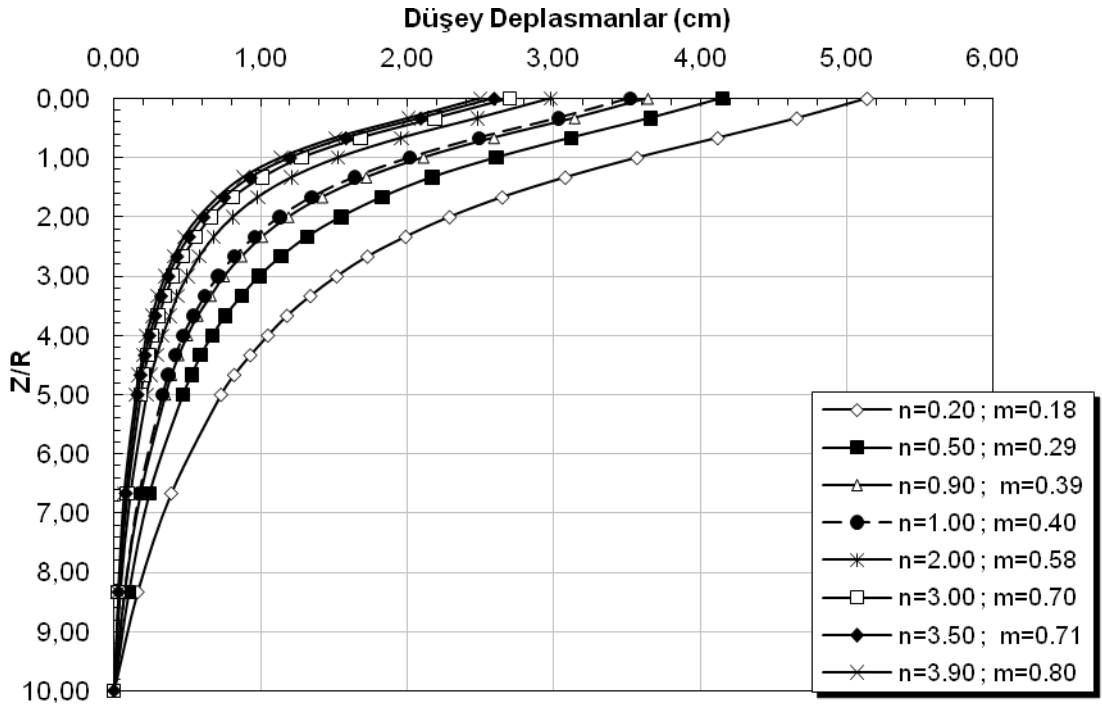
a)



b)

Şekil 4.12. Winnipeg kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin derinliğe göre dağılımı  
a) n için değerleri b) m için Değerleri



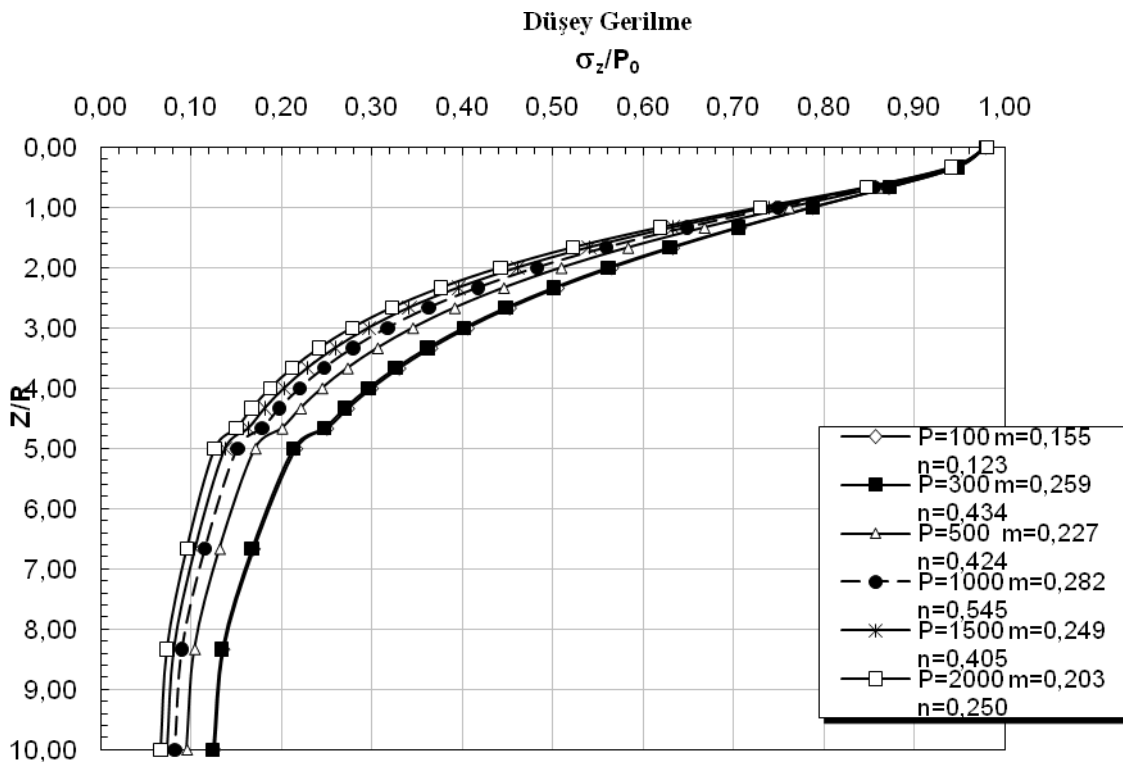


Şekil 4.13. Winnipeg kiline ait Deplasmanların derinliğe göre dağılımı

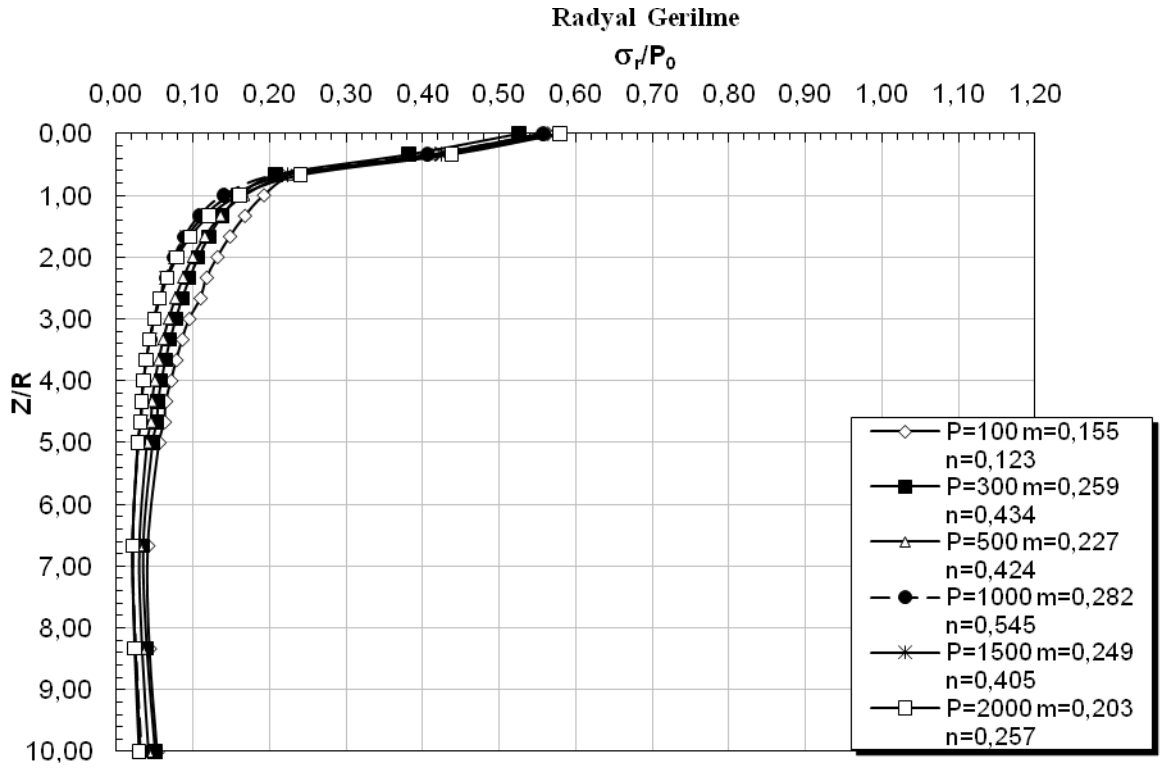
a) n için değerleri b) m için Değerleri

#### 4.4. Speswhite Kaolen Kili İçin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

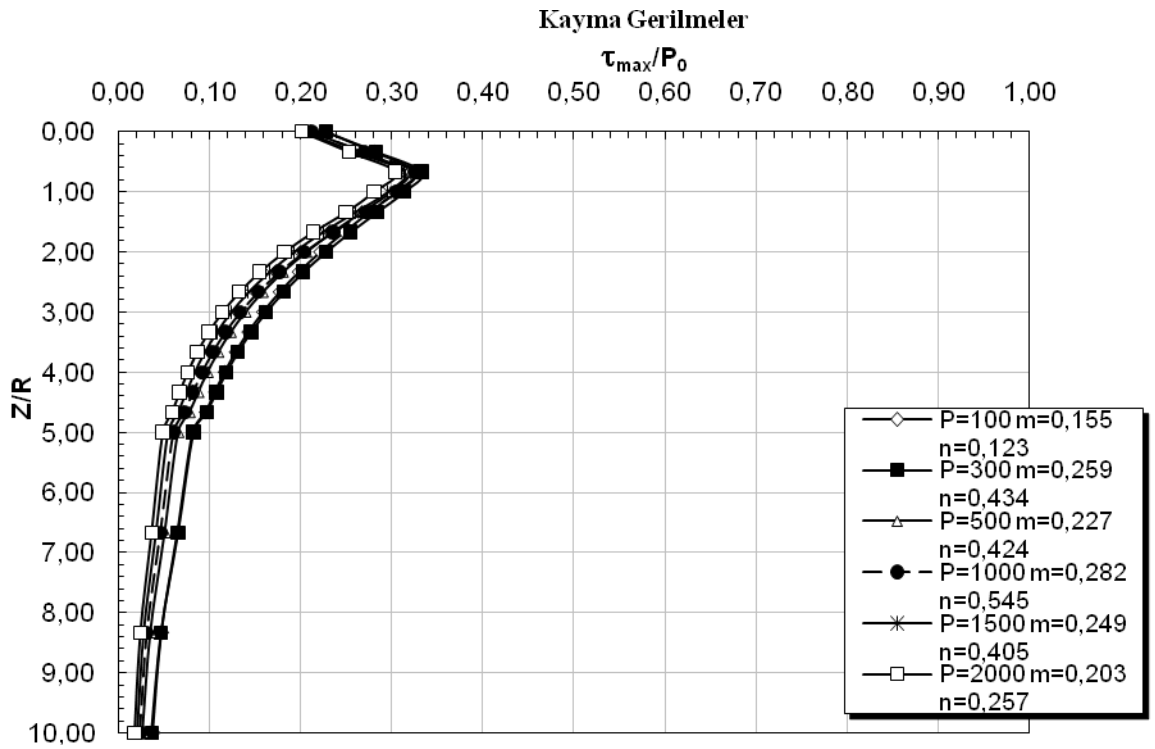
Şekil 4.14'te görüldüğü gibi P değeri artıkça gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 4.17'de deplasmanlarında P değeri artıkça deplasmanlarda da azalmaktadır ve kayma gerilmeleri Şekil 4.16' da azalmaktadır. Grafikselsel olarak Yenice kilinde ve Winnipeg kilinde olduğu gibi aynı davranışı göstermektedirler.



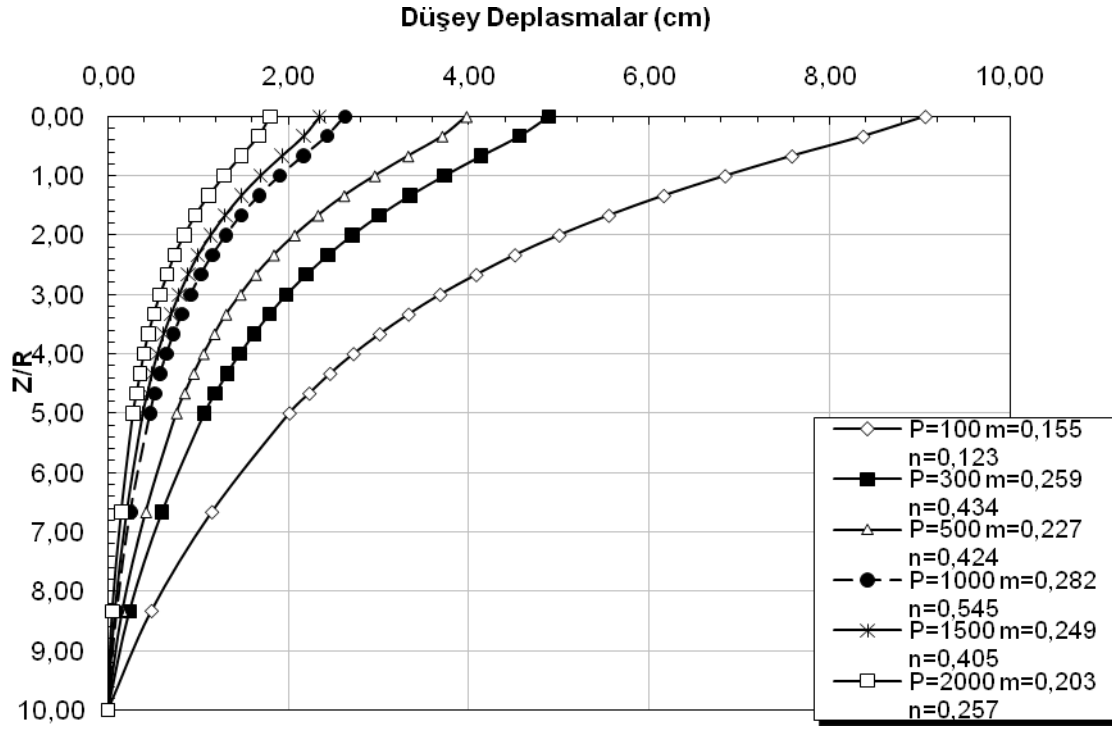
Şekil 4.14. Speswhite kaolen kiline ait Boyutsuz düşey gerilmelerin derinliğe göre dağılımı



Şekil 4.15. Speswhite kaolen kiline ait Boyutsuz radyal gerilmelerin derinliğe göre dağılımı



Şekil 4.16. Speswhite kaolen kiline ait Boyutsuz kayma gerilmelerin derinliğe göre dağılımı



Şekil 4.17. Speswhite kaolen kiline ait Deplasmanların derinliğe göre dağılımı

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yüzeyde dairesel bir alana dağılmış normal aksenal simetrik yük taşıyan elastik bir düzlemsel anizotropik yarı ortamda, gerilme ve deplasman dağılımını değerlendiren analizler gerçekleştirilmiştir. Geniş bir  $n$ ,  $m$  modül oranları aralığında düşey ve yatay normal gerilmelerin yük merkezi altındaki dağılımı ve maksimum kayma gerilmesi ve deplasmanların derinlikle değişimleri araştırılmıştır.

Bu çalışmada erişilen en önemli sonuçlardan biri,  $n$  değerlerinin artmasına bağlı olarak  $m$  değerlerinin de artması ve de  $\nu_{vh}$ 'nin azalmasıdır. Yani, bir zemine uygulanan herhangi bir etki altında  $n$  değerleri artırılması sonucunda (kompaksiyon işlemi v.b. gibi),  $m$  değerleri de artarken (zeminin kayma rijitliği artar)  $\nu_{vh}$  azalır.

Bu çalışmada kullanılan yöntemle elde edilen, gerilme analizleri araştırmaları için,  $(n,m)$  çiftleri sayesinde, daha önceki parametrik araştırmalarda yapılması mümkün olmayan parametrelerin gerçekçi aralıklarda bulunup bulunmadığı kontrol edilebilir. Örneğin,  $m=1$   $n=6,05$  çifti,  $m$  gerçekçi aralıklarda ise de  $n$  bakımından gerçekçi aralıkta değildir.

Bu çalışmada kullanılan  $n$  ve  $m$  modül oranları aralığında, deplasmanların gerçekçi değişimlere karşı çok farklı (neredeyse iki katına) çıktığı görülmektedir.

Düşey gerilmeler  $n$  ve  $m$ 'deki değişimlere hassastırlar. Ayrıca,  $n$  veya  $m$  değerleri arttıkça düşey eksen etrafındaki gerilme konsantrasyonu azalmaktadır. Yani,  $n$  ve  $m$  değerleri arttıkça ortamın yük yayma kapasitesi artmaktadır. Burada gerilme ve deplasmanlarla ilgili elde edilen sonuçlar, Gazetas'ın (1983) çalışmasıyla da uyumludur. Bir diğer ilginç sonuçsa, düşey gerilmeler için, zeminin anizotropi türü ( $n>1$  veya  $n<1$  türü) düşey gerilmelerin etkili olduğu derinliği belirler.

Radyal gerilmeler,  $\sigma_r$ , değerlendirildiğinde, yaklaşık  $0.67R$ 'den daha az derinlikte, daha yüksek  $n$  değerleri için daha yüksek  $\sigma_r$  gerilmeleri elde edilmektedir ve bunun altındaki derinliklerde tersi geçerlidir. Ortamın anizotropik karakterine bakılmaksızın sığ yerlerde (yaklaşık bir yarıçap) radyal gerilmeler oldukça düşük bir değere doğru azalmaktadır.

Sığ derinlikler için n ve m arttıkça maksimum kayma gerilmeleri  $\tau_{max}$ , azalır ve yaklaşık 0.67R derinlikte bir pik elde edildiği görülmektedir.

Bu araştırmada, üç parametrelili anizotropik temsille elde edilen gerilmeler/deplasmanlar, olası iki n değeri, n=3.5 ve n=0.2 için, mutata parametrik araştırmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Mutat yolla elde edilen düşey gerilmelere kıyasla, n>1 tipi anizotropide daha küçük düşey gerilme ve deplasmanlar görülürken n<1 tipi zeminlerde daha büyük düşey gerilmeler ve deplasmanlar söz konusu olmaktadır. Düşey gerilme ve deplasmanların tersine, radyal gerilmeler için bunun tersi geçerlidir. Öte yandan, üç parametrelili temsil ve mutata yolla elde edilen “gerilme farkı” ve “deplasman farkı”, %10 düzenindeyken, iki farklı n değerine tekabül eden radyal gerilmeler için daha küçüktür.

Bu çalışmada izlenen metoda benzer şekilde, gerilme/deplasman analizleri veya anizotropik modellemeler, ileriki araştırmalar da kullanılması mümkündür. Üç parametrelili anizotropik temsille elde edilen anizotropik parametreler (beş anizotropik parametre, n, m gibi boyutsuz parametreler veya diğer temsili anizotropik oranlar), zemin kütleindeki gerilme ve deplasmanların değişiminin araştırılmasında kullanılmasının mutata parametrik çalışmalara nazaran daha gerçekçi olduğu söylenebilir.

## 6.KAYNAKLAR

- Atkinson, J.H., Richardson, D., Stallebrass, S.E., 1990 . Effect of Recent Stress History On The Stiffness of Overconsolidated Soils. *Geotechnique*, 40(4): 531-540
- Barden, L. 1963. Stresses and Displacements in Cross-Anisotropic Soil. *Geotechnique*, 13(3): 198-210.
- Biot, M.A. 1941. General Theory of Three Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12(2): 155-164
- Gazetas, G. 1982. Stresses and Displacements in Cross-Anisotropic Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 108(4): 532-554
- Gazetas, G. 1980. Static and Dynamic Displacements of Foundations on Heterogeneous Multilayered Soils. *Geotechnique*, 30(2): 159-177
- Graham, J., Houlsby, G.T. 1983. Anisotropic Elasticity of a Natural Clay. *Geotechnique*, 33(2): 165-180.
- Hoque, E., Tatsuoaka, F., Sato, T. 1996. Measuring Anisotropic Elastic Properties of Sand Using a Large Triaxial Specimen. *Geotechnical Testing Journal*, 19(4): 411-420
- Keskin, M.S. 2009. Güçlendirilmiş Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. 377.
- Kirkgard, M.M., Lade, P.V. 1991. Anisotropy of Normally Consolidated. *Geotechnical Testing Journal*, 14(3): 231-246.
- Lings, M.L., Pennington D.S., Nash D.F.T. 2000. Anisotropic Stiffness Parameters and Their Measurements in a Stiff Natural Clay. *Geotechnique*, 50(2): 109-195
- Nayak, M. 1973. Elastic Settlement of a Crass-Anisotropic Medium under Axisymmetric Loading. *Soils and Foundations*, 13(2): 83-90.
- Pennington, D.S., Nash, D.F.T., Lings, M.L. 1997. Anisotropy of G<sub>0</sub> Shear Stiffness in Gault Clay. *Geotechnique*, 47(3): 391-398
- Pickering, D.J. 1970. Anisotropic Elastic Parameters for Soils. *Geotechnique*, 20(3): 271-276

Raymond, G.P. 1970. Stresses and Displacements in a Cross-Anisotropic Soil. Discussion by L. Barden *Geotechnique*, 20(4): 456-458

Schmertmann, J.H. 2005. Stress Diffusion Experiment in Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1): 1-10

Taskiran, T. 2006. Doymamış Rezidüel Killi Zeminlerde Anizotropinin ve Buna Bağlı Gerilme Ortamının İncelenmesi. Doktora Tezi, Cukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.151.

Tekinsoy, M. A., Laman, M. 2000. Elastik Zemin Problemleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Basımevi Yayınları, Yayın No:6, Sayfa:316. Isparta.

Timashenko, S. and Goodier, J.N. 1951. *Theory of Elasticity*. Kögakusha Comp. Ltd, pp 343-372 Tokyo, Japan

Wang, Y. H., Cheung, Y. K. 2001. Plate on Cross-Anisotropic Foundation Analysed by Finite Element Method. *Computers and Geotechnics*, 28(1): 37-57

Westergaard, H.M. 1938. A Problem of Elasticity Suggested by a Problem in Soil Mechanics, "Contributions to Mechanics of Solids, Timoschenko 60th Anniversary Vol., The MacMillan Co., New York.

Wheeler, S.J. 1988. A Conceptual Model For Soils Containing Large Gas Bubbles. *Geotechnique*, 38(3): 389-397

Yong, R.N., Silvestri, V. 1979. Anisotropic Behaviour of a Sensitive Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(2): 335-350.

Yong, R.N., Warkentin, B. P. 1975. *Soil Properties and Behaviour*. Elsevier Scientific Publishing Company, Sayfa No:450, Amsterdam.

Zdravkovic, L., Jardine, R.J. 1977. Some Anisotropic Stiffness Characteristics of a Silt Under General Stress Conditions. *Geotechnique*, 47(3): 407-437

Zhu, F., Clark, J. I. 1994. Effect Of Dynamic Loading On Lateral Stress in Sand Can. *Geotechnics. J.* 31, 308-311

Zienkiewicz, O.C., Humpeson, C., Lewis, R.W. 1975. Associated and Non-Associated Visco Plasticity and Plasticity in Soil Mechanics. *Geotechnique*, 25(4): 671-689



## **ÖZGEÇMİŞ**

20.07.1982 yılında Siirt ilinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Batman’da tamamladı.  
2006 Yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Bölümünden mezun oldu.  
Halen İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.