

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜZLEM DEFORMASYON KOŞULLARINDA KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE  
GERİLME DAĞILIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Ahmet KUVAT**

**NİSAN 2013  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜZLEM DEFORMASYON KOŞULLARINDA KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE  
GERİLME DAĞILIŞI**

**İnş. Müh. Ahmet KUVAT**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.03.2013  
Tezin Savunma Tarihi : 17.04.2013**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU**

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında**  
**Ahmet KUVAT Tarafından Hazırlanan**

**DÜZLEM DEFORMASYON KOŞULLARINDA KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE  
GERİLME DAĞILIŞI**

**başlıklı bu çalışmada, Enstitü Yönetim Kurulunun 02/04/2013 gün ve 1500 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER** .....

**Üye : Prof. Dr. Fikri BULUT** .....

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilen bu çalışmada tez danışmanlığımı üstlenerek, çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübelerinden yararlanmama imkan tanıyan Sayın Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU'na sonsuz saygılarımı sunarım.

Kendileriyle aynı ortamda çalışmaktan büyük onur duyduğum ayrıca çalışmalarım esnasında her türlü yardımı benden esirgemeyen çok değerli meslektaşlarım Sayın Arş. Gör. Hakan ULUTAŞ ve Arş. Gör. Esra SUBAŞI DUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında her türlü bilgi, belge ve deneyimlerini benimle paylaşan çok değerli meslektaşım Sayın Arş. Gör. Baki BAĞRIÇIK'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yaşamım boyunca hep yanımda olan, desteklerini hep hissettiren ve bütün zorluklara katlanarak yetişmemde en büyük rolü oynayan başta saygıdeğer annem ve babam olmak üzere tüm aile bireylerime minnettarlığımı belirtir, sonsuz saygı ve sevgilerimi sunar; bu çalışmanın ülkemizin ve milletimizin yararına olmasını dilerim.

Ahmet KUVAT  
Trabzon 2013

## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Düzlem Deformasyon Koşullarında Kohezyonsuz Zeminlerde Gerilme Dağılışı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/03/2013

Ahmet KUVAT

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XV
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Temel Tabanında Oluşan Basınçlar .....	3
1.3. İlave Yüklerden Dolayı Oluşan Düşey Gerilme Artışları.....	6
1.3.1. İzobarlar .....	7
1.3.2. Yatay Bir Düzlemde veya Doğrultuda Düşey Gerilme Dağılımı .....	7
1.3.3. Düşey Bir Düzlemdeki Düşey Gerilme Dağılışı.....	8
1.3.4. Tekil Yük Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları .....	8
1.3.5. Çizgisel Yük Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları .....	15
1.3.6. Üniform Şerit Yük Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları .....	17
1.3.7. Üniform Yüklü Dairesel Alan Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları .....	19
1.3.8. Üniform Yüklü Dikdörtgen Alan Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları .....	22
1.3.9. Yaklaşık Yöntem.....	24
1.3.10. Eşdeğer Tekil (Nokta) Yük Yöntemi .....	25
1.3.11. Sınırlı Tabaka Çözümleri .....	26
1.3.11.1. Üniform Şerit Yük Durumu .....	26
1.3.11.2. Üçgensel Yük Durumu.....	29
1.3.11.3. Üniform Dairesel Alan Yük Durumu.....	33
1.3.11.4. Üniform Yüklü Dikdörtgen Alan Durumu.....	36
1.3.12. Sonlu Elemanlar Metoduyla Analiz .....	41

1.3.13.	Zemin Davranışının Modellenmesi.....	43
1.3.13.1.	Lineer Elastik Zemin Modeli .....	44
1.3.13.2.	Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli.....	44
1.3.13.3.	Pekleşen Zemin Modeli .....	44
1.3.13.4.	Multilineer Kinematik Pekleşme Modeli .....	44
1.4.	Literatür Araştırması .....	45
1.5.	Amaç ve Kapsam .....	48
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	50
2.1.	Deneylerde Kullanılan Zeminin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi .....	50
2.1.1.	Elek Analizi .....	50
2.1.2.	Piknometre Deneyi.....	52
2.1.3.	Sıklık Deneyleri .....	52
2.1.4.	Kesme Kutusu Deneyleri .....	53
2.1.5.	Konsolidasyon Deneyi .....	57
2.1.6.	Zeminin Poisson Oranı ( $\mu$ )'nın Belirlenmesi.....	57
2.1.7.	Zeminin Elastisite Modülü (E)'nün Belirlenmesi .....	58
2.2.	Deney Düzeneği.....	60
2.2.1.	Deney Tankı.....	60
2.2.2.	Model Şerit Temel .....	62
2.2.3.	Yükleme Sistemi .....	63
2.2.4.	Yük Halkası.....	64
2.2.5.	Basınç Ölçerler.....	64
2.2.6.	Data Toplama Sistemi ve CoDA Locomotive Programı .....	65
2.3.	Deneyin Yapılışı .....	66
2.4.	Nümerik Çalışmalar .....	68
2.4.1.	ANSYS Programı .....	68
2.4.2.	ANSYS Paket Programı ile Yapılan Modelleme .....	68
2.5.	Analitik Çalışmalar .....	76
2.5.1.	Boussinesq Yöntemi ile İlave Düşey Gerilmelerin Hesabı .....	76
2.5.2.	Sınırlı Tabaka Yöntemi ile İlave Düşey Gerilmelerin Hesabı .....	76
3.	ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....	78
3.1.	Farklı Rölatif Sıklıkta Hazırlanan Kum Numunelerde İlave Düşey Gerilmelerin Analizi .....	79

3.1.1.	$z=0.1$ m İçin Düşey Gerilme Artışları.....	79
3.1.2.	$z=0.2$ m İçin Düşey Gerilme Artışları.....	81
3.1.3.	$z=0.3$ m İçin Düşey Gerilme Artışları.....	84
3.2.	Deneylerden Ölçülen İlave Düşey Gerilmelerin Yatay Doğrultuda Dağılımı ....	86
3.2.1.	$D_r=0.75$ İçin Yatay Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı.....	86
3.2.2.	$D_r=0.65$ İçin Yatay Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı.....	87
3.2.3.	$D_r=0.55$ İçin Yatay Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı.....	87
3.2.4.	$D_r=0.45$ İçin Yatay Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı.....	88
3.2.5.	$D_r=0.35$ İçin Yatay Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı.....	89
3.2.6.	$D_r=0.25$ İçin Yatay Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı.....	89
3.3.	Deneylerden Ölçülen İlave Düşey Gerilmelerin Düşey Doğrultuda Dağılımı ...	90
3.3.1.	$D_r=0.75$ İçin Düşey Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı .....	90
3.3.2.	$D_r=0.65$ İçin Düşey Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı .....	91
3.3.3.	$D_r=0.55$ İçin Düşey Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı .....	92
3.3.4.	$D_r=0.45$ İçin Düşey Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı .....	92
3.3.5.	$D_r=0.35$ İçin Düşey Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı .....	93
3.3.6.	$D_r=0.25$ İçin Düşey Doğrultuda İlave Düşey Gerilmelerin Dağılımı .....	94
4.	SONUÇLAR .....	95
5.	ÖNERİLER.....	97
6.	KAYNAKLAR .....	98
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DÜZLEM DEFORMASYON KOŞULLARINDA KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE  
GERİLME DAĞILIŞI

Ahmet KUVAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU  
2013, 102 Sayfa

Günümüzde, Geoteknik Mühendisliği alanında en çok karşılaşılan problemlerden biri, zemine çeşitli yollarla uygulanan dış yüklerin zeminde ne büyüklükte ilave gerilmeler meydana getireceğidir. Çünkü bu ilave gerilmeler, zeminde meydana gelecek oturma ve yer değiştirme büyüklüklerini belirlemede veya çeşitli zemine gömülü yapıların projelendirilmesindeki en önemli verilerden biridir. Bu çalışmada, öncelikle kohezyonsuz zemine üzerine oturan model şerit temelle düzlem deformasyon koşullarında deneyler yapılmış ve uygulanan düşey yüzey yüklemesinden dolayı zemin içinde belirli noktalarda meydana gelen ilave düşey gerilme değerleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, deney tankına altı farklı rölatif sıklıkta kum tabakalar halinde yerleştirilmiş ve önceden belirlenmiş noktalara basınç ölçerler yerleştirilerek ilave düşey gerilme artışları ölçülmüştür. Ayrıca model deney düzeneği, sonlu elemanlar yöntemine göre analiz yapan ANSYS paket programı ile farklı malzeme modelleri ile modellenip analiz edilerek düşey gerilme artışları nümerik olarak bulunmuştur. Bu deneysel ve nümerik sonuçlar, Elastisite Teorisine dayalı olarak geliştirilmiş çeşitli analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak irdelenmiştir. Çalışmalardan elde edilen bulgular incelendiğinde rölatif sıklığın zeminde gerilme dağılışında etkili bir parametre olduğu anlaşılmıştır. Ancak mevcut analitik ve nümerik çözümlerin, bu parametreyi göz önüne almaması ve zeminin malzeme özellikleri için yapılan kabullerin gerçekçi olmayışı, deney sonuçlarıyla nümerik ve analitik sonuçlar arasında büyük farklılıklar olmasına sebep olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilme Artışı, ANSYS, Basınç Ölçer, Düşey gerilme Dağılışı.

Master Thesis

STRESS DISTRIBUTIONS IN COHESIONLESS SOILS FOR PLAIN STRAIN  
CONDITIONS

SUMMARY

Ahmet KUVAT

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU  
2013, 102 Pages

Nowadays, one of most frequently encountered problems in the field of geotechnical engineering is that how much additional stresses will emerge in soil medium due to external loads applied on soil surface. That is why, these additional stresses are the most important data used to determine amount of settlement and displacement of soil or design buried structures. In this study, primarily several tests were carried out in plane strain conditions with model strip footing in cohesionless soil and the vertical stress increments occurred in the soil medium due to applied vertical surface loads were determined at several specific locations. In experimental studies, sand was placed in layers in a tank with six different relative densities and additional vertical stress increments were measured by strain gauges placed at predetermined locations. Also vertical stress increments were obtained numerically for different material models by modelling the experimental setup with ANSYS which analyses on basis of finite element method. These experimental and numerical results were compared and discussed with various results obtained from different analytical methods based on Theory of Elasticity. As the findings obtained from these studies were examined, it was understood that relative density is an effective parameter for stress distribution in soils. However, since the existing analytical and numerical solutions don't take into account this parameter and don't have realistic assumptions for the soil material properties, there are significant differences between the experimental results and the analytical or numerical results.

**Key Words:** Stress Increment, ANSYS, Strain Gauges, Vertical Stress Distribution.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Kohezyonlu bir zemin üzerine oturan esnek temel .....	3
Şekil 1.2.	Kohezyonlu bir zemin üzerine oturan rijit temel .....	4
Şekil 1.3.	Kohezyonsuz bir zemin üzerine oturan esnek temel .....	4
Şekil 1.4.	Kohezyonsuz bir zemin üzerine oturan rijit temel .....	5
Şekil 1.5.	Rijit kabule göre gerilme dağılımı .....	5
Şekil 1.6.	Zemin kitlesinde çeşitli yüzey yüklerinden oluşan düşey gerilme artışı.....	6
Şekil 1.7.	Tekil yük için izobarlar .....	7
Şekil 1.8.	Tekil bir yük altında, yatay bir düzlemdeki gerilme dağılımı .....	7
Şekil 1.9.	Tekil yükten düşey doğrultularda oluşan düşey gerilme artışları dağılımları ...	8
Şekil 1.10.	Tekil yükten dolayı zemin içinde oluşan gerilmeler .....	9
Şekil 1.11.	Westergaard çözümüne göre tekil yükten dolayı oluşan düşey gerilme artışı .....	11
Şekil 1.12.	Tekil yük için Kelvin problem .....	12
Şekil 1.13.	Tekil yük için Cerutti problemi .....	13
Şekil 1.14.	Gerilmelerin hesabında Green fonksiyonu .....	13
Şekil 1.15.	Çizgisel yükten dolayı oluşan düşey ve yatay gerilme artışları .....	15
Şekil 1.16.	Çizgisel yük (Kelvin problemi) .....	16
Şekil 1.17.	Çizgisel yük (Cerutti problemi) .....	17
Şekil 1.18.	Üniform şerit yük .....	18
Şekil 1.19.	Üniform yüklü alanın merkezi altında gerilme dağılımı .....	21
Şekil 1.20.	Üniform yüklü dikdörtgen alan .....	23
Şekil 1.21.	Bir dikdörtgen alanın altında yaklaşık gerilme artışı .....	24
Şekil 1.22.	Düşeyle 30 <sup>0</sup> 'lik dağılım yöntemi .....	25
Şekil 1.23.	Eşdeğer tekil yük yöntemi .....	25
Şekil 1.24.	Üniform çizgisel yük durumu .....	26
Şekil 1.25.	Poisson oranı ( $\mu$ ) 0 için etki faktörü eğrileri .....	27
Şekil 1.26.	Poisson oranı ( $\mu$ ) 0.2 için etki faktörü eğrileri .....	28
Şekil 1.27.	Poisson oranı ( $\mu$ ) 0.4 için etki faktörü eğrileri .....	28
Şekil 1.28.	Poisson oranı ( $\mu$ ) 0.5 için etki faktörü eğrileri .....	29
Şekil 1.29.	Üçgensel yük ile yüklü ile sınırlı tabaka .....	30

Şekil 1.30. Üçgensel yükün merkezi altında meydana gelen yatay gerilme artışı .....	30
Şekil 1.31. Üçgensel yükün kenar noktaları altında meydana gelen yatay gerilme artışı.....	31
Şekil 1.32. Üçgensel yükün merkezi altında meydana gelen düşey gerilme artışı.....	31
Şekil 1.33. Üçgensel yükün kenar noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı.....	32
Şekil 1.34. Üçgensel yükün kenar noktaları altında meydana gelen kayma gerilmesi artışı.....	32
Şekil 1.35. Dairesel alan yüklemesi ile yüklü sınırlı tabaka.....	33
Şekil 1.36. Dairesel alanın merkezi altında oluşabilecek düşey gerilme artışı değerleri .	34
Şekil 1.37. Dairesel alanın kenar noktaları altında oluşabilecek düşey gerilme artışı değerleri.....	34
Şekil 1.38. Dairesel alanın merkezi altında oluşabilecek yatay gerilme artışı değerleri..	35
Şekil 1.39. Dairesel alanın kenar noktaları altında oluşabilecek yatay gerilme artışı değerleri.....	35
Şekil 1.40. Üniform dikdörtgen alan ile yüklü sınırlı tabaka .....	36
Şekil 1.41. $z=0.2h$ için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı.....	37
Şekil 1.42. $z=0.4h$ için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı.....	38
Şekil 1.43. $z=0.6h$ için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı.....	39
Şekil 1.44. $z=0.8h$ için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı.....	40
Şekil 1.45. $z=1h$ için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı.....	41
Şekil 2.1. Deneyleerde kullanılan zemin örneği .....	50
Şekil 2.2. Deneyleerde kullanılan kum numuneye ait granülometri eğrisi .....	51
Şekil 2.3. $D_r=0,25$ için kesme kutusu deney sonuçları.....	54
Şekil 2.4. $D_r=0,35$ için kesme kutusu deney sonuçları.....	54
Şekil 2.5. $D_r=0,45$ için kesme kutusu deney sonuçları.....	55
Şekil 2.6. $D_r=0,55$ için kesme kutusu deney sonuçları.....	55
Şekil 2.7. $D_r=0,65$ için kesme kutusu deney sonuçları.....	56
Şekil 2.8. $D_r=0,75$ için kesme kutusu deney sonuçları.....	56
Şekil 2.9. Deney düzeneğinin şeması .....	60
Şekil 2.10. Deney tankının bir görüntüsü.....	61

Şekil 2.11. Model şerit temelin şeması.....	62
Şekil 2.12. Deneysel çalışmalarda kullanılan model şerit temel .....	62
Şekil 2.13. Yükleme düzeninin genel şeması .....	63
Şekil 2.14. Yükleme düzeninin genel görüntüsü.....	64
Şekil 2.15. Deneysel çalışmalarda kullanılan yük halkası ve yükleme bıçağı .....	64
Şekil 2.16. Deneysel çalışmalarda kullanılan basınç ölçerler .....	65
Şekil 2.17. TDG firmasının Ai8b model numaralı veri toplama ünitesi .....	65
Şekil 2.18. TDG firmasının RS-485 model numaralı aygıt geçidi .....	66
Şekil 2.19. Yüklemenin başlangıç anında deney düzeneğinin görünümü.....	67
Şekil 2.20. ANSYS paket programında anahtar noktalar (keypointler) ile oluşturulan çizgiler.....	69
Şekil 2.21. ANSYS paket programında çizgiler (line) ile oluşturulan alanlar (area).....	69
Şekil 2.22. ANSYS paket programında alanlar (area) yardımıyla oluşturulan hacimler (volume) .....	70
Şekil 2.23. Sonlu elemanlara ayırma (mesh) işleminden sonra deney tankının görüntüsü .....	73
Şekil 2.24. Sınır şartları atandıktan sonra modelin görüntüsü.....	74
Şekil 2.25. 1kN yük uygulandıktan sonra modelin görüntüsü .....	74
Şekil 2.26. Modelin çözümden sonraki görüntüsü .....	75
Şekil 2.27. Modelin düşey gerilme dağılışı ve deforme olmuş şekli.....	75
Şekil 3.1. Deney tankında basınç ölçerlerin yerleştirildiği yerler .....	78
Şekil 3.2. 1 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları .....	79
Şekil 3.3. 2 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları .....	80
Şekil 3.4. 3 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları .....	81
Şekil 3.5. 4 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları .....	82
Şekil 3.6. 5 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları .....	83
Şekil 3.7. 6 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları .....	84
Şekil 3.8. 7 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları .....	85
Şekil 3.9. $D_r=0.75$ için $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı.....	86

Şekil 3.10. $D_r=0.65$ için $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı.....	87
Şekil 3.11. $D_r=0.55$ için $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı.....	88
Şekil 3.12. $D_r=0.45$ için $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı.....	88
Şekil 3.13. $D_r=0.35$ için $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı.....	89
Şekil 3.14. $D_r=0.25$ için $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı.....	90
Şekil 3.15. $D_r=0.75$ için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı .....	91
Şekil 3.16. $D_r=0.65$ için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı .....	91
Şekil 3.17. $D_r=0.55$ için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı .....	92
Şekil 3.18. $D_r=0.45$ için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı .....	93
Şekil 3.19. $D_r=0.35$ için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı .....	93
Şekil 3.20. $D_r=0.25$ için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı .....	94

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Elek analizi deney sonuçları.....	51
Tablo 2.2. Sıklık deneyleri sonucu bulunan kuru yoğunluk değerleri .....	52
Tablo 2.3. Kohezyonsuz zeminlerde sıklık tablosu.....	53
Tablo 2.4. 2.1 bağıntısı kullanılarak elde edilen kuru yoğunluklar.....	53
Tablo 2.5. Tüm rölatif sıklık değerleri için dört farklı gerilme altında belirlenmiş oturma miktarları.....	57
Tablo 2.6. Tüm rölatif sıklık değerleri için bulunan Poisson oranı ( $\mu$ ) değerleri.....	58
Tablo 2.7. Rölatif sıklık değerlerine göre belirlenmiş Elastisite Modülü değerleri .....	60
Tablo 2.8. ANSYS paket programına girilen temel malzeme özellikleri.....	71
Tablo 2.9. ANSYS paket programında multilineer kinematik pekleşme malzeme modeli için girilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri.....	72
Tablo 2.10. Boussinesq yöntemine göre hesaplanmış düşey gerilme artışı değerleri .....	76
Tablo 2.11. Sınırlı tabaka yöntemine göre hesaplanmış ilave düşey gerilme değerleri ....	77
Tablo 3.1. 1 noktası ( $X/B=0$ , $D/B=1$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları .....	79
Tablo 3.2. 2 noktası ( $X/B=0$ , $D/B=1$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları .....	80
Tablo 3.3. 3 noktası ( $X/B=1$ , $D/B=2$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları .....	81
Tablo 3.4. 4 noktası ( $X/B=0$ , $D/B=2$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları .....	82
Tablo 3.5. 5 noktası ( $X/B=1$ , $D/B=2$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları .....	83
Tablo 3.6. 6 noktası ( $X/B=0$ , $D/B=3$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçlar .....	84
Tablo 3.7. 7 noktası ( $X/B=1$ , $D/B=3$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları .....	85

## SEMBOLLER DİZİNİ

$c$	: Kohezyon
$C_u$	: Üniformaluluk katsayısı
$C_r$	: Eğrilik katsayısı
$D_r$	: Rölatif sıklık
$D_{10}$	: Efektif dane çapı
$D_{30}$	: Granülometre eğrisinde %30'a karşılık gelen dane çapı
$D_{60}$	: Granülometre eğrisinde %60'a karşılık gelen dane çapı
$E$	: Elastisite modülü
$H_c$	: Konsolidasyon halkasının yüksekliği
$I$	: Boussinesq'e göre dairesel yük için etki faktörü
$I_l$	: Boussinesq'e göre çizgisel yük için etki faktörü
$I_p$	: Boussinesq'e göre tekil yük için etki faktörü
$I_w$	: Westergaard'a göre tekil yük etki faktörü
$I_{st}$	: Poulos ve Davis'e göre çizgisel yük etki faktörü
$K_0$	: Toprak basıncı katsayısı
$K_r$	: Yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı
$m, n, k$	: Boyutsuz katsayılar
$Q$	: Tekil yük
$q$	: Yayılı yük
$R$	: Yarıçap
$r$	: Sabit yatay uzaklık
$x$	: x yönündeki yatay mesafe
$y$	: y yönündeki yatay mesafe
$z$	: Derinlik
$\alpha, \beta$	: Yük yayılma açısı
$\delta_{zz}$	: Konsolidasyon deneyinden belirlenen düşey oturma miktarı
$\Delta\sigma_r$	: Radyal gerilme artışı
$\Delta\sigma_x$	: x yönündeki yatay gerilme artışları
$\Delta\sigma_y$	: y yönündeki yatay gerilme artışları
$\Delta\sigma_z$	: Düşey gerilme artışı



$\epsilon_{rr}, \epsilon_{\theta\theta}$	: Yatay birim Şekil değiştirmeler
$\epsilon_{zz}$	: Düşey birim Şekil değiştirme
$\phi$	: İçsel sürtünme açısı
$\gamma$	: Birim hacim ağırlığı
$\gamma_k$	: Kuru birim hacim ağırlığı
$\gamma_s$	: Tane birim hacim ağırlığı
$\mu$	: Poisson oranı
$\rho_k$	: Kuru yoğunluk
$\rho_{kmin}$	: Minimum kuru yoğunluk
$\rho_{kmax}$	: Maksimum kuru yoğunluk
$\sigma_x$	: Yatay gerilme
$\sigma_z$	: Düşey gerilme

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Zemin, yerkürenin dış tabakasını oluşturan, taneli, boşluklu doğal malzeme olarak adlandırılmaktadır. Zemin tanelerinin boyutları 0.1 m'den mm'nin 1000000'da 1'i kadar olabilir. Tanelerin şekli; yuvarlak, oval, çubuk vb. olabilmektedir (Uzuner, 2007). Zeminler, kayaçların fiziksel veya kimyasal parçalanması sonucu oluşmuş doğal malzemelerdir. Zeminler, yerinde oluşmuş ve taşınmış zeminler olmak üzere, iki ana gruba ayrılırlar. Yerinde oluşmuş zeminler, ana kayanın ufalanması ve ayrışması ile ana kayanın üst kısımlarında oluşur. Çeşitli ekvatorial bölgelerde birkaç m'ye kadar yerinde oluşmuş zeminler bulunabilmektedir. Taşınmış zeminler; ufalanma ve ayrışma neticesinde oluşan tanelerin, akarsu, buzul, rüzgâr, dalga, yerçekimi vb. taşıyıcı etmenlerle taşınarak belirli bir yerde biriktirilmesi sonucu oluşmuşlardır. Taşıyıcı etmenler aynı zamanda fiziksel ayrışmada da etkin rol oynamaktadırlar.

Kayaların fiziksel (mekanik) ayrışması ile kayaların sadece boyutları küçülmektedir. Ancak kayanın kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir. Kayaların fiziksel ayrışmasına neden olan etmenler çok çeşitlidir: gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farkları, suyun kayaların üzerinde bulunan çatlaklara girip donması, farklı iç gerilmeler, bitki kökleri, buzullar vb. bu etmenlere örnek olarak sıralanabilir. Akarsuların taşıyıp yığıldığı zeminlere genellikle alüvyon denilmektedir.

Kayaların kimyasal ayrışması ile kayaların hem kimyasal bileşimleri değişir hem de fiziksel boyutları değişir. Kayaların kimyasal ayrışmasına neden olan etmenlere, bitki ve hayvan kalıntıları üzerinde oluşan bakterilerin salgıladıkları çeşitli asitler, havadan oksijeni ve karbondioksiti muhtevasına alan yağmur suları örnek olarak gösterilebilir. Bir zemin kitlesinin üzerinde kalınlığı birkaç mm'den birkaç m'ye kadar değişen bitkisel toprak bulunur. Bitkisel toprak yüksek oranda organik madde içerir; rengi koyudur.

Ancak İnşaat Mühendisliğinde yapılar temeller aracılığıyla zemine oturtulurken bitkisel toprak tabakasının altındaki inorganik veya az organik tabakalara inilir. Bunun nedeni bitkisel toprağın uygun bir temel zemini olmayışdır.

Mühendislik bakış açısıyla, zeminler, homojen ve izotrop olmayan ayrıca özellikleri çevre koşullarına, jeolojik tarihçesine ve zamana bağlı olarak büyük değişiklikler gösteren

inşaat malzemeleridir. Bu açıdan zeminlerin mühendislik davranışlarını tanımlayan genel analitik modellerin ve sabit malzeme katsayılarının belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Zemin özelliklerinin her proje sahası için deneysel olarak belirlenmesi ve bu yapılırken de arazide geçerli olacak koşulların dikkatle göz önüne alınması gerekmektedir. Dolayısıyla deneysel yöntemler zemin mekaniğinin ayrılmaz ve vazgeçilmez bir parçasını oluşturmaktadır. Deneysel olarak belirlenen birçok zemin özelliği ise ancak belirli koşullarda geçerliliğini korumaktadır. Kullanılan deneysel yöntemlerin ve zemin davranışını etkileyen faktörlerin iyi anlaşılması, elde edilen sonuçların birçok durumda yanıltıcı olabilmesine yol açabilmektedir (Kumbasar ve Kip, 1984).

Zeminler genellikle kendi ağırlıkları altında bulunurlar. Zeminlere herhangi bir dış yük etkidiği zaman zemin içindeki gerilmelerde, yükün etkidiği alanın altında fazla olmak üzere, değişimler meydana gelir. Bu değişimlerin şiddetinin ve gidişinin bilinmesi temellerin projelendirilmesi bakımından gereklidir. Zira bu bilgilere dayanılarak oturmalar hesaplanır, zemin incelemelerinin kapsamı tayin olunur (Kumbasar ve Kip, 1999).

Birçok problemde (deformasyon problemlerinde, özellikle de oturma hesaplarında), kırılma (göçme)'dan önceki safhalarda, yüzey veya yüzeye yakın yüklerden, zemin ortamında oluşan gerilmelerin, yer değiştirmelerin (deformasyonların) bilinmesi gerekir. Zeminin doğal yapısının karmaşık olmasından dolayı, zemin için gerçekçi gerilme-deformasyon analizleri yapmak oldukça zordur. Bu nedenle, yaklaşık olmasına rağmen, genellikle Elastisite Teorisi kullanılır. Elastisite Teorisi kullanılırken, zemin için şu basitleştirici kabuller yapılabilmektedir,

- Zemin, elastik olup, gerilme-deformasyon ilişkisi doğrusal (lineer)dir. Başka bir deyişle Hooke Yasası geçerlidir.
- Zemin ortamı homojendir. Diğer bir deyişle, elastik sabitler, elastisite modülü, E ve Poisson oranı,  $\mu$  her noktada aynıdır.
- Zemin ortamı izotropdur. Yani, özellikleri bir noktada, her doğrultuda aynıdır.
- Zemin ortamı, yarım sonsuzdur. Yani, bir düzlemin altında, her yönde, sonsuz uzunlukta uzanır. Gerçekte bu kabullerin çoğu gerçekçi değildir. Ancak, Elastisite Teorisi, bu basitleştirici kabullerle, pratikte kullanılabilir, makul sonuçlar vermektedir (Uzuner, 2007).

Bu kabullerle elde edilen çözümler zemin ortamının fiziksel ve mekanik özelliklerini tam olarak dikkate almadığından gerçek gerilme artışlarıyla %30'a varan farklar ortaya

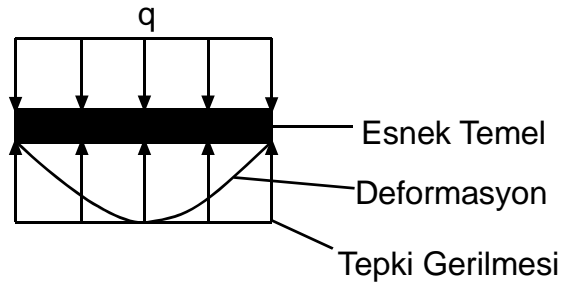
çıkmaktadır. Bununla birlikte farkın düşey gerilmelerde oldukça düşük olması bu yöntemlerin halen kullanılmasını sağlamaktadır (Uzuner, 2007).

## 1.2. Temel Tabanında Oluşan Basınçlar

Herhangi bir yapının temeli ile temel zemininin arasındaki temas yüzeyinde oluşan gerilme temel taban basıncı olarak adlandırılmaktadır. Zemin kitlesindeki sıkışabilir katmanlarda meydana gelen gerilme artışları, genellikle yapı ağırlığının meydana getirdiği temel taban basınçlarından ortaya çıkmaktadır.

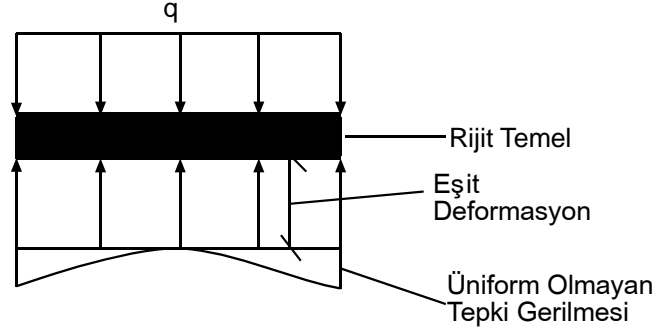
Taban basıncı temelin özellikleri, uygulanan yükün değeri, zeminin özellikleri ve temelin zemin içerisinde gömülme miktarına bağlı olarak taban boyunca polinom eğrisi gibi bir dağılım gösterir. Taban basınçlarının belirlenmesinde ilk uygulamalarda Elastisite Teorisi kullanılmıştır. Bu yaklaşımda zemin özellikleri öncelikle dikkate alınmadığından, gerçekçi olmadığı düşüncesiyle, eleştirilere maruz kalmıştır. Yapılan deney çalışmaları ve gerçek yapı temelleri altında yapılan ölçümler, taban basıncı dağılımının teorik olarak bulunan sonuçlardan farklı olduğunu, taban basınçlarının değerlerinin ve dağılımının zemin türüne büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir (Aytekin, 2009). Şekil 1.1’de kum ve Şekil 1.2’de kil üzerine oturan temeller altında meydana gelen tipik taban basıncı dağılımları görülmektedir.

Üniform bir  $q$  yükü ile yüklenmiş esnek bir temelde, kohezyonlu zeminlerde Şekil 1.1’de olduğu gibi farklı oturmalar ve tepki gerilmeleri oluşur.



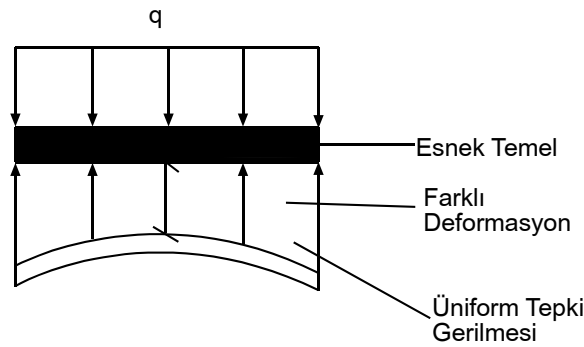
Şekil 1.1. Kohezyonlu bir zemin üzerine oturan esnek temel

Kohezyonlu bir zemin üzerindeki herhangi bir rijit temel, temel zemininde farklı oturmaların oluşmasına izin vermeyecek ve deformasyonların her yerde aynı olmasına neden olacaktır. Böyle bir durumda zemin ortamında oluşacak tepki gerilmeleri üniform olmayacağı açıktır. Şekil 1.2’de kohezyonlu bir zemine oturan rijit temeldeki deformasyon ve tepki gerilmesi görülmektedir.



Şekil 1.2. Kohezyonlu bir zemin üzerine oturan rijit temel

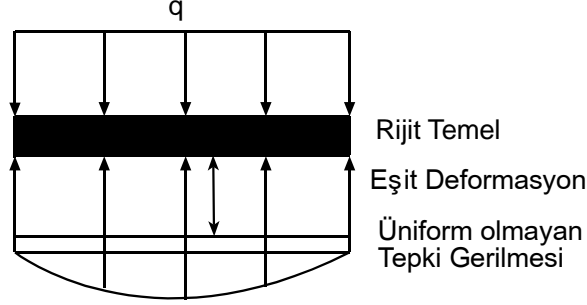
Kohezyonsuz zeminlerde meydana gelecek tepki gerilmeleri ve oluşacak deformasyonlar kohezyonlu zeminlerde meydana gelen tepki gerilmelerinden ve deformasyonlardan tamamen farklıdır. Üniform bir  $q$  yükü ile yüklenmiş kohezyonsuz bir zemin üzerinde meydana gelecek tepki gerilmeleri ve deformasyonlar Şekil 1.3’te görülmektedir.



Şekil 1.3. Kohezyonsuz bir zemin üzerine oturan esnek temel

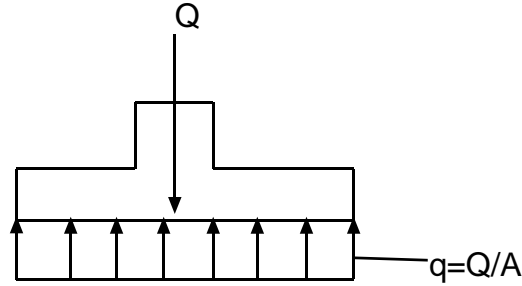
Rijit temelin bir kohezyonsuz zemine oturması durumunda ise, temelde eşit deformasyonlar meydana gelecek ve buna bağlı olarak temel zemininde meydana gelecek tepki gerilmeleri de üniform olacaktır. Rijit bir temelin kohezyonsuz zemin üzerine

oturması durumunda meydana gelecek deformasyonlar ve tepki gerilmeleri Şekil 1.4'te görülmektedir.



Şekil 1.4. Kohezyonsuz bir zemin üzerine oturan rijit temel

Temel projelendirmelerinde yukarıda bahsedilen kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin üzerine oturan rijit ve esnek temellerde oluşturacağı tepki gerilmeleri ve deformasyonları göz önüne almak hesapların karmaşık bir hal almasına neden olacağından, projelendirmede genellikle üniform taban basıncı dağılımı olarak dikkate alınmaktadır (Aytekin, 2009). Bu kabule göre tam merkezinden Q yükü ile yüklü bir temelde, zemin ortamında meydana gelecek gerilmeler Şekil 1.5'te görülmektedir.

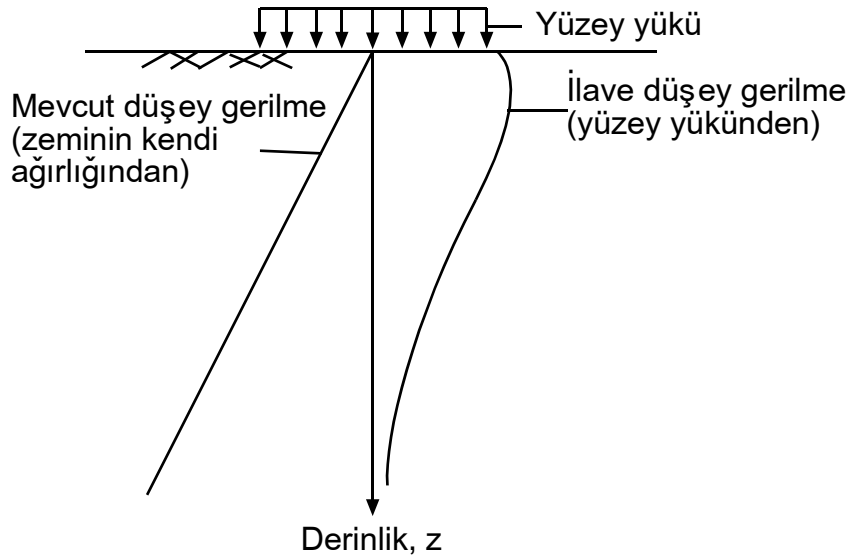


Şekil 1.5. Rijit kabule göre gerilme dağılımı

### 1.3. İlave Yüklerden Dolayı Oluşan Düşey Gerilme Artışları

Zeminler kendi ağırlıkları ve yapı temellerinin aktardıkları yüklerden dolayı gerilmelere maruz kalmaktadır. Yapıların zemine uyguladığı gerilmeler, yapı altında ve çevresinde sabit olmayıp derinlik boyunca değişim göstermektedir. Yapı altında zeminde oluşan gerilme dağılımları, geoteknik mühendisliğindeki birçok problemin çözümü ve

projelerin tasarımında oldukça büyük bir öneme sahiptir. Özellikle yapıların zeminde oluşturduğu düşey gerilme artışları, temeller ya da dolgular gibi yüzey yükleri uygulamalarından dolayı yapı altındaki zeminde oluşacak oturmaların tahmini için geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Dış yüklerin zeminde oluşturacağı gerilmelerin gerçek dağılımında, uygulanan yükün şiddetinin ve uygulandığı alanın boyutlarının yanında zemin özelliklerinin de etkisi söz konusudur. Ancak, zeminin karmaşık yapısından dolayı, zemin içerisinde gerçekçi gerilme-deformasyon analizleri yapmak oldukça zordur. Bu nedenle, zeminlerdeki gerilme artışı genellikle zeminin yarı sonsuz, ağırlıksız, izotrop, homojen ve elastik yarı sonsuz bir ortam kabulüyle belirlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 1.6'da yüzey yüklerinden dolayı zemin kitlesinde oluşan şematik düşey gerilme artışı,  $\Delta\sigma_z$ , gösterilmektedir.

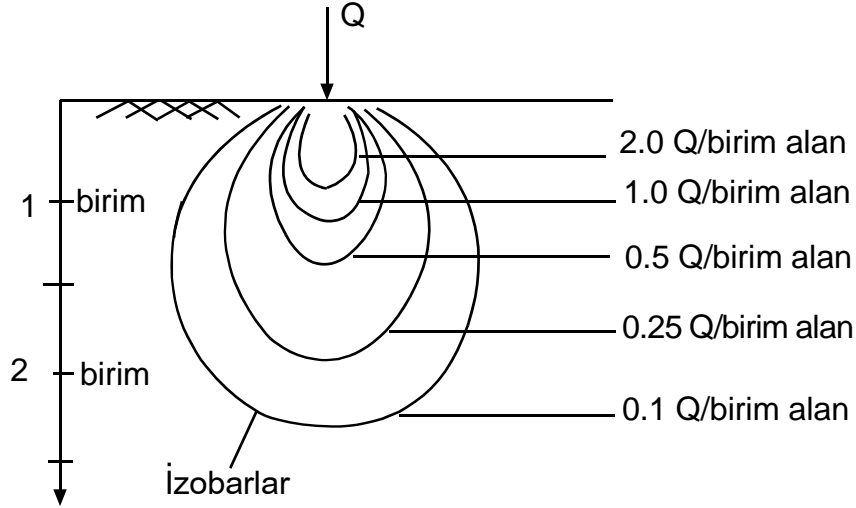


Şekil 1.6. Zemin kitlesinde yüzey yüklerinden oluşan şematik düşey gerilme artışı (Uzuner, 2007)

Zemine uygulanan yüzey yüklerinden dolayı oluşan düşey gerilme artışlarının gösterilmesinde ve belirlenmesinde kullanılan bazı yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.

### 1.3.1. İzobarlar

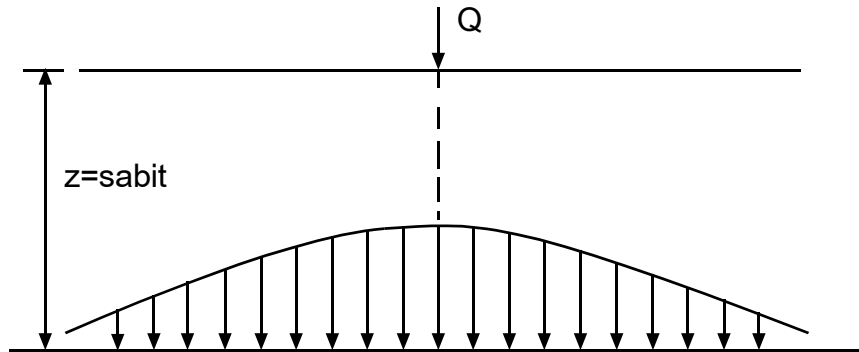
İzobarlar (basınç soğanları), eşit düşey gerilme artışı noktalarını birleştiren eğrilerdir. Şekil 1.7.'de tekil yükten oluşan izobarlar görülmektedir.



Şekil 1.7. Tekil yük için izobarlar (Uzuner, 1998)

### 1.3.2. Yatay Bir Düzlemde veya Doğrultuda Düşey Gerilme Artışı Dağılışı

Zemin yüzeyine uygulanan bir  $Q$  tekil yükünün altında, sabit derinlikte bulunan yatay düzlemdeki düşey gerilme artışı dağılışı Şekil 1.8'de görülmektedir.



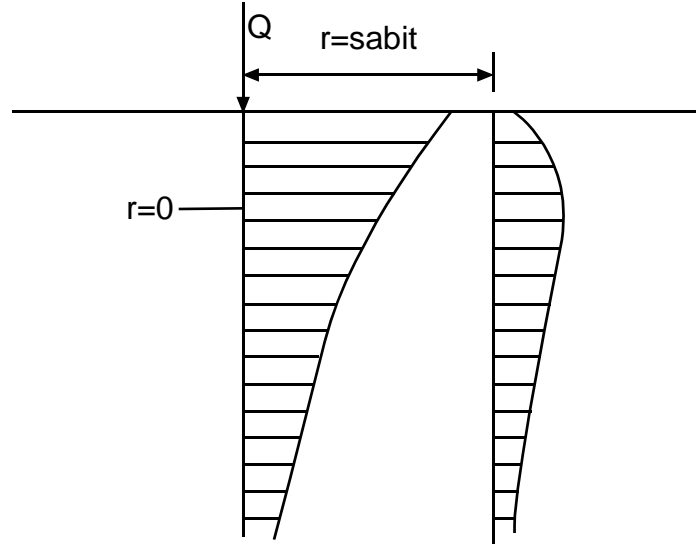
Şekil 1.8. Tekil bir yük altında, yatay bir düzlemdeki düşey gerilme artışı dağılışı (Uzuner,1998)



Şekil 1.8’de görüldüğü gibi zeminde oluşacak düşey gerilme artışı, tekil yükün uygulandığı noktada daha yatay olarak fazla yanlara doğru gittikçe azalmaktadır.

### 1.3.3. Düşey Bir Düzlemdeki Ek Düşey Gerilme Artışı Dağılışı

Herhangi bir  $r$ =sabit uzaklıktaki bir düzlem veya doğrultudaki düşey gerilme artışının dağılışı da grafik olarak gösterilebilir. Şekil 1.9’da tekil yükten dolayı, sabit uzaklıklardaki düşey doğrultular boyunca, düşey gerilme artışlarının dağılışı görülüyor (Uzuner, 2007).



Şekil 1.9. Tekil yükten düşey doğrultularda oluşan düşey gerilme artışları dağılışı (Uzuner, 2007)

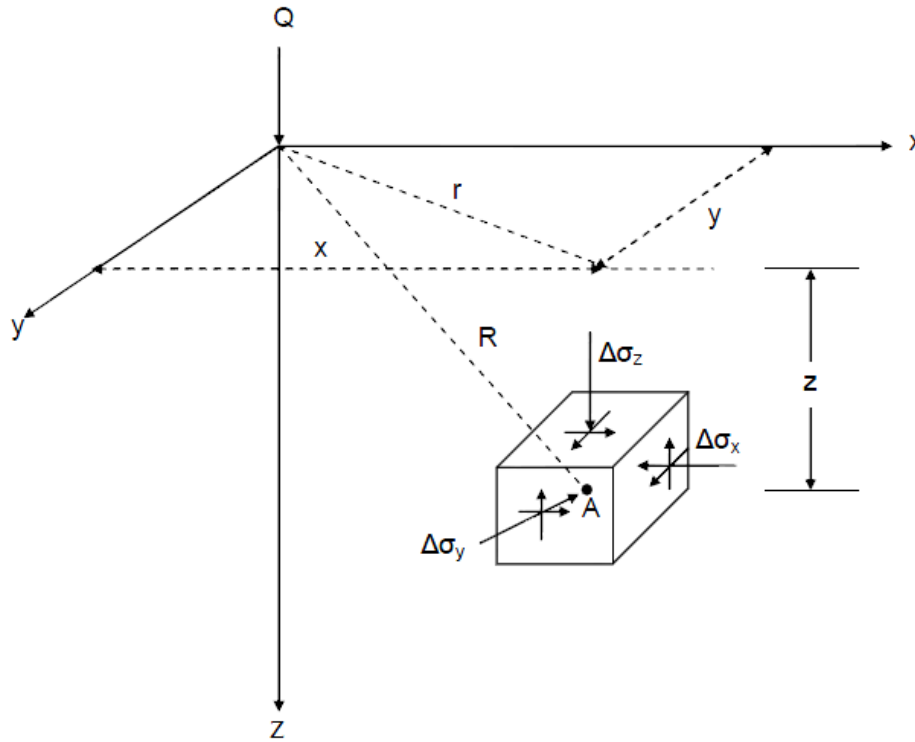
### 1.3.4. Tekil Yük Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları

Boussinesq (1885), lineer, elastik, homojen, izotrop, yarım sonsuz ortamda, yüzeye etkiyen bir tekil yükten dolayı oluşan gerilme problemini çözdü (Şekil 1.10) (Uzuner, 2007). Bu problem zemin mekaniğinde en çok karşılaşılan problemlerden biridir. Zemin yüzeyine uygulanan tekil yükten dolayı meydana gelecek ilave yatay ve düşey gerilmeler için bu çözümler 1.1, 1.2 ve 1.3 ifadelerinde verilmiştir.

$$\Delta\sigma_x = \frac{Q}{2\pi} \left( \frac{3x^2z}{R^5} - (1-2\mu) \left[ \frac{x^2-y^2}{Rr^2(R+z)} + \frac{y^2z}{R^2r^2} \right] \right) \quad (1.1)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{Q}{2\pi} \left( \frac{3y^2z}{R^5} - (1-2\mu) \left[ \frac{y^2-x^2}{Rr^2(R+z)} + \frac{x^2z}{R^2r^2} \right] \right) \quad (1.2)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5} = \frac{3Q}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2+z^2)^{5/2}} \quad (1.3)$$



Şekil 1.10. Tekil yükten dolayı zemin içinde oluşan gerilme artışları (Das, 2001)

Burada, x, y, z sırasıyla yatay mesafeler ve düşey mesafe,  $\mu$  ise poisson oranı, Q uygulanan tekil yük,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  'dir. (1.1) ve (1.2)'deki yatay gerilme artışı ifadelerinde Poisson oranı yer almasına rağmen (1.3)'de bu sabit yer almamaktadır. Bunun nedeni, düşey gerilme artışı ifadesi elde edilirken elastisite modülü ve Poisson oranının yarım sonsuz uzay boyunca sabit olduğu kabulünün yapılmasıdır. Dolayısıyla,

düşey gerilme artışları sadece uygulanan yükün şiddetine ve geometrik parametrelerine (x,y,z) bağlı olarak değişmektedir. (1.3) ifadesi aşağıdaki gibi düzenlenirse,

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} \left( \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left( (r+z)^2 + 1 \right)^{5/2}} \right) \quad (1.4)$$

bulunur. Bu ifadedeki r/z oranına bağlı etki faktörü (I<sub>p</sub>),

$$I_p = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left( (r+z)^2 + 1 \right)^{5/2}} \quad (1.5)$$

şeklinde tanımlanırsa düşey gerilmenin artışı bağıntısı basit olarak

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_p \quad (1.6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Doğal durumdaki zemin tabakalarının, yatay düzlemlerinde oluşan sürtünme kuvvetleri sebebiyle, düşey yüklemeler altında yatay şekil değiştirmelerinin oldukça sınırlı olduğu bilinmektedir.

Westergaard (1938), yatay şekil değiştirmelerin sıfır olduğu elastik bir ortamda, Q yükünden oluşan, z derinliğindeki A noktasında oluşan (Şekil 1.11) düşey gerilme artışı için,

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2 \pi} \frac{1}{\left[ 1 + 2 \left( r/z \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (1.7)$$

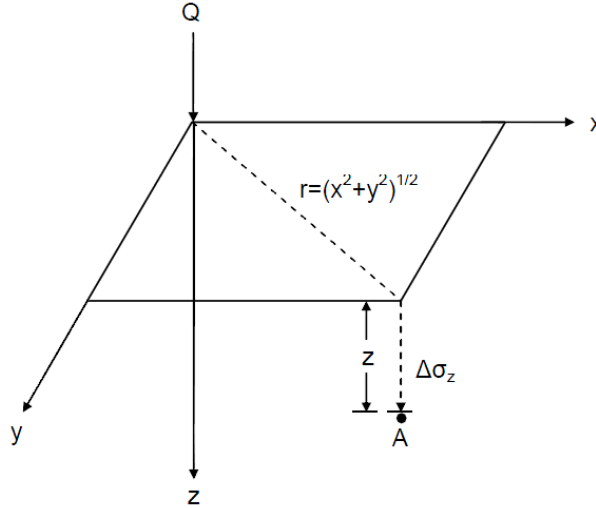
bağıntısını önermiştir. Burada,

$$I_w = \frac{1/\pi}{\left[1 + 2\left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (1.8)$$

Westergaard etki faktörü ( $I_w$ ) değeri yerine yazılırsa,

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_w \quad (1.9)$$

bağıntısı elde çıkar.



Şekil 1.11. Westergaard çözümüne göre tekil yükten dolayı oluşan düşey gerilme artışı (Das, 2001)

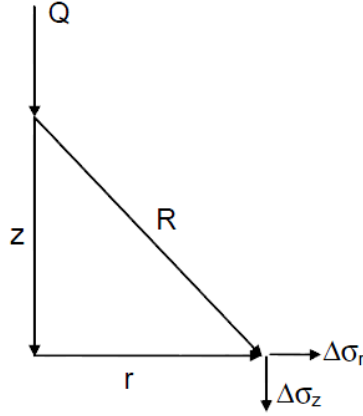
Sonsuz ortamda bir yüzeyde tekil yükten dolayı oluşan ilave düşey gerilmelerin hesaplanabilmesi için, Kelvin problemi olarak bilinen çözümde; düşey gerilmeler,

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{8\pi(1-\mu)} \left[ \frac{3z^3}{R^5} + \frac{(1-2\mu)z}{R^3} \right] \quad (1.10)$$

yatay radyal gerilmeler ise,

$$\Delta\sigma_r = \frac{Q}{8\pi(1-\mu)} \frac{z}{R^3} \left[ \frac{3r^2}{R^2} - (1-2\mu) \right] \quad (1.11)$$

şeklinde verilmektedir (Poulos ve Davis, 1974).

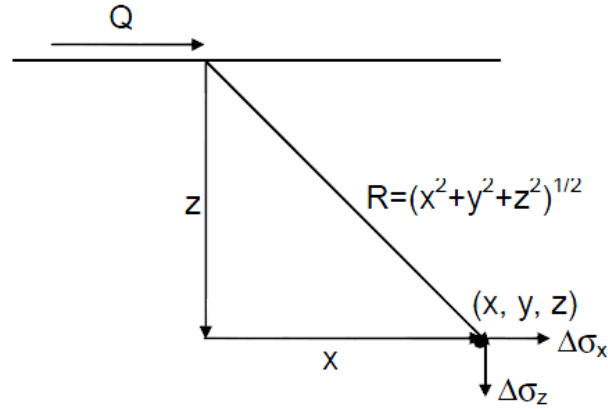


Şekil 1.12. Tekil yük için kelvin problemi (Poulos ve Davis, 1974)

Cerutti probleminde ise yarım sonsuz ortamda yatay bir yüzeyde tekil yükten dolayı oluşan, yatay ve düşey gerilmeler 1.12 ve 1.13 no'lu ifadelerde verilmiştir (Poulos ve Davis, 1974).

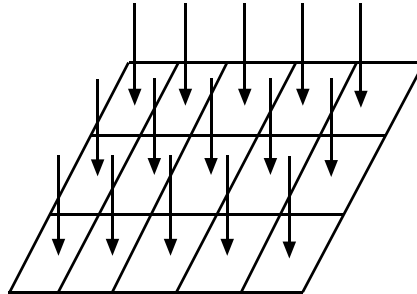
$$\Delta\sigma_z = \frac{3Qxz^2}{2\pi R^5} \quad (1.12)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{-Qx}{2\pi R^3} \left[ \frac{-3x^2}{R^2} + \frac{1-2\mu}{(R+z)^2} \left( R^2 - y^2 - \frac{2Ry^2}{R+z} \right) \right] \quad (1.13)$$



Şekil 1.13. Tekil yük için Cerutti problemi (Poulos ve Davis, 1974)

Yapılardan zemine gelen yükler temeller aracılığıyla aktarıldığı için, tekil yük için hesaplanan gerilme artışları, uygulamada karşılaşılan birçok inşaat mühendisliği probleminde gerçekçi olmamaktadır. Fakat tekil yük çözümlerinin integrali alınarak yayılı yüklerin zeminlerde yol açacağı gerilme dağılımlarını bulmak mümkün olmaktadır. Bu amaçla Şekil 1.14'te gösterildiği gibi dikdörtgen bir alanın üzerine gelen yayılı yük için tüm alan çok küçük alanlara ayrılır. Her bir alana gelen yayılı yük, tekil kuvvet gibi düşünülür. Tekil kuvvet ifadelerinde  $Q$  yerine konulan  $dQ$  diferensiyel yük ifadesine Green fonksiyonu adı verilmektedir (Tekinsoy ve Laman, 2000). Zeminler genellikle yarım sonsuz ortam olarak ele alındıklarından, Boussinesq probleminde bulunan düşey gerilme  $d\Delta\sigma_z$  ve yarım sonsuz ortamın sınırına etki eden yük de  $dQ$  olarak alınır. Bu diferansiyeller gerilme ifadelerinde yerlerine konulup, yükleme şekline bağlı olarak integralleri alındığında, gerilme dağılımları bulunmuş olur.



Şekil 1.14. Gerilmelerin hesabında Green fonksiyonu (Tekinsoy ve Laman, 2009)

Tekinsoy (1995) her türlü zemin için kullanılabilir yeni bünye denklemleri bulmuş ve bu denklemlerin zeminlerin gerilme artışı problemlerinde kullanılabilirliğini göstermiştir. Tekil yük için verilen gerilme ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\Delta\sigma_x = \frac{4P\sqrt{K_0}}{\pi} \left[ \frac{x^2z}{(4K_0x^2+z^2)^2} \right] \quad (1.14)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{4P\sqrt{K_0}}{\pi} \left[ \frac{z^3}{(4K_0x^2+z^2)^2} \right] \quad (1.15)$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{4P\sqrt{K_0}}{\pi} \left[ \frac{xz^2}{(4K_0x^2+z^2)^2} \right] \quad (1.16)$$

Burada  $K_0$ , zeminin cinsine bağlı sükunetteki basınç katsayısıdır.  $\phi$ , zeminin içsel sürtünme katsayısı olmak üzere,

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (1.17)$$

ile hesaplanır.

Tekinsoy vd. (2009) yaptıkları araştırmalarda zemin yoğunluğunun kütle aktarımı sırasında önemli bir işlevi olduğunu öne sürmüşlerdir. Bunun sonucu olarak kompasite, C ve gerilme arasında da önemli bir ilişki olduğunu varsaymışlardır. Kompasite,

$$C = \frac{\gamma_k}{\gamma_s} \quad (1.18)$$

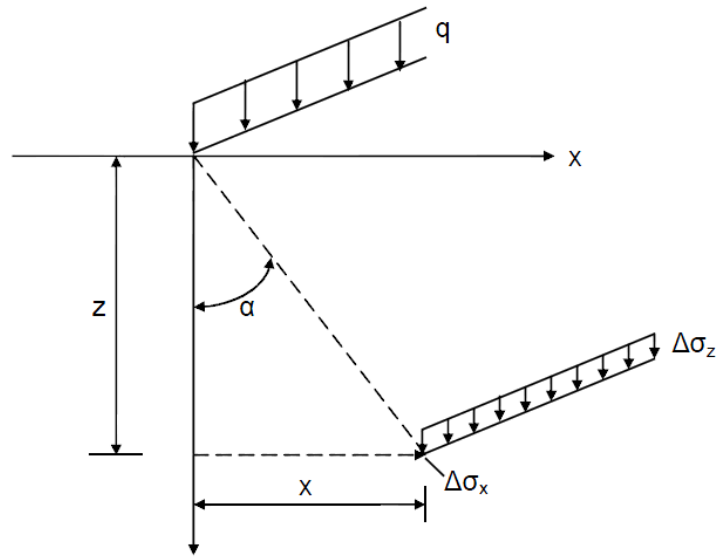
olduğuna göre, daha önce Tekinsoy (1995) tarafından tanımlanan (1.15) denklemi,

$$\Delta\sigma_z = \frac{\gamma_k}{\gamma_s} \frac{4P\sqrt{K_0}}{\pi} \left[ \frac{z^3}{(4K_0x^2+z^2)^2} \right] \quad (1.19)$$

haline gelir. Böylece gerilme ifadesinin tahmininde zemin indeks özellikleri de gözönüne alınmış olmaktadır (Tekinsoy vd., 1995).

### 1.3.5. Çizgisel Yük Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları

Sonsuz uzunluktaki bir çizgisel yükten dolayı oluşan düşey ve yatay gerilme artışları Şekil 1.15'te görülmektedir.



Şekil 1.15. Çizgisel yükten dolayı oluşan düşey ve yatay gerilme artışları (Uzuner, 1998)

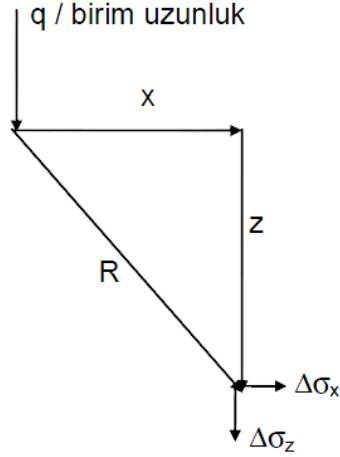
Bir  $q$  çizgisel yükünden,  $z$  derinliğinde,  $x$  uzaklıkta oluşan düşey ve yatay gerilme artışı değerleri Boussinesq probleminin integrasyonu ile, aşağıdaki gibi bulunabilir (Poisson oranı,  $\mu=0.5$  kabul edilerek).

$$\Delta\sigma_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2+z^2)^2} \quad (1.20)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{2qx^2z}{\pi(x^2+z^2)^2} \quad (1.21)$$



Yarım sonsuz ortamda, sonsuz uzunluktaki bir çizgisel yükten dolayı oluşan gerilmeler artışları (Şekil 1.16) Kelvin probleminin integrasyonu ile elde edilebilir (Poulos ve Davis, 1974). İntegrasyon sonucu elde edilen gerilme artışları, aşağıdaki ifadeler yardımıyla belirlenir.



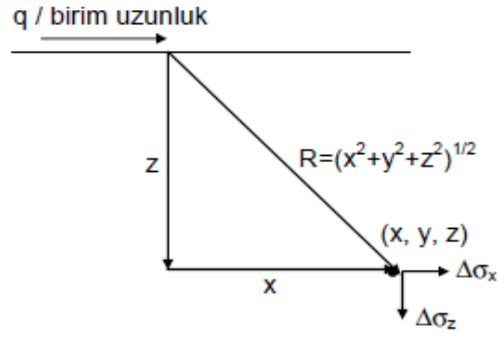
Şekil 1.16. Çizgisel yük (Kelvin problemi) (Poulos ve Davis, 1974)

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{2\pi(1-\mu)} \frac{z}{R^3} \left[ \frac{(3-2\mu)}{2} \frac{x^2}{R^2} \right] \quad (1.22)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{2\pi(1-\mu)} \frac{z}{R^3} \left[ -\frac{1-2\mu}{2} \frac{x^2}{R^2} \right] \quad (1.23)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{q}{2\pi} \frac{\mu}{(1-\mu)} \frac{z}{R^2} \quad (1.24)$$

Şekil 1.17'de verilen yarım sonsuz ortamda yatay çizgisel yükten dolayı oluşan gerilme artışları ise, Cerutti probleminin integrasyonu ile bulunabilir (Poulos ve Davis, 1974). Yatay tekil yükten dolayı oluşabilecek gerilme artışları 1.25, 1.26 ve 1.27 no'lu ifadeler yardımıyla hesaplanır.



Şekil 1.17. Çizgisel yük (Cerutti problemi) (Poulos ve Davis, 1974)

$$\Delta\sigma_z = \frac{2qxz^2}{\pi R^4} \quad (1.25)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{2qx^3}{\pi R^4} \quad (1.26)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{2qxz^2}{\pi R^4} \quad (1.27)$$

### 1.3.6. Üniform Şerit Yük Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları

Üniform şerit yükten dolayı oluşan gerilme artışlarını bulabilmek için Bölüm 1.3.5'te verilen (1.20) numaralı çizgisel yük gerilme ifadesinden faydalanılabilir. Yayılı yük  $q$  ( $F/L^2$ ) ise,  $dr$  genişliğindeki bir şerite etki eden yük  $q \cdot dr$  olur (Şekil 1.18). Şerit yük için (1.20) ifadesinde  $q$  yerine  $qdr$ ,  $x$  yerine  $(x-r)$  konulursa,

$$d\Delta\sigma_z = \frac{2(qdr)z^3}{\pi[(x-r)^2 + z^2]} \quad (1.28)$$

ifadesi elde edilir.  $B$  genişlikteki şerit yükten dolayı,  $A$  noktasında oluşan düşey gerilme artışı, (1.12) ifadesinin  $-B/2$  ve  $+B/2$  sınırları arasında integralinin alınmasıyla bulunabilir (Bağrıaçık, 2010).

$$\Delta\sigma_z = \int_{-B/2}^{+B/2} \left( \frac{2q}{\pi} \right) \left\{ \frac{z^3}{[(x-r)^2 + z^2]} \right\} dr \quad (1.29)$$

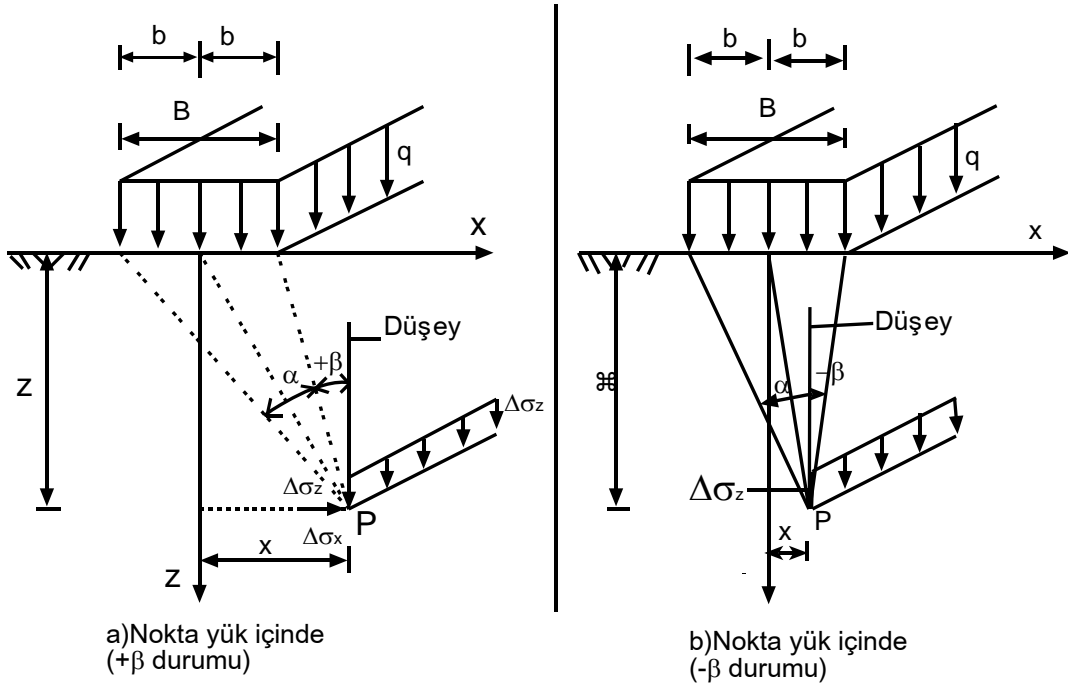
1.29 ifadesi Şekil 1.18.'de gösterilen  $\alpha$  ve  $\beta$  açıları cinsinden basitleştirilmiş olarak

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} [\alpha + \sin\alpha \cos(\alpha + 2\beta)] \quad (1.30)$$

şeklinde ifade edilir. Yatay gerilme ise

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi} [\alpha - \sin\alpha \cos(\alpha + 2\beta)] \quad (1.31)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Bağıntılarda  $\alpha$  ve  $\beta$  açıları radyan cinsindedir.



Şekil 1.18. Üniform şerit yük (Uzuner, 2007)

### 1.3.7. Ünlorm Yüklü Dairesel Alan Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları

Bölüm 1.3.4'te (1.3) numaralı ifade ile, yarım sonsuz ortamın sınırına etki eden tekil yük durumunda (Boussinesq tekil yük problemi) bulunan düşey gerilme artışı ifadesinde, Q yerine dq ve  $\Delta\sigma_z$  yerine de  $d\Delta\sigma_z$  alınarak, aşağıdaki Green fonksiyonu elde edilir.

$$d\Delta\sigma_z = \frac{3dq}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2+z^2)^2} \quad (1.32)$$

Yayıllı yük taşıyan alan dairesel olduğu için,

$$A = \int_0^r \int_0^{2\pi} r dr d\theta \quad (1.33)$$

$$A = 2\pi \int_0^r r dr \quad (1.34)$$

alınması gerekir ve dairesel alanın birim alanına gelen üniform yayıllı yük q ise, dA elemanter alanına gelen dq yükü,

$$dq = q 2\pi r dr \quad (1.35)$$

olacaktır. Bu değer (1.32) numaralı ifadeye yerine yazılacak olursa, toplam düşey gerilme artışı için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\Delta\sigma_z = \int_{r=0}^{r=R} \frac{3 \times 2\pi q r dr}{2\pi} \frac{z^3}{(x^2+z^2)^{5/2}} \quad (1.36)$$

$$\Delta\sigma_z = 3qz^3 \int_{r=0}^{r=R} \frac{r dr}{(x^2+z^2)^{5/2}} \quad (1.37)$$

Burada R değeri, yükün yayılı olduğu dairesel alanın yarıçapını göstermektedir (Şekil 1.19.).

Yukarıdaki integralde  $r^2+z^2=u$  dönüşümü yapıp,  $rdr=du/2$  değeri yerine konulursa,

$$\Delta\sigma_z=q\left[1-\frac{z^3}{(R^2+z^2)^{3/2}}\right] \quad (1.38)$$

sonucu ortaya çıkar. Buradaki  $\Delta\sigma_z$  gerilmesi, dairesel alanın merkezi altındaki düşey gerilme artışını göstermektedir. Burada, R=sabittir. İfadede paydadaki terim  $z^2$  parentezine alınır ve R/z oranına göre düzenlenirse,

$$\sigma_z=qI \quad (1.39)$$

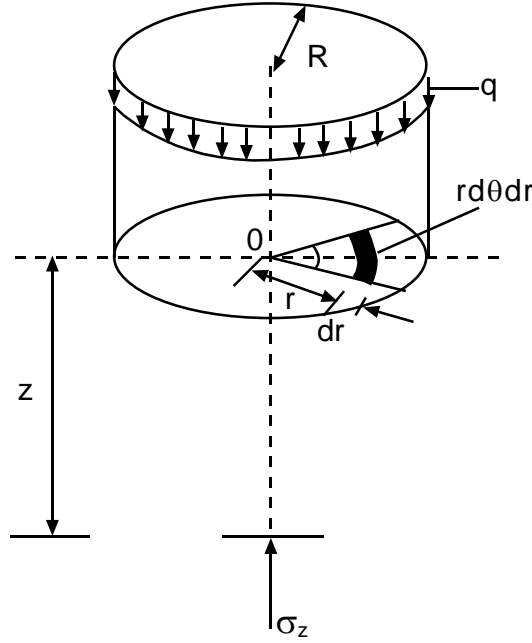
$$I=1-\frac{1}{\left[1+\left(\frac{R}{z}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (1.40)$$

gerilme dağılımı I tesir faktörüne bağlı olarak gösterilmiş olur.

Yatay gerilme artışları ise simetriden dolayı,

$$\Delta\sigma_x=\Delta\sigma_y=\frac{q}{2}\left[(1-2\mu)+\frac{2(1+\mu)z/a}{\left[1+(z/a)^2\right]^{1/2}}+\frac{(z/a)^3}{\left[1+(z/a)^2\right]^{3/2}}\right] \quad (1.41)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 1.19. Ünlform yüklü alanın merkezi altında gerilme dağılımı (Özüdođru vd.,1996)

Ünlform dairesel yükten dolayı zemin içinde oluşan düşey gerilme artışı Westergaard (1938) tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta\sigma_z = q \left\{ 1 - \frac{k}{\left[ k^2 \left( \frac{r}{z} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\} \quad (1.42)$$

$I_w$  etki faktörü olarak alınırsa,

$$\Delta\sigma_z = q I_w \quad (1.43)$$

burada,  $k$  geometriye bağlı bir katsayıdır (Keskin, 2003).

Tekinsoy (1995), dairesel ve unilform yüklü fleksibl bir alanın altındaki düşey gerilme artışını hesaplamak için, aşağıdaki denklemleri önermiştir.

$$\Delta\sigma_z = q \left[ 1 - \frac{z^3}{\left( 4K_0 R^2 + z^2 \right)^{3/2}} \right] \quad (1.44)$$

Burada R, dairesel yayılı yükün yarıçapıdır. Tekinsoy vd. (2009), dairesel ve uniform yüklü fleksibl bir alanın altındaki düşey gerilme artışını, kompasiteyi de göz önüne alarak, incelemişler ve daha önce Tekinsoy (1995) tarafından tanımlanan, (1.44) denklemi aşağıdaki hali almıştır (Bağrıaçık, 2010).

$$\Delta\sigma_z = \frac{\gamma_k}{\gamma_s} q \left[ 1 - \frac{z^3}{(4K_0R^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (1.45)$$

Bunun yardımıyla düşey gerilme artışlarının tahmininde, zeminin indeks özellikleri de dikkate alınmış olmaktadır.

### 1.3.8. Ünlorm Yüklü Dikdörtgen Alan Durumunda Zeminlerde Oluşan Gerilme Artışları

Boussinesq denklemleri L uzunluğunda ve B genişliğindeki q üniform yükü ile yüklenmiş dikdörtgen bir alanın altında oluşan gerilme artışlarını bulmak için de kullanılabilir. Dikdörtgen alanın bir köşesi altında ve z derinliğindeki A noktasında oluşan düşey gerilme artışını bulabilmek için, dikdörtgenin dx dy büyüklüğündeki elemanter bir parçası göz önüne alınacaktır (Sekil 1.20). Bu durumda elemanter parçacığa gelen yük,

$$dq = q dx dy \quad (1.46)$$

olacaktır. Bölüm 1.3.4'te (1.3) numaralı ifade ile bulunan düşey gerilme artışı ifadesinde Q yerine dq ve  $\sigma_z$  yerine  $d\sigma_z$  yazılarak,

$$d\Delta\sigma_z = \frac{3q dx dy z^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad (1.47)$$

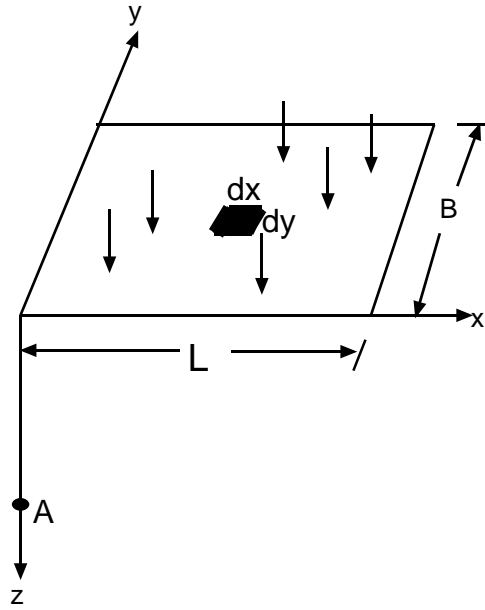
elde edilir. (1.47) numaralı ifadenin integrali alınırsa,

$$\Delta\sigma_z = \int d\Delta\sigma_z = \int_{y=0}^B \int_{x=0}^L \frac{3qz^3 (dx dy)}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} = qI_r \quad (1.48)$$

denklemleri elde edilir. Burada  $I_r$  etki faktörü olmak üzere

$$I_r = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \left( \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \right] \quad (1.49)$$

şeklinde yazılabilir (Das, 2001). Burada  $m=B/z$  ve  $n=L/z$ 'dir. 1.49 bağıntısında 2. terimin ( $\tan^{-1} \dots$ ) birimi radyandır.



Şekil 1.20. Üniform yüklü dikdörtgen alan

Westergaard (1938), üniform yüklü dikdörtgen bir alanın altında oluşan düşey gerilme artışı ifadesini elde etmiştir.

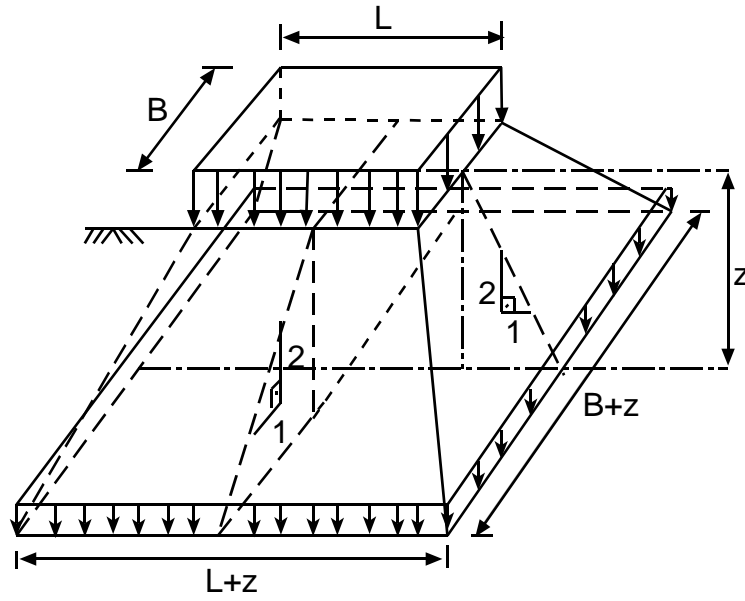
$$\Delta\sigma_z = q \frac{1}{2\pi} \left[ \cot^{-1} \sqrt{\left( \frac{1-2\mu}{1-2\mu} \right) \left( \frac{1}{m^2} + \frac{1}{n^2} \right)} + \left( \frac{1-2\mu}{1-2\mu} \right)^2 \left( \frac{1}{m^2 n^2} \right) \right] \quad (1.50)$$

Burada,  $m=B/z$  ve  $n=L/z$  geometriye bağlı katsayılarıdır.



### 1.3.9. Yaklaşık Yöntem

Bir dikdörtgen alanın altında, düşey gerilme artışı, yaklaşık olarak da hesaplanabilir. Burada, gerilme artışı dağılışının derinlik boyunca, 2:1 eğimi ile (Düşeyle 26.5 derecelik bir yayılış) gittiği kabul edilir (Uzuner, 2007). Yaklaşık yöntem diyagramı Şekil 1.21’de görülmektedir.



Şekil 1.21. Bir dikdörtgen alanın altında yaklaşık gerilme artışı (Uzuner, 2007)

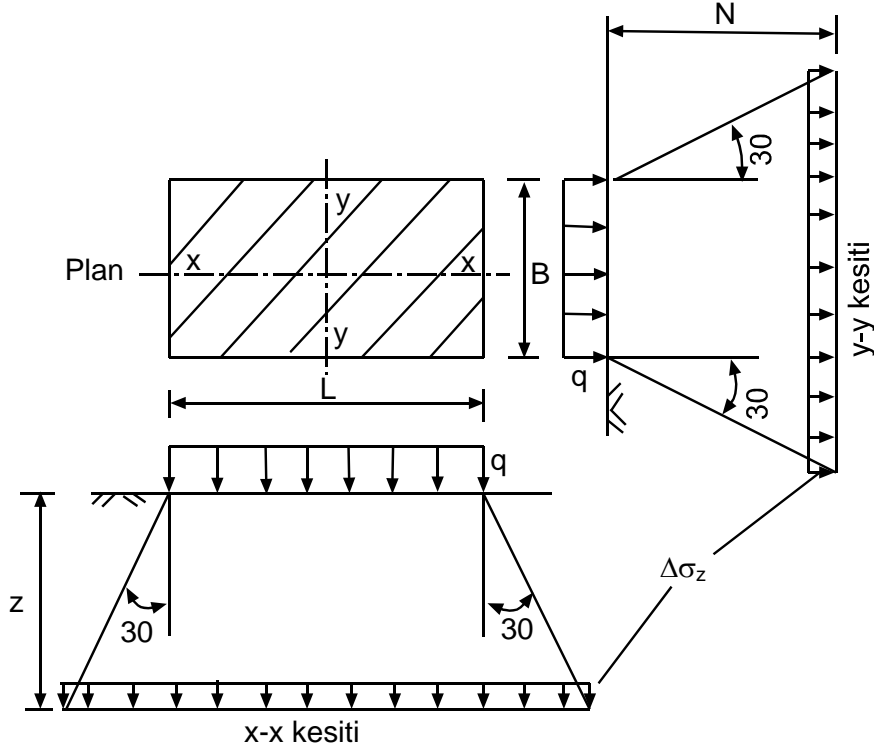
Buna göre, q yayılı yükü ile yüklü LxB alanının z derinliği altındaki  $\Delta\sigma_z$  düşey gerilme artışı

$$\Delta\sigma_z = \frac{qBL}{(B+z)(L+z)} \quad (1.51)$$

olur (Uzuner, 2007).

Üniform yayılı yük ile yüklü bir dikdörtgen alan altındaki düşey gerilme artışını hesaplamak için kullanılan bir diğer yaklaşık yöntemde, düşeyle 30°'lik bir yayılış kabul edilir (Şekil 1.22). Bu yöntemde, z derinliğindeki gerilme artışı, aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Uzuner, 2007).

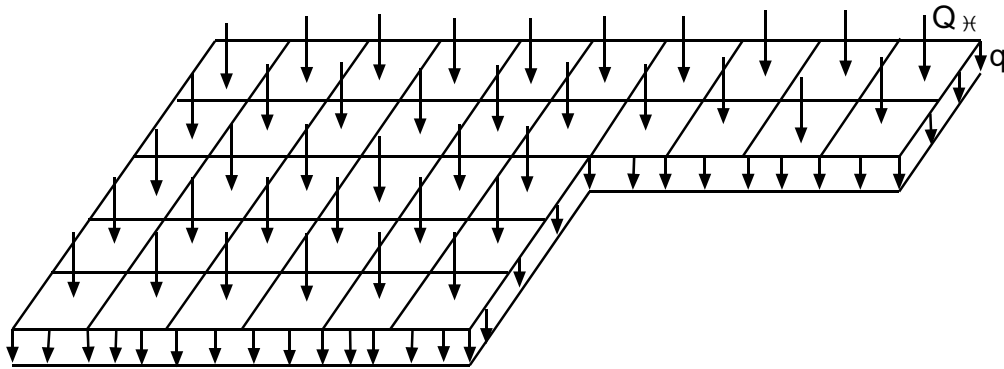
$$\Delta\sigma_z = \frac{qBL}{(B+1.155z)(L+1.155z)} \quad (1.52)$$



Şekil 1.22. Düşeyle 30°'lik dağılış yöntemi (Uzuner, 2007)

### 1.3.10. Eşdeğer Tekil (Nokta) Yük Yöntemi

Üniform yayılı yük ile yüklü alan, küçük alanlara bölünerek, her bir alanın yükü, o alan ortasında etkiyen tekil yüke dönüştürülür (Şekil 1.23).



Şekil 1.23. Eşdeğer tekil yük yöntemi (Uzuner, 2007)

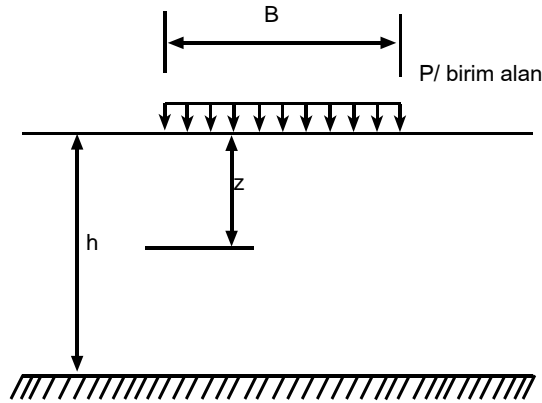
İstenilen noktadaki, tekil yüklerden dolayı oluşan gerilme artışları, Bağıntı 1.53 ile hesaplanır.

$$\Delta\sigma_z = \frac{1}{z^2} \sum_{i=1}^n K_{B_i} Q_i \quad (1.53)$$

### 1.3.11. Sınırlı Tabaka Çözümleri

#### 1.3.11.1. Üniform Şerit Yük Durumu

Şekil 1.24'te görülen bir sınırlı tabakaya B genişliğinde etki eden P üniform şerit yükünden meydana gelebilecek düşey ve yatay gerilme artışları,  $\Delta\sigma_z$ ,  $\Delta\sigma_y$ ,  $\Delta\sigma_x$  ve oturma miktarları  $\rho_z$ ,  $\rho_x$  aşağıda görülmektedir (Poulos, 1967).



Şekil 1.24. Üniform çizgisel yük durumu (Poulos ve Davis, 1974)

$$\sigma_x = \left[ \frac{\theta}{1+\mu} \right] - \sigma_z \quad (1.54)$$

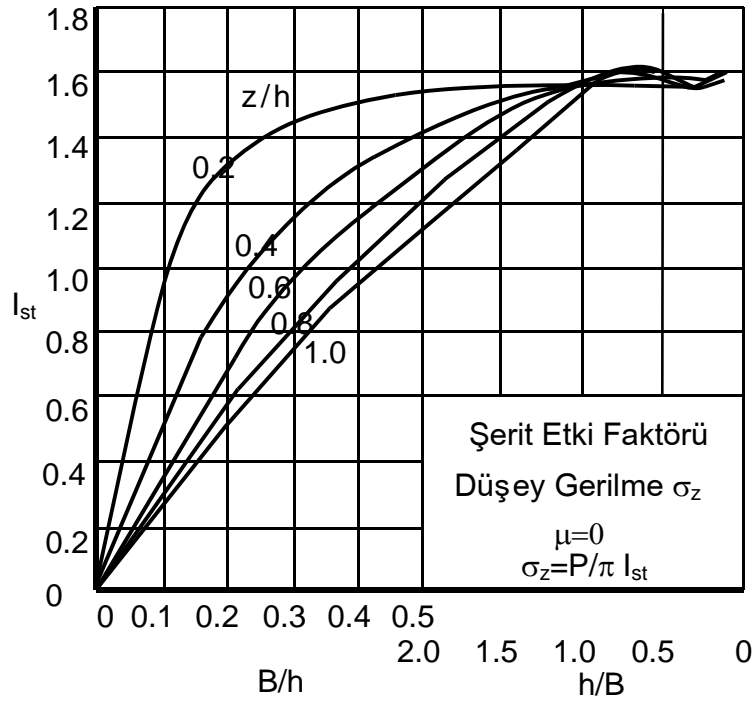
$$\sigma_y = \mu \times (\sigma_x + \sigma_z) \quad (1.55)$$

$$\sigma_z = \left( \frac{P}{\pi} \right) \times I_{st} \quad (1.56)$$

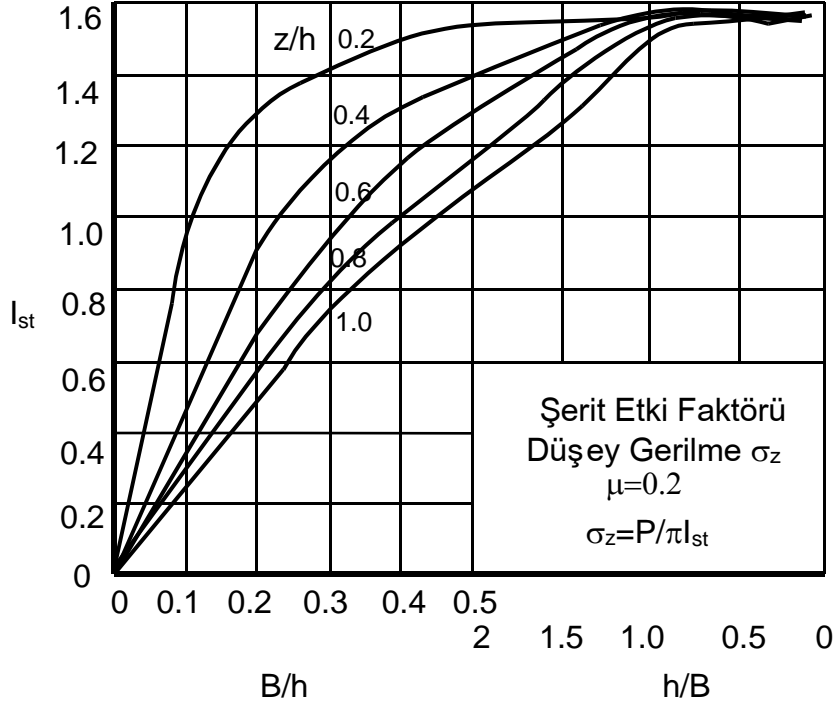
$$\rho_z = \left( \frac{(P \times h)}{(\pi \times E)} \right) I_{st} \quad (1.57)$$

$$\rho_x = \left( \frac{(P \times h)}{(\pi \times E)} \right) I_{st} \quad (1.58)$$

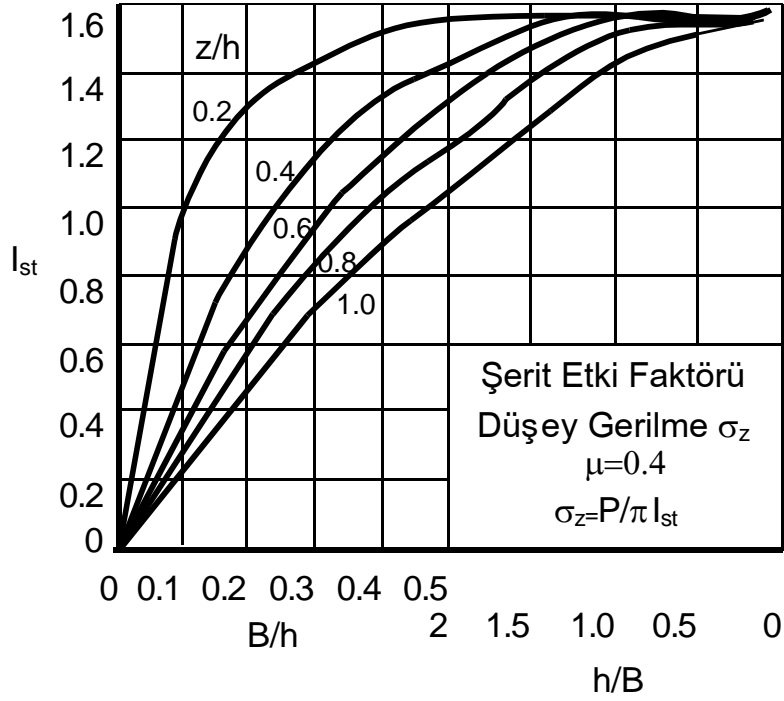
Bağıntı 1.54, 1.55 ve 1.56'da, P, uygulanan yükü,  $I_{st}$ , etki faktörünü, E, elastisite modülünü,  $\theta$ , toplam gerilmeyi, h, zemin tabakasının kalınlığını ve  $\mu$ , Poisson oranını göstermektedir. Şekil 1.25, 1.26, 1.27, 1.28'de farklı Poisson oranları için çizilmiş ilave düşey gerilme etki faktörleri eğrileri görülmektedir.



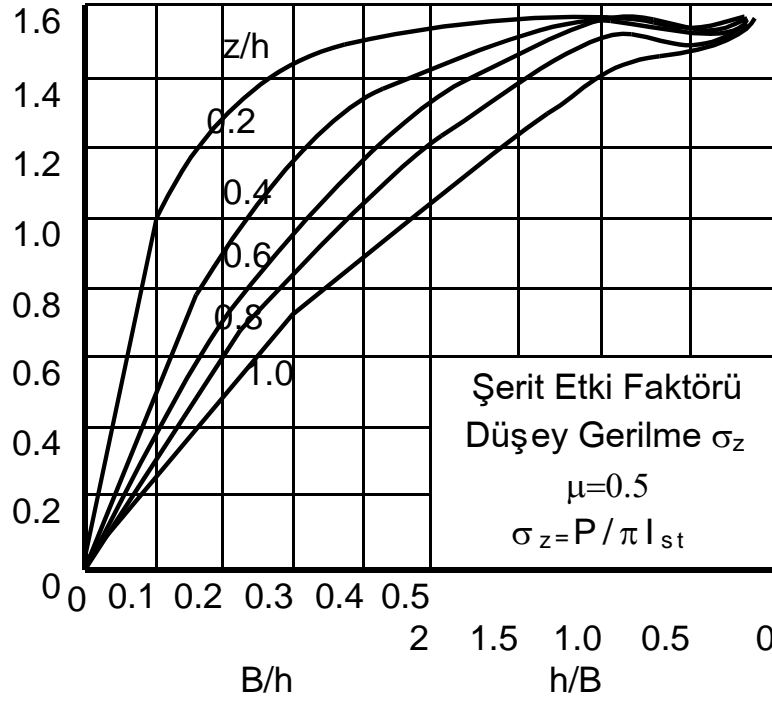
Şekil 1.25. Poisson oranı ( $\mu$ ) 0 için etki faktörü eğrileri (Poulos ve Davis, 1974)



Şekil 1.26. Poisson oranı ( $\mu$ ) 0.2 için etki faktörü eğrileri (Poulos ve Davis, 1974)



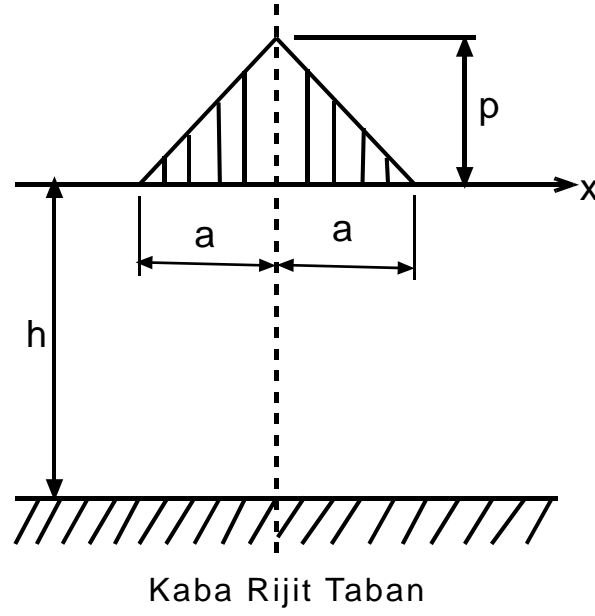
Şekil 1.27. Poisson oranı ( $\mu$ ) 0.4 için etki faktörü eğrileri (Poulos ve Davis, 1974)



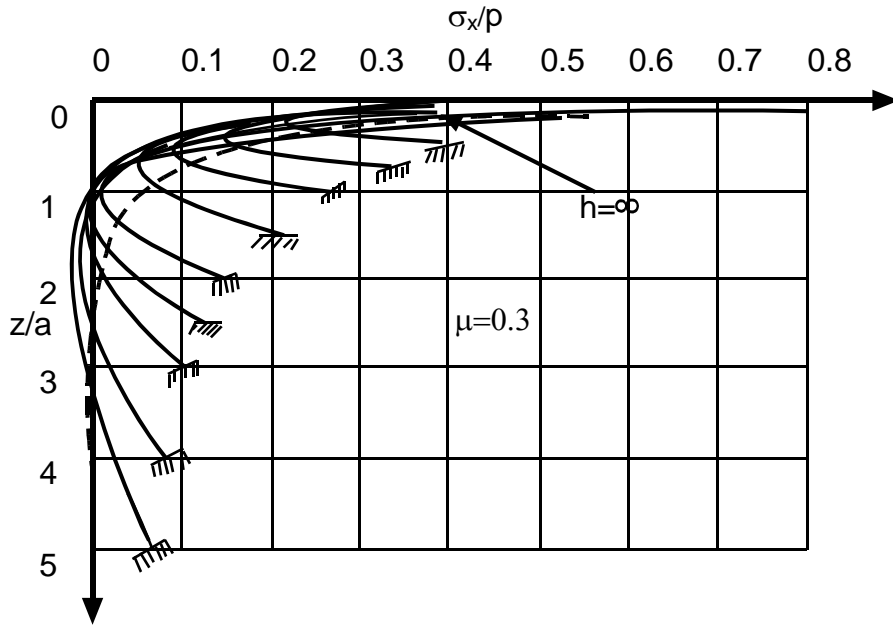
Şekil 1.28. Poisson oranı ( $\mu$ ) 0.5 için etki faktörü eğrileri (Poulos ve Davis, 1974)

### 1.3.11.2. Üçgensel Yük Durumu

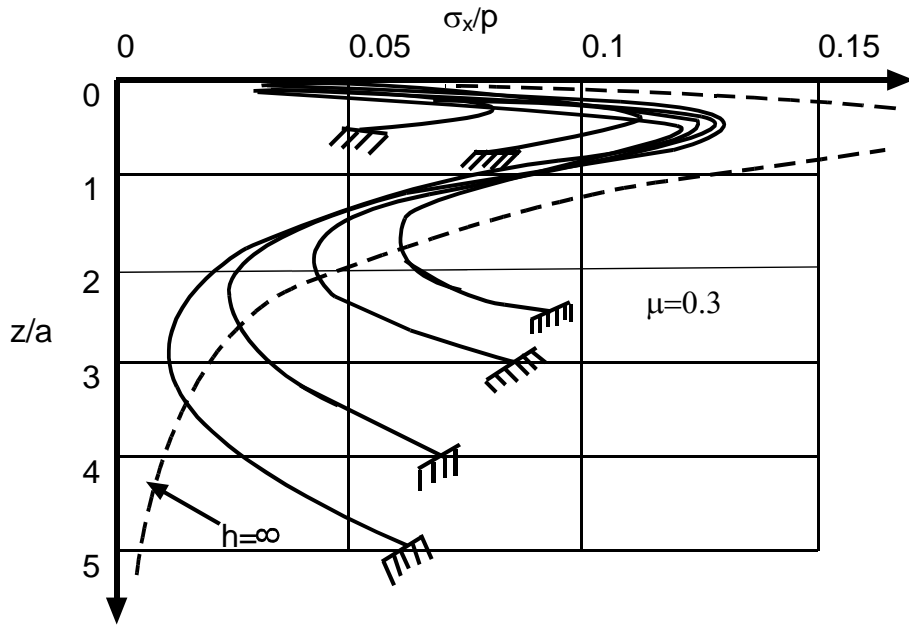
Giroud ve Watissee (1972) üçgensel yük ile yüklü sınırlı tabakada (Şekil 1.29) meydana gelebilecek gerilme artışlarını Poisson oranının 0.3 olduğu durumda uygulanan yükün merkezi ve kenar noktaları için elde etmişlerdir. Bu sonuçlar Şekil 1.30, 1.31, 1.32, 1.33 ve 1.34'te görülmektedir.



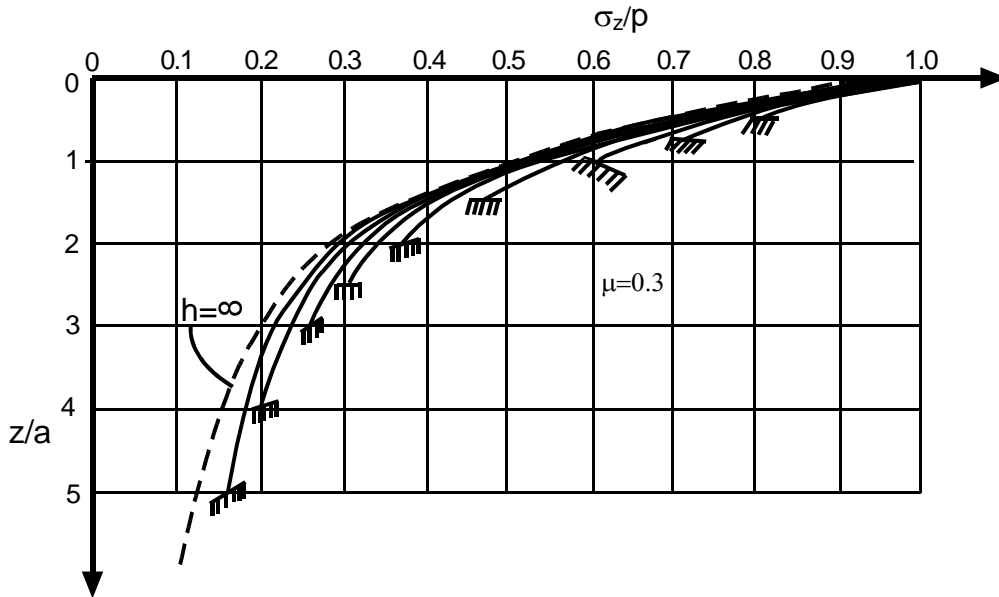
Şekil 1.29. Üçgensel yük ile yüklü ile sınırlı tabaka (Poulos ve Davis, 1974)



Şekil 1.30. Üçgensel yükün merkezi altında meydana gelen yatay gerilme artışı ( $\Delta\sigma_x$ ) (Poulos ve Davis, 1974)

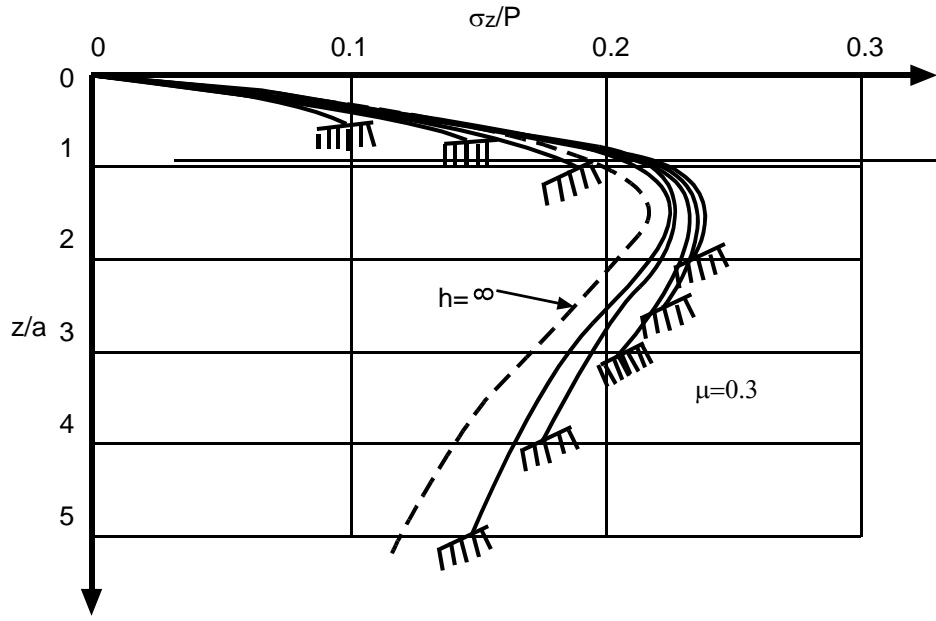


Şekil 1.31. Üçgensel yükün kenar noktaları altında meydana gelen yatay gerilme artışı ( $\Delta\sigma_x$ ) (Poulos ve Davis, 1974)

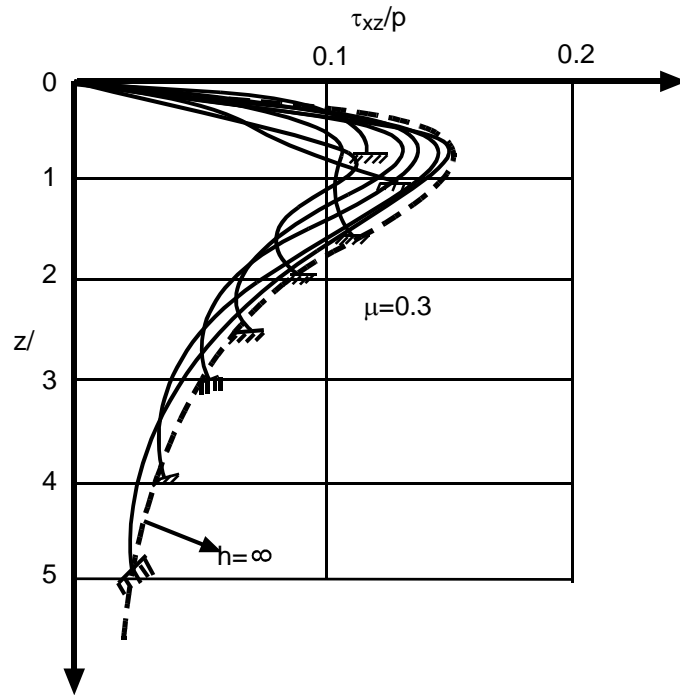


Şekil 1.32. Üçgensel yükün merkezi altında meydana gelen düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)





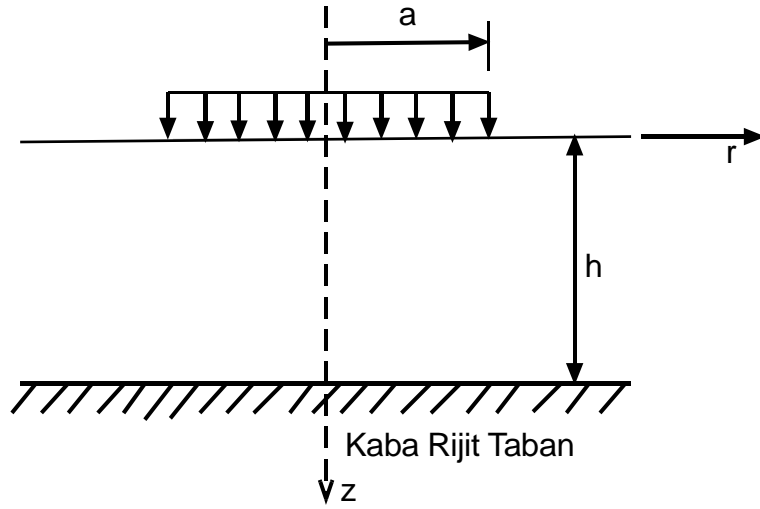
Şekil 1.33. Üçgensel yükün kenar noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)



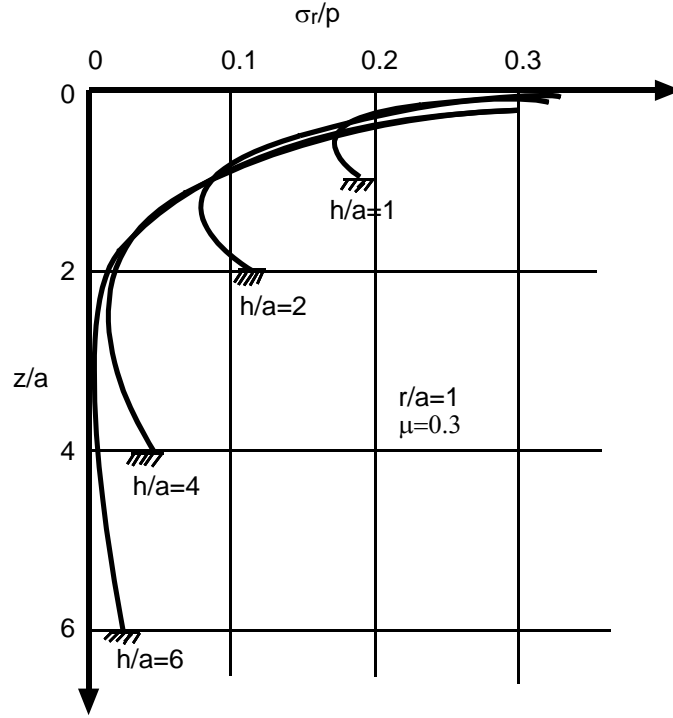
Şekil 1.34. Üçgensel yükün kenar noktaları altında meydana gelen kayma gerilmesi artışı ( $\Delta\tau_{xz}$ ) (Poulos ve Davis, 1974)

### 1.3.11.3. Üniform Dairesel Alan Yük Durumu

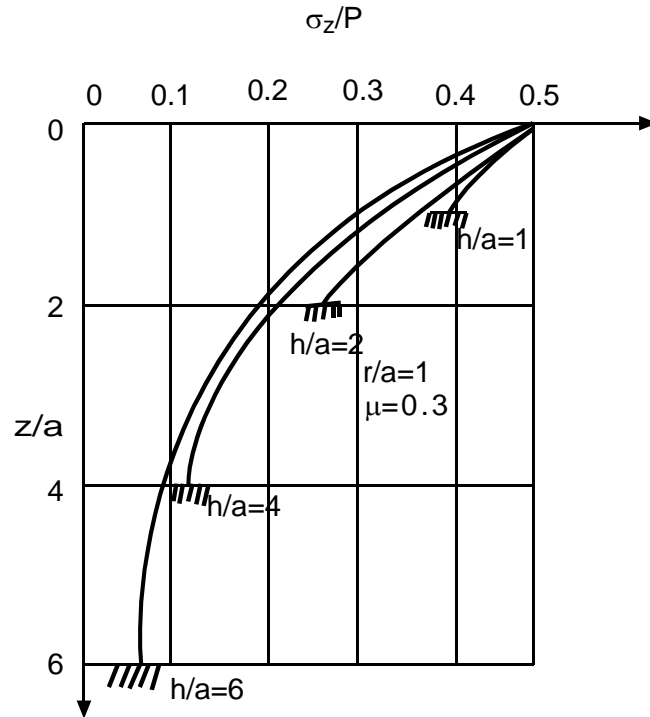
Milovic (1970), dairesel alan ile yüklü sınırlı tabakanın (Şekil 1.35) altında oluşabilecek üç farklı Poisson oranı değeri için ( $\mu=0.15, 0.30$  ve  $0.45$ ) ayrıca dört farklı  $h/a$  değeri için dairesel alanın merkezi ve kenar noktaları altında meydana gelecek yatay ve düşey gerilme artışlarını hesaplamıştır. Poisson oranının  $0.3$  olduğu durumda meydana gelecek düşey ve yatay gerilme artışları Şekil 1.36, 1.37, 1.38 ve 1.39'da görülmektedir.



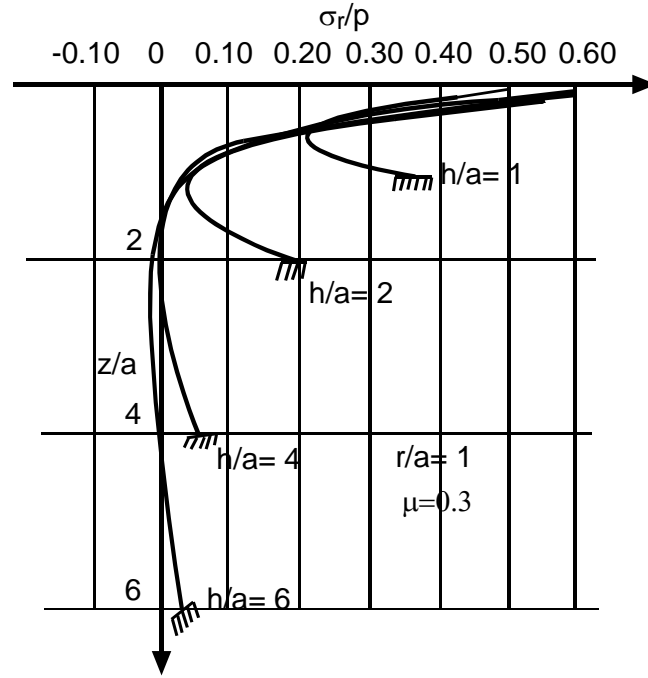
Şekil 1.35. Dairesel alan yüklemesi ile yüklü sınırlı tabaka (Poulos ve Davis, 1974)



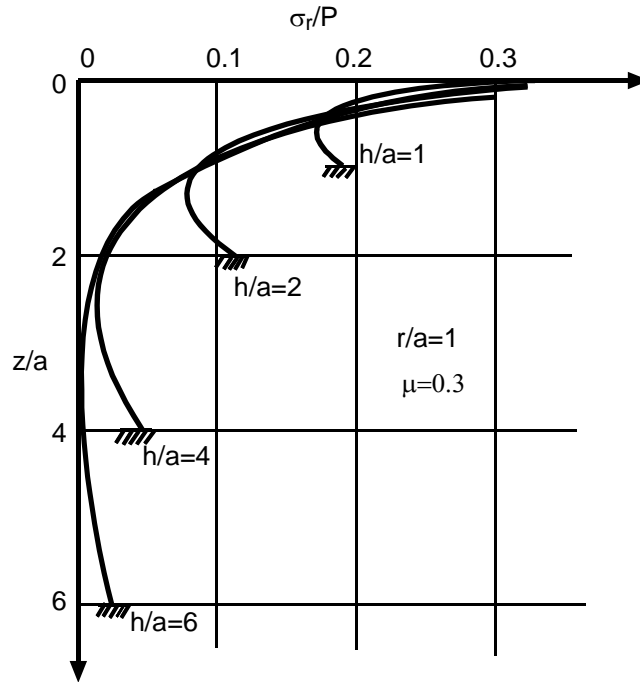
Şekil 1.36. Dairesel alanın merkezi altında oluşabilecek düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)



Şekil 1.37. Dairesel alanın kenar noktaları altında oluşabilecek düşey gerilme artışı değerleri ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)



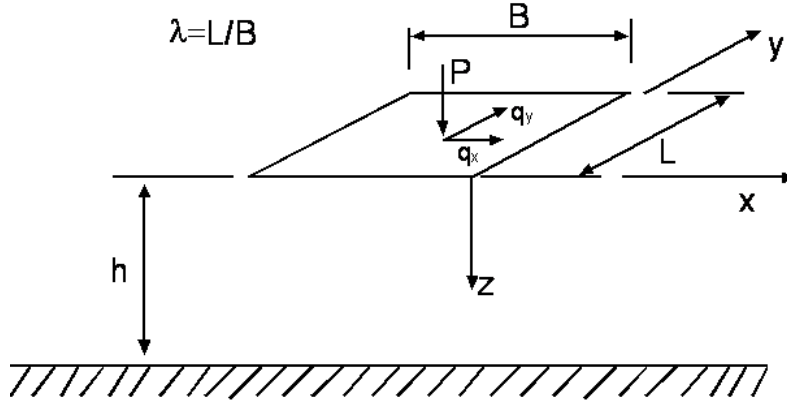
Şekil 1.38. Dairesel alanın merkezi altında oluşabilecek yatay gerilme artışı değerleri ( $\Delta\sigma_x$ ) (Poulos ve Davis, 1974)



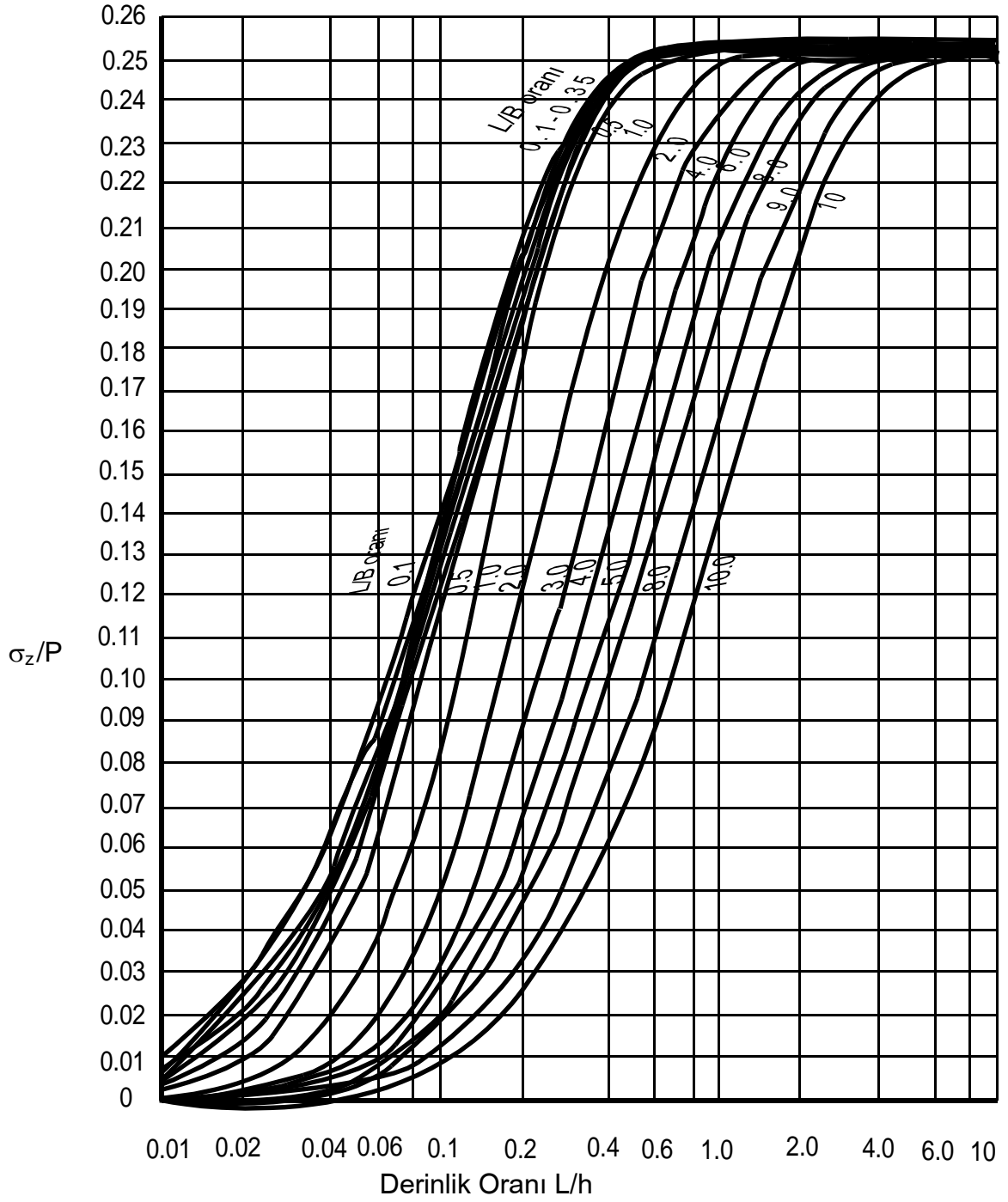
Şekil 1.39. Dairesel alanın kenar noktaları altında oluşabilecek yatay gerilme artışı değerleri ( $\Delta\sigma_x$ ) (Poulos ve Davis, 1974)

### 1.3.11.4. Üniform Yüklü Dikdörtgen Alan Durumu

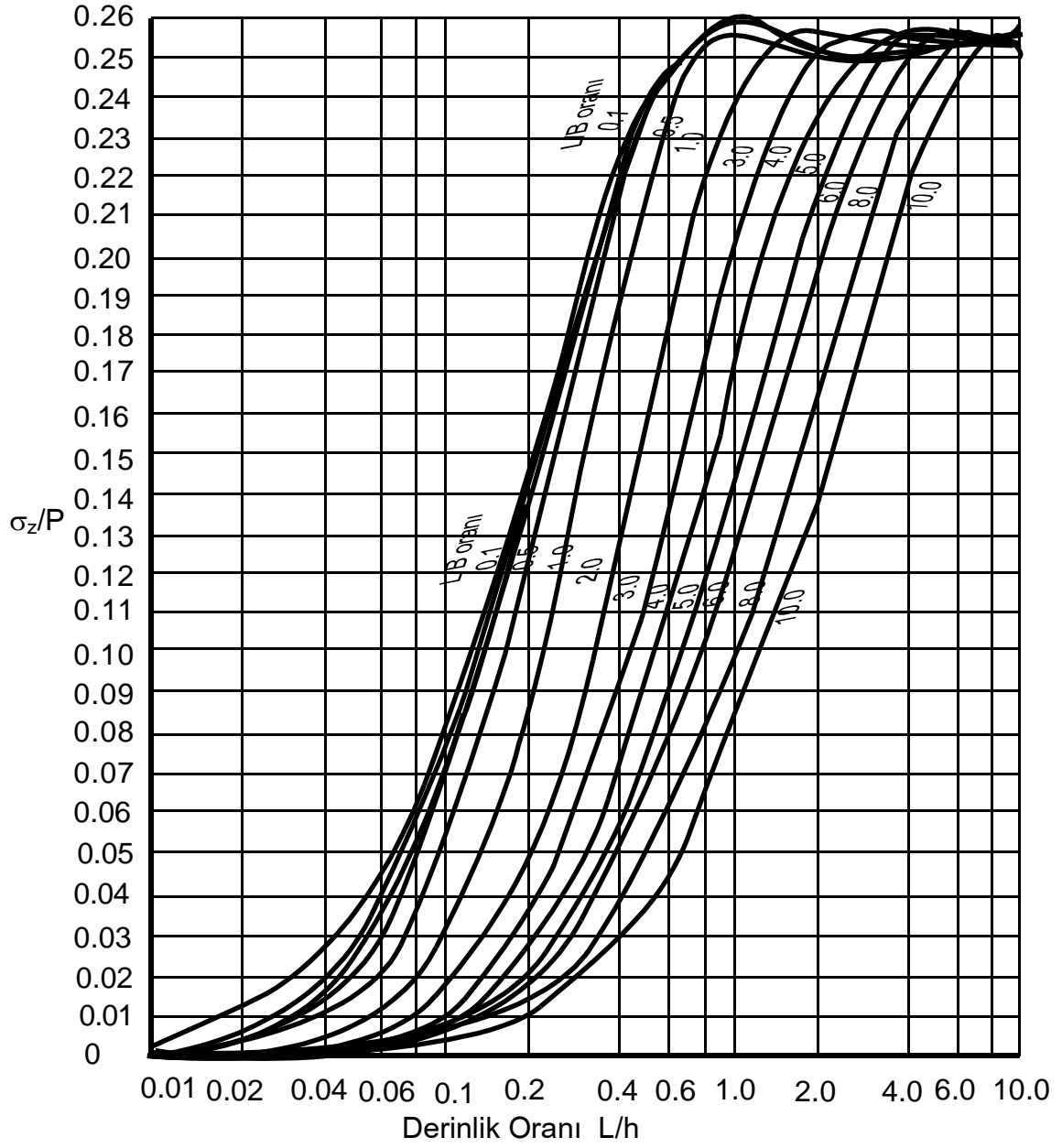
Burmister (1956) sınırlı kalınlıkta bir tabakanın üzerine uygulanan dikdörtgen alan yüklemesi (Şekil 1.40) için farklı derinliklerde alanın köşe noktaları altında meydana gelebilecek gerilme değeri artışlarını hesaplamıştır. Poisson oranı 0.4 için, köşe noktalar altındaki gerilme artışları Şekil 1.41, 1.42, 1.43, 1.44 ve 1.45'te görülmektedir.



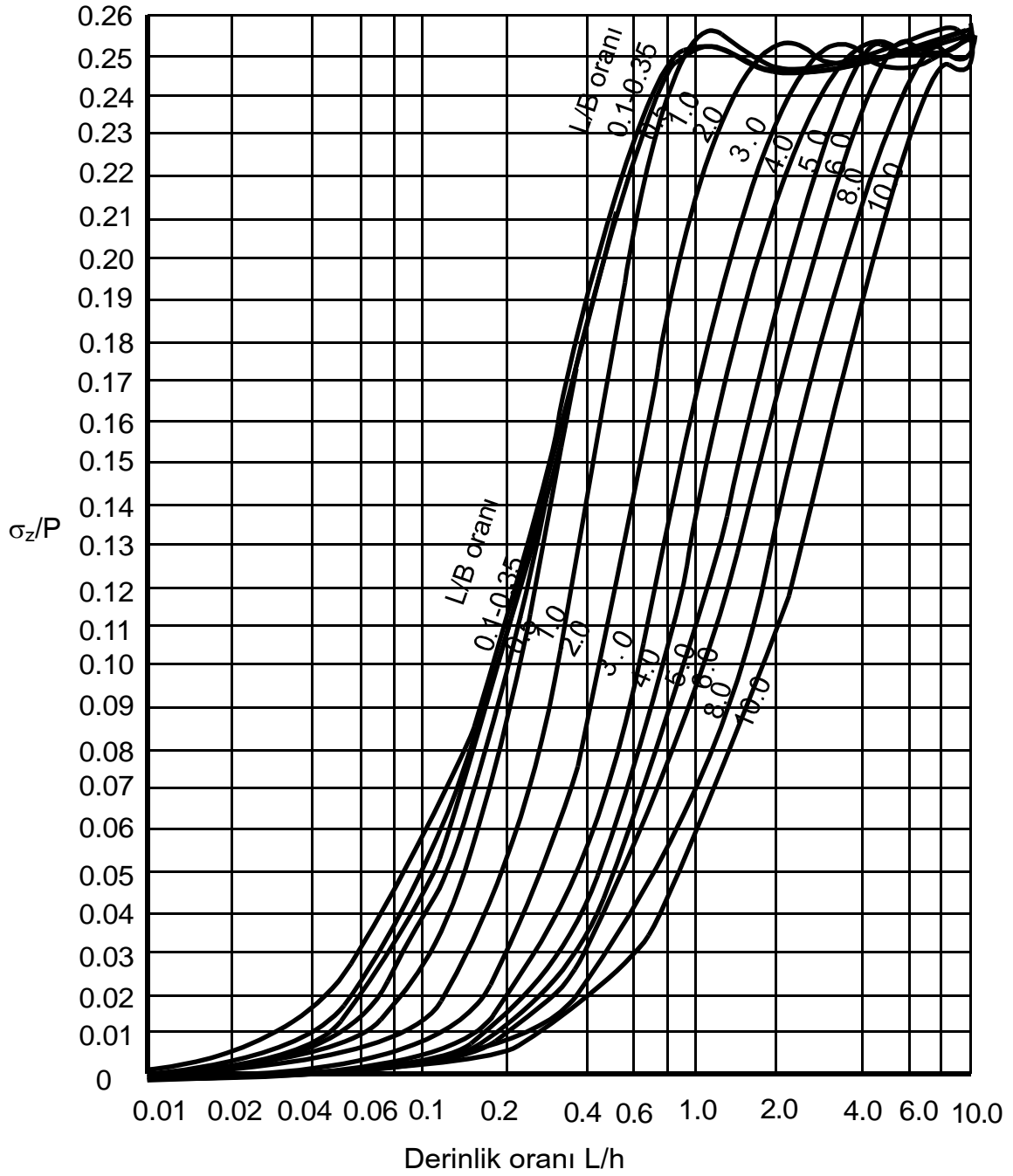
Şekil 1.40. Üniform dikdörtgen alan ile yüklü sınırlı tabaka (Poulos ve Davis, 1974)



Şekil 1.41.  $z=0.2h$  için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)

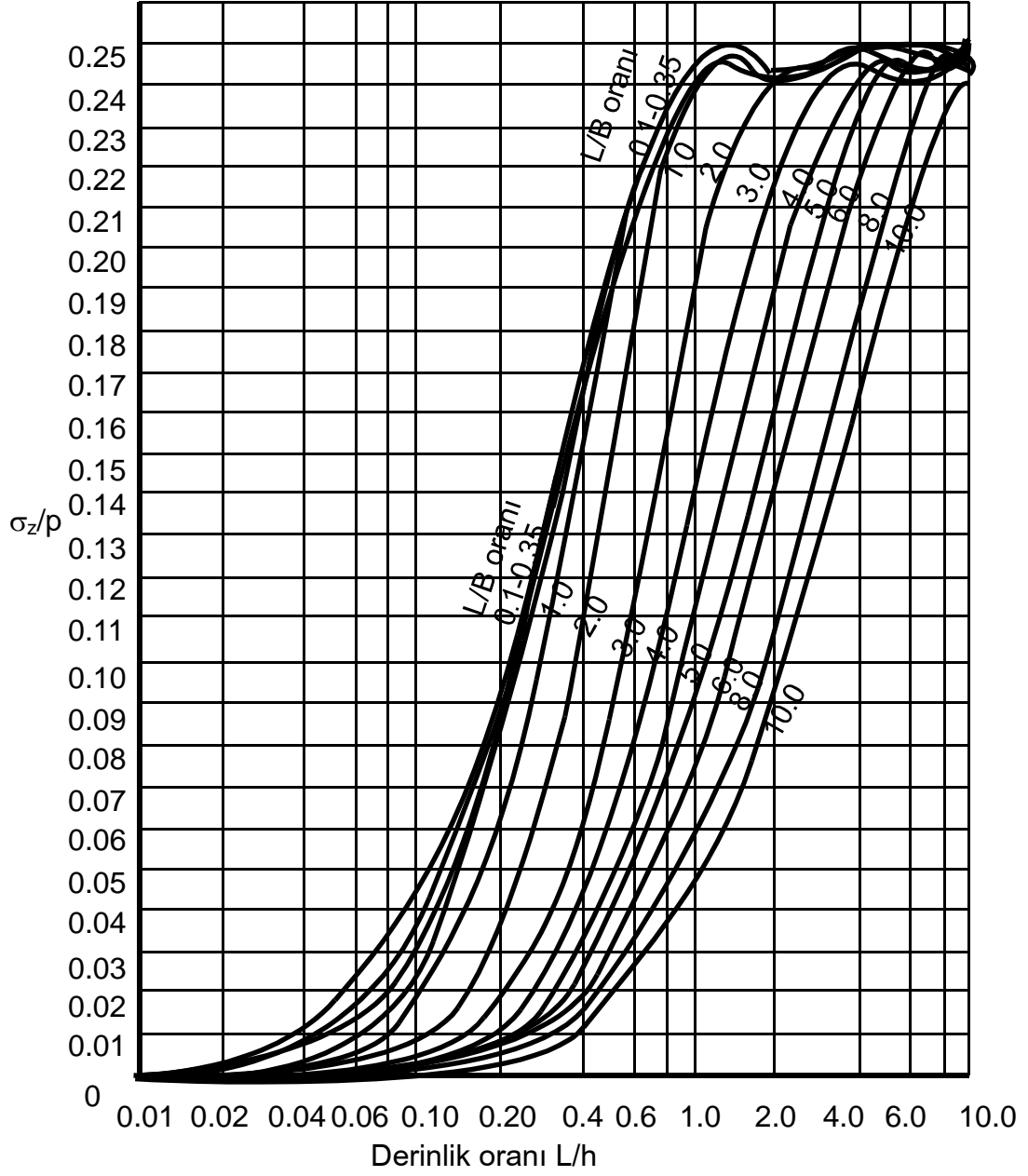


Şekil 1.42.  $z=0.4h$  için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)

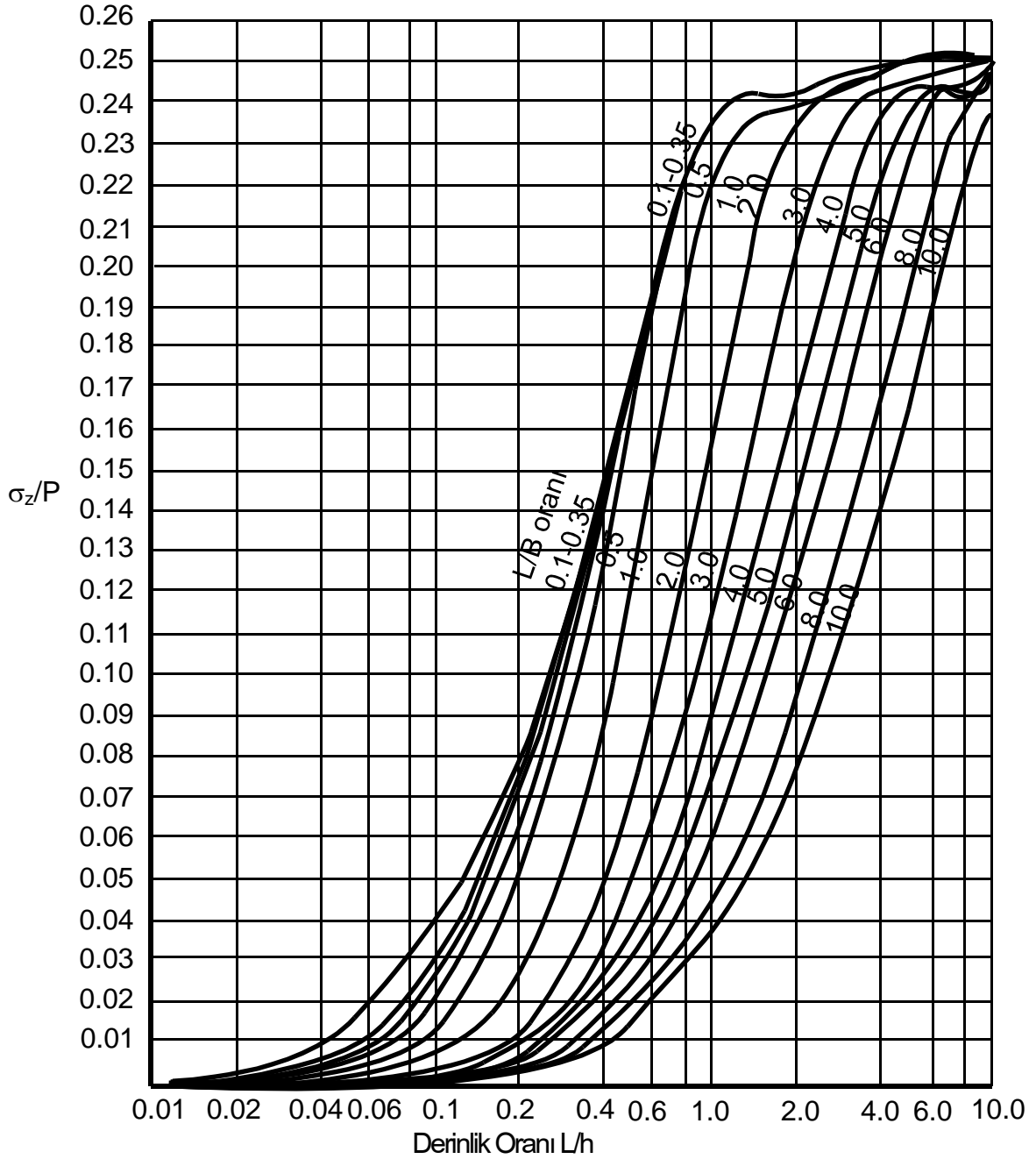


Şekil 1.43.  $z=0.6h$  için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)





Şekil 1.44.  $z=0.8h$  için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)



Şekil 1.45.  $z=1h$  için dikdörtgen alanın köşe noktaları altında meydana gelen düşey gerilme artışı ( $\Delta\sigma_z$ ) (Poulos ve Davis, 1974)

### 1.3.12. Sonlu Elemanlar Metoduyla Analiz

Sonlu Elemanlar Yöntemi, çeşitli mühendislik problemlerine makul bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Metod, farklı mühendislik dallarında etkin olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni, genel bir bilgisayar programının sadece giriş verilerinin değiştirilmesi vasıtasıyla herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilir

olmasıdır. Sonlu elemanlar metodu, inşaat mühendisliğinin çoğu alanında hem araştırma amaçlı, hem de problemlerin tasarımında yaygın olarak kullanılan bir sayısal analiz tekniğidir.

Sonlu elemanlar metodunda yapı, ilk olarak davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlara ayırma işleminin doğru biçimde yapılması çözümün doğruluğu açısından oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca oluşturulan sonlu elemanların boyutları ve sayıları hem sistemi en iyi şekilde temsil etmeli hem de problemin çözüm süresini uzatmamalıdır. Daha hassas çözümler elde edilmek istendiğinde daha küçük eleman boyutları seçilmelidir; ayrıca elemanın şekli boyutu problemin türüne göre seçilmelidir. Örneğin tek boyut için doğru şeklinde, iki boyut için kare veya üçgen gibi eleman şekilleri, üç boyutlu sistemlerde piramit veya dikdörtgenler prizması gibi eleman şekilleri tercih edilmelidir.

Var olan problemin, uygun sonlu elemanlara ayrılmasının ardından ele alınan parametrenin ortamdaki değişimini gösterecek yaklaşım denklemi seçilmektedir. Çözümlerdeki yaklaşıklık ve sonuçlardaki doğruluk, seçilen yaklaşım denkleminin gerçeğe yakınlığına bağlı olmaktadır. Yaklaşım denklemi problemin yapısına ve çözüm yapılacak yere uygun şekilde belirlenmelidir. Yaklaşım denkleminin, derecesi ve katsayıları belirlenen polinomlar veya seriler şeklinde tanımlanmaktadır (Bağrıaçık, 2010).

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerlerinin elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen

sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir.

Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik metodlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöyle sıralanabilir:

- Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.
- Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel rijitlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar metodunun bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- Sınır şartları kolayca uygulanabilir (Topcu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu elemanlar yönteminde izlenen adımlar ise şöyle sıralanabilir:

- Cismin sonlu elemanlara ayrılması,
- Yaklaşım fonksiyonunun seçimi,
- Eleman rijitlik matrisinin oluşturulması,
- Sistem rijitlik matrisinin oluşturulması,
- Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- Sınır şartlarının belirlenmesi,
- Sistem denklemlerinin çözümü.

### **1.3.13. Zemin Davranışının Modellenmesi**

Zemin mekaniği problemlerinin sonlu elemanlar metodu yardımıyla analiz edilebilmesi için zeminin lineer olmayan ve zamana bağlı davranışının dikkate alınması amacıyla farklı zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modelleri içerisinde en yaygın kullanılanı ise, hiperbolik zemin modelidir.

Hiperbolik zemin modeli, zeminlerin üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon eğrilerinin yaklaşık hiperbol şeklinde olduğu varsayımına dayanır.

Model, ilk olarak, drenajsız üç eksenli deney sonuçlarına göre formüle edilmiş ve Poisson oranının 0.5 olduğu kabulü yapılmıştır. Daha sonra, başka düzeltmeler eklenerek hem drenajlı hem de drenajsız problemlere uygulanabilir hale getirilmiştir (Bağrıaçık, 2010).

Genel olarak zemin davranışı modellemesinde kullanılan modeller şöyledir.

#### **1.3.13.1. Lineer Elastik Zemin Modeli**

Zemin davranışını çok sınırlı bir şekilde temsil eden ve genelde kaya zeminlerin modellenmesinde kullanılan bir model türüdür. Bu modelde, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu ve zeminin lineer-izotropik olduğu kabul edilmektedir. Programa giriş verisi olarak yalnızca, Poisson oranı ( $\mu$ ) ve elastisite modülü (E) değerleri girilmektedir.

#### **1.3.13.2. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli**

Elasto-tam plastik zemin davranışını modelleyebilen Mohr-Coulomb zemin modelinde, giriş verileri olarak 5 adet değişken girilir. Bunlar; elastisite modülü, E, Poisson oranı,  $\mu$ , kohezyon, c, içsel sürtünme açısı,  $\phi$  ve dilatasyon açısı,  $\psi$ 'dir. Ayrıca modelde doğru bir  $K_0$  seçilmesi, zeminin başlangıç yatay gerilme durumu için önemlidir.

#### **1.3.13.3. Pekleşen Zemin Modeli**

Bu model farklı sertlikte zeminlerin davranışını modellemek için kullanılmakta olan bir model olup, Mohr-Coulomb zemin modeline göre daha gelişmiş bir modeldir. Bu zemin modelinde kayma modülü esas alınmaktadır. Buna göre zeminin kayma modülü uygulanan gerilmeye bağlı olarak azalmaktadır.

#### **1.3.13.4. Multilineer Kinematik Pekleşme Modeli**

Kum ve çakıl gibi taneli malzemelerin lineer olmayan davranışı, Rollins vd. (1998) tarafından çakıl malzemeler için oluşturulmuş olan kayma modülü-kayma şekil değiştirmesi eğrisi kullanılarak elde edilen tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile

belirlenmiştir. Bu ilişki multilineer kinematik pekleşme modeli ile temsil edilmiştir (Kartal, 2010).

#### 1.4. Literatür Araştırması

Terzaghi (1920) kum ve kil numunelerde düşey yükler vasıtasıyla meydana gelen yatay ve düşey gerilmeleri kendi deney düzeneğiyle ölçmüştür. Yaptığı deneyler sonucunda, Donath (1891) tarafından yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı şeklinde tarif edilen, sükûnetteki yanal zemin basınç katsayısı  $K_0$  değerlerini elde etmiştir. Sonuçta kaba kum için  $K_0=0.42$  değerini bulmuştur. Kompaksiyonun  $K_0$  değerleri üzerindeki etkileri de ilk olarak Terzaghi tarafından araştırılmış ve kum zeminin el kompaktörü ile tabakalar halinde sıkıştırılması durumunda,  $K_0$  değerinin 0.6 ile 0.7 arasında artış gösterdiğini söylemiştir (Hanna ve Ghaly, 1992).

Kjellman (1936), üç eksenli deney aletine benzeyen bir deney aleti geliştirmiş bu alet vasıtasıyla kumlu zeminlerde meydana gelen gerilmeleri ölçmüştür ve  $K_0$  katsayısının zeminin gerilme geçmişine bağlı olduğunu bildirmiştir. Sonuçta  $K_0=0.5-1.5$  değerlerini elde etmiştir.

Bayliss (1948), yanal zemin basıncını ölçmek için bir alet geliştirerek, yapmış olduğu deneylerde kum ve orta plastisiteli organik kil için  $K_0=0,5$  değerini ölçmüştür (Sağlamer, 1973).

Hendron (1963) tarafından özel bir odometre ile oluşturulan deney düzeneğinde, yanal basınçlar, odometre halkasına yapıştırılan basınç ölçerler yardımıyla ölçülmüştür. Ayrıca çalışmada yüksek basınç altında danelerin kırılmasının, yanal basınçlar üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sağlamer (1973), bir düzenek geliştirerek kumlu zeminlerde düşey ve yatay gerilmeleri ölçmüştür. Gerilmeleri ölçmek için üç adet basınç ölçer kullanmış ve yüksek gerilmeler altında ölçümler almıştır.

Hanna ve Ghaly (1992) kumlu zeminlerde yatay ve düşey gerilmeleri, basınç ölçerler kullanarak ölçmüştür. Bu çalışmada, 1.0m x 1.0m x 1.25m ebatlarında metal bir kasa içerisine basınç ölçerler yerleştirilmiş ve farklı sıklıklarda kum numuneler hazırlanarak, oluşan yatay ve düşey gerilmeler ölçülmüştür. Ayrıca deneysel olarak hesaplanan  $K_0$  değerleri Jaky (1948) tarafından verilen  $K_0 = 1 - \sin\phi$  değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Cho ve Vipulanandan (1998) kumlu zeminlerde gerilme dağılımını belirlemek amacıyla, basınç ölçerler kullanarak ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler 0.6096m

uzunluk, 0.508 m genişlik ve 0.9144 m yüksekliğinde deney tankında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çapı 88.9 mm, kalınlığı 25.4 mm olan diyafram tipi basınç ölçerler kullanılmıştır. Deneyde kullanılan kumun sıklık derecesi  $D_r = \%70$  olacak şekilde kasa içerisine yerleştirilmiş ve yük rijit bir plaka ile uygulanmıştır. Deneyler sonunda elde edilen düşey gerilme artışı değerleri, mevcut teorik çözümle karşılaştırılmıştır.

Hanna ve Soliman-Saad (2001), kumlu zeminlerdeki yatay ve düşey gerilmeleri ölçmek amacıyla basınç ölçerler kullanmışlardır. Ayrıca kompaksiyon ile gerilme değerleri arasındaki ilişkiyi araştırmak amacıyla metal bir kasa içerisine, farklı sıklıklarda yerleştirilen kum numunelerde meydana gelen gerilmeleri ölçmüşlerdir. Kompaksiyon süresince kum numunelerin birim hacim ağırlığında oluşacak değişimleri tespit edebilmek amacıyla, her tabakanın içine yoğunluk kapları yerleştirilmiş ve her deney sonunda bu kaplar çıkarılıp birim hacim ağırlıklar elde edilmiştir. Ayrıca her deneyin sonunda kayma mukavemet açıları da hesaplanmıştır. Ölçülen yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranlanmasıyla bulunan  $K_0$  değerleri,  $K_0=1-\sin\phi$  formülü ile karşılaştırılmıştır.

Laman ve Keskin (2004), kumlu zeminler üzerine oturan kare temellerden dolayı zemin içinde oluşan ilave düşey gerilme değerlerini, model deneyler yaparak incelemişlerdir. Deneyler, kare kesitli bir kasa içerisinde gerçekleştirilmiş ve gerilme değerlerini bulmak için basınç ölçerler kullanılmıştır. Sıklığın ilave düşey gerilme değerlerine etkisinin araştırılması için deneyler iki farklı sıklıkta hazırlanan kum zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney düzeneği, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenip PLAXIS paket programı yardımıyla analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut teorik yöntemler ve deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, derinlik arttıkça gerilme değerlerinin azaldığı, deney sonuçlarının üç derinlikte de Boussinesq çözümlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Hardening-Soil ve Mohr-Coulomb zemin model sonuçları deney sonuçlarına yakın olup, Westergaard ve lineer elastik model sonuçları deney sonuçlarından farklı olmuştur.

Laman vd. (2004a), kumlu zeminlere oturan dairesel temellerden dolayı zemin içinde oluşan düşey ve yatay gerilme değerlerini model deneyler yaparak incelenmişlerdir. Deneylerde gerilme değerlerini bulmak için basınç ölçerler kullanılmıştır. Çalışmada iki farklı sıklıkta kum numuneler hazırlanmış ve iki farklı çapta dairesel temel kullanılmıştır. Ayrıca model deney düzeneği, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek, PLAXIS paket programı ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut teorik yöntemler ve deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlardan, taban alanından z derinliğinde bulunan yatay

düzlemlerdeki gerilme dağılışının aynı karakteristik şekli gösterdiği, ölçüm derinliğinin artmasıyla temel plakası merkezinin altındaki basıncın da azaldığı ve kum numunenin herhangi bir noktasındaki gerilme değerinin uygulanan yük ile orantılı olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca kum numunelerin sıklık oranının arttırılmasıyla, aynı yükler altında daha büyük gerilme değerlerinin oluştuğu gözlenmiştir. Temel genişliğinin artmasıyla da benzer durumun oluştuğu görülmüştür.

Laman vd. (2004b), farklı çaplardaki ring (halka) temeller ile çift yönlü geogrid donatılar kullanarak model deneyler gerçekleştirmiş ayrıca PLAXIS bilgisayar yazılımını kullanarak halka temeller, sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla analiz edilmiştir. Deneylerden ve analizlerden elde edilen sonuçlar ile donatılı ve donatısız durumda halka temellere ait sınır taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Sonuç olarak donatılı ve donatısız durum için en ideal temel yarıçap oranları belirlenmiştir.

Kayadelen vd. (2004), laboratuvarında model deney düzeneği oluşturarak kumlu zeminler üzerinde gerilme ölçümleri yapmışlardır. Düşey gerilme artımının  $K_0$  değerine bağlı olması bu parametrenin hassas bir şekilde tayinini önemli hale getirmektedir. Bu nedenle deneylerde kullanılan numunelerin  $K_0$  katsayısını doğrudan ölçmek amacı ile ince cidarlı ödometre ile deneyler yapılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen sonuçlar, literatürde verilmiş olan teorik ifadelerden hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler ve deneysel çalışmalar sonunda, zemin mekaniği ve temel mühendisliği için önemli bir olgu olan, gerilme artımı problemi için literatürdeki mevcut çözümlerin, zeminler için her zaman yeterli sonuçlar vermediği görülmüştür. Çünkü bu çözümlerde, kullanılan malzemenin fiziksel özellikleri göz önüne alınamamaktadır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar gerçek değerler ile farklılık gösterebilmektedir. Laboratuvarında model deneyler yapılarak uygulanan düşey yüklemelerden dolayı değişik derinliklerde oluşan ilave gerilmeler ölçülmüştür.

Keskin vd. (2008), kumlu zeminlere oturan üniform yüklü kare temellerin merkezi altında oluşan ilave düşey gerilme değerlerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneyler, kare kesitli bir metal kasa içerisinde gerçekleştirilmiş ve düşey gerilme değerlerini bulmak için basınç ölçerler kullanılmıştır. Sayısal çalışmada zemin, iki boyutlu aksel simetrik ve üç boyutlu koşullarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, lineer elastik ve non-lineer elastoplastik malzeme olarak modellenmiş ve analizlerde kullanılan bu modellerin ilave düşey gerilme değerlerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda deneysel, nümerik ve analitik sonuçlar arasında belirli derinlik değerlerinde genel bir uyum



görülmüştür. Sonuç olarak, derinlik arttıkça düşey gerilme değerlerinin azaldığı, deneysel sonuçların sayısal ve teorik sonuçlar arasında genel bir uyum olduğu ve sayısal sonuçlara göre %14, teorik sonuçlara göre ise %18'e varan oranlarda daha büyük değerler verdiğini bildirmişlerdir.

Yu Chuang vd. (2009), kazıklı dolgularda derinlik boyunca meydana gelen düşey gerilmeleri belirlemek için, iki farklı dolgu yüksekliğinde (H=0.35m ve 0.70m) yaptıkları model deneylerden elde ettikleri sonuçlar ile geliştirdikleri teorik sonuçları karşılaştırmışlardır.

Bağrıaçık ve Laman (2010), kumlu zeminler üzerine oturan farklı geometrilerdeki yüzeysel temellerden dolayı, zemin içinde oluşan ilave düşey gerilme davranışlarını laboratuvar model deneyleri yaparak araştırmış ve şekil etkisini incelemiştir. Sonuçta, farklı geometrilerdeki temellerde şekil etkisinin önemli mertebelerde olduğu görülmüştür.

Bağrıaçık ve Laman (2011), kumlu zeminler üzerine oturan farklı boyutlardaki dairesel temellerden dolayı, zemin içinde oluşan ilave düşey gerilme davranışlarını laboratuvar model deneyleri yaparak araştırmış ve boyut etkisini incelemiştir. Sonuç olarak, kumlu zeminlerde boyut etkisinin önemli mertebelerde olmadığını belirtmişlerdir.

Bağrıaçık ve Laman (2011), donatısız ve donatılı kumlu zeminlere oturan dairesel temeller altında gerilmelerin değişimini incelemiş ve sonuçta geogrid donatılı kumlu zeminler üzerine oturan yüzeysel temellerden dolayı zemin içinde oluşan ilave düşey gerilmelerin, donatısız duruma göre % 27 mertebelerinde fazladan azaldığını görmüşlerdir.

Bağrıaçık ve Laman (2011), kumlu zeminler üzerine oturan dairesel temellerden dolayı zemin içinde oluşan ilave yatay ve düşey gerilme davranışları laboratuvar model deneyleri yapılarak araştırılmıştır. Bu amaçla zemin içerisinde belirlenen derinliklerdeki dairesel temele artan yüklerden dolayı meydana gelen ilave düşey ve yatay gerilme değerleri ölçülüp, yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranlanmasıyla bulunan  $K_0$  değerleri incelenmiş ve yükün artmasına bağlı olarak zemin sıkılığının artması ile  $K_0$ 'ın değerlerinin, derinlik arttıkça azaldığı belirlenmiştir

### **1.5. Amaç ve Kapsam**

Bu çalışma ile farklı rölatif sıklılıklardaki kum zeminlere uygulanan yüzey yükleri nedeniyle zeminde meydana gelebilecek düşey gerilme artışı değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi ve deneylerden elde edilen sonuçların mevcut analitik çözümlerle ve ANSYS

paket programıyla elde edilecek nümerik sonuçlarla karşılaştırılması, tüm bu sonuçlar arasında bir ilişki kurulması amaçlanmaktadır.

Bu amaçla daha önceden hazırlanmış olan model deney tankına kötü derecelenmiş kum (SP), altı farklı rölatif sıklıkta ( $D_r=0.75, 0.65, 0.55, 0.45, 0.35, 0.25$ ) 50 mm'lik tabakalar halinde serilecek, öte yandan deney tankında daha önceden belirlenmiş noktalara basınç ölçerler yerleştirilecektir. Daha sonra zemin yüzüne model temel yerleştirilecek ve bir yük halkası vasıtasıyla zemine 1kN yük uygulanacaktır. Zeminde oluşacak düşey gerilmeler artışları basınç ölçerlerle, bir veri toplama ünitesi ve bilgisayar programı (CodA Locomotive) yardımıyla belirlenecektir. Daha sonra deney düzeneği ANSYS paket programında modellenecek, ayrıca mevcut teorik çözümlerle karşılaştırma yapılacaktır.

Yapılan bu gerilme artışı analizlerinden elde edilen sonuçlar, İnşaat Mühendisliği alanında sıkça karşılaşılan zeminde gerilme dağılımları problemi hakkında daha gerçekçi değerlerin elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Bu bölümde, deney düzeneği, deneylerde kullanılan zemin ve ölçüm aletlerinin özellikleri ile çalışmada izlenen deney programı açıklanmış, deneylerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

### **2.1. Deneylerde Kullanılan Zeminin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi**

Deneylerde kullanılacak olan zemin numuneleri, Rize ilinin İyidere ilçesi bitişiğindeki doğu sahilinden alınmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, alınan zemin numunelerinin geoteknik açıdan özellikleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan zemin örneği Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan zemin örneği

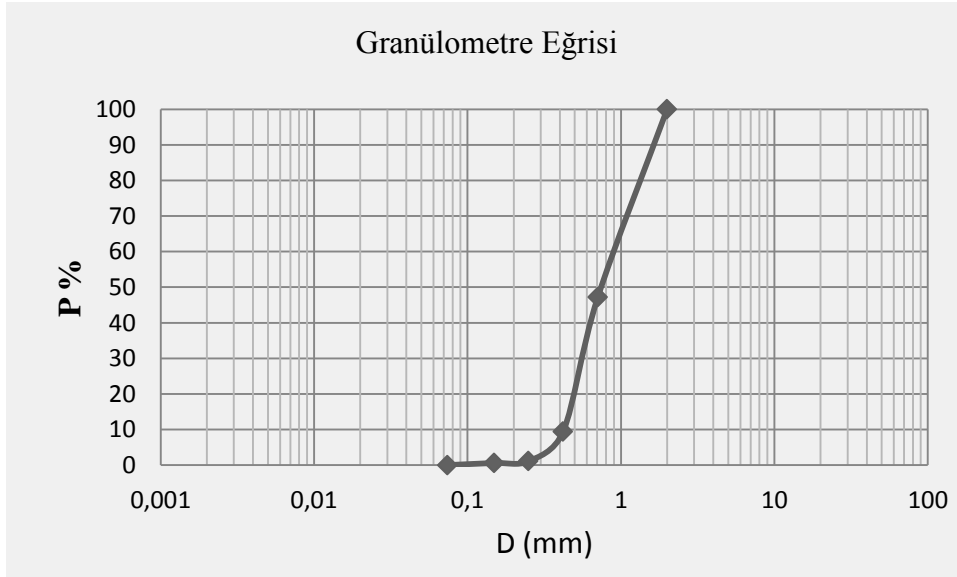
#### **2.1.1. Elek Analizi**

Deneylerde kullanılan zemin numuneleri, ASTM standartlarına göre belirlenen bir seri elekten elenerek dane çapı dağılımı belirlenmiştir. Elek analizi deney sonuçları Tablo 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.1. Elek analizi deney sonuçları

Elek No	Elek Çapı (mm)	Elek Üzerinde Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	% Geçen
10	2.000	0	879.2	100
25	0.707	464.4	414.8	47.2
40	0.420	332.1	82.7	9.4
60	0.250	73.5	9.2	1.1
100	0.149	4.4	4.8	0.6
200	0.074	4.8	-	-
Kap		-	-	-

Zemin sınıfı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) kullanılarak, kötü derecelenmiş kumlar ve çakıllı kumlar (SP) olarak elde edilmiştir. Elek analizi deney sonuçlarına göre çizilen granülometri eğrisi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Deneylerde kullanılan kum numuneye ait granülometri eğrisi

Kumun granülometri eğrisinden,  $D_{10}=0.42$  mm (efektif çap),  $D_{30}= 0.56$  mm ve  $D_{60}=0.9$  mm olarak bulunmuştur. Bu değerler yardımıyla üniformaluluk katsayısı  $C_u=2.14$ , eğrilik katsayısı  $C_r=0.83$  olarak elde edilir. Kumun tane çapları 0.07-2.0 mm arasında (iri-orta) değişmektedir.

### 2.1.2. Piknometre Deneyi

Deneylerde kullanılacak olan kum numunesinin tane özgül yoğunluğu ( $G_s$ )'nun belirlenmesi amacıyla Piknometre deneyi yapılmıştır. Bu deney sonucunda  $G_s=26.6 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir.

### 2.1.3. Sıkılık Deneyleri

Deney kumunun gevşek ve sıkı durumdaki kuru yoğunluklarını belirlemek için rölatif sıkılık deneyleri yapılmıştır.

Gevşek durumdaki kuru yoğunluk,  $\rho_{kmin}$ , değeri bulunurken kum numune kap içerisine herhangi bir sıkıştırmaya maruz bırakılmadan yerleştirilmiştir. İçerisinde gevşek kum bulunan kabın yüzeyi düzlendikten sonra ağırlığı belirlenmiştir. Sıkı haldeki kuru yoğunluğu,  $\rho_{kmax}$ , bulunurken kum numune kap içerisine 5 tabaka halinde serilerek yerleştirilmiş ve her bir tabaka serildikten sonra şişlenerek sıkıştırılmıştır. Böylece hesaplanan  $\rho_{kmin}$  ve  $\rho_{kmax}$  değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Sıkılık deneyleri sonucu bulunan kuru yoğunluk değerleri

Özellik	Birim	Değer
Tane özgül yoğunluğu, $G_s$	$\text{kN/m}^3$	26.6
Maksimumu kuru yoğunluk, $\rho_{kmax}$	$\text{kN/m}^3$	16.58
Minimum kuru yoğunluk, $\rho_{kmin}$	$\text{kN/m}^3$	13.95

Deneylerde kum tanka  $D_r=0.75-0.65-0.55-0.45-0.35-0.25$  rölatif sıkılıklarında yerleştirilmiştir. Rölatif sıkılığın farklı değerlerine göre kohezyonsuz zeminlerde sıkılık derecesi Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Kohezyonsuz zeminlerde sıklık tablosu

$D_r$	Sıklık derecesi
0-15	Çok gevşek
15-35	Gevşek
35-65	Orta sıkı
65-85	Sıkı
85-100	Çok sıkı

Deneylede rölâtif sıklığın 0.75,0.65, 0.55, 0.45, 0.35, 0.25 olabilmesi için Bağntı 2.1 kullanılmıştır.

$$D_r = \frac{\rho_{kmax}}{\rho_k} \left( \frac{\rho_k - \rho_{kmin}}{\rho_{kmax} - \rho_{kmin}} \right) \quad (2.1)$$

Bu bağntıdan yararlanılarak her bir rölâtif sıklık değeri için hesaplanmış kuru yoğunluklar Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

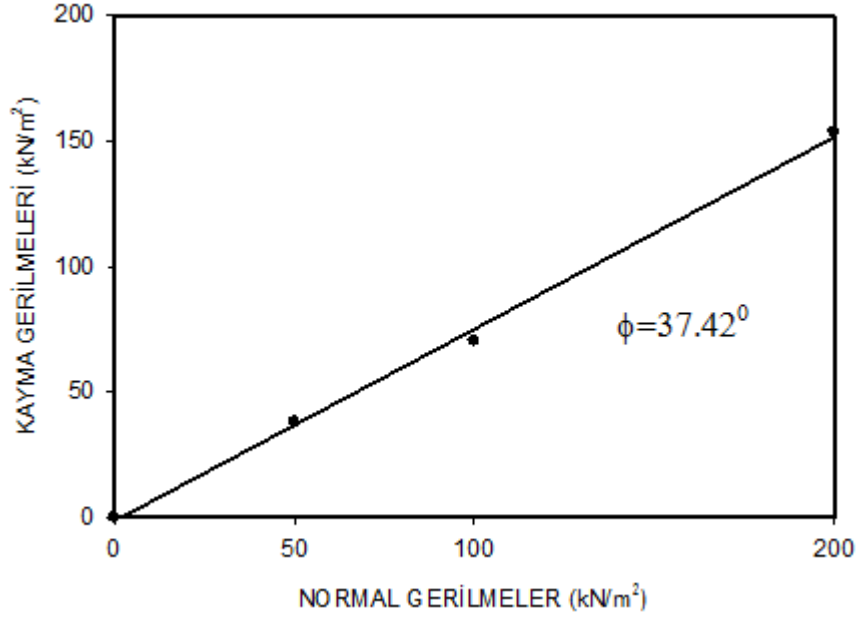
Tablo 2.4. 2.1 bağntısıyla elde edilen kuru yoğunluklar

Rölâtif Sıklık ( $D_r$ )	Kuru Yoğunluk ( $\rho_k$ ) (kN/ m <sup>3</sup> )
0,75	15.84
0,65	15.55
0,55	15.29
0,45	15.03
0,35	14.77
0,25	14.53

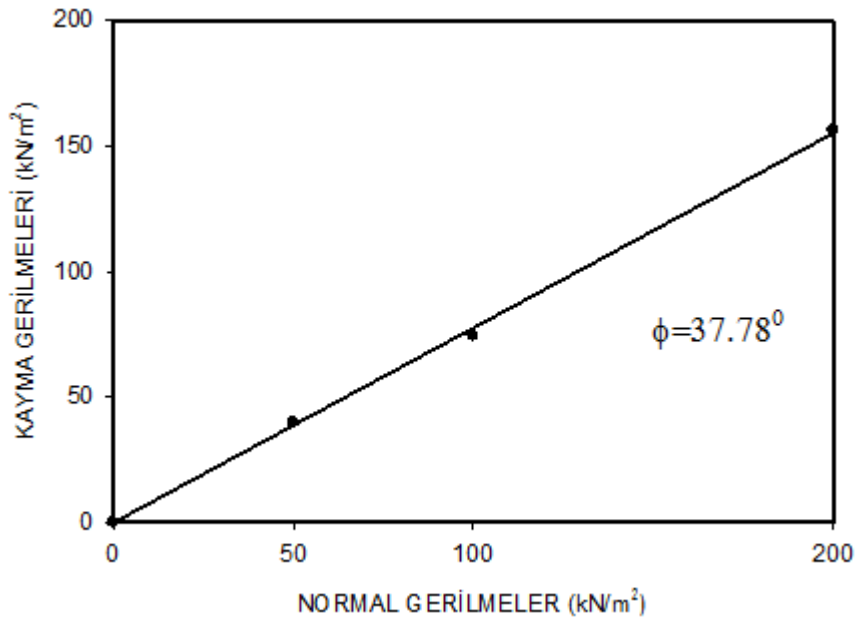
#### 2.1.4. Kesme Kutusu Deneyleri

Farklı sıklıklardaki kum numunelerinin kesme etkisine maruz bırakarak numuneye ait içsel sürtünme açısının belirlenmesi amacıyla kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Deneylede kullanılan kum numune  $D_r=0.75-0.65-0.55-0.45-0.35-0.25$  sıklığında 50, 100,

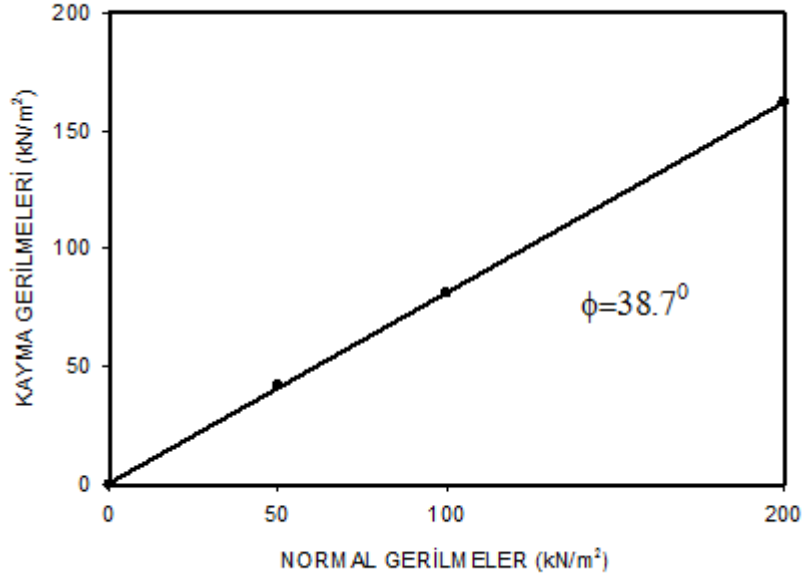
200 kN/m<sup>2</sup>'lik normal gerilmeler altında yatay doğrultuda kesilmiştir. Kesme kutusu deneyinden her bir rölatif sıklık değeri için elde edilen kayma gerilmeleri ve içsel sürtünme açıları Şekil 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 ve 2.8'de görülmektedir.



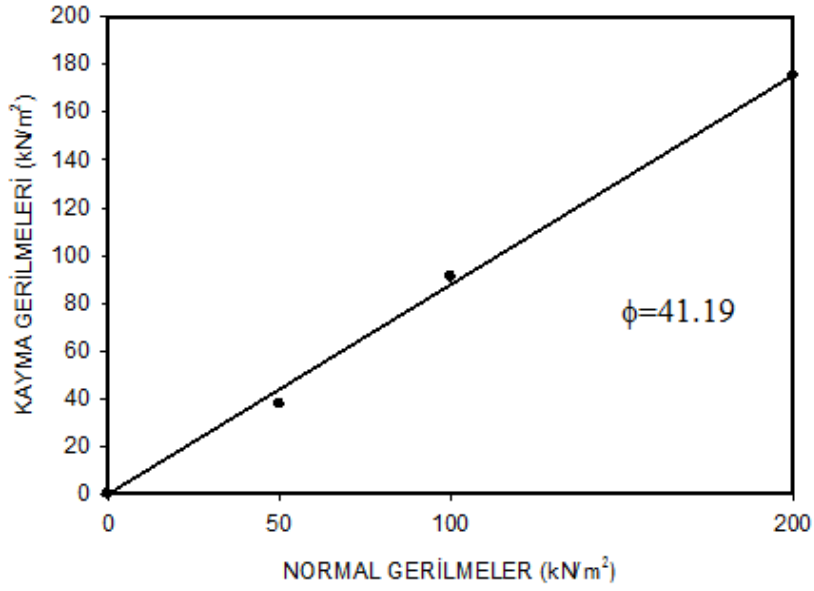
Şekil 2.3.  $D_r=0.25$  için kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 2.4.  $D_r=0.35$  için kesme kutusu deney sonuçları

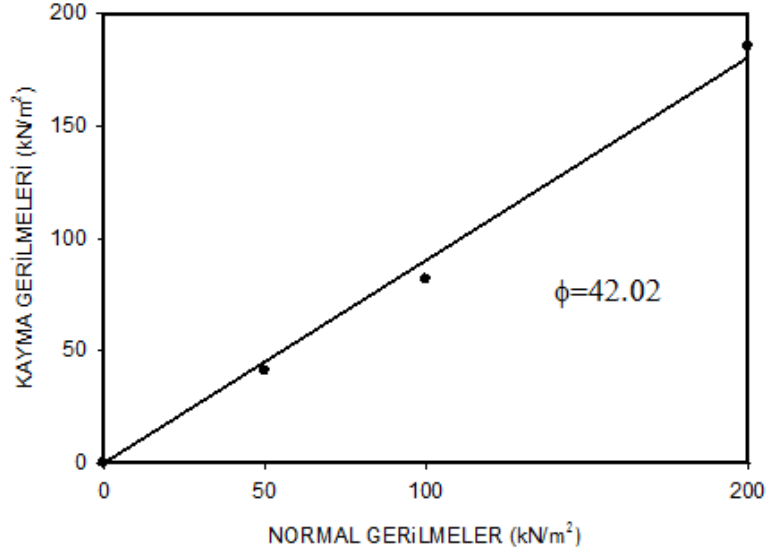


Şekil 2.5.  $D_r=0.45$  için kesme kutusu deney sonuçları

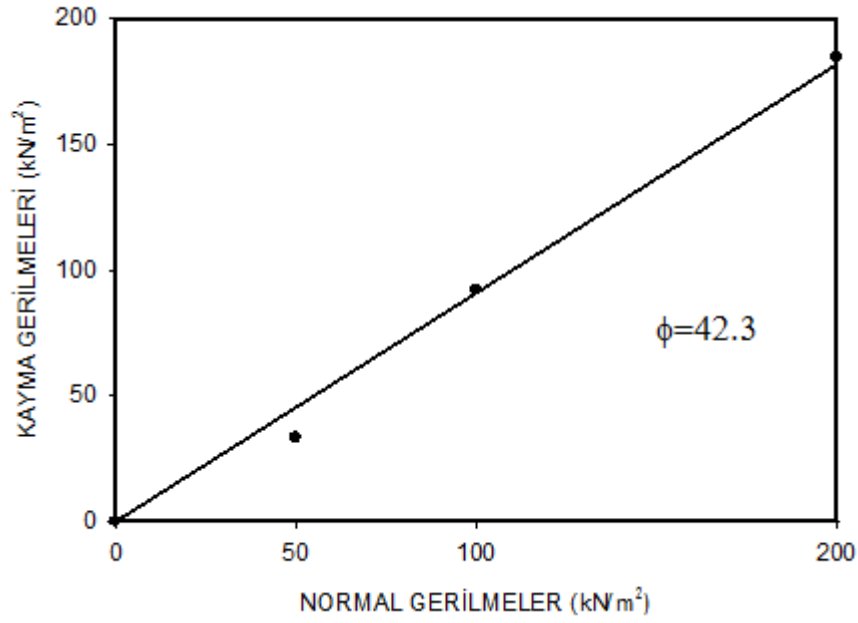


Şekil 2.6.  $D_r=0.55$  için kesme kutusu deney sonuçları





Şekil 2.7.  $D_r=0.65$  için kesme kutusu deney sonuçları



Şekil 2.8.  $D_r=0.75$  için kesme kutusu deney sonuçları

### 2.1.5. Konsolidasyon Deneyi

Deneyleerde kullanılacak zeminin Elastisite modülü (E), Poisson oranının ( $\mu$ ) belirlenmesi amacıyla her bir rölatif sıklık için konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen değerler Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Tüm rölatif sıklık değerleri için dört farklı gerilme altında belirlenmiş oturma miktarları

Rölatif sıklık	Uygulanan Yük (kN/m <sup>2</sup> )( $\sigma_{zz}$ )	Oturma miktarları (mm)( $\delta_{zz}$ )
0,75	50	0.012
	100	0.019
	150	0.031
	200	0.036
0,65	50	0.017
	100	0.026
	150	0.039
	200	0.047
0,55	50	0.023
	100	0.034
	150	0.042
	200	0.052
0,45	50	0.027
	100	0.039
	150	0.049
	200	0.063
0,35	50	0.033
	100	0.042
	150	0.056
	200	0.071
0,25	50	0.040
	100	0.047
	150	0.062
	200	0.088

### 2.1.6. Zeminin Poisson Oranı ( $\mu$ )'nın Belirlenmesi

Zemin numunesinin her bir rölatif sıklık değeri için Poisson değerinin bulunması amacıyla kesme kutusu deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açısı değerleri 2.2

ifadesinde yerine konularak her bir rölâtif sıklık değeri için sükûnetteki toprak basıncı katsayıları belirlenmiştir.

$$K_0=1-\sin\phi \quad (2.2)$$

Daha sonra bu değerler 2.3 ifadesinde yerine yazılarak her bir rölâtif sıklık değeri için Poisson oranları ( $\mu$ ) belirlenmiştir.

$$\mu=\frac{K_0}{1+K_0} \quad (2.3)$$

Bu eşitlik kullanılarak elde edilen Poisson oranı değerleri ( $\mu$ ) Tablo 2.6'da görülmektedir.

Tablo 2.6. Tüm rölâtif sıklık değerleri için bulunan Poisson oranı ( $\mu$ ) değerleri

Rölâtif Sıklık ( $D_r$ )	Poisson Oranı ( $\mu$ )
0.75	0.246
0.65	0.249
0.55	0.255
0.45	0.273
0.35	0.279
0.25	0.282

### 2.1.7. Zeminin Elastisite Modülü (E)'nün Belirlenmesi

Zeminin her bir rölâtif sıklıktaki Elastisite modülünü belirleyebilmek için konsolidasyon deneyi sonuçları ve Poisson oranı değerleri kullanılmıştır. Bu veriler aşağıdaki ifadelerde yerine yazılıp zeminin her bir rölâtif sıklık değeri için Elastisite modülü belirlenmiştir.

Konsolidasyon deneyinde düşey şekil değiştirmeler  $\epsilon_{zz}$ , yatay şekil değiştirmeler  $\epsilon_{rr}$  ve  $\epsilon_{\theta\theta}$  olarak tanımlanacak olursa bu şekil değiştirme değerleri 2.4, 2.5 ve 2.6 ifadeleriyle belirlenebilmektedir.

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} [\sigma_{rr} - \mu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})] \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{rr})] \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{rr})] \quad (2.6)$$

Konsolidasyon deney halkasında yatay birim şekil değiştirmelerin sıfır olduğu kabul edilirse ( $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\theta\theta}=0$ ) 2.7 ve 2.8 ifadeleri elde edilir.

$$\sigma_{rr} = \mu(\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}) \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{rr}) \quad (2.8)$$

2.8 ifadesindeki  $\sigma_{\theta\theta}$  değeri 2.7 ifadesinde yerine yazılacak olursa 2.9 ifadesi elde edilir.

$$\sigma_{rr} = \mu^2 \sigma_{rr} + \mu(\mu + 1) \sigma_{zz} \quad (2.9)$$

Ayrıca düşey şekil değiştirme değerleri ise 2.10 eşitliğinden yararlanılarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\delta_{zz}}{H_c} \quad (2.10)$$

Bu ifade de  $\delta_{zz}$ , konsolidasyon deneyinde ölçülen düşey oturma miktarını,  $H_c$  ise konsolidasyon halkasının yüksekliğini ifade etmektedir.

$\sigma_{zz}$  ile her bir rölatif sıkılık değeri için 2.9 eşitliğinden yararlanılarak bulunan  $\sigma_{rr}$  değerleri 2.8 eşitliğinde yerine yazılıp  $\sigma_{\theta\theta}$  değeri hesaplandıktan sonra bulunan tüm yatay ve düşey gerilmeler 2.6 eşitliğinde yerine yazılarak her bir rölatif sıkılık için deneylerde kullanılan kum numunenin elastisite modülü belirlenmiştir. Bu işlem sırası takip edilerek bulunan elastisite modülleri Tablo 2.7’de görülmektedir.

Tablo 2.7. Rölatif sıklık değerlerine göre belirlenmiş Elastisite Modülü değerleri

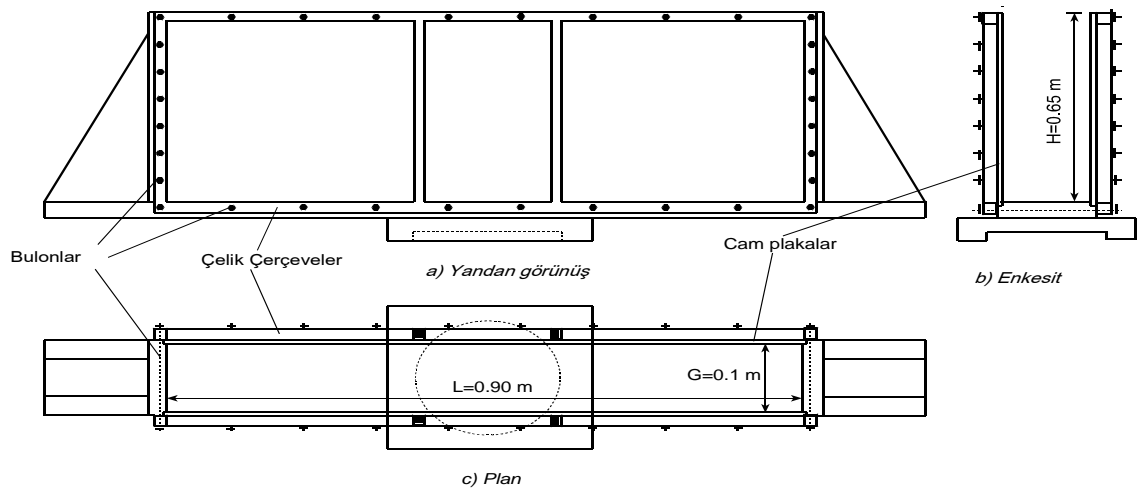
Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Elastisite Modülü (E) (kN/m <sup>2</sup> )
0.75	33579
0.65	25720
0.55	21722
0.45	18068
0.35	16000
0.25	14282

## 2.2. Deney Düzenegi

Deney düzenegini; deney tankı, model şerit temel, yükleme düzeni, basınç ölçerler ve veri toplama ünitesi oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak, deneylerde kumun sıkıştırılması için genişliği, deney tankı genişliğinde olan bir ahşap tokmak kullanılmıştır. Deneyler, K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümünün Geoteknik laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, Laboratuvarında bulunan üç eksenli deney aletinin presi (yükleme düzeni), yük halkaları, deformasyon ölçüm saatleri ile dijital fotoğraf makinesi kullanılmıştır.

### 2.2.1. Deney Tankı

Deney tankının içi bir dikdörtgenler prizması olup, uzunluğu 0.90 m, genişliği 0.10 m ve yüksekliği 0.65 m'dir. Deney tankının şeması Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9. Deney düzeneginin şeması (Şadoğlu, 2009)



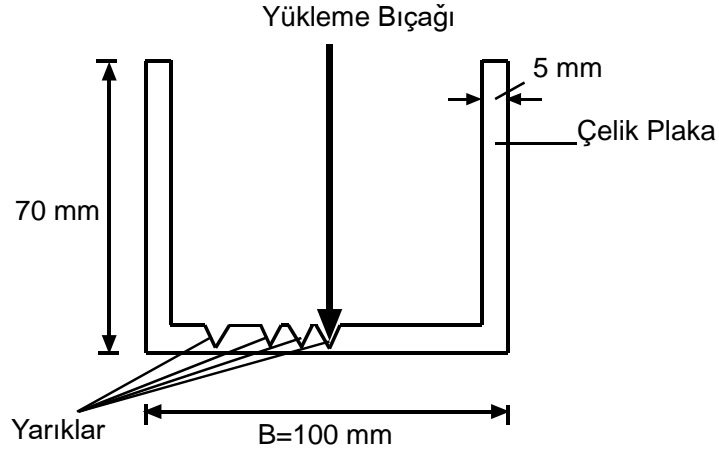
Şekil 2.10. Deney tankının bir görüntüsü

Deney tankının alt ve yan yüzleri sert ağaçtan üretilmiş bir çerçeve olup; bu ahşaba cam levhaları yerleştirilebilmesi için L biçimli kanallar açılmıştır. Ahşap yan yüzlerin rijitliğini sağlamak maksadıyla masif üçgen takozlar tankın her iki tarafına monte edilmiştir. Böylece ahşap çerçevenin yükleme esnasında yanlara doğru genişlemesinin engellenmesi amaçlanmıştır (Şekil 2.9a).

Ön ve arka yüzler, kırılma yüzeylerini gözlemlenebilmesi ve fotoğraf çekilebilmesi için 20 mm kalınlığındaki cam plakalardan oluşturulmuştur. Bu kalın cam plakalar yan sürtünmeleri mümkün mertebe azaltmak; aynı zamanda yükleme esnasında şerit temelin eksenine dik rijit düzlemler oluşturmada faydalı olmuşlardır. Kumun tabakalar halinde sıkıştırılmasını takip etme ve kırılma yüzeylerini belirlemede kolaylık sağlama açısından, tankın ön ve arkasındaki cam plakalar üzerinde bir kare ağ oluşturulmuştur. Cam plakaların yana doğru hareketinin engellemek için profillerden yapılmış olan iki çelik çerçeve cam plakalarını ön ve arka yüzüne yerleştirilmiş; bu çerçeveler cam plakaları dıştan tutacak şekilde 32 adet çelik bulonla birbirlerine bağlanmıştır. Deney tankını üç eksenli aletin presi üzerine oturabilmek için ahşap çerçevenin altına, tam ortasına denk gelecek şekilde dikdörtgen bir ahşap eleman monte edilmiştir. Bu eleman monte etmeden önce 25 mm derinliğinde ve 160 mm çapında üç eksenli aletin pres başlığının tam oturabileceği bir oyuk açılmıştır (Şekil 2.9c).

### 2.2.2. Model Şerit Temel

Model temelin genişliği 100 mm, uzunluğu 100 mm ve yan yüzlerinin yüksekliği 70 mm olup, 5 mm kalınlığında çelik levhalardan üretilmiştir (Şekil 2.11). Model temelin cama temas eden ön ve arka yüzlerine 2 mm kalınlığında sert plastik tabakalar yapıştırılmıştır. Bununla, camla temel yan yüzleri arasında kum tanelerini girmesinin engellenmesi ve camla temelin sürtünmesini azaltılması amaçlanmıştır. Bu plastik yüzeyler deney esnasında yağlanarak temelle cam arasındaki sürtünme en aza indirilmiştir. Şekil 2.11’de model şerit temelin bir şeması ve Şekil 2.12’de deneylerde kullanılan model şerit temel görülmektedir.



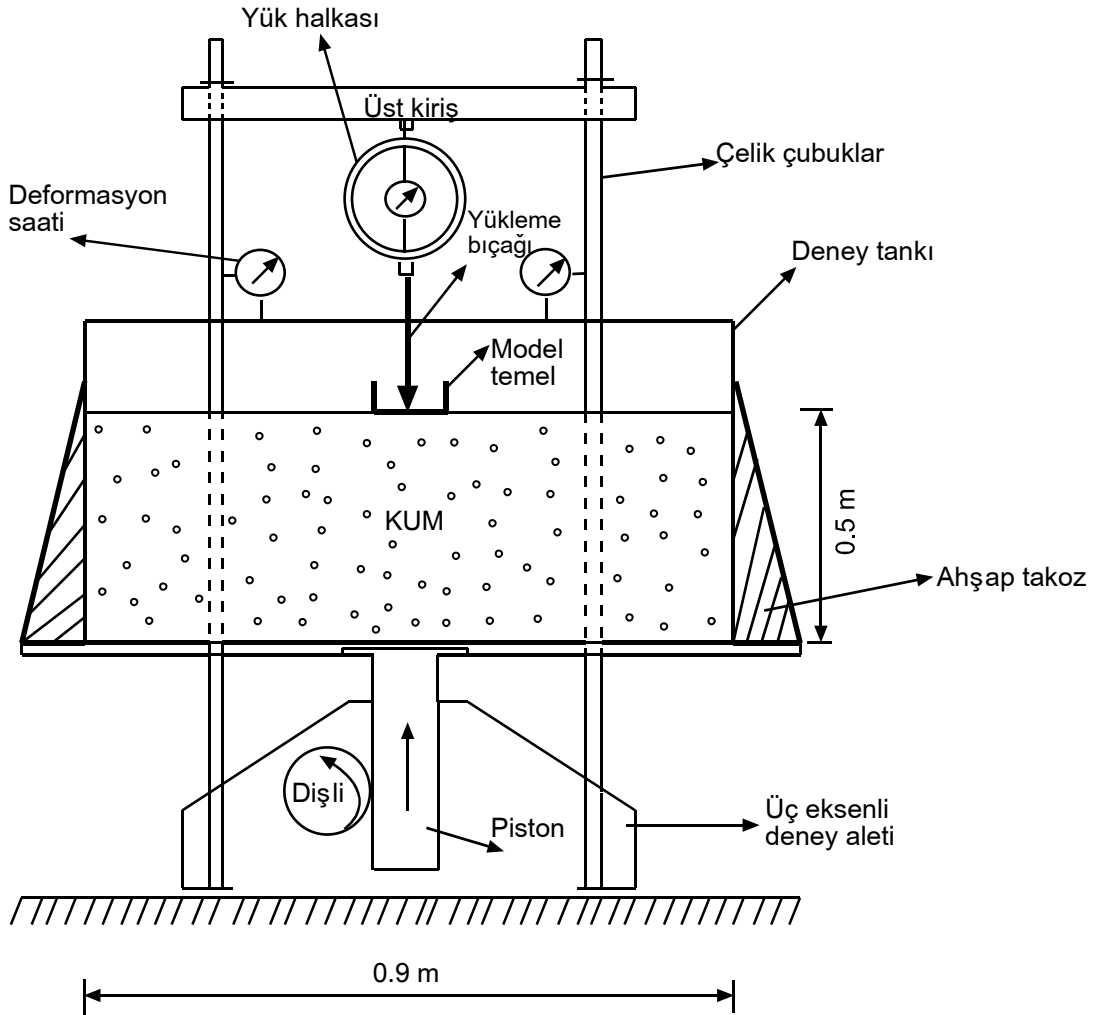
Şekil 2.11. Model şerit temelin şeması (Şadoğlu, 2009)



Şekil 2.12. Deneysel çalışmalarda kullanılan model şerit temel

### 2.2.3. Yükleme Sistemi

Deneyleerde yükün uygulanması için, bir üç eksenli deney aletinin 10 kN kapasiteli presi kullanılmıştır. Bu pres elektrik motoru sayesinde çeşitli hızlarda (0.006 mm/dk - 1.52 mm/dk) sabit deformasyon uygulama ve elle kriko gibi kullanılma özelliklerine sahiptir. Presin iki yanında bulunan düşey çelik çubuklar model temelin yüklenebilmesi için uzatılmıştır (Şekil 2.10). Deney tankı, altında bulunan dairesel oyuk sayesinde presin üst başlığının üzerine oturtulmuştur. Şekil 2.13'te yükleme düzeninin bir şeması görülmektedir ve Şekil 2.14'te yükleme düzeninin bir fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2.13. Yükleme düzeninin genel şeması (Şadoğlu, 2009)

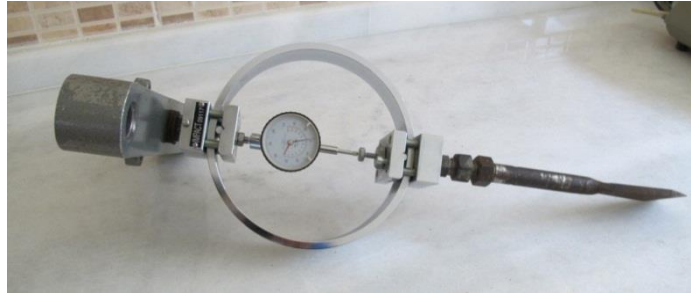




Şekil 2.14. Yükleme düzeninin genel görüntüsü

#### 2.2.4. Yük Halkası

Yükleme düzenindeki presin üst kirişine, düşey ve sabit olarak takılan 10 kN kapasiteli bir yük halkası, uygulanan yükü ölçmede kullanılmıştır. Deneylerden önce yük halkası kalibre edilmiş; kalibrasyon eğrisi belirlenmiştir. Yük halkasına düşey olarak monte edilmiş ucu keskin yükleme bıçağı, model temeli yüklemek için kullanılmıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Deneysel çalışmalarda kullanılan yük halkası ve yükleme bıçağı

#### 2.2.5. Basınç Ölçerler

Zemine uygulanan yüzey yüklerinden dolayı meydana gelecek düşey gerilme artışlarını ölçebilmek amacıyla kullanılan yöntemlerden biri de zemin içerisinde gerilme

ölçülecek derinliklere basınç ölçerler yerleştirilmesidir. Basınç ölçerler vasıtasıyla gerilme ölçmenin diğer yöntemlere göre en önemli avantajı, gerilme değerlerinin doğrudan ölçülebilmesidir.

Şekil 2.16’te Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. firması tarafından üretilen BH1431 seri numaralı, KDE-500KPA modelli 50 mm çapında ve 500 kPA kapasiteli basınç ölçerler görülmektedir.



Şekil.2.16. Deneylerde kullanılan basınç ölçerler

### 2.2.6. Data Toplama Sistemi ve CoDA Locomotive Programı

Deneyler sırasında basınç ölçerlerde ölçülen gerilme değerleri 8 kanal girişli Ai8b modelinde TDG markalı veri toplama cihazına ve yine aynı markaya ait RS-485 modelindeki aygıt geçidi yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 2.17, Şekil 2.18). Bu veriler CoDA Locomotive programı yardımıyla sayısal değerlere dönüştürülmüştür.



Şekil 2.17. TDG firmasının Ai8b model numaralı veri toplama ünitesi.



Şekil 2.18. TDG firmasının RS-485 model numaralı aygıt geçidi

### 2.3. Deneyin Yapılışı

Deneysel çalışmalar süresince bir deneyin yapılışı, deneye hazırlık, yükleme ve deney sonrası olmak üzere üç aşamaya ayrılmıştır. Her aşamada yapılan işler tüm deneylerde aynı sıra ile tekrarlanmış böylece bir standart tutturulmaya çalışılmıştır. Aşağıda bir deneyde yapılan çalışmalar bu üç aşama için kademe kademe anlatılmış, deneylerin yapılması esnasında özellikle dikkat edilecek hususlara değinilmiştir. (Şadoğlu, 2009).

Deneye hazırlık aşamasında, model temel yükleme yapmaya hazır hale getirilmiştir. İlk olarak deney tankının altında bulunan kum tahliye delikleri, kum doldururken açılmamaları için iyice kapatılmıştır. Sonra deney tankına kum, ön ve arka yüzlerinde oluşturulmuş olan kare ağ çizgileri takip edilerek tabakalar halinde doldurulmuştur. Her rölatif sıklık için önceden belirlenmiş miktarlarda kum tartılmış ve deney tankına büyükçe bir huniyi tankın uzunluğuna gezdirerek, serbestçe dökülmüştür. Bu serilen gevşek tabaka uniform bir kalınlığa getirilmiştir. Bu aşamadan sonra ahşap hafif bir tokmak yardımıyla tabaka kalınlığı 50 mm'ye indirilmiştir. Deney tankına yerleştirilen kum numunenin yüksekliği 200 mm olduğunda deney tankının cam yüzeylerinde önceden işaretlenmiş olan 6 ve 7 no'lu noktalara basınç ölçerler yerleştirilmiştir. Basınç ölçerler yerleştirilirken aynı yatay doğrultuda olmalarına ayrıca kabloların basınç ölçerlerin üzerine gelmemesine ve zarar görmemesine dikkat edilmiştir. Daha sonra 2 tabaka zemin yine aynı yöntemle yerleştirildikten sonra deney tankının cam yüzeylerinde işaretli 3,4 ve 5 no'lu noktalara basınç ölçerler yerleştirilmiş ve üzerine 2 tabaka zemin yerleştirilmiştir. Son olarak cam yüzeyler üzerinde işaretlenmiş olan 1 ve 2 no'lu noktalara basınç ölçerler yerleştirilip son 2 tabaka aynı işlem sırası takip edilerek yerleştirilmiştir. Son zemin tabakası oluşturulduktan sonra model temel düzeneğe yerleştirilmiştir. Model temel düzeneğe yerleştirilmeden önce

cama temas edecek kenarları yağlanmıştır. Deney tankının yanal deformasyonunu sınırlamak için tankın çelik çerçevesinin üst profilinde bulunan bulonlar ve marangoz mengeneleri monte edilmiştir. Deney tankı, üç eksenli deney aleti presinin elle kaldırma kolu vasıtasıyla üzerinde bulunduğu takozlardan kaldırılmıştır. Yükleme bıçağı, yük halkası ve kirişten oluşan düzenek model temelin üzerine yerleştirilmiş ve bulonları sıkılarak sabitlenmiştir.

Deney aşaması, model sığ şerit temele yüklemenin yapıldığı aşamadır. Öncelikli olarak yük halkası sıfırlanmıştır. Yükleme esnasında fotoğraf çekmek için bir dijital fotoğraf makinesi cam yüzeyinden yaklaşık 1.5 m uzaklıktaki bir fotoğraf makinesi sehpasına yerleştirilmiştir. Yüklemenin başlangıç anında, deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 2.19’da görülmektedir. Bu işlemlerden sonra 0.15 mm/dk’lık sabit bir düşey deformasyon hızı uygulanacak şekilde, model temel yüklenmeye başlanmıştır. Yük halkası saati okumaları ile belirli oturmalara karşılık gelen toplam düşey yük değerleri belirlenmiştir.

Deney sonrası aşaması, deney düzeneğinin sökülmesi ve bir sonraki deneye hazırlık işlemlerini kapsamaktadır. Yükleme tamamlandıktan sonra deney tankı üç eksenli deney aletinin elle indirme kolu kullanılarak tekrar takoza alınmıştır. Alttaki tahliye delikleri açılarak kumun tanktan boşaltılması sağlanmıştır. Bundan sonra üst başlık kirişi ve bu kirişe monte edilmiş olan yük halkası sökülüştür. Model temel çıkarılmış ve tankın çelik çerçevesinin üst profilinde bulunan bulonlar sökülüştür.



Şekil 2.19. Yüklemenin başlangıç anında deney düzeneğinin görünümü

## 2.4. Nümerik Çalışmalar

### 2.4.1. ANSYS Programı

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak teorik çözümlerinde sayısal çözümlerin önemi daha da artmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ise sayısal çözüm yöntemlerinden en etkili ve en çok tercih edilen yöntemdir. Bu metodun temelinde, karmaşık geometriye sahip bir bölge sonlu eleman olarak adlandırılan basit geometrik şekillere ayrılmaktadır. Tüm malzeme parametreleri ve dikkate alınan ortamın bünye denklemleri her bir eleman için ayrı ayrı elde edilmekte ve bilinmeyen büyüklükler ise elemanların düğüm noktalarında tanımlanmaktadır. Bu düğüm noktaları diğer elemanlarla ortak olduğu düğüm noktalarından birbirlerine bağlıdır. Her bir eleman için dikkate alınan bünye denklemleri birbirleriyle olan düğüm noktaları yardımıyla birleştirilip tüm ortamın çözümlenmesi sağlanır. Aynı zamanda bu düğüm noktalarına etki eden dış yükleme ve sınır şartları tanımlanarak bir dizi bilinmeyen denklem takımları elde edilmektedir. Bu denklem takımlarının çözümleri ortamın yaklaşık olarak davranışını bize anlatmaktadır (Kaya, 2011).

Sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS programı, 1971 yılından günümüze kadar kendisine giderek, daha büyük bir uygulama alanı bulacak şekilde geliştirmiştir.

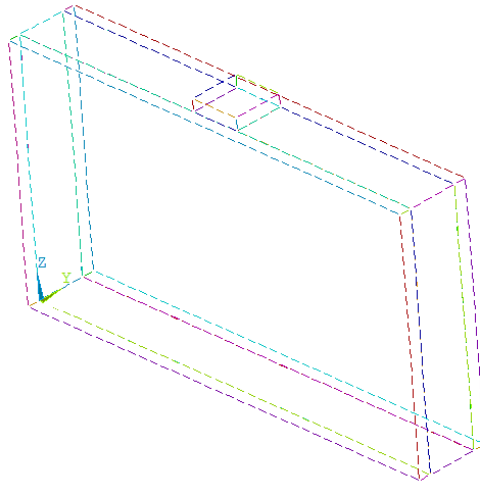
ANSYS programı, basitlikten karmaşıklığa, lineerlikten non-lineerliğe, statik analizden dinamik analize kadar çoğu sonlu elemanlar analizini yapabilme özelliklerine sahip olup, günümüzde tüm dünyada en fazla kullanılan bilgisayar programlarının başında gelmektedir (Kaya, 2011). Ayrıca ANSYS yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim akışkanlar mekaniği ve ısı transferi gibi alanlarda fiziğin bütün disiplinleri arasında olan ilişkileri modellemek için kullanılabilen bir yazılımdır.

### 2.4.2. ANSYS Paket Programı ile Yapılan Modelleme

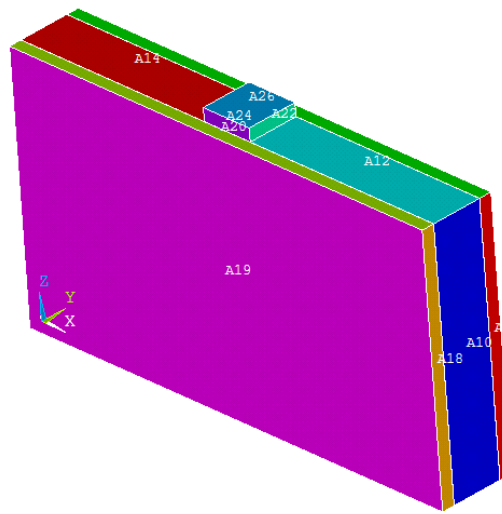
Modellemeye öncelikle deney tankının geometrik modelinin oluşturulması ile başlanılmıştır. Ayrıca modelleme yapılırken gerçekte deney tankında ahşap olan yüzeyler rijit olarak kabul edilmiş ve girilen geometrik modelde bu noktalara mesnet atanmıştır.

Geometrik model oluşturulmaya öncelikle aktif koordinat sisteminde anahtar noktalar (keypointler) oluşturulmak suretiyle başlanılmıştır. Daha sonra anahtar noktalar

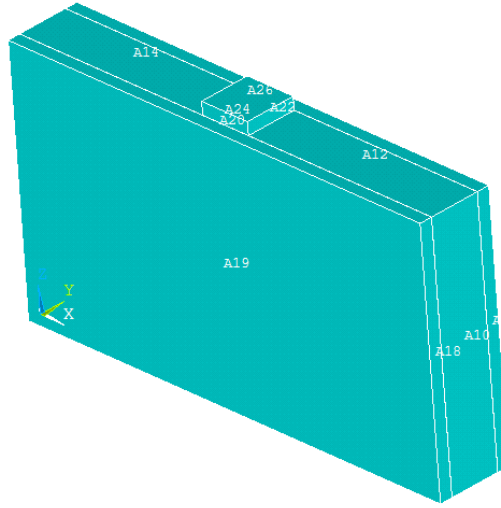
(keypoint) vasıtasıyla çizgiler (line), çizgilerin seçilmesi ile alanlar (area) ve son olarak alanlar yardımıyla hacimler (volume) tanımlanmıştır. Geometrik model oluşturulurken temas problemini çözebilmek için cam yüzeyler ile kum yüzeyler arasında 0.1mm boşluk bırakılmıştır. Şekil 2.20’de anahtar noktalar (keypoint) yardımıyla oluşturulan çubuk (line) elemanlar, Şekil 2.21’de çubuk (line) elemanlar yardımıyla oluşturulan alan (area) elemanlar ve Şekil 2.22’de alan (area) elemanlar vasıtasıyla oluşturulan hacim (volume) elemanlar görülmektedir.



Şekil 2.20. ANSYS paket programında anahtar noktalar (keypointler) ile oluşturulan çizgiler



Şekil 2.21. ANSYS paket programında çizgiler (line) ile oluşturulan alanlar (area)



Şekil 2.22. ANSYS paket programında alanlar (area) yardımıyla oluşturulan hacimler (volume)

Geometrik model oluşturulduktan sonra çözümlenmesi istenen sistemin geometrisine uygun eleman tipi seçilmiştir. Bu amaçla ANSYS paket programında element type komutunda 8 düğüm noktasından oluşan katı hacim elemanlara uygun 8 node 185 (Solid185) eleman tipi belirlenmiştir. Ayrıca temas yüzeylerinde hedef yüzeyler için 3 boyutlu hedef yüzeylere uygun olan 3dsurf 170 (Targe170) eleman tipi, sürtünme yüzeyleri için ise 4 adet düğüm noktasından oluşan sürtünme yüzeylerine uygun 4 node 173 (Conta173) eleman tipi seçilmiştir.

Eleman tipi de belirlendikten sonra malzeme özelliklerinin programa girilmesi işlemine geçilmiştir. Programda cam yüzeyler ve çelik model şerit temel lineer-elastik malzeme olarak tanımlanırken kum numune hem lineer elastik hem de multilineer kinematik pekleşen malzeme olarak tanımlanmıştır. Tablo 2.8’de programa girilen temel malzeme özellikleri ayrıca Tablo 2.9’da multilineer kinematik pekleşen malzeme modeli için girilen değerler görülmektedir.

Tablo 2.8. ANSYS paket programına girilen temel malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (E) (kN/m <sup>2</sup> )*10 <sup>3</sup>	Poisson Oranı ( $\mu$ )
Çelik	200000	0.3
Cam	70000	0.25
Kum <sub>0.75</sub>	33579	0.246
Kum <sub>0.65</sub>	25720	0.249
Kum <sub>0.55</sub>	21722	0.255
Kum <sub>0.45</sub>	18068	0.273
Kum <sub>0.35</sub>	16000	0.279
Kum <sub>0.25</sub>	14282	0.282
Kum <sub>LE</sub>	28000	0.2

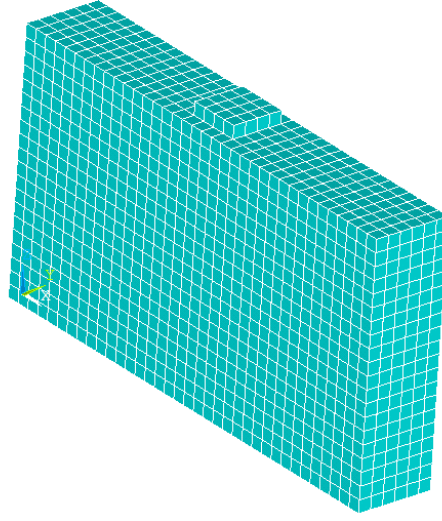
Bu tabloda görülen Kum<sub>0.75</sub>, rölatif sıklığın 0.75 olduğu durumdaki kum numuneyi, Kum<sub>0.65</sub>, rölatif sıklığın 0.65 olduğu durumdaki kum numuneyi, Kum<sub>0.55</sub>, rölatif sıklığın 0.55 olduğu durumdaki kum numuneyi, Kum<sub>0.45</sub>, rölatif sıklığın 0.45 olduğu durumdaki kum numuneyi, Kum<sub>0.35</sub>, rölatif sıklığın 0.35 olduğu durumdaki kum numuneyi ve son olarak Kum<sub>0.25</sub>, rölatif sıklığın 0.25 olduğu durumdaki kum numuneyi temsil etmektedir. Öte yandan Kum<sub>LE</sub> ise lineer-elastik malzeme modellenmiş kum numuneyi temsil etmektedir.



Tablo 2.9. ANSYS paket programında multilineer kinematik pekleşme malzeme modeli için girilen gerilme ve şekil değıştirme değeri

Malzeme	Uygulanan Yık (kN/m <sup>2</sup> )( $\sigma$ )	Şekil Değıştirme, $\epsilon$ (%)
Kum <sub>0,75</sub>	50	0.06
	100	0.155
	150	0.31
	200	0.49
Kum <sub>0,65</sub>	50	0.085
	100	0.215
	150	0.42
	200	0.745
Kum <sub>0,55</sub>	50	0.115
	100	0.285
	150	0.495
	200	0.755
Kum <sub>0,45</sub>	50	0.135
	100	0.33
	150	0.575
	200	0.89
Kum <sub>0,35</sub>	50	0.165
	100	0.375
	150	0.655
	200	1.01
Kum <sub>0,25</sub>	50	0.2
	100	0.435
	150	0.745
	200	1.185

Malzeme özelliklerinin programa girilmesi işleminden sonra, oluşturulmuş geometrik modele malzeme atama ve istenilen boyutta sonlu elemanlara ayırma işlemine (mesh) geçilmiştir. Bu işlem, programdaki mesh tool komutu ile yapılmıştır istenilen eleman türleri, malzeme ve sonlu elemanın boyutu bu komut vasıtasıyla yapılmıştır. Geometrik model 25 mm boyutunda sonlu elemanlara bölünmüştür. Şekil 2.23'te sonlu elemanlara ayrılmış ayrıca malzeme özellikleri tanımlanmış model görülmektedir.

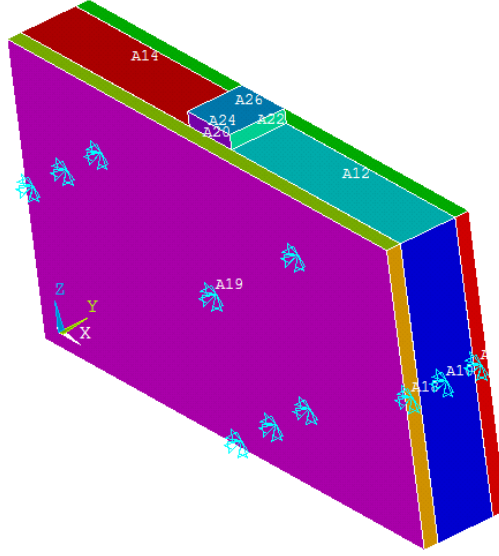


Şekil 2.23. Sonlu elemanlara ayırma (mesh) işleminden sonra deney tankının görüntüsü

Sonlu elemanlara ayırma işleminden sonra temas yüzeylerinin oluşturulması adımına geçilmiştir. Temas yüzeyler oluşturulurken cam ve kum yüzeyler arası sürtünme açısı  $12^0$  olarak girilmiştir (Keskin, 2004). Kum numune ile model temel arasında tam sürtünme olduğu kabul edilerek içsel sürtünme açısına yakın bir değer olduğundan  $40^0$  olarak kabul edilmiştir.

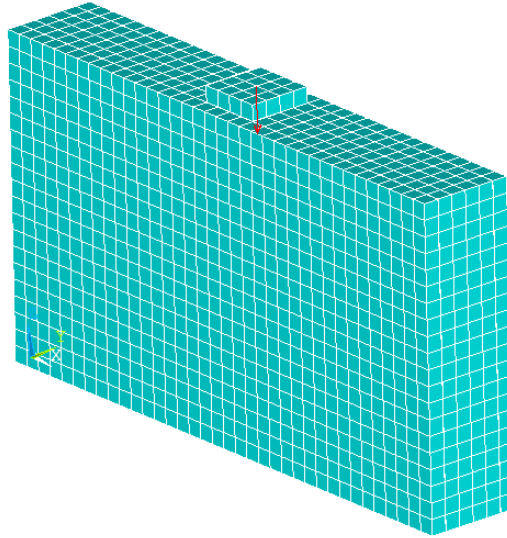
Modellemenin bir sonraki adımında sınır şartlarının (mesnetlerin) atanması, yükün uygulanması ve son olarak çözüm adımı sayısı ile yakınsama kriterinin belirlenmesidir.

Oluşturulan modelde cam malzemenin dış yüzeyleri (üst yüzeyi hariç) ile deney tankında ahşap olan yüzeyler rijit olarak kabul edilip bu alanlara mesnetler atanmıştır. Şekil 2.24'te sınır şartlarının uygulandığı model görülmektedir.



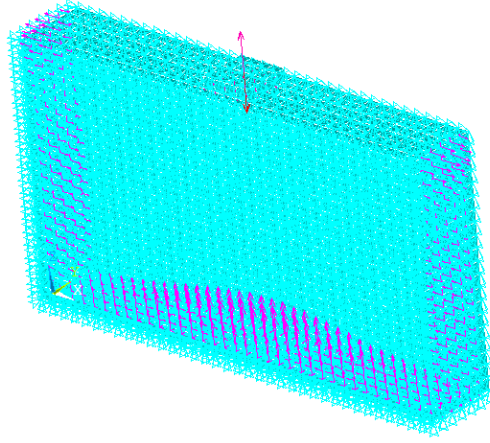
Şekil 2.24. Sınır şartları atandıktan sonra modelin görüntüsü

Sınır şartları da atanmış modele yük model şerit temelin tam merkezinden düşey yönde 1 kN olarak uygulanmıştır. Şekil 2.25'te 1 kN yük uygulandıktan sonra oluşan model görülmektedir.



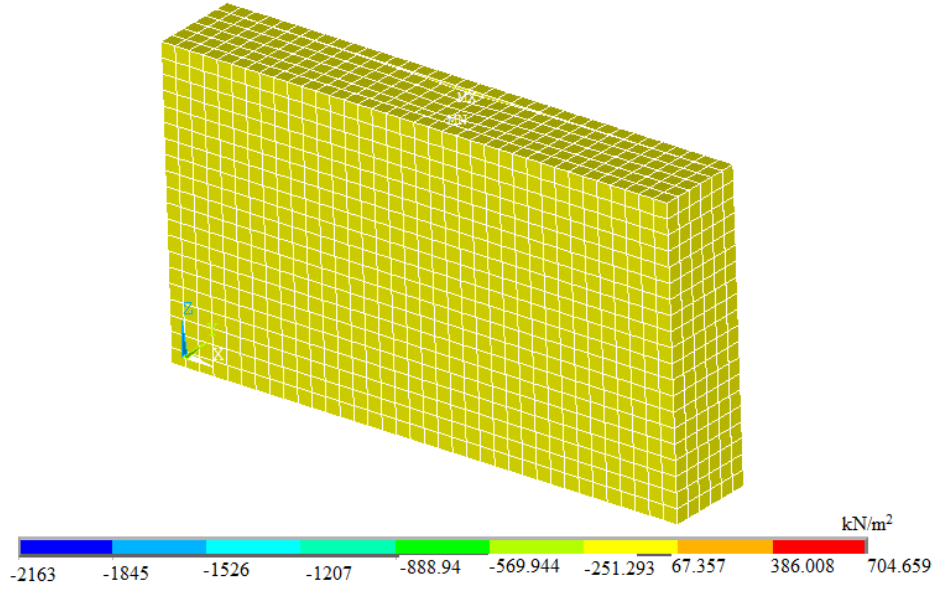
Şekil 2.25. 1kN yük uygulandıktan sonra modelin görüntüsü

Çözüm adımına geçilmeden önce son olarak model %1 yakınsama kriteri ve maksimum adım sayısı 3000 olan bir analiz tipi seçilmiştir. Daha sonra modelin çözüm aşamasına geçilmiştir. Şekil 2.26'da modelin çözümden sonraki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.26. Modelin çözümden sonraki görüntüsü

Şekil 2.27’de analizden sonra analiz sonrası düşey gerilmelerin dağılışı ve deforme olmuş model görülmektedir.



Şekil 2.27. Modelin düşey gerilme dağılışı ve deforme olmuş şekli

## 2.5. Analitik Çalışmalar

### 2.5.1. Boussinesq Yöntemi ile Düşey Gerilme Artışlarının Hesabı

Boussinesq yöntemi ile düşey gerilme artışlarının hesaplanırken, istenen noktaların yatay ve düşey mesafeleri ile ilgili değerler giriş bölümünde şerit yük durumu için verilmiş olan 1.32 ifadesinde yerine yazılarak her bir nokta için düşey gerilme artışları hesaplanmıştır. Bu yöntemde gerilme poisson oranından bağımsız olduğu için her bir rölatif sıklık değeri için aynı düşey gerilme artışları bulunmuştur. Bu yöntemde göre bulunan düşey gerilme artışı değerleri Tablo 2.10'da görülmektedir.

Tablo 2.10. Boussinesq yöntemine göre hesaplanmış düşey gerilme artışı değerleri

Nokta	İlave Düşey Gerilme ( $\Delta\sigma_z$ ) (kPA)
1	55
2	18.48
3	20.49
4	30.6
5	20.49
6	20.8
7	17.09

### 2.5.2. Sınırlı Tabaka Yöntemi ile İlave Düşey Gerilmelerin Hesabı

Sınırlı tabaka yöntemi ile düşey gerilme artışı değerlerinin belirlenmesi için giriş bölümünde sınırlı tabakalarda Poisson oranının 0.2 ve 0.4 olduğu üniform çizgisel yük durumu için verilmiş olan Şekil 1.26 ve 1.27 her bir nokta için  $z/h$  ve  $B/h$  değerlerine göre yük etki faktörü ( $I_{st}$ ) belirlenmiş daha sonra bu değer ile ilgili değerler 1.58 ifadesinde yerine konularak her bir nokta için 2 farklı poisson oranında ayrı ayrı düşey gerilme artışı değerleri hesaplanmıştır. 6 farklı poisson oranına sahip kum numunesi olduğundan dolayı her bir noktada tüm Poisson oranları için meydana gelecek düşey gerilme artışları

interpolasyon yoluyla belirlenmiştir. Böylelikle hesaplanan düşey gerilme artışı değerleri Tablo 2.11’de görülmektedir.

Tablo 2.11. Sınırlı tabaka yöntemine göre hesaplanmış düşey gerilme artışı değerleri

Nokta	$\Delta\sigma_{z0.75}$ (kPA)	$\Delta\sigma_{z0.65}$ (kPA)	$\Delta\sigma_{z0.55}$ (kPA)	$\Delta\sigma_{z0.45}$ (kPA)	$\Delta\sigma_{z0.35}$ (kPA)	$\Delta\sigma_{z0.25}$ (kPA)
1	61.298	61.311	61.337	61.414	61.440	61.453
2	14.765	14.773	14.789	14.838	14.854	14.863
3	20.775	20.8	20.854	21.011	21.064	21.09
4	30.647	30.653	30.665	30.699	30.710	30.716
5	20.775	20.8	20.854	21.011	21.064	21.09
6	23.08	23.09	23.111	23.174	23.195	23.205
7	17.793	17.817	17.867	18.016	18.066	18.091

### 3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Deney tankı  $D_r=0.75, 0.65, 0.55, 0.45, 0.35$  ve  $0.25$  rölatif sıklık değerlerinde  $0.05$  m'lik tabakalar halinde doldurulmuş ve son tabaka yerleştirildikten sonra zemin yüzeyine yerleştirilen model temele, merkezi olarak kademe kademe arttırılarak  $1\text{kN}$  yük uygulanmıştır. Bu esnada, model temelin altındaki çeşitli noktalarda ( $x=0, z=0.1$  m;  $x=0.1, z=0.1$  m;  $x=-0.1, z=0.2$  m;  $x=0, z=0.2$  m;  $x=0.1, z=0.2$  m;  $x=0, z=0.3$  m;  $x=0.1, z=0.3$  m) oluşan düşey gerilme artışları basınç ölçerlerle belirlenmiştir (Şekil 3.1). Deneysel yöntemle ölçülen gerilme artışı değerleri, literatürdeki teorik yöntemlerden ve ANSYS sonlu elemanlar programı modelinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneyler esnasında model temele uygulanan maksimum yük  $P=1$  kN'dur.

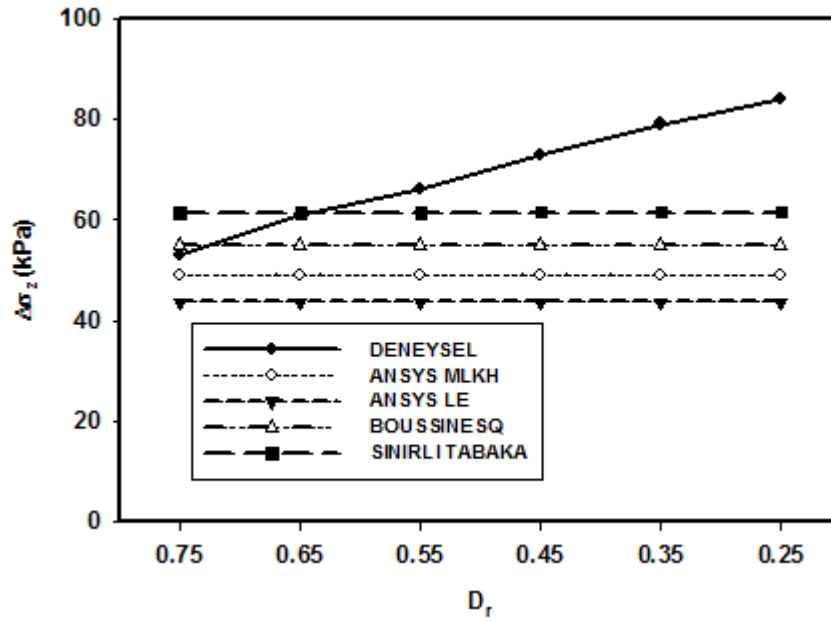


Şekil 3.1. Deney tankında basınç ölçerlerin yerleştirildiği yerler

### 3.1. Farklı Rölatif Sıklıkta Hazırlanan Kum Numunelerde İlave Düşey Gerilmelerin Analizi

#### 3.1.1. $z=0.1$ m İçin Düşey Gerilme Artışları

Şekil 3.1’de görülen 1 ve 2 No’lu noktalar için deneysel, nümerik ve analitik yöntemlerle belirlenmiş gerilme artışı sonuçları Şekil 3.2 ile 3.3 ve Tablo 3.1 ile Tablo 3.2’de görülmektedir.

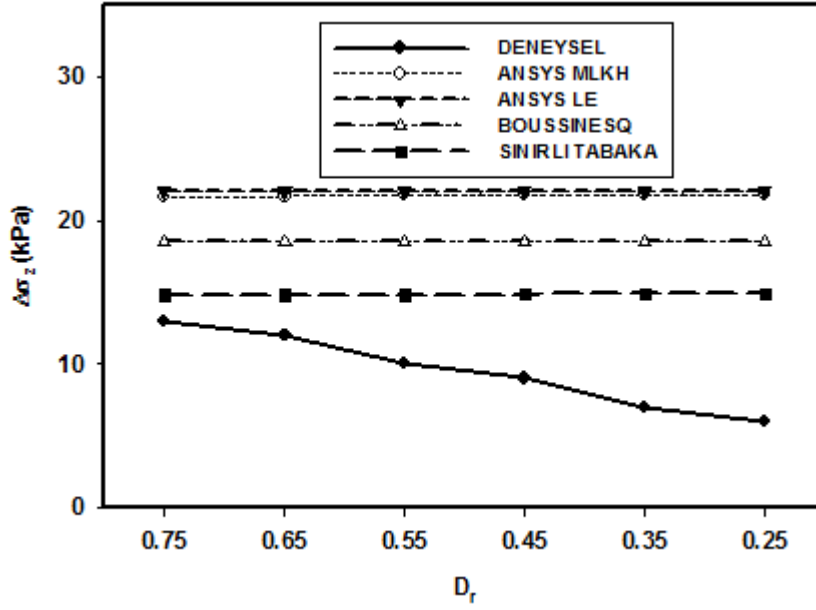


Şekil 3.2. 1 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları

Tablo 3.1. 1 noktası ( $X/B=0$ ,  $D/B=1$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları

Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Deneysel (kPA)	ANSYS MLKH (kPA)	ANSYS Lineer Elastik(kPA)	Boussinesq (kPA)	Sınırlı Tabaka (kPA)
0.75	53	48.829	43.685	55	61.298
0.65	61	48.868	43.685	55	61.311
0.55	66	48.892	43.685	55	61.337
0.45	73	48.915	43.685	55	61.414
0.35	79	48.927	43.685	55	61.440
0.25	84	48.935	43.685	55	61.453





Şekil 3.3. 2 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı değerleri

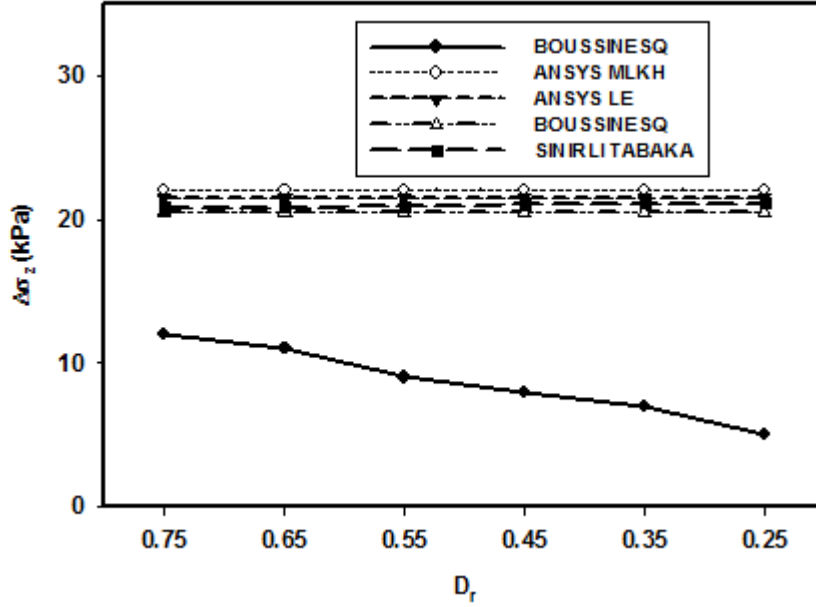
Tablo 3.2. 2 noktası ( $X/B=0$ ,  $D/B=1$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları

Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Deneysel (kPA)	ANSYS MLKH (kPA)	Ansysis Lineer Elastik(kPA)	Boussinesq (kPA)	Sınırlı Tabaka (kPA)
0.75	13	21.658	21.979	18.48	14.765
0.65	12	21.664	21.979	18.48	14.773
0.55	10	21.675	21.979	18.48	14.789
0.45	9	21.710	21.979	18.48	14.838
0.35	7	21.722	21.979	18.48	14.854
0.25	6	21.728	21.979	18.48	14.863

Yukarıdaki değerlere baktığımızda 1 No'lu noktada deney sonuçları rölatif sıklık değeri azaldıkça ortalama %10-15 artmakta buna karşın 2 No'lu noktada aynı oranlarda azalmaktadır. Genel olarak sonuçlara bakıldığında yüksek rölatif sıklık değerlerinde 1. nokta için deneysel sonuçlar mevcut teorik çözümlere ve sayısal çözümlere daha yakinken rölatif sıklık değeri azaldıkça deneysel sonuçlar ile diğer sonuçlar arasındaki fark artmıştır. Öte yandan 2 No'lu noktada bu durumun tam tersi bir durum gözlenmiştir. Genel olarak 1 ve 2 No'lu noktalarda deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar sınırlı tabaka çözümünden elde edilen sonuçlar olmuştur.

### 3.1.2. $z=0.2$ m İçin Düşey Gerilme Artışları

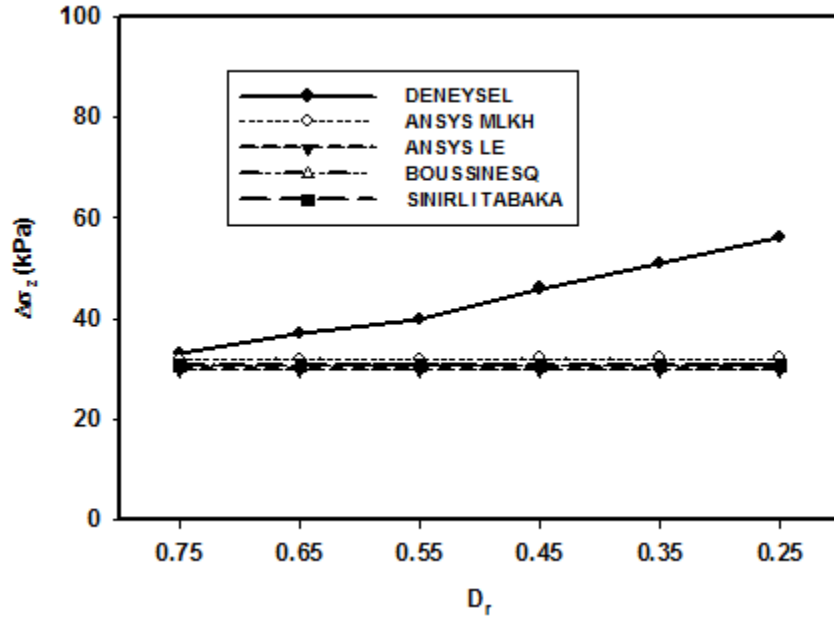
Şekil 3.1'de görülen 3, 4 ve 5 No'lu noktalar için deneysel, nümerik ve analitik yöntemlerle belirlenmiş sonuçlar Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve 3.6'da ayrıca Tablo 3.3 Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.4. 3 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları

Tablo 3.3. 3 noktası ( $X/B=1$ ,  $D/B=2$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları

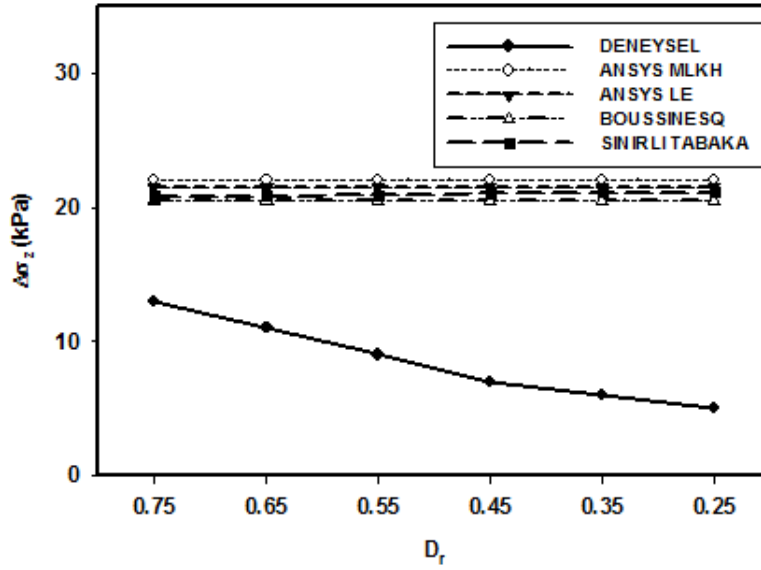
Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Deneysel (kPA)	ANSYS MLKH (kPA)	Ansyes Lineer Elastik(kPA)	Boussinesq (kPA)	Sınırlı Tabaka (kPA)
0.75	12	22.002	21.458	20.49	20.775
0.65	11	22.010	21.458	20.49	20.8
0.55	9	22.018	21.458	20.49	20.854
0.45	8	22.036	21.458	20.49	21.011
0.35	7	22.042	21.458	20.49	21.064
0.25	5	22.046	21.458	20.49	21.09



Şekil 3.5. 4 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları

Tablo 3.4. 4 noktası ( $X/B=0$ ,  $D/B=2$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları

Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Deneysel (kPA)	ANSYS MLKH (kPA)	Ansyes Lineer Elastik(kPA)	Boussinesq (kPA)	Sınırlı Tabaka (kPA)
0.75	33	32.002	29.807	30.6	30.647
0.65	37	32.018	29.807	30.6	30.653
0.55	40	32.026	29.807	30.6	30.665
0.45	46	32.030	29.807	30.6	30.699
0.35	51	32.033	29.807	30.6	30.710
0.25	56	32.036	29.807	30.6	30.716



Şekil 3.6. 5 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik gerilme artışı sonuçları

Tablo 3.5. 5 noktası ( $X/B=1$ ,  $D/B=2$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik gerilme artışı sonuçları

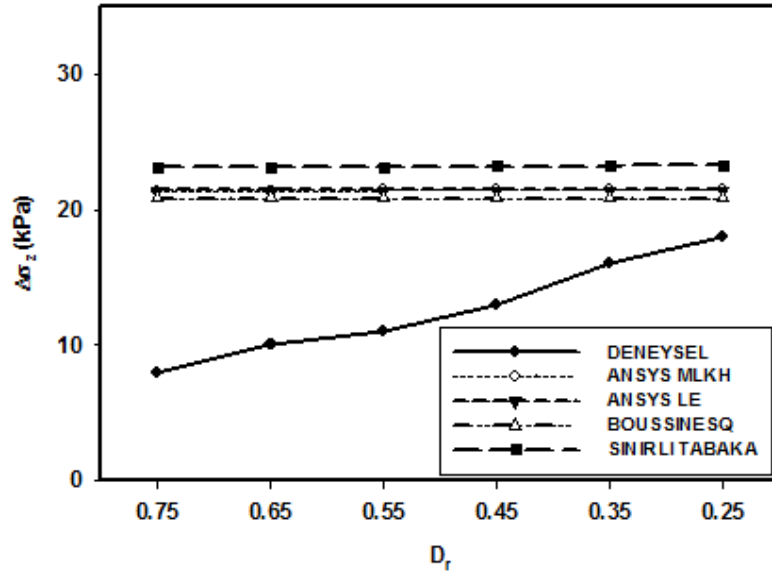
Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Deneysel (kPA)	ANSYS MLKH (kPA)	Ansys Lineer Elastik(kPA)	Boussinesq (kPA)	Sınırlı Tabaka (kPA)
0.75	13	22.002	21.458	20.49	20.775
0.65	11	22.010	21.458	20.49	20.8
0.55	9	22.018	21.458	20.49	20.854
0.45	7	22.036	21.458	20.49	21.011
0.35	6	22.042	21.458	20.49	21.064
0.25	5	22.046	21.458	20.49	21.09

Yukarıdaki değerlere baktığımızda 4 No'lu noktada deney sonuçları rölatif sıklık değeri azaldıkça ortalama %10-15 artmakta buna karşın 3 ve 5 No'lu noktalarda aynı oranlarda azalmaktadır. 3 ve 5 No'lu noktalar simetrik olmasına rağmen bazı rölatif sıklık değerlerinde farklı ilave düşey gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu fark %5 civarında olduğu için deneysel sonuçların sağlıklı olduğu düşünülmüştür. ANSYS MLKH modeli ve sınırlı tabaka çözümünden elde edilen sonuçlara göre tüm noktalarda rölatif sıklık değeri azaldıkça ilave düşey gerilme değerleri de artmıştır. Genel olarak sonuçlara bakıldığında yüksek rölatif sıklık değerlerinde deneysel sonuçlar mevcut teorik çözümlere ve sayısal çözümlere daha yakinken rölatif sıklık değeri azaldıkça deneysel sonuçlar ile diğer

sonuçlar arasındaki fark artmıştır. 3 No'lu ve 5 No'lu noktalarda deneysel değerlere en yakın sonuçlar BOUSSINESQ çözümü iken 4 No'lu ANSYS MLKH modellemesinden elde edilen sonuçlar olmuştur.

### 3.1.3. $z=0.3$ m İçin Düşey Gerilme Artışları

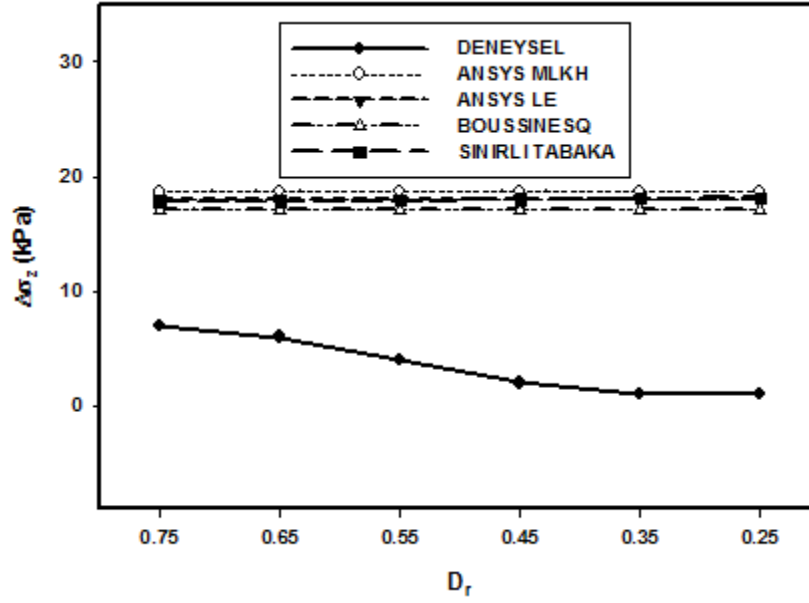
Şekil 3.1'de görülen 6 ve 7 No'lu noktalar için deneysel, nümerik ve analitik yöntemlerle belirlenmiş gerilme artışı sonuçları Şekil 3.7 ile 3.8'de ve Tablo 3.6 ile Tablo 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7. 6 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik sonuçlar

Tablo 3.6. 6 noktası ( $X/B=0$ ,  $D/B=3$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik sonuçlar

Rölatif Sıklık ( $D_r$ )	Deneysel (kPA)	ANSYS MLKH (kPA)	Ansyes Lineer Elastik(kPA)	Boussinesq (kPA)	Sınırlı Tabaka (kPA)
0.75	8	21.349	21.401	20.8	23.08
0.65	10	21.364	21.401	20.8	23.09
0.55	11	21.382	21.401	20.8	23.11
0.45	13	21.427	21.401	20.8	23.174
0.35	16	21.443	21.401	20.8	23.195
0.25	18	21.451	21.401	20.8	23.205



Şekil 3.8. 7 noktası için belirlenen deneysel, analitik ve nümerik sonuçlar

Tablo 3.7. 7 noktası ( $X/B=1$ ,  $D/B=3$ ) için belirlenen deneysel, nümerik ve analitik sonuçlar

Rölatif Sıklılık ( $D_r$ )	Deneysel (kPA)	ANSYS MLKH (kPA)	Ansyes Lineer Elastik(kPA)	Boussinesq (kPA)	Sınırlı Tabaka (kPA)
0.75	7	18.596	17.979	17.09	17.793
0.65	6	18.607	17.979	17.09	17.817
0.55	4	18.621	17.979	17.09	17.867
0.45	2	18.656	17.979	17.09	18.016
0.35	1	18.669	17.979	17.09	18.066
0.25	1	18.676	17.979	17.09	18.091

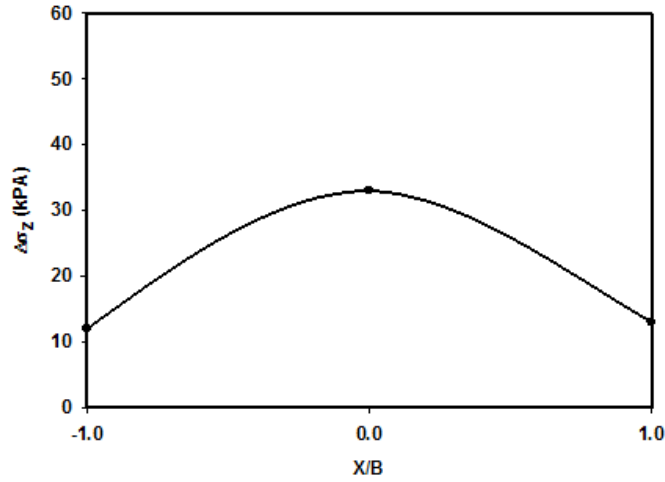
Yukarıdaki değerlere baktığımızda 6 No'lu noktada deney sonuçları rölatif sıklık değeri azaldıkça ortalama %10-15 artmakta buna karşın 7 No'lu noktada aynı oranlarda azalmaktadır. ANSYS MLKH modeli ve sınırlı tabaka çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre tüm noktalarda rölatif sıklık değeri azaldıkça ilave düşey gerilme değerleri de artmıştır. Genel olarak sonuçlara bakıldığında yüksek rölatif sıklık değerlerinde deneysel sonuçlar mevcut teorik çözümlere ve sayısal çözümlere daha yakinken rölatif sıklık değeri azaldıkça deneysel sonuçlar ile diğer sonuçlar arasındaki fark artmıştır. 6 ve 7 No'lu noktalarda deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar Boussinesq yönteminden elde edilen sonuçlar olmuştur.

### 3.2. Deneylelerden Ölçülen İlave Düşey Gerilmelerin Yatay Doğrultuda Dağılımı

Bu bölümde deney tankında 3, 4 ve 5 No'lu noktalarda farklı rölatif sıklıklarda deneysel olarak belirlenmiş düşey gerilme artışlarının  $z=0.2$  m seviyesindeki yatay dağılımı incelenecektir. Model şerit temele olan yatay mesafeler  $X$ , düşey mesafeler  $D$  ve model şerit temelin genişliği  $B$  olarak tanımlanmış ve grafikler bu değerlere göre elde edilmiştir.

#### 3.2.1. $D_r=0.75$ İçin Yatay Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.9'da  $D_r=0.75$  için deneylelerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $D/B=2$  yatay düzlemi için  $X/B=-1$ ,  $X/B=0$  ve  $X/B=1$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

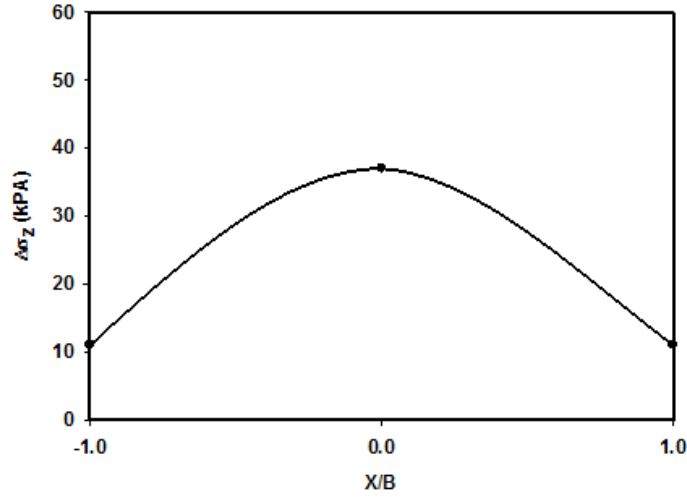


Şekil 3.9.  $D_r=0.75$  için  $z=0.2$ m'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde 4 No'lu nokta ( $X/B=0$ ) ile 3 ve 5 No'lu noktalar ( $X/B=-1,1$ ) arasındaki düşey gerilme artışları arasında yaklaşık olarak %64 farklılık olduğu gözlenmiştir.

### 3.2.2. $D_r=0.65$ İçin Yatay Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.10'da  $D_r=0.65$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $D/B=2$  yatay düzlemi için  $X/B=-1$ ,  $X/B=0$  ve  $X/B=1$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.



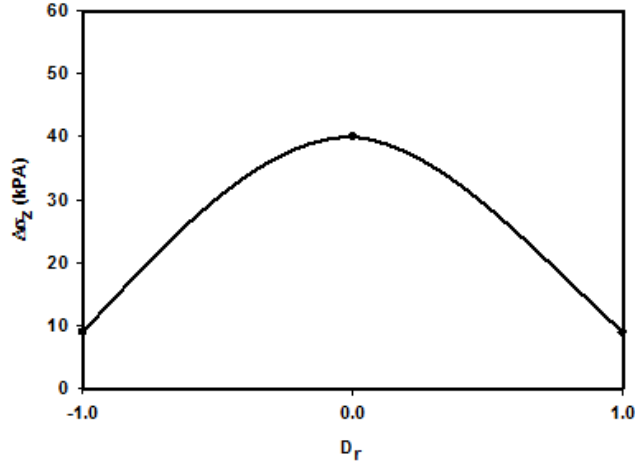
Şekil 3.10.  $D_r=0.65$  için  $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde 4 No'lu nokta ( $X/B=0$ ) ile 3 ve 5 No'lu noktalar ( $X/B=-1,1$ ) arasındaki düşey gerilme artışları arasında yaklaşık olarak %70 farklılık olduğu gözlenmiştir.

### 3.2.3. $D_r=0.55$ İçin Yatay Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.11'de  $D_r=0.55$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $D/B=2$  yatay düzlemi için  $X/B=-1$ ,  $X/B=0$  ve  $X/B=1$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.



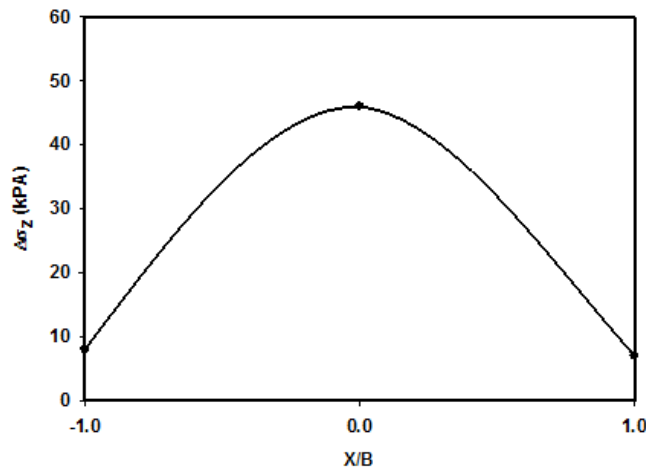


Şekil 3.11.  $D_r=0.55$  için  $z=0.2\text{m}$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde 4 No'lu nokta ( $X/B=0$ ) ile 3 ve 5 No'lu noktalar ( $X/B=-1,1$ ) arasındaki düşey gerilme artışları arasında yaklaşık olarak %77 farklılık olduğu gözlenmiştir.

### 3.2.4. $D_r=0.45$ İçin Yatay Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.12'de  $D_r=0.45$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $D/B=2$  yatay düzlemi için  $X/B=-1$ ,  $X/B=0$  ve  $X/B=1$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

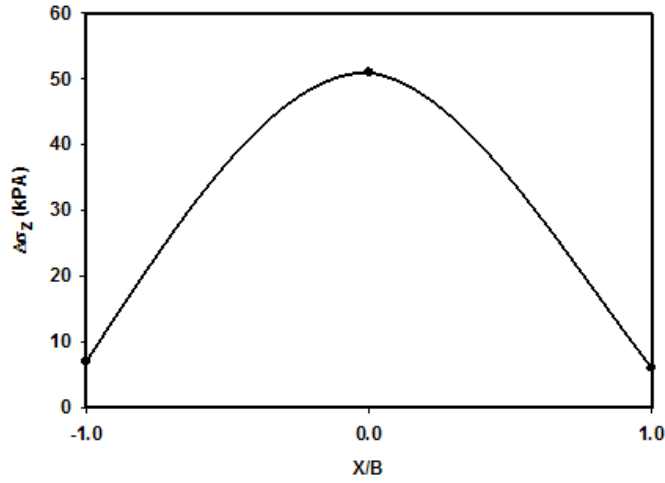


Şekil 3.12.  $D_r=0.45$  için  $z=0.2\text{m}$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde 4 No'lu nokta ( $X/B=0$ ) ile 3 ve 5 No'lu noktalar ( $X/B=-1,1$ ) arasındaki düşey gerilme artışları arasında yaklaşık olarak %85 fark olduğu gözlenmiştir.

### 3.2.5. $D_r=0.35$ İçin Yatay Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.13'te  $D_r=0.35$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $D/B=2$  yatay düzlemi için  $X/B=-1$ ,  $X/B=0$  ve  $X/B=1$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

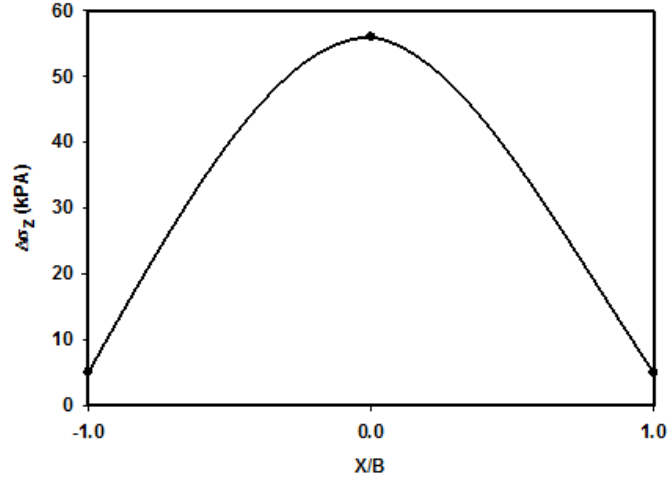


Şekil 3.13.  $D_r=0.35$  için  $z=0.2m$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde 4 No'lu nokta ( $X/B=0$ ) ile 3 ve 5 No'lu noktalar ( $X/B=-1,1$ ) arasındaki düşey gerilme artışları arasında yaklaşık olarak %88 fark olduğu gözlenmiştir.

### 3.2.6. $D_r=0.25$ İçin Yatay Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.14'te  $D_r=0.25$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $D/B=2$  yatay düzlemi için  $X/B=-1$ ,  $X/B=0$  ve  $X/B=1$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.



Şekil 3.14.  $D_r=0.25$  için  $z=0.2\text{m}$ 'de düşey gerilme artışlarının yatay doğrultuda dağılımı

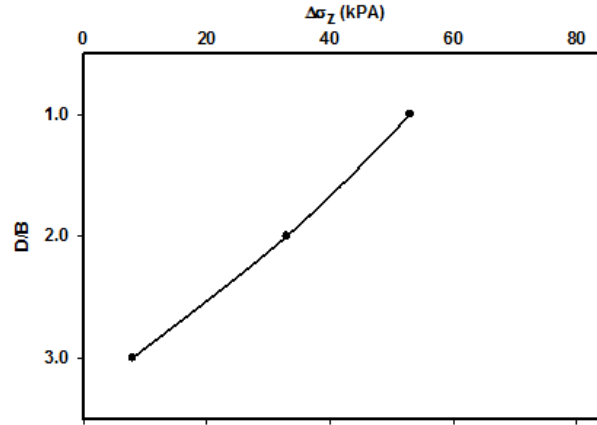
Yukarıdaki şekil incelendiğinde 4 No'lu nokta ( $X/B=0$ ) ile 3 ve 5 No'lu noktalar ( $X/B=-1,1$ ) arasındaki düşey gerilme artışları arasında yaklaşık olarak %92 fark olduğu gözlenmiştir.

### 3.3. Deneylerden Ölçülen Düşey Gerilme Artışlarının Düşey Doğrultuda Dağılımı

Bu bölümde deney tankında 1, 4 ve 6 No'lu noktalarda farklı rölatif sıklıklarda deneysel olarak belirlenmiş düşey gerilme artışlarının  $x=0$  m düşey doğrultusundaki dağılımı incelenecektir. Model şerit temele olan yatay mesafeler  $X$ , düşey mesafeler  $D$  ve model şerit temelin genişliği  $B$  olarak tanımlanmış ve grafikler bu değerlere göre elde edilmiştir.

#### 3.3.1. $D_r=0.75$ İçin Düşey Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.15'te  $D_r=0.75$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $X/B=0$  düşey düzlemi için  $D/B=1$ ,  $D/B=2$  ve  $D/B=3$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

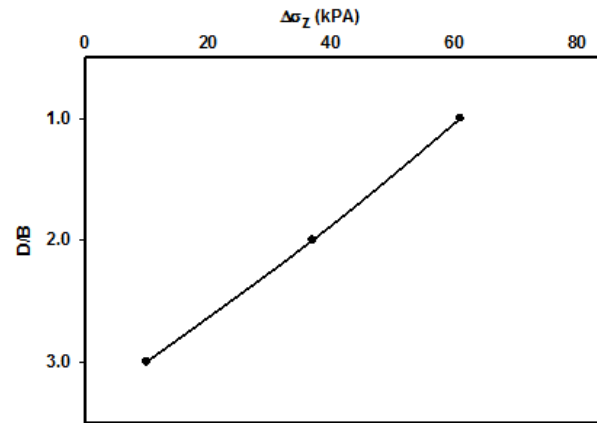


Şekil 3.15.  $D_r=0.75$  için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde derinlik arttıkça ilave düşey gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma oransal olarak incelendiğinde 1 No'lu nokta ile 4 No'lu nokta arasındaki gerilme artış miktarı yaklaşık olarak %38 azalırken, 4 No'lu nokta ile 6 No'lu nokta arası yaklaşık olarak %79 azalmanın olduğu görülmüştür.

### 3.3.2. $D_r=0.65$ İçin Düşey Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.16'da  $D_r=0.65$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $X/B=0$  düşey düzlemi için  $D/B=1$ ,  $D/B=2$  ve  $D/B=3$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

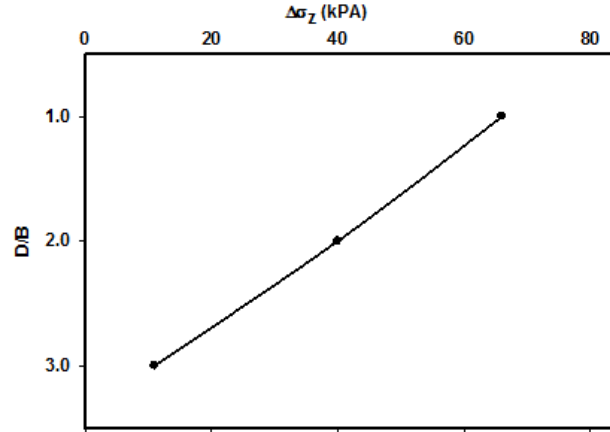


Şekil 3.16.  $D_r=0.65$  için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde derinlik arttıkça ilave düşey gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma oransal olarak incelendiğinde 1 No'lu nokta ile 4 No'lu nokta arası artış miktarı yaklaşık %39 azalırken, 4 No'lu nokta ile 6 No'lu nokta arası yaklaşık olarak %73 azalmanın olduğu görülmüştür.

### 3.3.3. $D_r=0.55$ İçin Düşey Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.17'de  $D_r=0.55$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $X/B=0$  düşey düzlemi için  $D/B=1$ ,  $D/B=2$  ve  $D/B=3$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

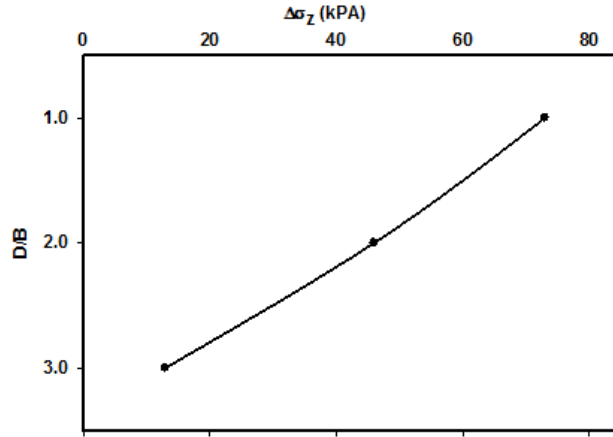


Şekil 3.17.  $D_r=0.55$  için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde derinlik arttıkça düşey gerilme artışı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma oransal olarak incelendiğinde 1 No'lu nokta ile 4 No'lu nokta arası artış miktarı yaklaşık %38 azalırken, 4 No'lu nokta ile 6 No'lu nokta arası yaklaşık olarak %73 azalmanın olduğu görülmüştür.

### 3.3.4. $D_r=0.45$ İçin Düşey Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.18'de  $D_r=0.45$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $X/B=0$  düşey düzlemi için  $D/B=1$ ,  $D/B=2$  ve  $D/B=3$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

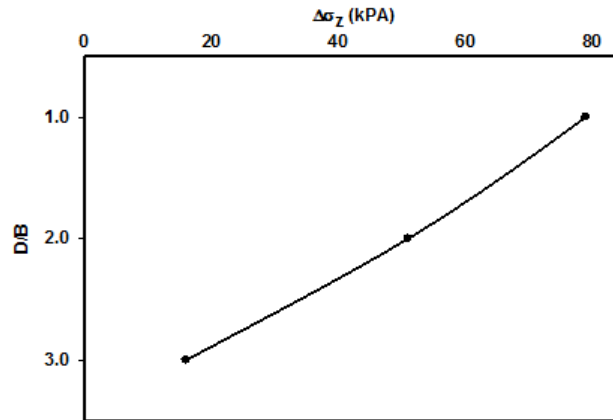


Şekil 3.18.  $D_r=0.45$  için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde derinlik arttıkça düşey gerilme artışı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma oransal olarak incelendiğinde 1 No'lu nokta ile 4 No'lu nokta arası artış miktarı yaklaşık %37 azalırken, 4 No'lu nokta ile 6 No'lu nokta arası yaklaşık olarak %71 azalmanın olduğu görülmüştür.

### 3.3.5. $D_r=0.35$ İçin Düşey Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.19'da  $D_r=0.35$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $X/B=0$  düşey düzlemi için  $D/B=1$ ,  $D/B=2$  ve  $D/B=3$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.

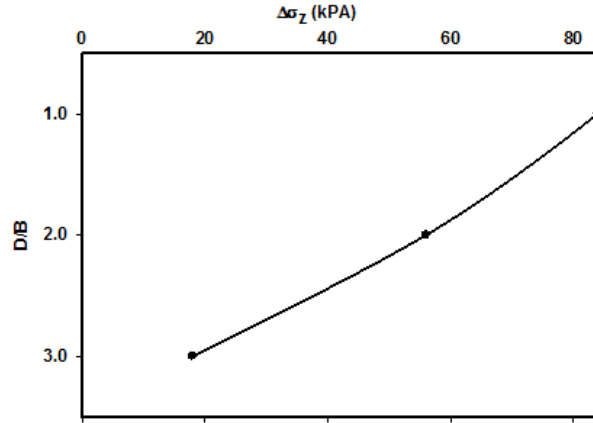


Şekil 3.19.  $D_r=0.35$  için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde derinlik arttıkça düşey gerilme artışı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma oransal olarak incelendiğinde 1 No'lu nokta ile 4 No'lu nokta arası artış miktarı yaklaşık %35 azalırken, 4 No'lu nokta ile 6 No'lu nokta arası yaklaşık olarak %68 azalmanın olduğu görülmüştür.

### 3.3.6. $D_r=0.25$ İçin Düşey Doğrultuda Düşey Gerilme Artışlarının Dağılımı

Şekil 3.20'de  $D_r=0.25$  için deneylerden elde edilmiş düşey gerilme artışlarının  $X/B=0$  düşey düzlemi için  $D/B=1$ ,  $D/B=2$  ve  $D/B=3$  noktalarındaki değerleri görülmektedir.



Şekil 3.20.  $D_r=0.25$  için düşey gerilme artışlarının düşey doğrultuda dağılımı

Yukarıdaki şekil incelendiğinde derinlik arttıkça düşey gerilme artışı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma oransal olarak incelendiğinde 1 No'lu nokta ile 4 No'lu nokta arası gerilme artış miktarı yaklaşık %33 azalırken, 4 No'lu nokta ile 6 No'lu nokta arası yaklaşık olarak %69 azalmanın olduğu görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı sıklıktaki taneli zeminlerdeki gerilme artışı dağılımları deneysel, nümerik ve analitik olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, ön ve arka yüzeyleri cam, yan yüzeyleri ahşap olan bir deney tankına, farklı rölatif sıklıklarda hazırlanan kötü derecelenmiş kum tabakalar halinde yerleştirilmiş ve düzlem deformasyon koşullarında şerit yüzey yükü uygulanmıştır. Bu yük uygulanırken, çeşitli derinliklere yerleştirilmiş basınç ölçerler vasıtasıyla düşey gerilme artışları ölçülmüştür. Analitik çalışmada basınç ölçerlerin bulunduğu yerlerdeki düşey gerilme artışları, farklı sınır koşullarına sahip elastisite teorisine bağlı çözümlerle elde edilmiştir. Bunun yanında, kullanılan tankın sınırlı uzunlukta olması sebebiyle oluşan kenar etkisini göz önüne almak için lineer elastik malzeme modeli için gerilme artışları, ayrıca ANSYS paket programıyla da elde edilmiştir. Plastisite Teorisinde dayalı nümerik çözümler için de ANSYS paket programında bulunan multilineer kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, analitik ve nümerik yöntemlerle elde edilen çözümlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir:

- Rölatif sıklık değeri arttıkça model temelin merkezi altında ölçülen gerilme değerleri azalırken merkezin sağında ve solunda ölçülen gerilme değerleri artmıştır. Öte yandan ANSYS multilineer pekleşme modeli ve sınırlı tabaka çözümlerinden elde edilen sonuçlara göre rölatif sıklık değeri arttıkça ilave düşey gerilme değerleri de tüm noktalarda artmıştır. Ancak, rölatif sıklığa bağlı olarak ortaya çıkan gerilme artışlarında değişim deneylerde % 60 seviyelerinde iken, sınırlı tabaka ile ANSYS MLKH sonuçlarındaki değişim % 0.5 seviyelerindedir.
- Genel olarak değerlendirildiğinde, sığ derinlikler için sınırlı tabaka çözümleri ile ANSYS Multilineer Kinematik pekleşme modelinden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlara daha yakın iken, derinlik arttıkça Boussinesq çözümünden elde edilen sonuçlar daha yakın olmuştur.
- Temel eksenini altında bulunan basınç ölçerlerde okunan gerilme artışları tüm rölatif sıklıklarda derinlik arttıkça azalmaktadır. Bu azalma, derinlikle birlikte daha az olmaktadır. Yani sığ derinliklerde gerilme artışında olan birim derinlikteki azalma miktarı, büyük derinliklerdekine göre daha fazla olmaktadır.



- Analitik hesaplamalarda Boussinesq yöntemi ile sınırlı tabaka yöntemi karşılaştırıldığında genel olarak, sığ derinliklerde sınırlı tabaka sonuçları daha yüksek iken derinlik arttıkça Boussinesq yönteminden elde edilen sonuçların daha yüksek olduğu elde edilmiştir. İki yöntem ile hesaplanan gerilme değerleri arasındaki fark çok küçük değerlerdedir. Boussinesq yönteminde zemin yarım sonsuz ortam olarak kabul edilirken, sınırlı tabaka yönteminde bu durumun söz konusu olmaması iki yöntem ile hesaplanan düşey gerilme artışları arasındaki farkın oluşmasının temel nedeni olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde sınırlı tabaka çözümleri ile ANSYS lineer-elastik malzeme modeli sonuçları karşılaştırıldığında, genel olarak sınırlı tabaka yöntemi sonuçlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. İki yöntemde de malzeme özellikleri ile zemin tabaka kalınlığının aynı olmasına rağmen aradaki farka, ANSYS modellemesinde cam yüzey ile kum yüzey arası sürtünmenin tanımlanması ve kenar etkisinin de göz önüne alınmasının sebep olduğu düşünülmektedir.

## 5. ÖNERİLER

- Nümerik çalışmalarda, zemin modellemesine daha elverişli 3 boyutlu bilgisayar programları kullanılarak daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir.
- Farklı geometriye ve daha büyük boyutlara sahip olan deney tankıyla kum-yan yüzey sürtünmesi olmayan çalışmalar yapılabilir.
- Farklı model temeller kullanılarak, temel şeklinin gerilme artışı üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Benzer bir çalışmada, kil veya silt gibi ince daneli zeminlerde su muhtevasının gerilme artışı üzerindeki etkisi araştırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Adams, M.T. ve Collin J.G., 1997. Large Model Spread Footing Load Tests on Geosynthetic Reinforced Soil Foundations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, 1, 66-72.
- Ahlvin, R.G. ve Ulery, H.H., 1962. Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Load on a Homogeneous Half Space. Highway Research Board, Bulletin 342,1-13.
- Alawaji, H.A., 2001. Settlement and Bearing Capacity of Geogrid Reinforced Sand over Collapsible Soil, Geotextiles and Geomembranes, 19, 75-88.
- Algin, H. M., 2000. Stresses from Linearly Distributed Pressures over Rectangular Areas, International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 24, 681-692.
- Al-Mosawe, M.J. ve Al-Dobaissi, H.H., 1992. Reinforced Earth Response to Impact Loading, Proceedings of The International Symposium on Earth Reinforcement Practice, Fukuoka, Japan, 653-658.
- Ambraseys, N.N., 1960. Discussion of Linearly Variable Load Distribution on a Rectangular Foundation, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 3, 123-125.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Aytekin, M., 2009. Çözümlü Problemlerle Temel Tasarımı, Derya Kitabevi, Trabzon.
- Bağrıaçık, B., Laman, M. ve Demir, A., 2011. Dairesel Temeller Altında Farklı Sıkılıklarda Oluşan Düşey Gerilmelerin Karşılaştırılması, 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, Bildiriler Kitabı, 552-565.
- Bağrıaçık, B., Laman, M. ve Demir, A., 2011. Kum Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Deneysel Olarak Belirlenmesi, 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, Bildiriler Kitabı, 540-552.
- Bağrıaçık, B., 2010. Zeminde Gerilme Durumlarının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Boussinesq, J., 1885. Application des Potentiels a L'etude de L'equilibre et du Movement des Solids Elastiques. Gauthier-Villars, Paris.

- Burland, J.B., Broms, B.B. ve De Mello, V.F.B, 1977. Behaviour of Foundations and Structures, In Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 495-538.
- Burmister, D.M., 1956. Stress and displacement characteristics of a two-layer rigid base soil system: influence diagrams and practical applications. Proc. Highway Res. Board, 35, 773-814.
- Cho, S., ve Vipulanandan, C., 1998. Verification of Stress Distribution in a Soil Box. CIGMAT-Department of Civil and Environmental Engineering University of Houston, Texas, 77204-4003.
- Daramola, O., 1980. On Estimating  $K_0$  for Overconsolidated Granular Soils. Geotechnique, 30, 3, 310-313.
- Das, B.M., 2001. Principles of Geotechnical Engineering. Brooks Cole, USA.
- Das, B.M., Shin, E.C. ve Omar, M.T., 1994. The Bearing Capacity of Surface Strip Foundations on Geogrid-Reinforced Sand and Clay –A Comparative Study, Geotechnical and Geological Engineering, 12, 1-14.
- Geddes, J.D., 1966. Stresses in Foundation Soils due to Vertical Subsurface Loading. Geotechnique, 16, 3, 231-255.
- Giroud, J.P., 1970. Stresses Under Linearly Loaded Rectangular Area. Int. Soil Mechs. Fndns. Divn., ASCE, 96, 263-268.
- Gray, H., 1943. Stresses and Displacements from Loads over Rectangular Area, ASCE, 13, 5, 227-229.
- Hanna, A., and Ghaly, A., 1992. Effects of  $K_0$  and Overconsolidation on Uplift Capacity. Journal of Geotechnical Engineering, 118, 9, 1449-1469.
- Hanna, A.M., ve Soliman-Saad, N., 2001. Effect of Compaction Duration on the Induced Stress Levels in a Laboratory Prepared Sand Bed. Geotechnical Testing Journal, 24 (4), 430-438.
- Hataf, N. ve Rahimi, M.M., 2006. Experimental Investigation of Bearing Capacity of Sand Reinforced with Randomly Distributed Tire Shreds, Construction and Building Materials, 20, 910-916.
- HENDRON, A.J., 1963. The Behaviour of Sand in One Dimensional Compression. Ph. D. Thesis, University of Illinois, USA.
- Jarquio R. ve Jarquio V., 1984. Vertical Stress Formulas for Triangular Loading, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 110, 73-78.
- Kartal, M. E., 2010. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizi, Doktora Tezi K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Kaya, A. G., 2011. Karayolu Tabakalarında Plaka Yükleme Deneyinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kayadelen, C., 2005. Doygun Olmayan İnce Daneli Zeminlerin  $K_0$  Koşullarındaki Yanal Basınçlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Keskin, M.S., Laman M. ve BARAN, T., 2008, Kuma Oturan Kare Temeller Altında Oluşan Düşey Gerilmelerin Deneysel Tespiti ve Sayısal Analizi, İMO Teknik Dergi, 4521-4538,
- Keskin, M.S., 2004. Zeminlerde Oluşan İlave Düşey Gerilmelerin Değişik Yöntemlerle İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Khing, K.H., Das, B.M., Puri, V.K., Cook, E.E. ve Yen, S.C., 1993. The Bearing Capacity of a Strip Foundation on Geogrid-reinforced Sand, Geotextiles and Geomembranes, 12, 351-361.
- Kjellman, W., 1936. Report on an Apparatus for the Determination of the Coefficient of Lateral Earth Pressure at Rest. Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mech. And Fnd. Engrg., Harvard Printing Office, Cambridge, Mass., 2, 16-20.
- Koegler, D.P. ve Scheidig, A., 1938. Baugrund und Bauwerk, W. Ernst und Shon, Berlin.
- Kumbasar, V, ve Kip, F, 1983. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 350s.
- Laman, M. ve Keskin, M.S., 2004a. Kumlu Zeminlerde Oturan Kare Temeller Altında Düşey Gerilme Analizi. Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 431,3, 53-57.
- Laman vd., 2004b. Farklı Sıklıktaki Kumlu Zeminlere Oturan Dairesel Temeller Altında Gerilme Analizi, Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongre ve Sergisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Milović, D.M., Touzot, G. ve Tournier, J.P., 1970. Stresses and displacements in an elastic layer due to inclined and eccentric load over a rigid strip. Geotechnique, 20, 3, 231-252.
- Morgan, J.R. ve Gerard, C.M., 1971. Behavior of Sands Under Surface Loads, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 97, 1675-1699.
- Newmark, N.M., 1942. Influence Charts for Computation of Stresses in Elastic Solids. Univ. Of Ill., Eng. Expt. Stn., 24, 33, 4.
- Omar, M.T., Das, B.M., Puri, V.K. ve Yen, S.C., 1993. Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations on Sand with Geogrid Reinforcement, Canadian Geotechnical Journal, 30, 545-549.

- Poulos, H.G., 1966. Stresses and Displacements in an Elastic Layer Underlain by a Rough Rigid Base. Civ. Eng. Res. Rep. No. R63, Univ. of Sydney, Australia.
- Poulos, H.G. ve Davis, E.H., 1974. Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics. John Wiley and Sons, Inc., 411p.
- Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B. ve Daily, W.D. III., 1998. Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124, 5, 396-405.
- Sağlamer, A., 1972. Kohezyonsuz Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Zemin Parametreleri Cinsinden İfadesi. Ph.D. Thesis in Civil Engineering, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Sivakumar, V., Jeludine, D. K. N. M., Bell, A., Glynn, D. T. ve Mackinnon, P., 2011. The Pressure Distribution along Stone Columns in Soft Clay under Consolidation and Foundation Loading, 61, 7, 613-620.
- Şadoğlu, E., Cüre, E., Moroğlu, B. ve Uzuner, B. A., 2009. Ultimate Loads For Eccentrically Loaded Model Shallow Strip Footing On Geotextile-Reinforced Sand, Geotextiles and Geomembranes, 27, 176-182.
- Şadoğlu, E., 2009. Donatılı Kuma Oturan Eksantrik Yüklü Model Sığ Şerit Temelin Taşıma Gücü, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tekinsoy, M.A., Taskıran, T., Kayadelen C. ve Baran, T., 2009. An Approximatton to the Stress Distribution Analaysis For Anisotropic Clayey Soil. Scientific Research and Essay Vol.4 (2), pp. 078-087.
- Terzaghi, K., 1920. Old Earth Pressure Theories and New Test Results. Engrg. News-Rec., 85, 14, 632-637.
- Uzuner, B. A., 2007. Temel Zemin Mekaniği, 7. Baskı, Derya Kitabevi, Trabzon.
- Uzuner, B.A., 1998. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği. Teknik Yayınevi, Ankara.
- Vitone, D.M. ve Valsangkar, A.J., 1986. Stresses from Loads over Rectangular Areas, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 112, 961-964.
- Wasti, Y. ve Bütün, M. D., 1996. Behaviour of Model Footings on Sand Reinforced with Discrete Inclusions, Geotextiles and Geomembranes, 14, 575-584.
- Westergaard, H.M. 1938. A Problem of Elasticity Suggested by a Problem in Soil Mechanics: Soft material Reinforced by Numerous Strong Horizontal Sheets, Contributions to the Mechanics of Solids, Stephen Timoshenko 60th Anniversary Volume, Macmillan, New York.
- Whitlow, R., 2001. Basic Soil Mechanics, 4th edition, Prentice Hall, Dorchester.

- Yang, K.H., Zornberg, J.G., Liu, C.N. ve Lin, H.D., 2012. Stress Distribution and Development within Geosynthetic-Reinforced Soil Slopes, Geosynthetics International, 19, 1, 62-78.
- Yıldız, A.A., 2002. Donatılı Zemin Oturan Yüzeysel Temellerin Analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana.

## ÖZGEÇMİŞ

Ahmet KUVAT 1987 yılında Elazığ'da doğdu. Lise öğrenimini Elazığ Korgeneral Hulusi Sayın Lisesi'nde tamamladı. 2005-2006 eğitim öğretim yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2009 yılında lisans öğrenimini başarıyla tamamladıktan sonra aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans yapmaya hak kazandı. 2010 yılı Temmuz ayında Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı kapsamında Gümüşhane Üniversitesi'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2011-2012 öğretim yılında ara verdiği yüksek lisans eğitimine KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yeniden başlayarak devam etti. 2013 yılı Ocak ayında Karadeniz Teknik Üniversitesine 35. madde kapsamında görevlendirilen Ahmet KUVAT, iyi derecede İngilizce bilmektedir.