

## Kuma Oturan Kare Temeller Altında Oluşan Düşey Gerilmelerin Deneysel Tespiti ve Sayısal Analizi

M. Salih KESKİN\*  
Mustafa LAMAN\*\*  
Tarık BARAN\*\*\*

### ÖZ

Bu çalışmada, kumlu zeminlere oturan üniform yüklü kare temellerin merkezi altında oluşan ilave düşey gerilme değerleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Elde edilen değerler Boussinesq yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneyler, kare kesitli bir kasa içerisinde gerçekleştirilmiş ve düşey gerilme değerlerini bulmak için basınç transduseri kullanılmıştır. Sayısal çalışmada zemin, iki boyutlu eksenel simetri ve üç boyutlu koşullarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, lineer elastik ve non-lineer elasto-plastik malzeme olarak modellenmiş ve analizlerde kullanılan bu modellerin ilave düşey gerilme değerlerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda deneysel, sayısal ve teorik sonuçlar arasında belirli derinlik değerlerinde genel bir uyum gözlenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

### ABSTRACT

#### Experimental Determination and Numerical Analysis of Vertical Stresses Under Square Footings Resting on Sand

In this study, the vertical stress values occurred under the center line of the uniformly loaded square footings were investigated experimentally and numerically. The results of the study were compared with the results of Boussinesq method. Tests were performed in a square shaped test box and pressure transducer was used to measure the stresses. In the numerical analysis, soil was modeled using finite element method with two dimensional axi-symmetric and three dimensional conditions as linear elastic and non-linear elasto-plastic materials and the effect of these models on the vertical stress values was investigated. Finally, a general agreement was observed between the experimental, numerical and theoretical results for the values obtained for predetermined depths of sand and the obtained results are discussed.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 07.01.2008 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2008 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana- skeskin@cu.edu.tr

\*\* Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana- mlaman@cu.edu.tr

\*\*\* Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana- tbaran@cu.edu.tr

## **1. GİRİŞ**

Zemin tabakalarının kendi ağırlıkları ve uygulanan dış yüklerin etkisiyle zemin içerisinde gerilmeler oluşur. Gerilmelerin dağılımının bilinmesi, birçok problemin çözümü ve projelerin tasarımında oldukça önemlidir. Bu gerilmeler uygulanan yükün şiddetine, yükün uygulandığı alanın boyutlarına ve zemin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Zeminin karmaşık yapısından dolayı, zemin içerisinde gerçekçi gerilme-deformasyon analizleri yapmak oldukça zordur [1]. Zeminlerdeki gerilme artımı problemi genellikle zeminin lineer elastik ve yarı sonsuz bir ortam olduğu kabulüyle elastik çözümlerle bulunmaya çalışılmaktadır. Elastisite teorisinden yararlanarak elde edilen bu çözümlerde, düşey gerilme dağılımları zeminin malzeme özelliklerinden bağımsızdır. Ayrıca zeminin cinsi ve sıklık gibi parametreleri dikkate alınmamakta, her cins zemin için aynı gerilme dağılımları elde edilmektedir [2]. Oysa yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, düşey gerilme dağılımlarının granüler zeminlerde, özellikle sıklığa bağlı olarak önemli mertebelerde değişebileceğini göstermiştir [3]. Bu yüzden, zeminlerde ilave yüklerden dolayı oluşan ilave düşey gerilme değerlerinin deneysel olarak bulunması, bulunan değerlerin sayısal ve teorik çözümler ile karşılaştırılması ve sonra parametrik çalışmalara geçilmesi zorunluluğu vardır.

Bu çalışmada, kumlu zeminlere oturan üniform yüklü kare temeller altında oluşan ilave düşey gerilme değerleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmış ve elde edilen değerler Boussinesq yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma, kare kesitli bir kasa içerisinde gerçekleştirilmiş ve gerilme değerleri basınç transduseri kullanılarak ölçülmüştür. Sayısal analizde ise zemin, iki boyutlu aksel simetrik ve üç boyutlu koşullarda modellenmiş ve zemin içerisinde oluşan ilave düşey gerilme değerlerine, iki boyutlu aksel simetrik modellenmenin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, sayısal analizde zemin hem lineer elastik hem de non-lineer elasto-plastik malzeme olarak modellenmiş ve bu durumun ilave düşey gerilme değerlerine etkisi araştırılmıştır.

## **2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR**

Zeminlerde oluşan düşey gerilmelerin belirlenmesi için laboratuvar düzenekleri ve deney teknikleri geliştirilmiş, ayrıca zeminin elastik bir malzeme gibi davrandığı kabul edilip elastisite teorisinden yararlanılarak çok sayıda teorik çalışma yapılmıştır.

Koegler [4] tarafından yapılan çalışma, zeminlerde oluşan gerilmelerin belirlenmesi amacıyla yapılan ilk deneysel çalışmalardan biri olarak kabul edilmektedir. Çalışmada, kumlu zeminlerde gerilme dağılımının bulunmasına yönelik laboratuvar model deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, bir kum dolgusunun yüzeyine yükleme yapıp, bu yükün belli derinliklerdeki yatay düzlemlerin çeşitli noktalarında meydana getirdiği gerilmeler, bu noktalara yerleştirilen aletler yardımıyla ölçülmüştür. Koegler [4] çalışmadan elde ettiği sonuçları teorik çözümler ile karşılaştırmış ve deney sonuçlarının, yüklü alanlar altındaki gerilme dağılımını veren Boussinesq [5] denklemleriyle uyum içinde olduğunu belirtmiştir [6].

Burland vd. [7] non-lineerlik, non-homojenlik ve anizotropi etkilerini birçok zemin durumunu göz önüne alarak incelemiş ve Boussinesq denklemlerinin, yüklü alanlar altındaki gerilme dağılımını kabul edilebilir doğrulukta verdiğini belirtmişlerdir.

Morgan ve Gerard [8], granüler zeminlerde model temeller kullanılarak düşey gerilme ölçümü yapılmış çalışmaları özetlemiş ve sonuçların elastisite teorisi kullanılarak elde edilen çözümlerle uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

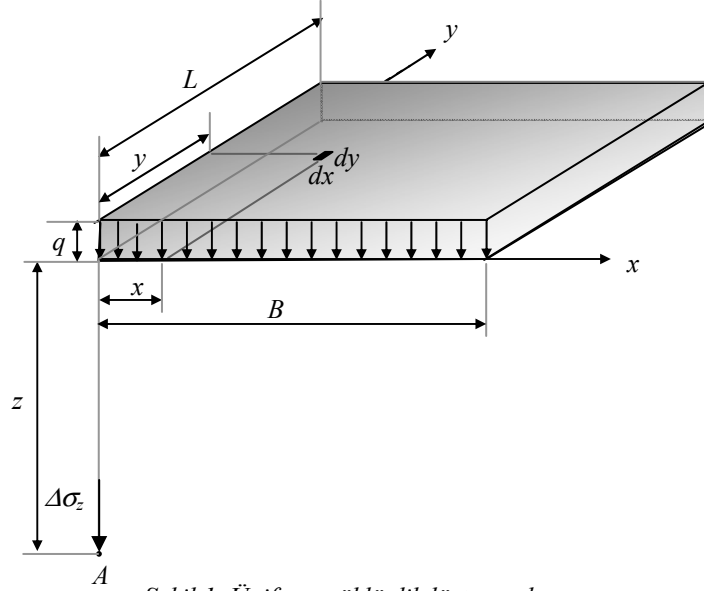
Farklı yüzey yüklerinden dolayı, zemin içinde oluşan ilave düşey gerilmelerin şiddetinin ve dağılımının belirlenmesi, zemin mekaniğinin klasik problemlerinden birisidir ve daha önce pek çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır [5, 9-16].

Elastisite teorisinden yararlanılarak elde edilen bu çözümlerden, pratikte en çok kullanılanı Boussinesq [5] tarafından elde edilen çözümdür. Boussinesq [5], lineer, elastik, homojen, izotrop, yarı sonsuz ortamda, yüzeye etkiyen bir tekil yükten dolayı oluşan gerilme problemini çözmüştür. Bu problem zemin mekaniğinde en çok çalışılan problemlerden birisidir ve zeminlerdeki gerilme artışlarının belirlenmesi bir Boussinesq problemi olarak ele alınmaktadır [17]. Bu çözüme göre, Q tekil yükünden dolayı, zemin içerisinde herhangi bir z derinliğinde ve r yatay mesafesindeki bir noktada oluşan ilave düşey gerilme değeri,  $\Delta\sigma_z$  Denklem (1)'deki gibidir.

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

Yapılardan zemine aktarılan yükler temeller vasıtasıyla aktarıldığı için, tekil yük için elde edilen gerilme dağılımları birçok inşaat mühendisliği probleminde gerçekçi olmamaktadır [18]. Fakat, tekil yük çözümlerinin integrali alınarak yayılı yüklerin zeminlerde oluşturacağı gerilme dağılımlarını bulmak mümkün olmaktadır. Bu amaçla Şekil 1'de 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. Bu tekil kuvvetlerin ve bunlarla ilgili gerilmelerin toplamı, yayılı yükler altındaki gerilmeleri verir. Zeminler genellikle yarı sonsuz uzay olarak ele alındıklarından, Boussinesq probleminde bulunan düşey gerilme  $d\Delta\sigma_z$  ve yarı uzayın sınırına etki eden yük de  $dQ$  olarak alınır. Bu diferansiyeller gerilme ifadelerinde yerlerine konulup, yükleme şekline bağlı olarak integralleri alındığında, gerilme dağılımları bulunmuş olur.

Boussinesq [5] ifadesi Şekil 1'de gösterilen L uzunluğunda ve B genişliğindeki q üniform yükü ile yüklenmiş dikdörtgen bir alanın altında oluşan gerilmeleri bulmak için kullanılabilir. Dikdörtgen alanın bir köşesi altında, z derinliğindeki A noktasında oluşan düşey gerilme değerini bulmak için, dikdörtgenin  $dx dy$  büyüklüğündeki elemanter bir parçası göz önüne alınmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Üniform yüklü dikdörtgen alan

Buna göre, üniform yayılı yüklü dikdörtgen bir alanın bir köşesi altında, herhangi bir  $z$  derinliğindeki bir noktada, ilave düşey gerilme, Newmark [9] tarafından Boussinesq [5]'in tekil yük ifadesinin integrasyonu ile,

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{4\pi} \left( \frac{2BLz(B^2 + L^2 + 2z^2)}{(B^2 + z^2)(L^2 + z^2)\sqrt{z^2 + B^2 + L^2}} + \tan^{-1} \left( \frac{2BLz\sqrt{z^2 + B^2 + L^2}}{-B^2L^2 + z^2(B^2 + L^2) + z^4} \right) \right) \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir. Üniform dikdörtgen yüklü alanın içindeki veya dışındaki bir nokta altında oluşan ilave düşey gerilme değerleri ise, süperpozisyon kuralı uygulanarak Denklem (2)'den bulunabilmektedir.

Westergaard [10], üniform dikdörtgen yüklü bir alanın altında oluşan ilave düşey gerilme değerinin elde edilebilmesi için Denklem 3'ü önermiştir.

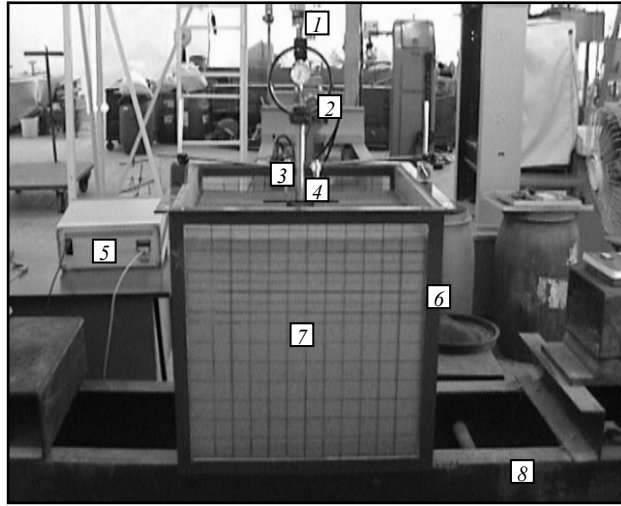
$$\Delta\sigma_z = q \frac{1}{2\pi} \left[ \cot^{-1} \sqrt{\left( \frac{1-2\mu}{2-2\mu} \right) \left( \frac{1}{m^2} + \frac{1}{n^2} \right)} + \left( \frac{1-2\mu}{2-2\mu} \right)^2 \left( \frac{1}{m^2 n^2} \right) \right] \quad (3)$$

Burada,  $\mu$  poisson oranı,  $m$  ve  $n$  ise geometriye bağlı katsayılardır.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

DeneySEL çalışma, kum zemin üzerine yerleştirilen model temel plakasının yüklenmesi sonucu, zemin içinde, kare temelin merkezi altında oluşan ilave düşey gerilme değerlerinin değişik derinliklerde ölçülmesini içermektedir.

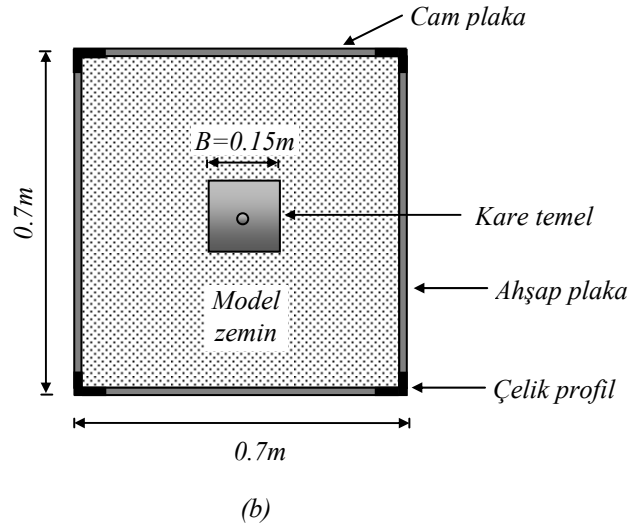
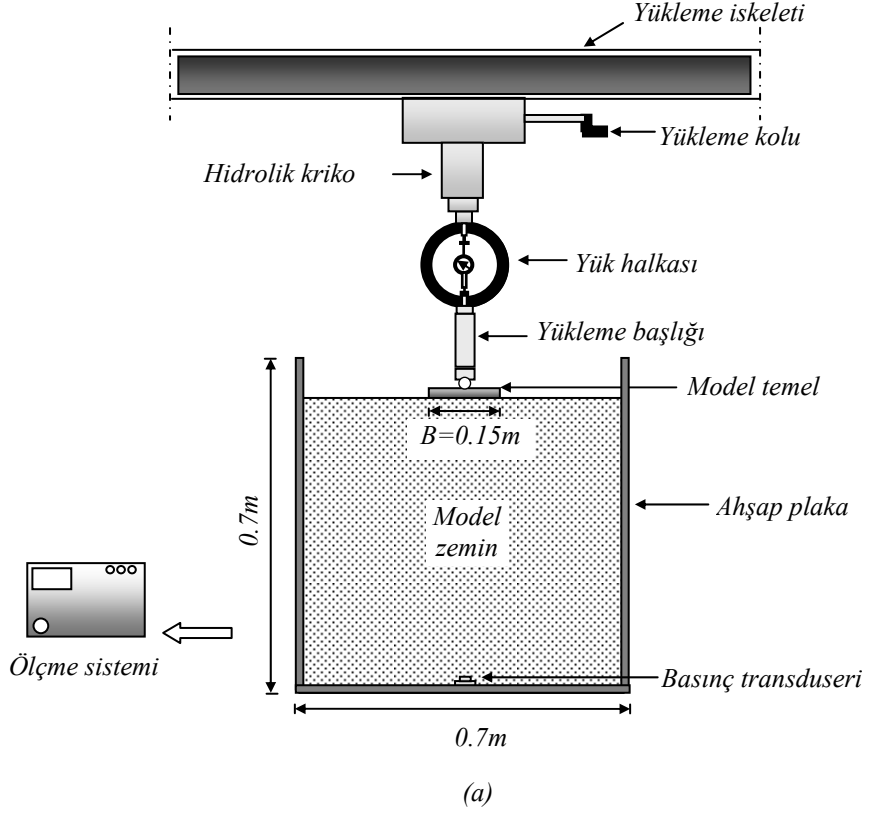
Model deneyler, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında 70×70×70cm boyutlarındaki kare kesitli kasa içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2 ve 3). Deney kasasının iskeleti, çelik profillerden olup, ön ve arka yüzeyi 8mm kalınlığındaki cam, yan yüzeyler ile alt taban ise, 20mm kalınlığındaki ahşap malzemeden yapılmıştır.



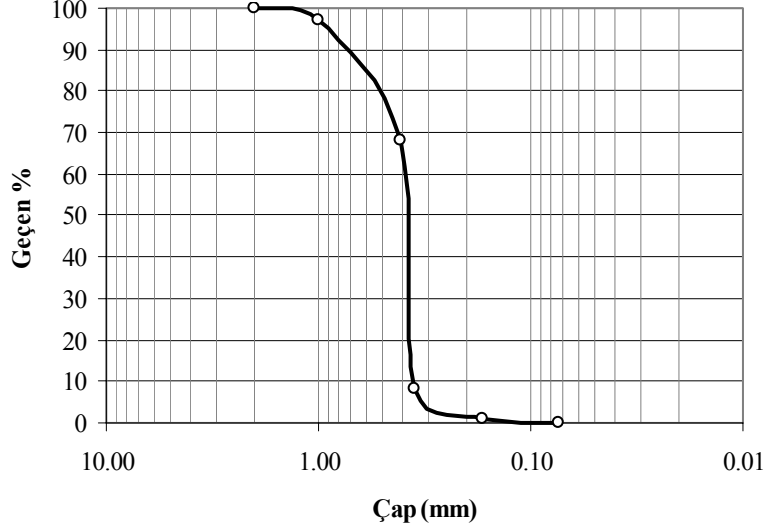
Şekil 2. Deney düzeneği: 1) Hidrolik krika, 2) Yük halkası, 3) Yükleme başlığı, 4) Model temel, 5) Ölçme sistemi, 6) Çelik profil, 7) Model zemin, 8) Yükleme iskeleti

DeneySEL çalışmada, Çukurova Bölgesi, Seyhan Nehir yatağından getirilen kum zemin kullanılmıştır. Yapılan elek analizi sonucunda, kullanılan kumun zemin sınıfı, kötü derecelenmiş ince ve temiz kum (SP) olarak bulunmuştur (Şekil 4).

Kum numuneler kasa içerisinde tabakalar halinde ve sıklık derecesi,  $D_r=0\%65$  ve kuru birim hacim ağırlığı,  $\gamma_k=17.1$  kN/m<sup>3</sup> olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu amaçla deney kasasının duvarları ölçeklendirilmiş ve her bir kum tabakası, elektrikle çalışan titreşim cihazı ile önceden belirlenen derinliğe kadar sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sırasında üniform sıklık elde etmek ve kum danelerinin ezilmesini önlemek amacıyla titreşim cihazının uç kısmına 13cm×13cm boyutlarında ve 2.0cm kalınlığında derlin malzemeden imal edilen bir plaka monte edilmiştir.



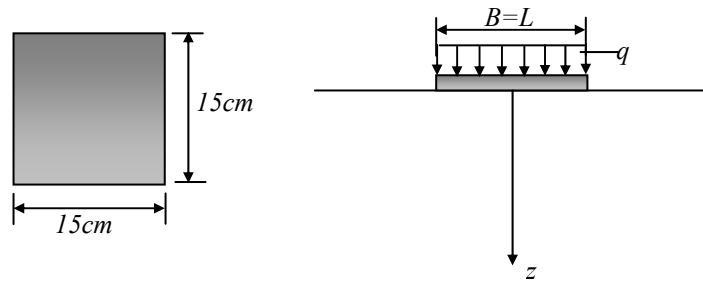
Şekil 3. Deneysel düzeneği (a) Kesit (b) Plan



Şekil 4. Deneyde kullanılan kumun granülometri eğrisi

Yüklemeye, temel plakası merkezine düşey yönde ve statik olarak uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan yüklemeye sistemi, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarındaki yüklemeye iskeletine 45kN kapasiteli mekanik krikoye monte edilerek oluşturulmuştur. Model temel plakalarına uygulanan yük değerlerini okumak için yük halkası kullanılmıştır.

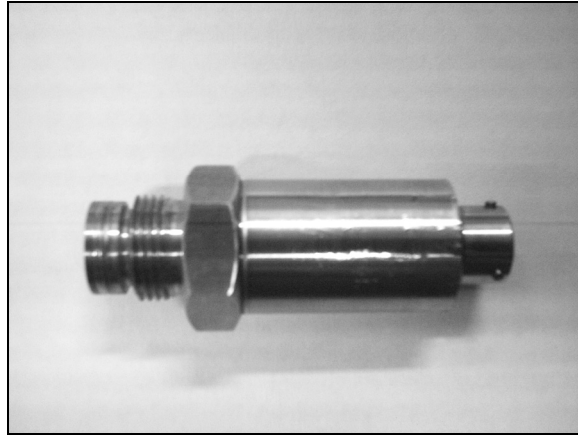
Deneylerde kare temel olarak,  $B=L=15\text{cm}$  genişlik ve 2.0cm kalınlıkta rijit metal plaka kullanılmıştır. Deney sırasında, yüklemeye nedeniyle temel tabanındaki basınç dağılımının üniform olarak gerçekleşmesine dikkat edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Model temel plakası

*Kuma Oturan Kare Temeller Altında Oluşan Düşey Gerilmelerin Deneysel ...*

Yükleme sırasında temel plakası merkezi altında meydana gelen düşey gerilmeler, kasa içerisine temel plakasının merkezine gelecek şekilde düşey pozisyonda monte edilmiş olan 10bar kapasiteli diyafram tipi basınç transduseri yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 6). Herhangi bir malzeme üzerinde yüklemelerden dolayı meydana gelen gerilmeleri ölçmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler mekanik, optik, akustik, pönomotik ve elektriksel teknikler üzerine kurulu deneysel yöntemlerdir. Bu yöntemlerin çoğunda gerilme doğrudan ölçülememektedir. Gerilmeler, malzemenin deformasyon gibi ölçülebilir parametreleri üzerinden hesaplanmaktadır [2]. Çalışmada kullanılan basınç transduserinin diğer yöntemlere göre üstünlüğü, ölçümlerin doğrudan yapılabilmesidir.

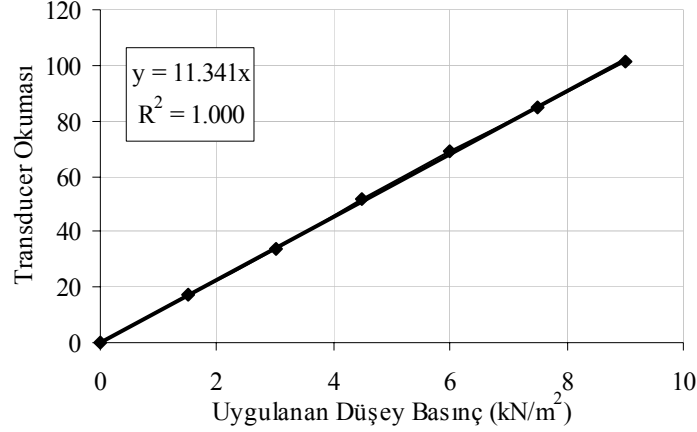


*Şekil 6. Basınç transduseri*

Uygulanan düşey basınçlardan dolayı transduserde oluşacak gerilmeleri doğru ve hassas bir şekilde ölçmek için, transduserin önceden kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bunun için transduser üzerinde, değeri bilinen basınçlar oluşturulmak suretiyle, meydana gelen gerilmeler okunmuştur. Şekil 7’de transduser için elde edilen kalibrasyon eğrisi görülmektedir.

Kalibrasyon eğrisinden, transduserde artan basınçlar karşısında lineer bir davranış olduğu görülmekte ve kalibrasyon katsayısı bu doğrunun eğimi olarak elde edilmektedir.





Şekil 7. Basınç transduserinin kalibrasyon eğrisi

### 3.1. Deney Yöntemi

Kum numuneler, kasa içerisine tabakalar halinde ve kuru birim hacim ağırlığı  $\gamma_k=17.1\text{kN/m}^3$  ve sıklık derecesi  $D_r=\%65$  olacak şekilde, dinamik yöntem ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir.

Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra yüzeyin düzgün olup olmadığı her deneyde su terazisi kullanılarak kontrol edilmiş ve temel plakası, zemin yüzeyine, merkezi transduserin merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir.

Yük, temel plakası merkezine düşey yönde ve statik olarak uygulanmıştır. Deney sırasında göçme oluşuncaya kadar kademeli olarak yüklemeye devam edilmiştir.

Her yükleme kademesinde oluşan gerilmeler data okuma cihazı yardımıyla kaydedilmiş ve bu işlemler üç farklı derinlikte (1.0B, 1.5B, 2.0B, B=temel genişliği) tekrarlanmıştır.

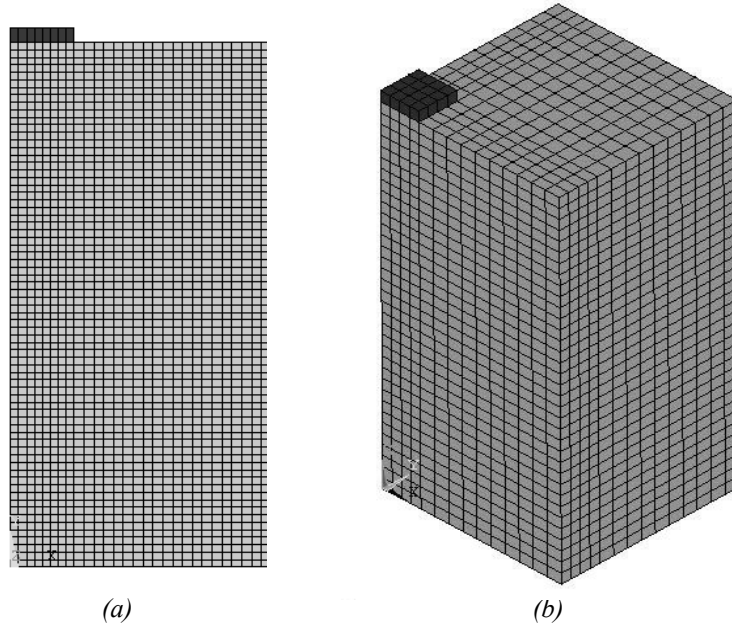
## 4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak teorik analizlerde sayısal çözümlerin önemi artmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal çözüm yöntemlerinden en efektif ve sistematik olanıdır. Yöntemin sistematikliği ve her türlü yapıya aynı işlemlerle uygulanabilmesi en önemli avantajlarından. İşlem hacminin büyümesi dezavantaj olarak görünse de bu olumsuzluk bilgisayar yardımı ile aşılmaktadır. Son yıllarda, yeterli hassasiyette sonuçlar veren ve bu çalışma kapsamında da kullanılan ANSYS gibi sonlu elemanlar yöntemine dayalı birçok hazır paket programlar geliştirilmiştir. ANSYS, bir çok mühendislik probleminin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmış bir bilgisayar programıdır. Bu çalışmada, ANSYS v10 versiyonu kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde, kumlu zeminlere oturan kare temeller altında oluşan ilave düşey gerilme değerleri, ANSYS bilgisayar programı kullanılarak araştırılmıştır. Programda,

*Kuma Oturan Kare Temeller Altında Oluşan Düşey Gerilmelerin Deneysel ...*

problemler üç boyutlu, iki boyutlu, lineer, non-lineer, statik ve dinamik olarak analiz edilebilmektedir. Lineer Elastik modelde, malzeme davranışının Hooke yasasına uyduğu ve izotropik lineer elastik bir malzeme olduğu kabul edilir. Programda giriş bilgileri olarak Elastisite Modülü ( $E$ ) ve Poisson oranı ( $\mu$ ) değerleri girilir. Drucker-Prager modeli ise elasto-plastik, non-lineer bir malzeme modelidir. Bu model granüler yapıya sahip elemanların modellenmesinde kullanılmaktadır. Modelde giriş bilgileri olarak elastisite modülü ( $E$ ), Poisson oranı ( $\mu$ ), kohezyon ( $c$ ), kayma mukavemet açısı ( $\phi$ ) ve dilatasyon açısı ( $\psi$ ) girilir.

Sonlu elemanlar analizinde, zemin, çevre, sınır ve yükleme koşulları, Keskin [19] tarafından yapılan deneysel çalışma programına benzer seçilmiştir. Çalışmada, kum zemin, ANSYS bilgisayar programında iki boyutlu aksel simetrik ve üç boyutlu olarak modellenirken, zeminin davranışı için Lineer Elastik ( $LE$ ) ve Drucker-Prager ( $DP$ ) modelleri kullanılmıştır. Laboratuvar model deney kasasının boyutları  $70 \times 70 \times 70$  cm'dir. Zemin ortamı, iki boyutlu problemde 4 düğümlü, aksel simetrik dikdörtgen elemanlarla ( $PLANE 42$ ), üç boyutlu problemde ise, 8 düğümlü, dikdörtgen prizmatik elemanlarla ( $SOLID45$ ) modellenmiştir (Şekil 8). Çalışmada kullanılan kum zeminin, üç eksenli ve kesme kutusu deneyleriyle belirlenmiş özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir [19].



Şekil 8. (a) İki boyutlu model (b) Üç boyutlu model

Çizelge 1. Deney kumu için model parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değer
Elastisite modülü	$E$	kN/m <sup>2</sup>	28000
Kohezyon	$c$	kN/m <sup>2</sup>	0
Kayma mukavemeti açısı	$\phi$	(°)	41
Dilatasyon açısı	$\psi$	(°)	11
Poisson oranı	$\mu$	-	0.20

Analizlerde, yüklü alanın boyutları, deneysel çalışmadakine benzer şekilde 15×15cm olarak alınmıştır. ANSYS’de iki boyutlu aksenal simetrik modelde kare temel eşdeğer dairesel temele dönüştürülerek analizler (D=B≅17cm) yapılmıştır.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, kare temelin merkezi altında oluşan ilave düşey gerilme değerleri deneysel olarak üç farklı derinlikte (1.0B, 1.5B ve 2.0B) ve farklı yükler altında ölçülmüştür. Fakat, deneysel sonuçların, sayısal ve teorik sonuçlarla karşılaştırmasında kolaylık sağlaması açısından ayrıca diğer yük değerlerinde de aynı davranışın olduğu göz önüne alınarak, q=10kN/m<sup>2</sup>’lik üniform yük altında oluşan gerilme değerleri sunulmuştur. Sayısal analizlerde, deneysel çalışmadakine benzer şekilde, kare temelin merkezi altında oluşan ilave düşey gerilme değerleri, 10 kN/m<sup>2</sup>’lik üniform yük altında elde edilmiştir. Elde edilen deneysel ve sayısal düşey gerilme değerleri, Boussinesq [5] yöntemiyle elde edilen gerilme değerleriyle karşılaştırılmıştır.

### 5.1. Deneysel, Sayısal ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması

Deneysel, sayısal (iki boyutlu) ve teorik olarak elde edilen düşey gerilme değerleri Çizelge 2 ve Şekil 9’da görülmektedir.

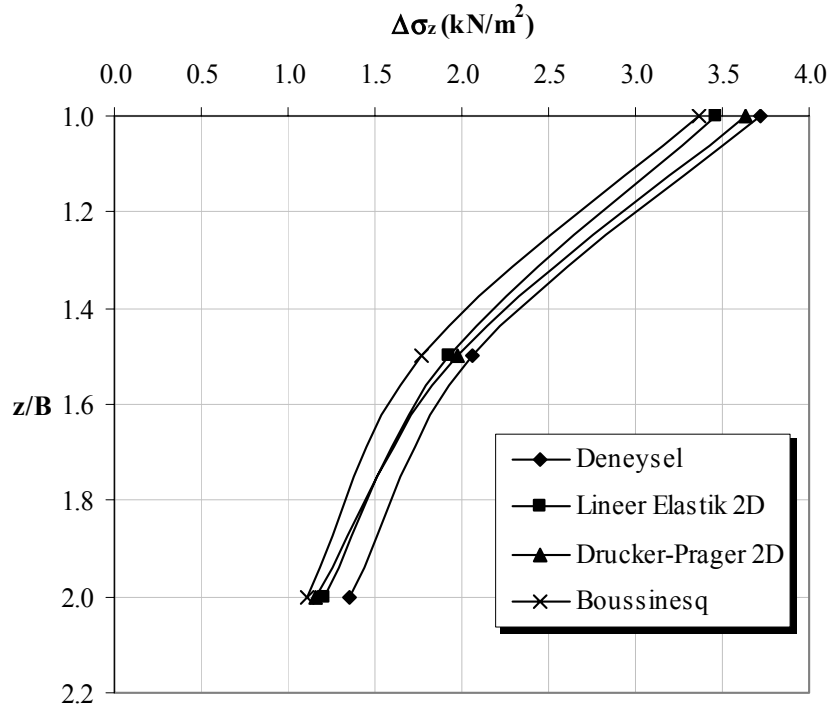
Çizelge 2. Deneysel, sayısal (iki boyutlu model) ve teorik sonuçların karşılaştırılması

İlave Düşey Gerilmeler, $\Delta\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )				
Derinlik	Deneysel	Lineer-Elastik	Drucker-Prager	Boussinesq
1.0B	3.715	3.469	3.629	3.360
1.5B	2.067	1.928	1.971	1.770
2.0B	1.348	1.203	1.164	1.106

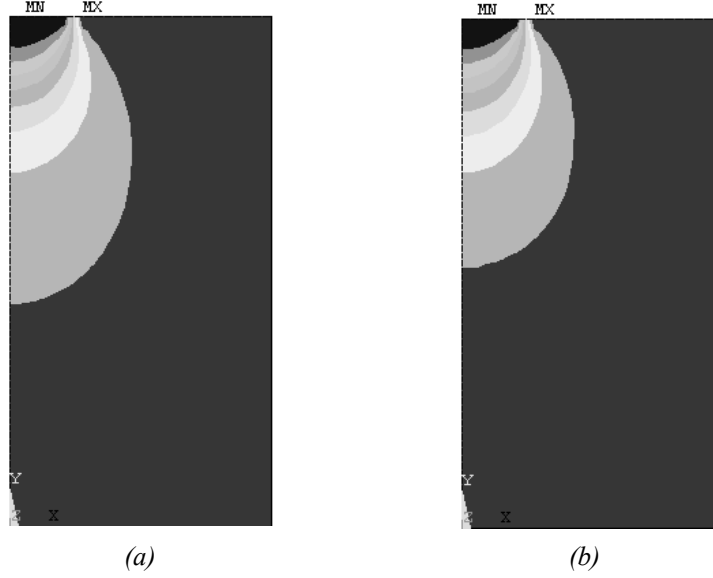
*Kuma Oturan Kare Temeller Altında Oluşan Düşey Gerilmelerin Deneysel ...*

Çizelge 2 ve Şekil 9'dan, deneysel sonuçların sayısal ve teorik sonuçlarla genel bir uyum içerisinde olduğu ve sayısal sonuçlara göre %14, teorik sonuçlara göre ise %18'e varan oranlarda daha büyük değerler verdiği görülmektedir. Deneysel sonuçları 1.0B ve 1.5B derinliklerde Drucker-Prager sonuçlarına, 2.0B derinlikte ise Lineer Elastik sonuçlarına daha yakın çıkmaktadır. Boussinesq sonuçları hem sayısal hem de deneysel sonuçlardan daha küçük değerler vermektedir. Lineer Elastik ve Drucker-Prager sonuçları birbirinden çok farklı olmamasına rağmen, Lineer Elastik çözümde göçme yükünün elde edilememesi bir dezavantaj olarak görülmekte ve Drucker-Prager modelinin, zeminin davranışını daha iyi yansıttığı düşünülmektedir.

Şekil 10'da sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 9. Deneysel, sayısal (iki boyutlu model) ve teorik düşey gerilme değerleri



Şekil 10. (a) Lineer Elastik (b) Drucker-Prager

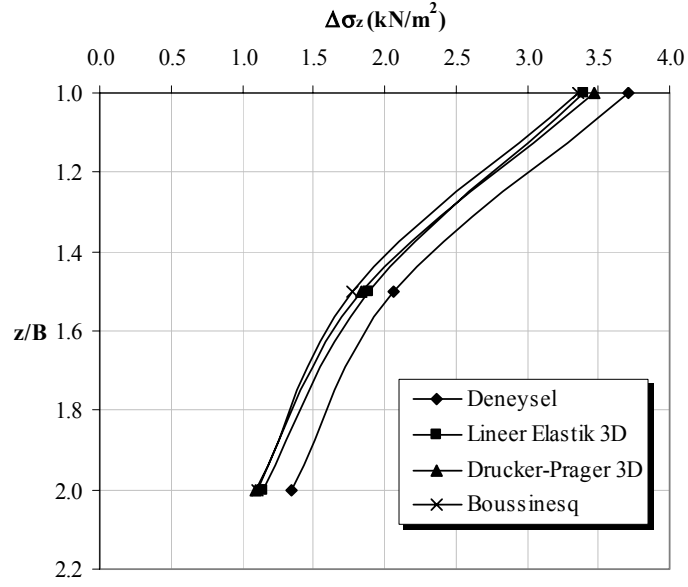
Çizelge 3 ve Şekil 11’de ise deneysel, sayısal (üç boyutlu model) ve teorik olarak elde edilen düşey gerilme değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3. Deneysel, sayısal (üç boyutlu model) ve teorik sonuçların karşılaştırılması

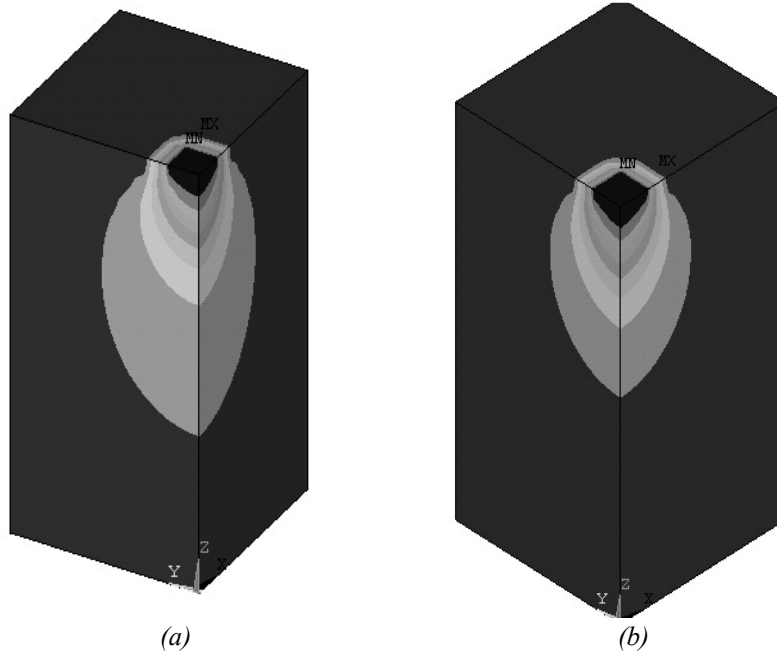
İlave Düşey Gerilmeler, $\Delta\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )				
Derinlik	Deneysel	Lineer-Elastik	Drucker-Prager	Boussinesq
1.0B	3.715	3.390	3.466	3.360
1.5B	2.067	1.893	1.836	1.770
2.0B	1.348	1.143	1.090	1.106

Çizelge 3 ve Şekil 11’den görüldüğü gibi, üç boyutlu modelde, hem Lineer Elastik hem de Drucker-Prager malzeme model sonuçları, iki boyutlu modele göre daha küçük gerilme değerleri vermektedir.

Şekil 12’de sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 11. Deneysel, sayısal (üç boyutlu model) ve teorik düşey gerilme değerleri



Şekil 12. (a) Lineer Elastik (b) Drucker-Prager

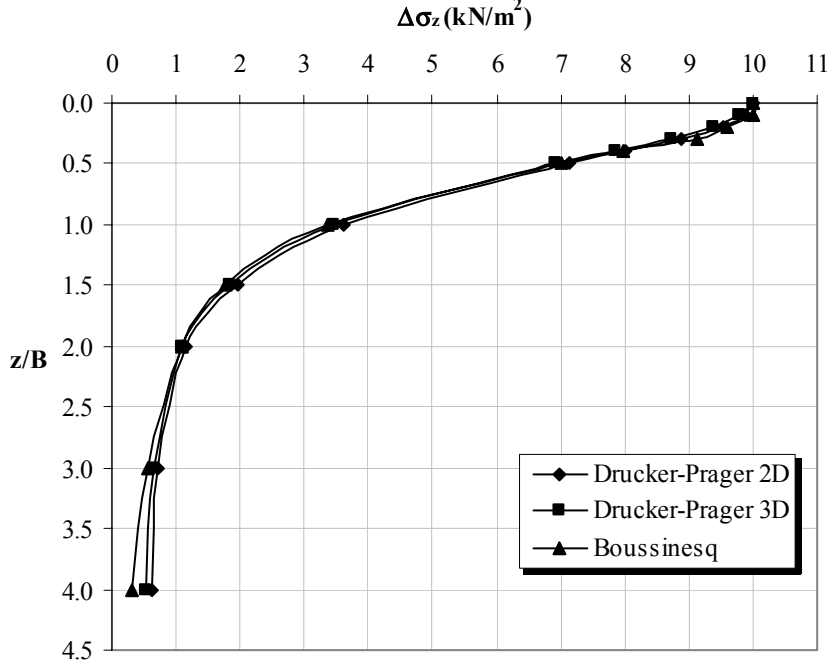
Deneyisel çalışmada, model temel plakası belli bir oranda küçültülürken, model zemin olarak gerçek boyutlardaki kum numuneler kullanılmaktadır. Bu yüzden, model temel ve kum zemin, gerçekte göstermesi gereken davranışı gösteremeyebilmekte ve ölçek etkisi deneysel sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir. Bu deneysel çalışmanın bir amacı da, başka araştırmacılar tarafından ileride yapılabilecek ve gerçek davranışı daha iyi yansıtabilecek olan santrifüj veya birebir ölçekli deneysel çalışmalara fayda sağlayabilecek veriler sunmaktır.

## 5.2. Parametrik Çalışma

Çalışmada, deney sırasında ölçüm yapılmayan derinliklerdeki gerilme değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla ANSYS programı kullanılarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmada, malzeme modeli olarak, zeminin davranışını daha iyi yansıttığı düşünülen Drucker-Prager modeli kullanılmış ve elde edilen ilave düşey gerilme değerleri Boussinesq yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde, üniform yüklü alanın kare veya dikdörtgen olması durumunda iki boyutlu modelleme yapılırken, eksenel simetri koşullarının sağlanabilmesi için, yüklü alanın eşdeğer dairesel alana çevrilmesi zorunlu olmaktadır. Çalışmada bu kabulün ilave düşey gerilme değerlerine etkisinin olup olmadığı araştırılmış ve bu amaçla problem hem iki boyutlu eksenel simetri hem de üç boyutlu olarak modellenerek, deneysel çalışmadan farklı olarak daha fazla sayıda derinlik için ( $z=0.1B, 0.2B, 0.3B, 0.4B, 0.5B, 1.0B, 1.5B, 2.0B, 3.0B$  ve  $4.0B$ ) gerilme değerleri elde edilmiştir. Çizelge 4'te Drucker-Prager (DP) malzeme modeli için iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) çözümlerle elde edilen gerilme değerleri görülmektedir. Aynı değerler ayrıca grafik olarak Şekil 13'de verilmektedir.

Çizelge 4. İki ve üç boyutlu modellerde ilave düşey gerilme değerleri

İlave Düşey Gerilmeler, $\Delta\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )			
Derinlik	DP 2D	DP 3D	Boussinesq
0.1B	9.865	9.774	9.994
0.2B	9.550	9.365	9.604
0.3B	8.866	8.716	9.120
0.4B	8.004	7.847	7.976
0.5B	7.122	6.928	7.008
1.0B	3.629	3.466	3.360
1.5B	1.971	1.836	1.770
2.0B	1.164	1.090	1.106
3.0B	0.723	0.639	0.558
4.0B	0.627	0.521	0.320



Şekil 13. İki ve üç boyutlu Drucker-Prager modellerinde ilave düşey gerilmeler

Çizelge 4 ve Şekil 13'de verilen değerler incelendiğinde, Drucker-Prager malzeme modelleri kullanılarak gerçekleştirilen iki boyutlu aksel simetrik analiz sonucu elde edilen gerilme değerlerinin tüm derinlik değerleri için üç boyutlu analiz sonucu elde edilen gerilme değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, yüzeyden itibaren 2B derinliğe kadar Drucker-Prager ve Boussinesq sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmeye rağmen, Boussinesq sonuçlarının 3.0B ve 4.0B derinliklerinden sonra daha küçük sonuçlar verdiği görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kumlu zeminlere oturan kare temeller altında oluşan ilave düşey gerilme değerleri deneysel, sayısal ve teorik olarak araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre,

- (1) Temel tabanından  $z$  derinlikte bulunan yatay düzlemlerdeki gerilme dağılışı çalışılan tüm yöntemlerde aynı karakteristik şekli göstermekte ve derinliğin artmasıyla temel plakası merkezinin altındaki basınç da azalmaktadır.
- (2) Deneysel sonuçlar, sayısal ve teorik sonuçlarla genel bir uyum içerisinde olmakla birlikte iki boyutlu model kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlara göre %14, üç boyutlu model kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlara göre %19 ve teorik sonuçlara göre ise %18'e varan oranlarda daha büyük değerler vermektedir.



- (3) Sayısal ve teorik sonuçların, özellikle temel genişliğinin iki katı kadar olan derinliklere kadar uyum içerisinde olduğu, derinliğin temel genişliğinin üç ve dört katı olması durumlarında ise teorik yöntemle elde edilen gerilme değerlerinin daha küçük olduğu gözlenmiştir.
- (4) Lineer Elastik ve non-lineer Drucker-Prager modelleri ile elde edilen sonuçlar arasında çok büyük farklar gözlenmemiştir. Ancak, hem zemin davranışını daha iyi yansıtması ve hem de göçme yükü elde edilebilmesinden dolayı, Drucker-Prager modelinin bu tür zemin problemlerinde kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.
- (5) Boussinesq sonuçlarının, özellikle zemine uygulanan üniform yük değerinin yaklaşık % 10'a düştüğü derinliklere kadar genelde hem deneysel hem de sayısal sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğu ve pratikte kabul edilebilir değerler verdiği görülmüştür.
- (6) İki boyutlu aksenal simetrik analiz sonucu elde edilen gerilme değerleri, üç boyutlu analiz sonucu elde edilen gerilme değerlerinden daha büyük çıkmaktadır.
- (7) Gerilme değerleri arasında iki ve üç boyutlu modellerde oluşan farklara rağmen, hem iki boyutlu aksenal simetrik model ile elde edilen gerilme değerlerinin güvenli tarafta kalması hem de üç boyutlu model oluşturmanın güçlüğü ve çözüm süresinin oldukça uzaması gibi nedenlerle bu tür gerilme artışı problemlerinde iki boyutlu aksenal simetri modelin kullanılmasında bir sakınca olmadığı anlaşılmıştır.

#### Semboller

$Q$	: Tekil yük
$z$	: Derinlik
$r$	: Yatay mesafe
$\Delta\sigma_z$	: İlave düşey gerilme
$L$	: Temel uzunluğu
$B$	: Temel genişliği
$q$	: Üniform yük
$\mu$	: Poisson oranı
$m, n$	: Geometriye bağlı katsayılar
$Dr$	: Sıklık derecesi
$\gamma_k$	: Kuru birim hacim ağırlık
$E$	: Elastisite modülü
$c$	: Kohezyon
$\phi$	: Kayma mukavemet açısı
$\psi$	: Dilatasyon açısı
$D$	: Çap

#### Kaynaklar

- [1] Uzuner, B.A., Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Ankara, Teknik Yayınevi, 1998.

- [2] Sağlamer, A., Kohezyonsuz Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Zemin Parametreleri Cinsinden İfadesi, Ph. D. Thesis in Civil Engineering, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1972.
- [3] Laman, M., Keskin, M.S., Kumlu Zeminlere Oturan Kare Temeller Altında Düşey Gerilme Analizi, Türkiye Mühendislik Haberleri, 431, 53-57, 2004.
- [4] Koegler, D.P., Scheidig, A., Baugrund und Bauwerk, W. Ernst und Shon, Berlin, 1938.
- [5] Boussinesq, J., Application des Potentiels a L'etude de L'equilbre et du Movement des Solids Elastiques, Gauthier-Villars, Paris, 1885.
- [6] Charles, J.A., The Depth of Influence of Loaded Areas, Geotechnique, 46 (1), 51-61, 1996.
- [7] Burland, J.B., Broms, B.B., De Mello, V.F.B., Behaviour of Foundations and Structures, In Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, A.A. Balkema, pp. 495-538, 1977.
- [8] Morgan, J.R., Gerrard, C.M., Behavior of Sands Under Surface Loads, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 97 (SM 12), 1675-1699, 1971.
- [9] Newmark, N.M., Simplified Computation of Vertical Pressures in Elastic Foundations, University of Illinois Engineering, Experiment Station, Circular No. 24, Illinois, 1935.
- [10] Westergaard, H.M., 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, S. Timoshenko 60th Anniversary Volume, Newyork-Mac Millan, 1938.
- [11] Gray H., Stresses and Displacements from Loads over Rectangular Area, Civil Engineering, ASCE, 13 (5), 227-229, 1943.
- [12] Ambraseys N.N., Discussion of Linearly Variable Load Distribution on a Rectangular Foundation, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 86 (SM3), 123-125, 1960.
- [13] Vitone D.M., Valsangkar A.J., Stresses from Loads over Rectangular Areas, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 112 (10), 961-964, 1986.
- [14] Giroud, J.P., Stresses Under Linearly Loaded Rectangular Area, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 96 (SMI), 263-268, 1970.
- [15] Jarquio R. and Jarquio V., Vertical Stress Formulas for Triangular Loading, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 110 (1), 73-78, 1984.
- [16] Algin, H.M., Stresses from Linearly Distributed Pressures over Rectangular Areas, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 24, 681-692, 2000.
- [17] Tekinsoy, M.A., Laman, M., Elastik Zemin Problemleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Basımevi, Isparta, 2000.
- [18] Özaydın, K., Zemin Mekaniği, MEYA Matbaacılık ve Yayıncılık, İstanbul, 1989.
- [19] Keskin, M.S., Zeminlerde Oluşan İlave Düşey Gerilmelerin Değişik Yöntemlerle İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2004.