



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Granüler zemine oturan yüzeysel kare temelin altındaki gerilme artışının küçük ölçekli model deneylerle incelenmesi

## *Investigation of stress increase with small scale model tests under shallow square footing resting on granular soil*

Yazar(lar) (Author(s)): Bayram ATEŞ<sup>1</sup>, Erol ŞADOĞLU<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-1251-7053

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-3757-5126

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ateş B. ve Şadoğlu E., “Granüler zemine oturan yüzeysel kare temelin altındaki gerilme artışının küçük ölçekli model deneylerle incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 95-105, (2022).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.721382

# Granüler Zemine Oturan Yüzeysel Kare Temelin Altındaki Gerilme Artışının Küçük Ölçekli Model Deneylerle İncelenmesi

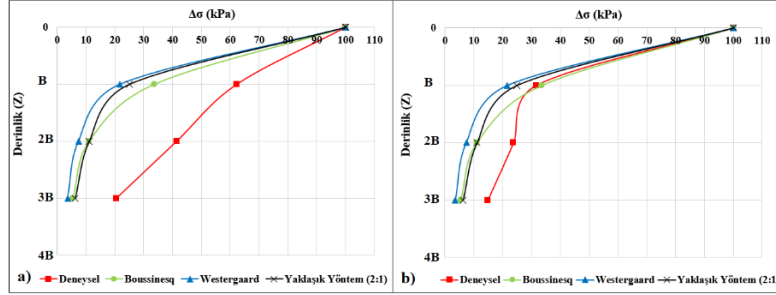
## Investigation of Stress Increase with Small Scale Model Tests under Shallow Square Footing Resting on Granular Soil

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Düşey gerilme artışları/Vertical stress increases
- ❖ Granüler zemine oturan yüzeysel kare temeller/Shallow square footing restin on granular soil
- ❖ Küçük ölçekli model deneyler/Small scale model tests
- ❖ Boussinesq ve Westergaard'a bağlı analitik çözümler / Analytical methods for Boussinesq and Westergaard
- ❖ Basınç ölçerler/Pressure gauges

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Model yüzeysel temel altında meydana gelen düşey gerilme artışı değişimleri araştırılmıştır. / The vertical stress increase occurred under model shallow footing was investigated.



Şekil. Model kare temel altında farklı derinliklerdeki düşey gerilme artışları (a)  $D_r = 30\%$ , (b)  $D_r = 70\%$  / **Figure.** Vertical stress increases under the center of model raft foundation for different depths (a)  $D_r = 30\%$ , (b)  $D_r = 70\%$

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada, granüler zemine oturan model yüzeysel temel altında meydana gelen düşey gerilme artışı değişimleri deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. / In this study, the vertical stress increase occurred under model shallow footing rested on the granular soil was investigated experimentally and analytically.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kum iki farklı rölatif sıklıkta tanka yerleştirilmiş ve üç farklı derinlikte yerleştirilen basınç ölçerler yardımıyla düşey gerilme artışları ölçülmüştür. / The sand was placed in a tank with two different relative densities and vertical stress increments were measured by pressure gauges placed at the three different depths.

### Özgünlük (Originality)

Deneysel çalışmalar kapsamında, üç farklı derinlikte ( $z/B=1$ ,  $z/B=2$ ,  $z/B=3$ ) yerleştirilen basınç ölçerler yardımıyla düşey gerilme artışları ölçülmüştür. / In scope of experimental study, vertical stress increments were measured by pressure gauges placed at the three different depths ( $z/B=1$ ,  $z/B=2$ ,  $z/B=3$ ).

### Bulgular (Findings)

Elastisite Teorisine bağlı çözümlerin zemindeki gerilme artışlarını belirlemede yetersiz kalabileceği görülmüştür. / It can be seen that the methods based on Elasticity theory may be insufficient to predict the stress increase in soil.

### Sonuç (Conclusion)

Rölatif sıklığın zemindeki gerilme dağılımında etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. / It was understood that relative density is a very effective parameter on stress distribution in granular soils

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Granüler Zemine Oturan Yüzeysel Kare Temelin Altındaki Gerilme Artışının Küçük Ölçekli Model Deneyle İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Bayram ATEŞ\*, Erol ŞADOĞLU**

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 16.04.2020 ; Kabul/Accepted : 04.10.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 18.10.2020)

## ÖZ

Son 50 yıl içinde yüzeysel temeller üzerinde, güvenilir ve ekonomik tasarım yöntemleri geliştirmek için kapsamlı nümerik, analitik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Artan ve karmaşık hale gelen yükleri zemine aktarma problemi ile karşılaşan geoteknik mühendisleri için; zeminde meydana gelecek oturmaları ve gerilme dağılımlarını tespit etmek kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu çalışmada, granüler zemine oturan model yüzeysel temel altında meydana gelen düşey gerilme artışı değişimleri deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, kum iki farklı rölatif sıklıkta tanka yerleştirilmiş ve üç farklı derinlikte ( $z/B=1$ ,  $z/B=2$ ,  $z/B=3$ ) yerleştirilen basınç ölçerler yardımıyla düşey gerilme artışları ölçülmüştür. Ayrıca zeminin, Elastisite Teorisine dayanan analitik yöntemlerle (Boussinesq, Westergaard) ve Boston kuralı (Yaklaşık yöntemle) düşey gerilme artışları hesaplanmıştır. Küçük ölçekli model deneylerle elde edilen tüm değerler incelendiğinde, rölatif sıklığın zemindeki gerilme dağılımında etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte Elastisite Teorisine bağlı çözümlerin zemindeki gerilme artışlarını belirlemede yetersiz kalabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Yüzeysel temel, düşey gerilme artışı, model deney, analitik çözümler.

# Investigation of Stress Increase with Small Scale Model Tests under Shallow Square Footing Resting on Granular Soil

## ABSTRACT

Comprehensive numerical, analytical and experimental studies have been conducted to develop reliable and economical design methods for shallow foundations over the last 50 years. For geotechnical engineers, faced with transferring the loads that are more complex and increasing, determination of stress distribution and settlement has become inevitable. In this study, the vertical stress increase occurred under model shallow footing rested on the granular soil was investigated experimentally and analytically. In scope of experimental study, the sand was placed in layers in a tank with two different relative densities (%30-%70) and vertical stress increments were measured by pressure gauges placed at the three different depths ( $z/B=1$ ,  $z/B=2$ ,  $z/B=3$ ). In addition, vertical stress distribution in soil was computed with analytical methods based on elasticity theory (Boussinesq, Westergaard) and the Boston Rule (Approximate Method). As the findings obtained from the small scale model tests were examined, it was understood that relative density is a very effective parameter on stress distribution in granular soils. Also, it can be seen that the methods based on Elasticity theory may be insufficient to predict the stress increase in granular soils.

**Keywords:** Shallow foundation, vertical stress increase, model test, analytical method.

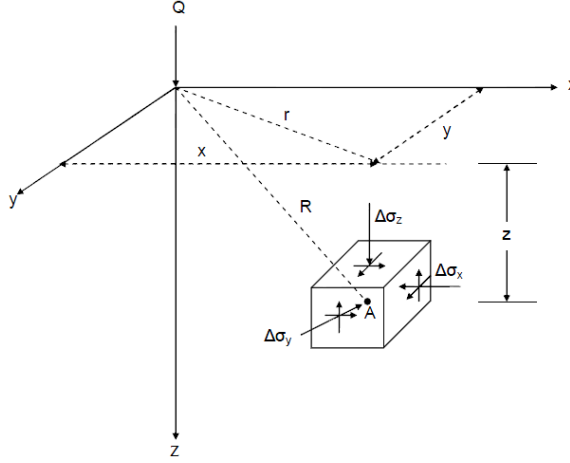
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zeminler kendi ağırlıklarından dolayı oluşan gerilmelere maruz kalırlar. Herhangi bir dış yük zemine uygulandığında zemin içindeki gerilmelerde değişimler oluşur. Temellerin oturma analizinde, göçmeden önceki evrelerde, yapı yüklerinden dolayı zeminde oluşan gerilmelerin, yer değiştirmelerin bilinmesi gerekir. Ancak; zeminin doğal yapısının homojen olmaması, zemin için gerçekçi gerilme-deformasyon analizleri yapılmasını güçleştirmektedir. Bu sebeple; yaklaşık olmasına rağmen çoğunlukla Elastisite Teorisi kullanılır.

Bu kabullerle elde edilen çözümler zemin ortamının fiziksel ve mekanik özelliklerini tam olarak dikkate almadığından gerçek gerilme artışlarıyla Elastisite Teorisine dayalı analitik yöntemlerle hesaplanan gerilme artışları arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Üst yapıdan kaynaklanan düşey gerilme artışları, yapı altında yatay ve düşey yönde sabit olmayıp derinlik boyunca değişim göstermektedir. Yapı altındaki zeminde oluşan gerilme dağılımları, geoteknik mühendisliğindeki birçok problemin çözümü ve projelerin tasarımında oldukça büyük bir öneme sahiptir. Zeminlerdeki gerilme artışı genellikle zeminin yarı sonsuz, izotrop, homojen, elastik ve yarım sonsuz bir ortam kabulüyle belirlenmeye çalışılmaktadır. Farklı zemin ve temel türlerinde

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : bayramates61@hotmail.com

meydana gelen ilave düşey gerilmelerin tahmini ve tespiti ile ilgili literatürde birçok teorik çalışma bulunmaktadır [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Boussinesq [2] lineer, elastik, homojen, izotrop, yarım sonsuz ortamda, yüzeye etkiyen bir nokta yükten dolayı oluşan gerilme artışını Şekil 1’de olduğu gibi ifade edip çözmüştür.



Şekil 1. Tekil yükten dolayı zemin içinde oluşan gerilme artışları [1] (Vertical stress increase in soil due to point load)

Yapı yüklerinden kaynaklanan gerilme artışının hesaplanması zemin mekaniğinde en çok karşılaşılan problemlerden biridir. Zemin yüzeyine uygulanan tekil yükten dolayı meydana gelecek ilave düşey gerilmeler için Boussinesq tarafından önerilen çözüm Eş. 1’de verilmiştir.

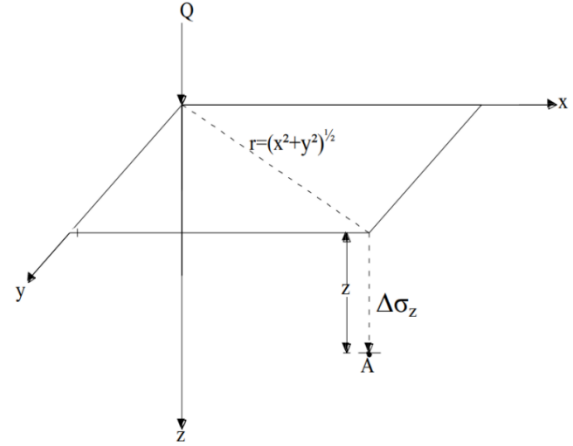
$$\Delta\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5} = \frac{3Q}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (1)$$

Burada Δσ<sub>z</sub> düşey gerilme artışını, Q uygulanan tekil yükü, z gerilme artışının meydana geldiği düşey mesafeyi ve r gerilme artışının meydana geldiği yatay mesafeyi ifade etmektedir.

Westergaard [3], yatay şekil değiştirmelerin sıfır olduğu elastik bir ortamda, Q yükünden oluşan, z derinliğindeki A noktasında oluşan düşey gerilme artışı için Eş. 2’yi önermiştir.

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

Burada Δσ<sub>z</sub> düşey gerilme artışını, Q uygulanan tekil yükü, z gerilme artışının meydana geldiği düşey mesafeyi ve r gerilme artışının meydana geldiği yatay mesafeyi ifade etmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Westergaard’a göre tekil yükten dolayı zemin içinde oluşan gerilme artışları [1] (Vertical stress increase in soil due to point load according to Westergaard)

Yukarıda bahsedilen analitik çalışmalar Elastisite teorisi yardımı ile elde edilen teorik çözümler olması nedeniyle ne yazık ki zemin ortamını tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle; zeminlerde oluşan düşey ve yatay gerilme değerlerinin belirlenmesi amacıyla birçok araştırmacı tarafından laboratuvar düzenekleri geliştirilmiş olup deneysel çalışmalar yapılmıştır. Koegler [4] tarafından yapılan çalışma, zeminlerde oluşan gerilmelerin belirlenmesi amacıyla yapılan ilk deneysel çalışmalardan biri olarak kabul edilmekte olup; söz konusu çalışmada kumlu zeminlerde laboratuvar model deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, bir kum dolguya yüzeyel yük uygulanıp, yükün belirli derinliklerdeki yatay düzlemlerin çeşitli noktalarında neden olduğu gerilmeler ekipmanlar yardımıyla ölçülmüştür. Sağlamer [7], bir düzenek geliştirerek kumlu zeminlerde düşey ve yatay gerilmeleri ölçmüştür. Gerilmeleri ölçmek için üç adet transducer kullanmış ve yüksek gerilmeler altında ölçümler elde etmeye çalışmıştır. Oluşturulan bu düzenegin, konu ile ilgili çalışılan diğer ölçme aletlerinden üstünlüğü, herhangi bir yanal gerilme olmaksızın ölçümlerin doğrudan yapılabilmesidir. Diğer düzeneklerin birçoğunda ise gerilmeler, deformasyon cinsinden dolaylı olarak ölçülmüştür. Hanna ve Ghaly [8], kumlu zeminlerde yatay ve düşey gerilmeleri, gerilme transducerleri kullanarak ölçmüşlerdir. Bu çalışmada, 1,0m x 1,0m x 1,25m ebatlarında metal bir kasa içerisine transducerler yerleştirilmiş ve farklı sıklıklarda kum numuneler hazırlanarak, oluşan yatay ve düşey gerilmeler ölçülmüştür. Ayrıca deneysel olarak hesaplanan K<sub>0</sub> değerleri Jaky [9] tarafından verilen K<sub>0</sub>=1-sinφ değerleri ile mukayese edilmiştir. Laman ve Keskin [10], kumlu zeminlere oturan kare temelin yüklenmesinden dolayı zeminde meydana gelen düşey gerilme artışlarını model deneyler yaparak incelenmiştir. Deneylerde, kare temel olarak B=L=15 cm genişliğinde ve 2.0 cm kalınlığında rijit metal bir plaka kullanmışlardır. Deney tankı 70x70x70 cm boyutunda kare kesitli çelik iskelete sahip olup, ön ve arka yüzeyleri 8 mm kalınlığında cam, yan yüzeyleri ve

tabanı ise 20 mm kalınlığında ahşap malzemeden imal edilmiştir. Kum, tank içerisine tabakalar halinde ve kuru birim hacim ağırlıkları  $\gamma_k=15.0$  ve  $17.1$  kN/m<sup>3</sup> olacak şekilde yerleştirilmiştir. Model kare temel altında basınç ölçerler yardımı ile üç farklı derinlikte (1.0B, 1.5B ve 2.0B) gerilme artışları elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar nümerik (PLAXIS) ve analitik (Boussinesq ve Westergaard) sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel, teorik ve nümerik çalışmalar sonunda, üniform yüklü rijit bir temel tabanından z derinliğinde bulunan yatay düzlemlerdeki gerilme dağılımının benzer yapıda olduğu, derinliğin artmasıyla temel plakası merkezi altında hesaplanan ve ölçülen basıncın azaldığı ve kum zeminin herhangi bir noktasındaki gerilme değerinin uygulanan yük ile orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Literatürde mevcut Westergaard, Boussinesq gibi pek çok teorik çözümlerde ilave düşey gerilmeler hesaplanırken, zeminin sıklık durumu göz önüne alınamamakta ve her sıklık değeri için aynı sonuçlar elde edilmektedir. Oysaki bu çalışmada deney sonuçlarından görülmüştür ki, sıklık değerinin artmasıyla aynı derinliklerde ve aynı yükler altında, ilave düşey gerilme değerleri önemli mertebelerde etkilemektedir. Bağrıaçık ve Laman [11], kumlu zeminler üzerine oturan yüzeysel temellerden dolayı zemin içinde oluşan ilave düşey gerilmeleri laboratuvar model deneyleri yaparak araştırmışlardır. Deneylerde şekil etkisini belirleyebilmek amacıyla,  $\gamma_k=15.0$  kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığındaki kum, 50 cm genişliğinde ve 40 cm yüksekliğindeki kare kesitli kasa içerisine yerleştirilmiş olup; Z=1.0B derinlikte ve üç farklı geometrideki temel (B=6 cm'lik dairesel temel, B=5 cm'lik kare temel ve B=5 cm'lik şerit temel) kullanılarak yatay düzlemler boyunca meydana gelen ilave düşey gerilme değerlerini basınç transducerleri yardımıyla ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, gerilme dağılımının daire ve kare temeller altında çok farklı olmadığı ancak; daire ve kare temel ile şerit temel arasında gerilme davranışında temel şeklindeki değişimin önemli mertebelerde olduğu görülmüştür. Uygulanan farklı yükler için, temel altında oluşan gerilme değerlerinde kayda değer herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak Z=1,0B derinliğinde meydana gelen düşey gerilme değerleri, B=5 cm'lik şerit temelde en yüksek, B=6 cm'lik dairesel temelde ise, en düşük değeri vermiştir. Ayrıca B=5 cm'lik kare temelin gerilme değeri, B=6 cm çaplı dairesel temelin gerilme değerlerine oldukça yakın olduğu, ancak; B=5 cm'lik şerit temelden dolayı elde edilen gerilme değerinin, daire ve kare temel altında elde edilen gerilme değerlerinden %49 daha fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, farklı geometrilerdeki

temellerde, gerilme değerleri açısından şekil etkisinin önemli mertebelere çıkabildiği görülmüştür. Çiçek ve ark. [12], model deneyler yardımı ile düşey yüke maruz model şerit temelin (B=10cm) merkez çizgisi altında meydana gelen gerilme artışlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmalarda  $\gamma_k=15.0$  kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığındaki kum rölatif sıklığı  $D_r=0.46$  olacak şekilde, 100x50x100 cm boyutunda dikdörtgen kesitli kasa içerisine yerleştirilmiş olup; z=0.35B, 0.55B, 0.75B, 0.95B, 1.65B, 2.20B derinliklerinde minyatür basınç sensörleri ile ilave düşey gerilme artışları ölçülmüştür. Elde edilen deneysel bulgular, nümerik ve analitik (Boussinesq ve Westergaard) çözümler ile mukayese edilmiştir. Sonuç olarak B derinliğinde deneysel bulguların Westergaard çözümleri ile uyumlu olduğu görülmüş olup genel olarak Elastisite teorisine dayalı çözümlerin zeminlerdeki gerilme artışını öngörmeye sınırlı kaldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, granüler zeminlere oturan düşey yüklü kare temellerin merkezi altında oluşan ilave gerilme değerleri deneysel olarak araştırılmış olup elde edilen değerler mevcut analitik yöntemler ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

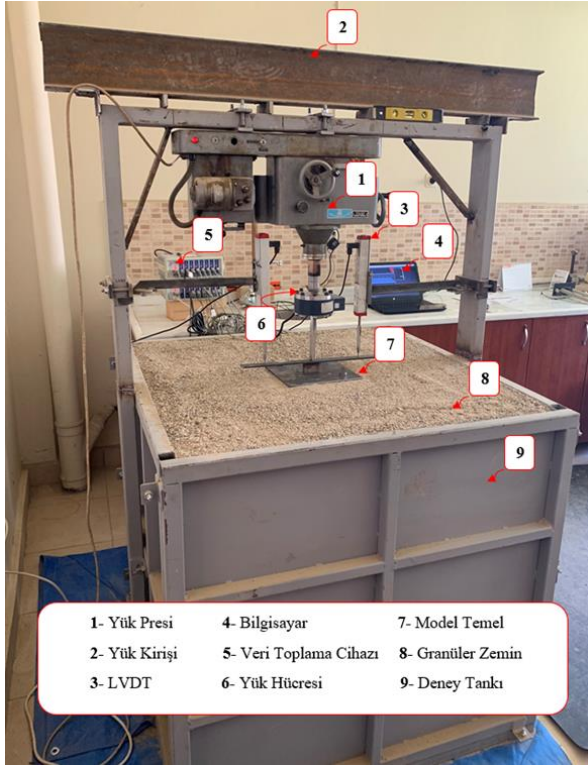
Temelleri arazide yapacağımız deneysel çalışmalar ile incelemek yüksek bir maliyet gerektirmesi sebebi ile söz konusu temelin davranışı konusundaki çalışmalar çoğunlukla küçük ölçekli model laboratuvar deneyleri ile yapılabilmektedir. Fiziksel modelleme prototiplerin davranışını belirli açılardan incelemek üzere yapılır. Bu çalışmada; kum zemine oturan düşey yüklü kare temellerin, farklı rölatif sıklıktaki zeminde düşey gerilme artışını gözlemlemek ve bu dağılımın analitik yöntemler ile uyumunu incelemek için 1g ortamda deney düzeneği yapılmıştır.

### 2.1. Malzeme, Araç-gereç ve Cihazlar (Material, Tools and Devices)

#### 2.1.1. Deney Düzeneği (Experimental Setup)

Deney düzeneği; model kare temel, yükleme düzeneği, deney tankı, deformasyon ölçerler (LVDT), yük hücresi ve kum yüzeyini düzleme aletinden oluşmaktadır. Deney düzeneği Şekil 3'de görülmektedir. Ayrıca, deneylerde kumun istenilen rölatif sıklıkta sıkıştırılması için dinamik sıkıştırma cihazı kullanılmıştır. Deneyler, K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümünün Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, laboratuvarında bulunan üç eksenli deney aletinin presi, deplasman ölçerler (LVDT), veri toplama ünitesi, basınç ölçerler, aygıt geçidi, yük hücresi, bilgisayar ile dijital fotoğraf makinesi kullanılmıştır.





Şekil 3. Deney düzeninin şeması (A view of experimental setup) [13]

### 2.1.2. Kum Tankı (Sand Box)

Deney tankının içi küp biçiminde olup, uzunluğu 1,00 m, genişliği 1,00 m ve yüksekliği 1,00 metredir. Seçilen tank boyutları, sınır etkisi olmayacak şekilde literatür ve sayısal analiz sonuçları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Yükleme esnasında sınır etkisini kontrol etmek amacıyla sonlu elamanlar yöntemi ile yapılan analizlerin yanı sıra deformasyon saatleri yardımıyla hem deney tankı hem de kum zemindeki hareket gözlenmiştir. Kasanın iskeleti çelik profillerden imal edilmiştir. Deney esnasında rijitliği sağlamak için tanka belli noktalardan kaynak yapılmış olup; çelik kuşaklar ve bulonlar takılmıştır. Deneyler esnasında, zemini tank içine daha kolay yerleştirebilmek ve istenilen rölatif sıklıkları sağlayabilmek için, tankın iç yüzeyleri beşer cm aralıklarla yatay olarak çizilerek, kum zeminin tabakalar halinde yerleşimine olanak sağlanmıştır. Deney tankına üç eksenli aletin presini bağlamak için çelik giriş monte edilmiştir [13].

### 2.1.3. Model Kare Temel (Model Square Foundation)

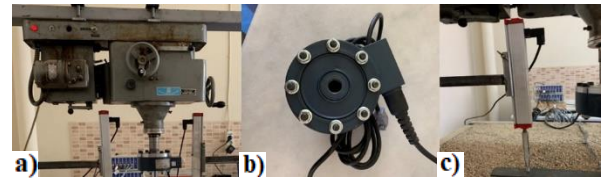
Deneyel çalışmalarda kullanılan model kare temelin (BxB) bir kenarının uzunluğu 160 mm olup, 6 mm kalınlığında çelik levhalardan üretilmiştir. Model temelin tabanında merkezi yükleme yapabilmek için başlık montajına uygun şekilde delikler açılmıştır. Tam sürtümlü ve pratikteki koşullara uygun olarak 100 numara zımpara kâğıdı temel tabanına yapıştırılmıştır. Şekil 4’de model kare temel görülmektedir.



Şekil 4. Model kare temel boyutları; B, L=160 mm (Dimensions of model square foundation; B, L=160mm)

### 2.1.4. Yükleme Aparatı, Yük Hücresi ve Deplasman Ölçerler (Loading Apparatus, Load Cell and LVDTs)

Deneyel çalışmalarda yük, üç eksenli deney aletinin presi yardımı ile düşey olarak uygulanmıştır. Bu pres elektrik motoru vasıtasıyla çeşitli hızlarda (0,50 mm/dk – 1,50 mm/dk) sabit deformasyon uygulama ve elle kriko gibi kullanılma özelliklerine sahiptir. Pres düşey yükleme yapmak amacıyla deney tankına sabitlenmiş yük girişine monte edilmiştir (Şekil 5a). Zemine uygulanan düşey yükleri ölçebilmek amacıyla kalibre edilen bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi kullanmanın diğer ölçüm yöntemlerine göre en önemli avantajı, hassas ve zamana bağlı ölçüm yapılabilmesidir. Bu çalışmada 50 kN kapasiteli, LS-5T model yük hücresi kullanılmıştır (Şekil 5b). Deneylerden önce yük hücresi tarafımızca kalibre edilmiştir. Yük hücresinde düşey olarak monte edilmiş ucu keskin yükleme bıçağı, model temeli yüklemek için kullanılmıştır. Deneyel çalışmalarda, model kare temelin düşey yüklenmesi sonucu, temelde oluşan oturmaları ölçmek amacıyla, 150 mm’ye kadar deplasman değeri ölçebilen, LPS-150 model, deplasman ölçerler (LVDT) kullanılmıştır (Şekil 5c). Bu deplasman ölçerler,  $\pm \% 0,05$  ( $>200$  mm),  $\pm \% 0,1$  (130-200 mm),  $\pm \% 0,2$  (75-130 mm),  $\pm \% 0,5$  ( $<75$  mm) aralığında hassasiyete sahiptir. Yükleme maruz model kare temelin oturması, temelin merkezine yakın ve eşit mesafedeki iki LVDT ile ölçülmüştür.

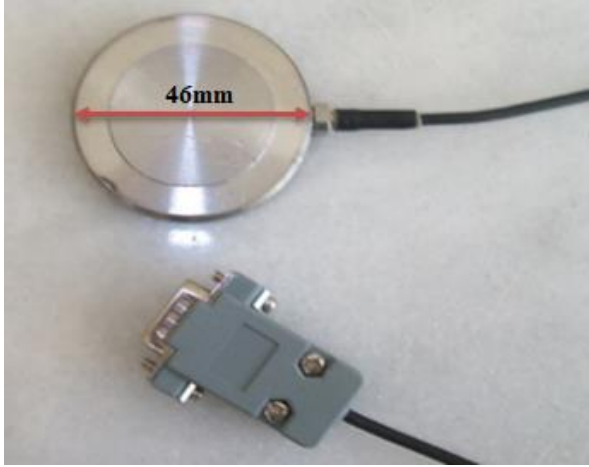


Şekil 5. Yükleme düzeni a) yük presini, b) yük hücresi, c) LVDT (Loading setup (a) Loading apparatus, (b) load cell, (c) LVDT)

### 2.1.5. Basınç Ölçer (Pressure Gauges)

Temel yüklemesinden dolayı kum içinde belli bir derinlikte meydana gelen gerilme artışlarını ölçmek için 46 mm çapında ve 500 kPa kapasiteli basınç ölçerler kullanılmıştır (Şekil 6). Söz konusu sensörler yaklaşık 0.5mV/V ( $1000 \times 10^{-6}$  strain) nominal çıkış değerine sahip

olup;  $\pm \%0,02$  aralığında hassasiyete sahiptir. Bu basınç ölçerler kum içerisinde B, 2B ve 3B derinliklere yerleştirilmiştir.



Şekil 6. Basınç ölçerler (Pressure Gauges)

### 2.1.6. Veri Toplama Ünitesi ve Aygıt Geçidi (Data Logger and Gateway)

Deneysel çalışmalarda, yük hücresi ve deplasman ölçerden elde elektrik sinyalleri, 8 kanal girişli veri toplama cihazı ve aygıt geçidi yardımıyla sayısal değerlere dönüştürülerek bilgisayara aktarılmıştır. Bu veriler CoDA Locomotive programı yardımıyla kayıt altına alınmıştır (Şekil 7).



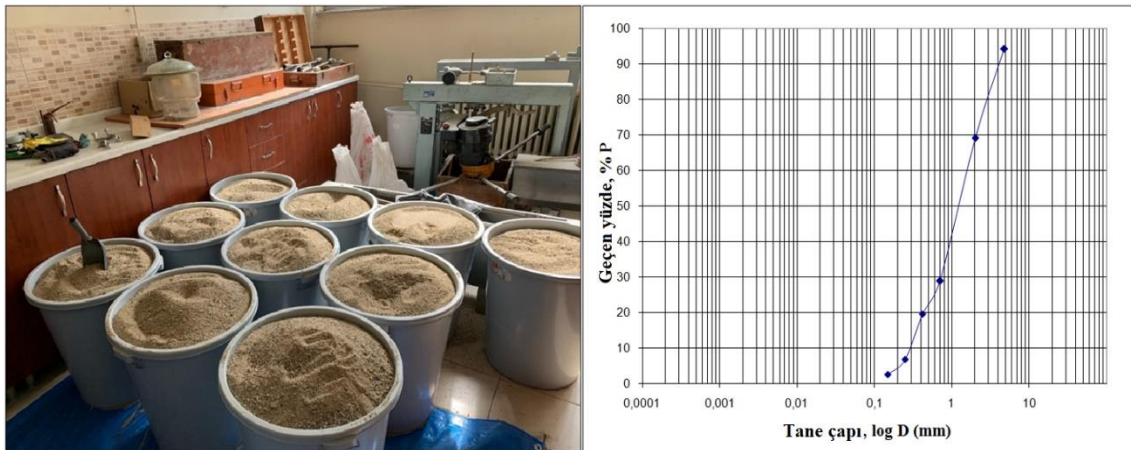
Şekil 7. Ölçüm Cihazları a) veri toplama ünitesi, b) aygıt geçidi, c) CoDA Locomotive programı ara yüzü (Data transfer devices (a) Data logger, (b) Gateway, (c) CoDA Locomotive program interface)

### 2.1.7. Kum (Sand)

Deneylerde, İyidere ilçesinin (Rize) bitişiğindeki doğu sahilinden alınan kum kullanılmıştır. Kum, mevcut özelliklerin korunması ve doğal bir zemin ortamı elde edilmesi amacıyla sadece organik maddeler elenmiş olup doğal granülometrisi bozulmamaya çalışılmıştır. Deney kumunun, ASTM D-6913 [14] standardına göre granülometri eğrisi elde edilmiştir (Şekil 8).

Kumun granülometri eğrisinden,  $D_{10}=0,28$  mm (efektif çap),  $D_{30}=0,73$  mm ve  $D_{60}=1,71$  mm olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden üniformaluluk katsayısı  $C_u=6,11$  ve eğrilik katsayısı  $C_r = 1,11$  olarak hesaplanmıştır. Kumun dane çapları 0,1-5,0 mm arasında (iri-orta) olup, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre iyi derecelenmiş kumdur (SW). Kumun, ilgili deneylerle belirlenmiş bazı özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Rölatif sıklığın  $D_r=0,30$  ve 0.70 olması için kumun kuru birim hacim ağırlığı Eş. 3 yardımı ile hesaplanmıştır. Farklı rölatif sıklıktaki deney kumuna ait kayma mukavemeti açısı değerleri kesme kutusu deneyi ile elde edilmiştir.

$$D_r = \frac{\gamma_{k \max} - \gamma_k}{\gamma_{k \max} - \gamma_{k \min}} \quad (3)$$



Şekil 8. Deney kumu ve kumun granülometri eğrisi (Test sand and particle size distribution curve of the sand)



**Çizelge 1.** Deney kumunun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Some physical and mechanical properties of the test sand)

Özellik	Birim	Değer
Dane özgül yoğunluğu, $G_s$ (ASTM D854-14, [15])	-	2,64
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{kmax}$ (ASTM D4253-16, [16])	kN/m <sup>3</sup>	18,90
Minimum kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{kmin}$ (ASTM D4254-16, [17])	kN/m <sup>3</sup>	15,80
Efektif çap, $D_{10}$	mm	0,28
$D_{30}$	mm	0,73
$D_{60}$	mm	1,71
Üniformluluk katsayısı, $C_u$	-	6,11
Derecelenme katsayısı, $C_r$	-	1,11
Kayma mukavemeti açısı, $\phi$ , ( $D_r=0,70$ ) (ASTM D3080 / D3080M-11, [18])	Derece	44
Kayma mukavemeti açısı, $\phi$ , ( $D_r=0,30$ ) (ASTM D3080 / D3080M-11, [18])	Derece	37

### 2.1.8. Dinamik Sıkıştırma Cihazı (Dynamic Compaction Device)

Kum, deney tankı içerisine tabakalar (5cm) halinde ve belli bir sıklıkta yerleştirilmiştir. Her bir kum tabakası, dinamik sıkıştırma cihazı ile önceden belirlenen kalınlığa ulaşıncaya kadar aynı süre (10sn) sıkıştırmaya tabi tutulmuştur (Şekil 9). Matkabin uç kısmına 20cm×20cm boyutlarında ve 10 mm kalınlığında çelik plaka monte edilmiştir. Sıkıştırma sırasında üniform sıklık elde etmek ve kum danelerinin ezilmesini önlemek amacıyla titreşim cihazının uç kısmındaki plaka kauçuk malzeme ile kaplanmıştır.

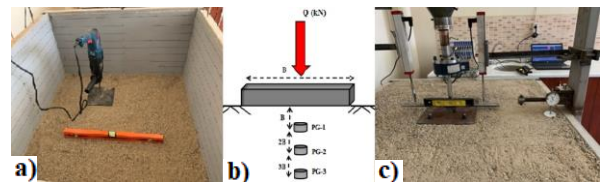


Şekil 9. Titreşim cihazı (Vibration device)

### 2.2. Deney Prosedürü (Experimental Procedure)

Kum, deney tankı içerisine 5cm'lik tabakalar halinde ve iki farklı rölatif sıklıkta ( $D_r=\%30$ ,  $\gamma_k=16,60$  kN/m<sup>3</sup> ve  $D_r=\%70$ ,  $\gamma_k=17,90$  kN/m<sup>3</sup>) yerleştirilmiştir.  $D_r=\%30$  rölatif sıklığın elde edilebilmesi için 5 cm'lik zemin tabakası için gerekli olan kum ağırlığı hesaplanmış olup; kumun sıkışmasını önlenmek amacıyla yakın mesafeden deney tankı içerisine dökülmüş ve sonrasında su terazisi vasıtasıyla zemine basınç uygulamadan yüzeyi düzelterek, kum zeminin tabaka boyunca homojen olarak yerleşmesi sağlanmıştır.  $D_r=\%70$  rölatif sıklığın

elde edilebilmesi için ise, kum tabakası dinamik sıkıştırma cihazı ile sıkıştırılmıştır (Şekil 10a). Söz konusu rölatif sıklıklarda tabakaların yüksekliği tank yüzeyleri üzerinde bulunan ve tabaka sınırlarını belirten yatay çizgilere ile kontrol edilmiştir. Basınç ölçerler, zeminde kare temelin merkezi altına, temel tabanından itibaren B, 2B, 3B derinliklere yerleştirilmiştir (Şekil 10b). Deneye başlanmadan önce, temel plakasının her iki tarafına LVDT'ler ve eksenel yükleme cihazı ucuna yük hücresi yerleştirilmiştir. Ölçüm cihazlarının başlangıç değerleri sıfırlanıp, yük düşey yönde ve statik olarak uygulanmıştır. İstenilen deplasman değeri elde edilene kadar, 0.50 mm/dk'lık sabit ve sürekli yükleme uygulanmıştır. Ancak yükleme 100 kPa olduğunda durdurulmuştur. Veri toplama ünitesi ve RS-485 model numaralı aygıt geçidi yardımı ile veriler deney esnasında toplanmış ve CoDA Locomotive programı yardımıyla veriler sayısal değerlere dönüştürülmüştür (Şekil 10c). Elde edilen sayısal veriler ışığında düşey yük-oturma eğrileri çizilmiştir. Ayrıca, sıkıştırılan zeminin homojenliği deney tamamlandıktan sonra, deney tankı hazırlanırken kum tankına yerleştirilen numune kapları ile kontrol edilmiştir. Deneyler, her bir rölatif sıklık için üç defa tekrarlanmış, sonuçlar kayıt altına alınmıştır.



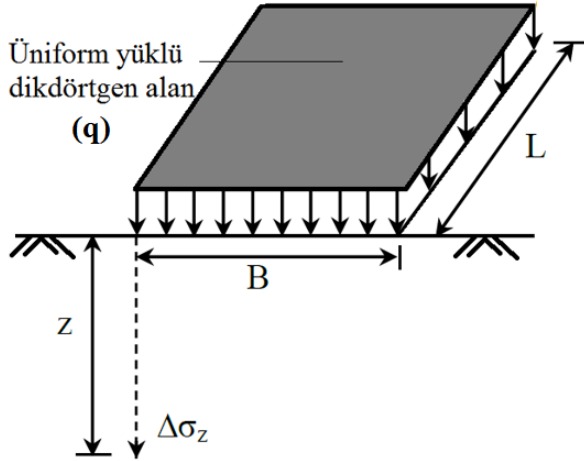
Şekil 10. Bir deneyin yapılışı a) kumun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması, b) basınç ölçer yerleştirme düzeni, c) deney başlangıç anı (Execution of a typical test (a) placing of sand and compaction of it, (b) positions of pressure gauges, (c) start of a test)

### 2.1. Analitik Çalışmalar (Analytical Study)

Laboratuvarda yapılan model deney sonuçlarını, mukayese edebilmek ve kare temelin zeminde sebep olduğu gerilme artışlarını incelemek amacıyla laboratuvarda yapılan model deneylerin sonuçları



literatürde sıkça kullanılan analitik yöntemlerden Boussinesq, Westergaard ve 2:1 yöntemleriyle kıyaslanmıştır. Boussinesq denklemleri L uzunluğunda ve B genişliğindeki q üniform yükü ile yüklenmiş dikdörtgen bir alanın altında ve z derinliğindeki bir noktada oluşan gerilme artışlarını ( $\Delta\sigma_z$ ) bulmak için kullanılabilir (Şekil 11).



Şekil 11. Üniform yüklü dikdörtgen alanın bir köşesi altında gerilme artışı (Vertical stress increase under an edge of uniform rectangular loaded area)

Newmark [19] tarafından, Boussinesq'in nokta yük altındaki gerilme artışını bulmak için geliştirdiği denklemin integrasyonu yapılarak üniform yüklü dikdörtgen bir alanın altındaki ilave düşey gerilme artışlarını veren bir denklem geliştirilmiştir (Eş. 4).

$$\Delta\sigma_z = qI_r \quad (4)$$

Burada  $I_r$  etki faktörü ise Eş. 5 ile ifade edilebilir.

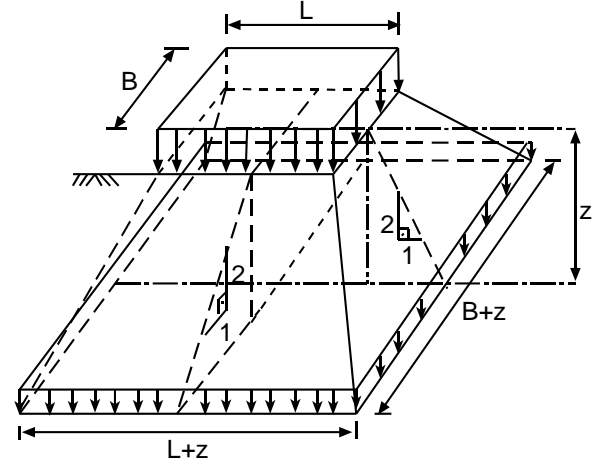
$$I_r = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \left( \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \right] \quad (5)$$

Burada, q uygulanan üniform yayılı yükü, m ve n temel geometrisine bağlı katsayıları ifade etmektedir. Westergaard [3] ise üniform yüklü dikdörtgen bir alanın altında oluşan düşey gerilme artışı için Eş. 6 ifadesini önermiştir.

$$\Delta\sigma_z = q \frac{1}{2\pi} \left[ \cot^{-1} \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{(1-2\mu)} \left( \frac{1}{m^2} + \frac{1}{n^2} \right) + \frac{(1-2\mu)^2}{(1-2\mu)} \left( \frac{1}{m^2n^2} \right)} \right] \quad (6)$$

Burada, q uygulanan yayılı yükü,  $\mu$  poisson oranını, B temel genişliğini, L temel uzunluğunu, z gerilme artışının meydana geldiği belirli bir zemin derinliğini,  $m=B/z$  ve  $n=L/z$  geometriye bağlı katsayıları ifade etmektedir.

Zemindeki gerilme artışı hesaplarında yaklaşık yöntem olarak adlandırılan, gerilme artışı dağılımının derinlik boyunca, 2:1 eğimi ile (düşeyle 26.6° bir yayılış) gittiği kabulüne dayanan yöntemler de vardır [1]. Yaklaşık yöntem şematik olarak Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 12. Üniform dikdörtgen yük altında yaklaşık gerilme artışı [20] (Approximate vertical stress increase under uniform rectangular loaded area)

Buna yönteme göre, q yayılı yükü ile yüklü LxB alanının z derinliği altındaki  $\Delta\sigma_z$  düşey gerilme artışı Eş. 7 yardımıyla hesaplanabilir.

$$\Delta\sigma_z = \frac{qBL}{(B+z)(L+z)} \quad (7)$$

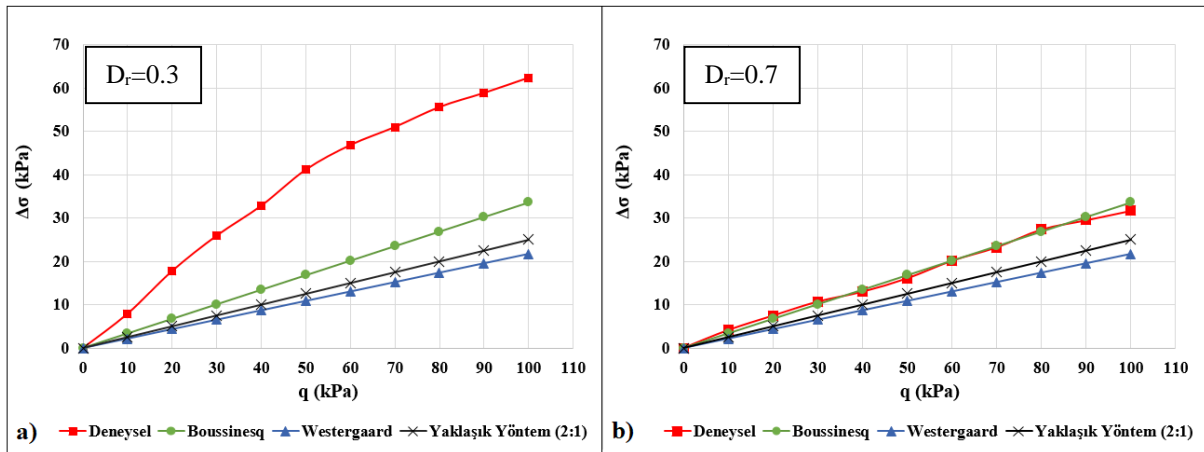
Burada, q uygulanan yayılı yükü, B temel genişliğini, L temel uzunluğunu ve z gerilme artışının meydana geldiği derinliği ifade etmektedir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

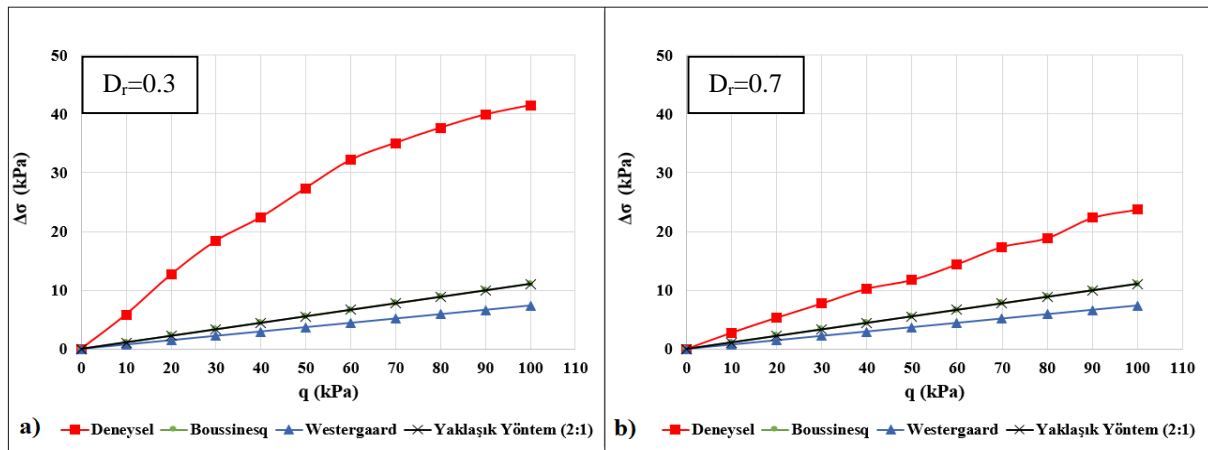
Farklı rölatif sıklığa ( $D_r=\%30$  ve  $D_r=\%70$ ) sahip kumlu zeminlerde kare ( $B \times B=160$  mm) temel altına merkezinden itibaren B, 2B, 3B derinliklere yerleştirilen basınç ölçerler yardımıyla düşey gerilme artışları kayıt altına alınmıştır. Temel tabanından itibaren temel merkezi altında B derinliğinde ölçülen gerilme artışları analitik yöntemlerle hesaplanan gerilme artışlarıyla birlikte Şekil 13'de sunulmuştur. Her iki rölatif sıklık durumunda da q yüküne bağlı olarak model kare temel orta noktasından itibaren zeminde B derinliğinde oluşacak ilave gerilmeler gözle görülür biçimde artmıştır. B ( $z/B=1$ ) zemin derinliğinde düşük rölatif sıklıkta analitik yöntemler ile deneysel sonuçlar arasında belirgin fark olup;  $\%85-189$  arasındadır. Gevşek zeminde en yakın sonucu Boussinesq çözümleri vermiştir. Zemin sıklığının artması deneysel sonuçlar ve analitik çözümlerin (Boussinesq, Westergaard, yaklaşık yöntem) birbirine yaklaşmasına sebep olmuştur.  $D_r=\%70$  için B zemin derinliğinde analitik yöntemler ile deneysel çalışma arasındaki fark azalmış olup;  $\%6-46$  arasındadır. Boussinesq çözümleri sıkı zeminde  $z/B=1$  derinliğinde

deneysel sonuçlarla oldukça uyum göstermiştir. Analitik yöntemler rölâtif sıklıktan bağımsız olduğu için her iki zemin durumunda da aynı gerilme değeri artışı değerlerini vermiştir. Ancak; deneysel çalışmalarda rölâtif sıklığın gerilme artışı ifade etmede önemli bir zemin parametresi olduğu görülmektedir. Rölâtif sıklığın artmasının zeminde meydana gelecek ilave gerilme artışlarını azalttığı, laboratuvar ortamında yapılan küçük ölçekli model deneylerde belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Yüzev yüklerine maruz gevşek taneli zeminlerde kayma direnci, sığ derinliklerdeki düşük normal gerilmeler ve düşük rölâtif sıklık sebebiyle sahip olunan düşük içsel sürtünme açısı sebebiyle sıkı zemine göre daha azdır. Bu durum, yüzev yükünün düşey düzlemlerde oluşan kayma gerilmeleriyle daha geniş alanlara aktarılmasını sınırlamaktadır. Analitik çözümlerde bir kayma mukavemeti sınırlaması

Şekil 14’de 2B derinlikte ölçülen gerilme artışları, aynı derinlik için analitik yöntemlerle hesaplanan gerilme artışlarıyla birlikte sunulmuştur. B derinlikte ölçülen gerilme artışlarına göre, her iki rölâtif sıklık durumunda da model kare temel in orta noktasından itibaren 2B derinlikte oluşan düşey gerilme artışları gözle görülür biçimde azalmaktadır. Ayrıca, rölâtif sıklığın artmasının zeminde meydana gelecek ilave gerilmeleri azalttığı belirgin bir şekilde tespit edilmiştir. 2B zemin derinliğinde düşük rölâtif sıklıkta analitik yöntemler ile deneysel çalışma arasındaki fark yaklaşık olarak %273-460 arasındadır. Düşük rölâtif sıklığa sahip zeminlerde en yakın sonucu Boussinesq çözümü vermiştir. Zemin sıklığının artması deneysel sonuçlar ve analitik çözümlerin (Boussinesq ve Westergaard) birbirine az da olsa yaklaşmasına sebep olmuştur.  $D_r=70\%$  için  $z/B=2$  zemin derinliğinde analitik yöntemler ile deneysel



Şekil 13. Yüzevden itibaren B derinlikte (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$  için temel in merkezi altına meydana gelen düşey gerilme artışları (Vertical stress increases under the center of the model foundation for  $z/B=1$  (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$ )



Şekil 14. Yüzevden itibaren 2B derinlikte (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$  için temel in merkezi altına meydana gelen düşey gerilme artışları (Vertical stress increases under the center of model foundation for  $z/B=2$  (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$ )

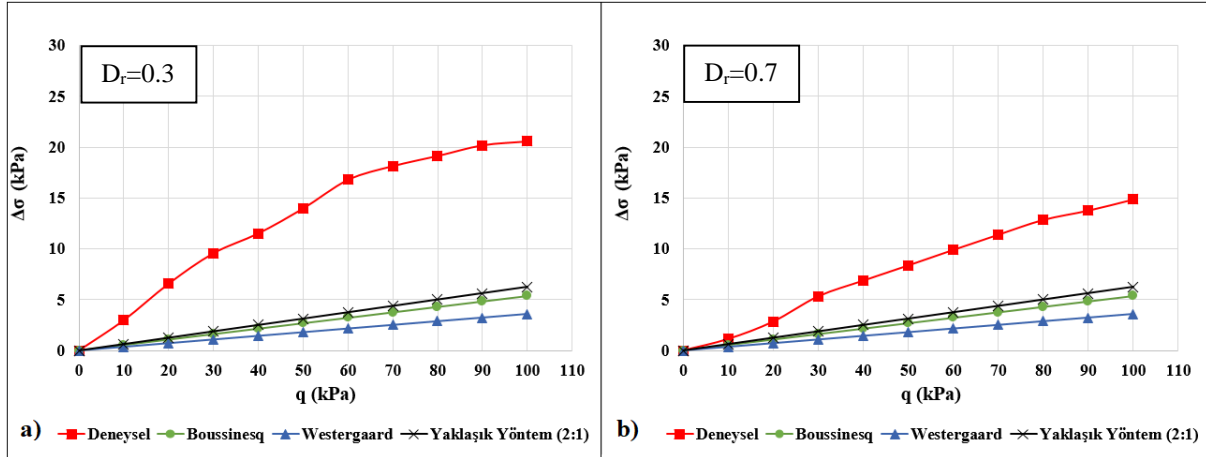
olmadığından zeminde kayma mukavemetinin artması, deneysel ölçümlerle analitik çözümleri birbirine yaklaştırmaktadır.

çalışma arasındaki fark %113-221 arasındadır. Derinlik arttıkça analitik yöntemler ile deneysel ölçümler arasındaki rölâtif hata artmaktadır.

3B zemin derinliğinde düşük rölatif sıklıkta analitik yöntemler ile deneysel çalışma arasındaki fark yaklaşık olarak %229-473 arasındadır (Şekil 15). Düşük rölatif sıklığa sahip zeminlerde deneysel sonuçlar ve analitik yöntemler arasındaki fark oldukça yüksek olmasına rağmen en yakın sonucu Westergaard çözümleri vermiştir. Zemin sıklığının artması deneysel sonuçlar ve

birbirine yaklaşmış olup özellikle Boussinesq çözümü yakın sonuç vermiştir.

Kare temel merkezi altında deneysel çalışmalar ve teorik çözümler ile elde edilen düşey gerilme artışları toplu olarak Çizelge 2’de sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda ölçülen düşey gerilme artışları ile analitik yöntemler ile belirlenen düşey gerilme artışları arasında

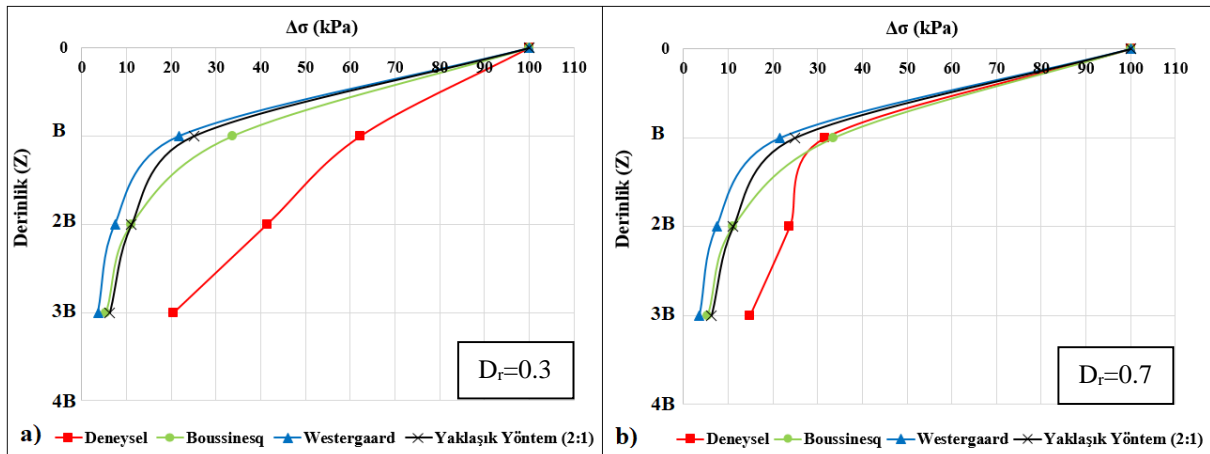


Şekil 15. Yüzeiden itibaren 3B derinlikte (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$  için temel merkezi altına meydana gelen düşey gerilme artışları (Vertical stress increases under the center of model foundation for  $z/B=3$  (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$ )

analitik çözümlerin (Boussinesq, Westergaard, yaklaşık yöntem) birbirine yaklaşmasına sebep olmuştur.  $D_r=70\%$  için  $z/B=3$  zemin derinliğinde analitik yöntemler ile deneysel çalışma arasındaki fark artmış olup; %137-313 arasındadır.

Şekil 16’da model kare temel altında, üç farklı derinlikte ( $z=1.0B$ ,  $z=2.0B$ ,  $z=3.0B$ ) ve  $q=100$  kPa yük kademesinde tespit edilen ilave düşey gerilme artışları toplu olarak grafik halinde sunulmuştur. Şekilden, her iki rölatif sıklıkta da derinlik boyunca oluşan düşey gerilmelerin, derinlik arttıkça azaldığı görülmektedir. B derinliğine kadar gevşek zeminde gerilme artışları deneysel çalışmada ve teorik çözümlerde farklılık gösterirken; aynı derinlikte sıkı zeminde sonuçlar

belirgin derece farklılıklar vardır. Analitik yöntemler rölatif sıklıktan bağımsız olduğu için her iki zemin durumunda da aynı gerilme değeri artışı değerlerini vermiştir. Ancak; deneysel çalışmalarda rölatif sıklığın gerilme artışını etkileyen önemli bir zemin parametresi olduğu görülmektedir. Burada yapılan irdelemeler, taneli zeminde küçük ölçekli deney sonuçlarına dayanmaktadır. Taneli zeminlerde düşük derinlik basınçlarının hâkim olduğu seviyelerde kayma dirençleri oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu durum gerilme deformasyon ilişkisini, Elastisite Teorisinin denge, uygunluk ve bünye denklemleriyle ifade etmeyi olanaksız kılmaktadır. Diğer bir anlatımla, düşük yük seviyelerinde dahi plastik noktalar oluşmaktadır. Bu durum gerilme dağılımlarının Elastisite Teorinin



Şekil 16. Model kare temel altında farklı derinliklerdeki düşey gerilme artışları (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$  (Vertical stress increases under the center of model raft foundation for different depths (a)  $D_r=30\%$ , (b)  $D_r=70\%$ )

çözümlerden çok farklı olmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada yapılan küçük ölçekli deneylerde olduğu gibi gerçek boyutlu temelerde de büyük taban basınçları durumunda bu farklılıklar gözlenebilecektir.

gerilme artışlarının tespiti için yaygın olarak kullanılan analitik yöntemler belirlenmiş olup; model temel için analitik çözümler yapılmış ve elde edilen sonuçların

**Çizelge 2.**  $D_r=30\%-70$  için deneysel ve analitik çalışma ile elde edilen düşey gerilme artışları (Vertical stress increases obtained by experimental and analytically studies for  $D_r=30\%-70$ )

Derinlik	Yük Mertebeleleri (kPa)	Deneysel Çalışma		Boussinesq (kPa)	Westergaard (kPa)	Yaklaşık Yöntem (kPa)
		$D_r=0,3$	$D_r=0,7$			
B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10,00	7,91	4,13	3,36	2,17	2,50
	20,00	17,75	7,46	6,72	4,33	5,00
	30,00	25,90	10,70	10,08	6,50	7,50
	40,00	32,80	12,99	13,44	8,66	10,00
	50,00	41,10	16,08	16,80	10,83	12,50
	60,00	46,78	20,14	20,16	12,99	15,00
	70,00	50,95	23,24	23,52	15,16	17,50
	80,00	55,55	27,34	26,88	17,32	20,00
	90,00	58,80	29,49	30,24	19,49	22,50
	100,00	62,31	31,66	33,60	21,65	25,00
2B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10,00	5,86	2,77	1,11	0,74	1,11
	20,00	12,65	5,32	2,21	1,48	2,22
	30,00	18,38	7,74	3,32	2,21	3,33
	40,00	22,40	10,26	4,42	2,95	4,44
	50,00	27,37	11,75	5,53	3,69	5,55
	60,00	32,17	14,41	6,63	4,43	6,66
	70,00	35,05	17,39	7,74	5,17	7,77
	80,00	37,64	18,89	8,84	5,90	8,88
	90,00	39,87	22,32	9,95	6,64	9,99
	100,00	41,45	23,74	11,05	7,38	11,10
3B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10,00	2,97	1,13	0,54	0,36	0,63
	20,00	6,57	2,84	1,08	0,72	1,25
	30,00	9,57	5,32	1,62	1,08	1,88
	40,00	11,52	6,87	2,16	1,44	2,50
	50,00	13,97	8,37	2,70	1,80	3,13
	60,00	16,79	9,89	3,23	2,15	3,75
	70,00	18,15	11,39	3,77	2,51	4,38
	80,00	19,14	12,84	4,31	2,87	5,00
	90,00	20,19	13,76	4,85	3,23	5,63
	100,00	20,57	14,85	5,39	3,59	6,25

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, farklı rölatif sıklığa sahip kum zemine oturan küçük ölçekli model kare temel ( $B \times B=160\text{mm}$ ) altında meydana gelen ilave düşey gerilme artışları, deneysel ve analitik yöntemlerle araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, çelik ve rijit olarak imal edilen bir deney tankına, farklı rölatif sıklıklarda ( $D_r = 30\%$  ve  $D_r = 70\%$ ) hazırlanan kum tabakalar halinde yerleştirilmiş ve üzerindeki model temele düşey yük uygulanmıştır. Bu düşey yük uygulanırken, zemine farklı derinliklerde yerleştirilen basınç ölçerler yardımıyla zemindeki düşey gerilme artışları kayıt altına alınmıştır. Zemindeki ilave

deneysel sonuçları ile olan uyumu araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçları şöyle sıralayabiliriz:

- Zemin sıklığının artması deneysel sonuçlar ve analitik çözümlerin (Boussinesq, Westergaard, yaklaşık yöntem) birbirine yakınsamasını sağlamıştır.  $D_r=70$  için B zemin derinliğinde analitik yöntemler ile deneysel çalışma arasındaki fark azalmış olup; %6-46 arasındadır. Boussinesq çözümleri sıkı zeminde B ( $z/B=1$ ) derinliğinde deneysel sonuçlarla oldukça uyum göstermiştir.



- 2B ve 3B zemin derinliklerinde deneysel bulgular ve analitik çözümler birbiri ile uyum içinde değildir. Yani büyük derinliklerde her rölatif sıklık için analitik çözümler ile deneysel ölçümler arasında önemli farklılıklar belirlenmiştir. Taneli zeminler düşük normal gerilmeler altında düşük mukavemetli olduklarından, düşük yüzey yüklerinde dahi plastik davranmakta ve Elastisite Teorisinin sonuçlarından oldukça farklı sonuçlar gözlemlenmektedir. Özellikle düşük rölatif sıklıkta bu plastik davranış daha belirgin olmaktadır.
- Deneysel çalışmalarda rölatif sıklığın, düşey gerilme artışına etkisi araştırılmış ve kum zeminin sıklığı arttıkça aynı yük değerleri altında ve aynı derinliklerde gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Yani, rölatif sıklık zemindeki ilave gerilme artışlarının tespiti için önemli bir parametredir. Ancak; mevcut analitik çözümler (Boussinesq, Westergaard, yaklaşık yöntem) bu zemin parametresini dikkate almadığından gerçekçi sonuçlar elde etmemiz güçleşmektedir. Analitik yöntemler rölatif sıklıktan bağımsız olduğu için bu etkiyi göz önüne alamamaktadır.
- Granüler zeminler üzerine oturan yüzeysel temellerde rölatif sıklık arttıkça yüzey yüklerinin etkili olduğu derinliğin azaldığı belirlenmiştir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Bayram ATEŞ:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Erol ŞADOĞLU:** Deneysel sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemlerine katkı sunmuştur.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Das B.M., "Principles of Geotechnical Engineering", *Brooks Cole*, USA, (2001).
- [2] Boussinesq J., "Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre du Mouvement des Solides Élastiques", *Gauthier-Villars*, Paris, (1885).
- [3] 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).
- [4] Koegler D.P., Scheidig A., Baugrund ve Bauwerk, W., *Ernst und Shon*, Berlin, (1938).
- [5] Lei G.H., Sun H.S., Charles W.W. and Chiu C.F.L., "Vertical stress under vertical pressure by extended Mindlin's equation", *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2016).
- [6] Rui R., Han J., Zhang L., Zhai Y., Cheng Z. and Chen C., "Simplified method for estimating vertical stress-settlement responses of piled embankments on soft soils", *Computers and Geotechnics*, 119, 103365, (2020).
- [7] Sağlamer A., "Kohezyonsuz Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Zemin Parametreleri Cinsinden İfadesi", *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (1972).
- [8] Hanna A. ve Ghaly A., "Effects of K0 and Over consolidation on Uplift Capacity", *Journal of Geotechnical Engineering*, 118 (9), 1449-1469, (1992).
- [9] Jaky J., "Pressure in Soils", *Proc. 2nd Conf. On Soil Mech. and Found. Engrg.*, Netherlands, 1, 103-107, (1948).
- [10] Laman M. ve Keskin M.S., "Kumlu Zeminlerde Oturan Kare Temeller Altında Düşey Gerilme Analizi", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 431- 2004/3, 53-57, (2004).
- [11] Bağrıaçık B. ve Laman M., "Yüzeysel Temel Geometrisinin Zeminlerde Oluşan Gerilmelere Etkisinin Araştırılması", *Çukurova Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Adana, 1-2: 155-166, (2010).
- [12] Çiçek E., Güler, E. ve Yetimoğlu T., "Comparison of measured and theoretical pressure distribution below strip footings on sand soil", *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000347, 06014009, (2014).
- [13] Ateş B., "Kum Zemindeki Kazıklı Radye Temellerin Davranışlarının Deneysel ve Nümerik Yöntemlerle Araştırılması", *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, (2019).
- [14] ASTM D-6913, "Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 34, (2017).
- [15] ASTM D-854, "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 8, (2006).
- [16] ASTM D4253-16, "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [17] ASTM D4254-16, "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [18] ASTM D3080M-11, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
- [19] Newmark N.M. "Influence Charts for Computation of Stresses in Elastic Solids", *Univ. of Ill., Eng. Expt. Stn.*, 24(4): 33, (1942).
- [20] Uzuner B. A. "*Temel Zemin Mekanikliği*", 7. Baskı, Derya Kitabevi, Trabzon, (2007)