

# Kohezyonsuz Zeminde Temel Geometrisi Etkisinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizleri ile Karşılaştırılması

Mehmet Erkan EFE<sup>1\*</sup>, İlyas Devran ÇELİK<sup>2</sup>, Ercan Egemen BAŞAR<sup>3</sup>,

<sup>1\*</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-8198-9997), mefe3234@gmail.com

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9011-4041), idcelik@gmail.com

<sup>3</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-8175-6923), basarercan1@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 15.01.2024 ve Kabul Tarihi 30.01.2024)

(DOI: 10.35354/tbed.1420150)

**ATIF/REFERENCE:** Efe, M. E., Çelik, İ. D. & Başar E. E. (2024). Kohezyonsuz Zeminde Temel Geometrisi Etkisinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizleri ile Karşılaştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 14 (1), 31-43.

## Öz

Literatürde sıklıkla kullanılan analitik yöntemlerde bulunan formüllerin yeterli veya ekonomik olmamasından kaynaklanan alternatif metotlar arayışı ile son yıllarda yatak katsayıları ve sonlu elemanlar analizleri ile temel-zemin etkileşimi incelenmektedir. Özellikle sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çalışmalarda, çalışmaların model testler ile doğrulanması ve programlara girilen bünye modelleri, analizlerin daha gerçekçi sonuçlanması için önem arz etmektedir. Bu çalışmada %50 ve %85 olmak üzere iki farklı rölatif sıklıkta kohezyonsuz zeminde iki farklı temel geometrisinde doğrusal ve doğrusal olmayan bünye modellerince sekiz sonlu elemanlar analizi Ansys programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada sonuç olarak, aynı düşey yükleme koşullarında dairesel temelin kare temele göre daha fazla oturduğu ancak dairesel temelde gerilme dağılımının kare temele göre daha üniform olduğu belirlenmiştir. Doğrusal olmayan analizlerde çok sıkı zeminde performans halindeki temel-zemin etkileşiminin zemin matrisi davranışında daha gerçekçi sonuçlar sunması ile oturma farkları yüzdesel olarak doğrusal duruma göre daha az çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Temel-Zemin Etkileşimi, Sonlu Elemanlar Analizi, Temel Geometrisi, Doğrusal, Doğrusal Olmayan.

## Comparison of Effect of Foundation Geometry in Cohesionless Soil by Linear and Non-Linear Finite Element Analyses

### Abstract

In recent years, coefficient of soil reaction and finite element analysis have been used to examine foundation-soil interaction in search of alternative methods due to the fact that the formulas in analytical methods frequently used in the literature are not sufficient or economical. Especially in studies carried out with the finite element method, verification of the studies with model tests and constitutive models introduced in the programs are important for more realistic results of the analyses. In this study, eight finite element analyses were performed using the Ansys program for linear and non-linear constitutive models in two different foundation geometries on cohesionless soil with two different relative density of 50% and 85%. As a result of the study, it was determined that the circular foundation settled more than the square foundation under the same vertical loading conditions, but the stress distribution in the circular foundation was more uniform than the square foundation. In non-linear analyses, settlement differences were found to be less in percentage terms than in the linear case, as the foundation-soil interaction in performance condition on very dense soil provided more realistic results in soil matrix behaviour.

**Keywords:** Foundation-Soil Interaction, Finite Element Analysis, Foundation Geometry, Linear, Non-Linear.



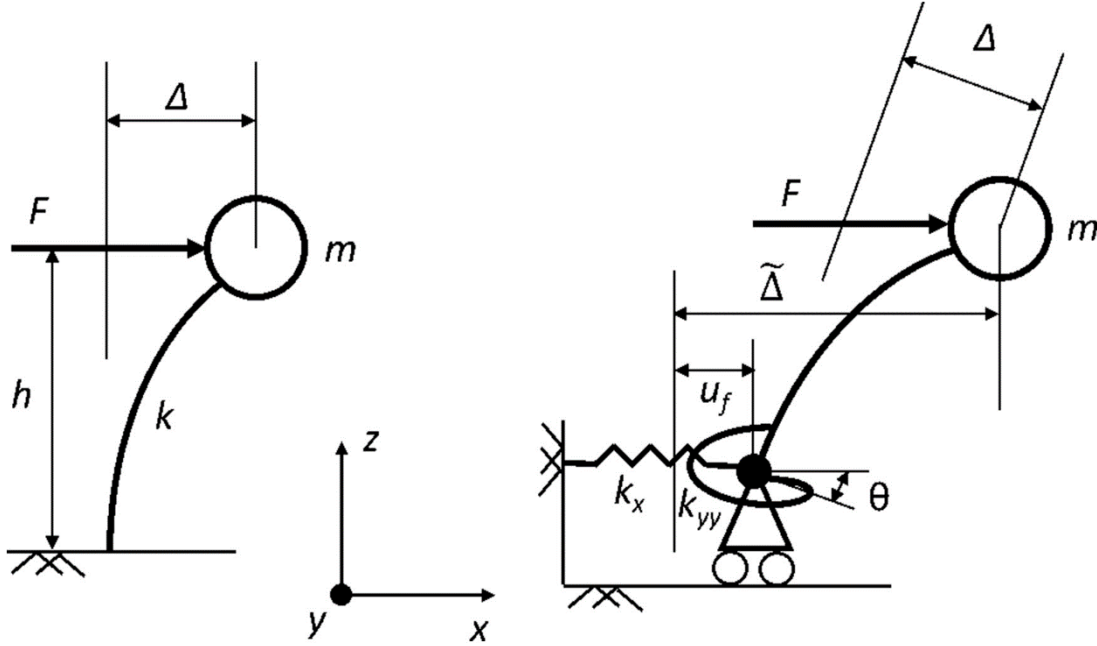
$F_{qs}, F_{qd}, F_{qi}$  :Derinlik Faktörü

$N_c, N_q, N_\gamma$  : Taşıma Kapasitesi Faktörleri

$F_{\gamma s}, F_{\gamma d}, F_{\gamma i}$  :Yük Eğimi Faktörü

Şekil 1’de yer alan geleneksel analitik yöntemle temel taşıma kapasitesi ile ilgili formüller literatürde sıkça yer almaktadır[13]. Ancak söz konusu yöntemin diğer sonlu elemanlar, sonlu farklar, yatak katsayısı v.b. yöntemlerle geliştirilmesi veya daha ekonomik ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi söz konusudur[13, 15].

Buna göre literatürde yapı-zemin etkileşimini inceleyen ve söz konusu geleneksel analitik yöntemleri gerek yay katsayıları gerekse sonlu elemanlar analizleri ile geliştirmeye çalışan araştırmacılar bulunmaktadır. Şekil 2’de temel üstyapı ve zemin etkileşim ilişkisinin şematığı yer almaktadır.



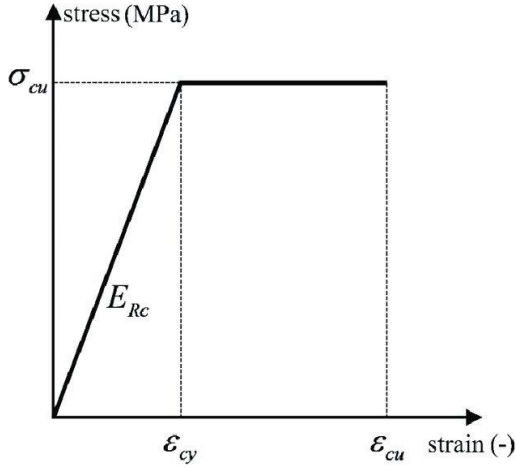
Şekil 2. Yapı-zemin sisteminin şematik gösterimi[3]

Niwa ve Clough[14], deprem yükü altında silo tipi yapıların burkulmasını incelemiş olup boy/çap oranlarına göre farklı hasar durumlarının meydana geldiğine değinmişlerdir. Ayrıca, tankların tamamen dolu durumda olduğuna ve deprem esnasında kaldırma hasar durumunun oluşumu için müsait bir durumda olduklarını belirtmişlerdir. Hasar meydana gelen tankların çoğunluğunda yırtılma meydana gelmediğini meydana gelen burkulma hasarlarının, tankların devrilme mekanizması kaynaklı aşırı aksenal gerilme yığılımları sebebiyle oluştuğunu düşünmektedirler. Ayrıca, hasar mekanizmasını doğrulayabilecek veriye sahip olmadıklarını da belirtmişlerdir. Deneysel bir çalışma ile deprem durumu için oluşturdukları fiziksel modelleri kullanarak zemin bağlantılarındaki rijitlik değişimi ile hasar durumlarını incelediler. İyileştirilmiş temellenme koşullarında, deprem koşulunda aynı tanklar üzerinde bazı hasar koşullarının engellendiğini tespit etmişlerdir. Deneysel analiz ile desteklenmekte olan sayısal analiz modelleri ile farklı tip modeller için daha tutarlı veya en azından doğruluğu savunulabilecek sonuçların elde edilebileceği düşünülebilir. Azevedo ve Garcia [2], 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ve eşdeğer radye yöntemlerini birleştirerek, kazıklı radye temellerin ön tasarım aşamasında bu sistemlerin davranışı için daha tahmin edilebilir bir sonuç üretecek nitelikte bir yöntem elde etmişlerdir. Ayrıca, eşdeğer radye yöntemi ile çözüm yapılan sistemlerin oturma değerlerinin sahada olandan daha yüksek çıktığını ancak bu hibrit yöntem ile daha hassas ve gerçekçi oturma değerlerinin

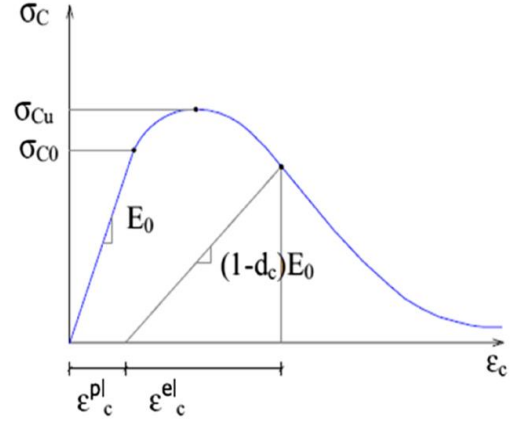
elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Kazıklar arası mesafe arttıkça, kazıklı radye temel ile zemin etkileşim bölgesinde, üstyapı yük transferi için zeminin temelden daha fazla verim alabildiğine değinmektedirler. Ayrıca, kritik radye derinliğinin kazık ucunun alt bölgesinde daha uzun bir mesafede oluştuğunu, sonuç olarak kazık yan ve uç taşıma kapasitesi açısından daha yüksek bir değerde olduğunu tespit etmişlerdir. Ateş ve Şadoğlu [1] yapmış oldukları model test çalışmasını sonlu elemanlar yöntemi ile doğrularak kazıklı radye temellerdeki temel dizayn parametrelerini incelemişlerdir. Buna göre radye temelin yük taşıma kapasitesine olan katkısının kazık aralıklarıyla doğrudan ilişkili olduğu ve bu durumun zemin sıklığından etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, aynı kazık dizilimi için kohezyonsuz sıkı zeminde gevşek zemine göre kritik radye derinliğinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Çiçek v.d. [7], kohezyonsuz zemin koşulu için temel altı basınç dağılımlarını model testler ile incelemişlerdir. Basınçölçerler ile sürekli temel altında ölçümler almışlardır. Teorik dağılım formülleri ile yaptıkları hesaplamaları model test sonuçları ile karşılaştırması sonucu basınç dağılımlarının düşük kotlarda verilerin örtüştüğü ancak daha derin olan durumlar veya nihai dayanım için teorik hesaplama formüllerinin yetersiz kaldığına değinmişlerdir. Bağrıaçık [5], çalışmasında kazıklı radye temelleri model test ve plaxis 3D programı ile analiz etmiş olup buna göre temellerin % 60 a varan mertebede kazıklara göre yükü karşıladığı sonucuna ulaşmıştır. Ek olarak, kazık uzunluğu arttıkça kazıkların daha fazla oranda

yük taşıdığı, ancak kazık uzunluğu bir öncekine göre %33 ten fazla artsa bile bu artışın temel yükünün % 6 dan fazlasını kazığa vermediği sonucunu belirtmiştir. El-Wakil ve Azzam [10], deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleri ile radye temel yapısı ve kazıkların yük paylaşımlarını tespit etmişlerdir. Üstyapı, radye, kazık ve zemin etkileşiminde sistem taşıma kapasitesinin üstyapı yüküne göre değiştiğine değinmişlerdir. Buna sebep olarak da radye temelin farklı oturma değerlerinde farklı yatak katsayısı değerlerinin oluşması gösterilmiştir. Yapmış oldukları model testler ve sayısal analizlerin sonuçlarında üstyapı yükünün radye temel ve kazıklar arasında yaklaşık 40% ve 60% dağıldığını

belirtmişlerdir. Small v.d. [17], sonlu elemanlar yöntemi ile farklı çap ve uzunluk değerlerine sahip kazıklar için analizler gerçekleştirmişlerdir. Temel üzerindeki düşey üstyapı yüklerinin etkilenmesi ve bu yükün kazıklar tarafından zemine aktarılması sürecinde yüklemenin etkilenme hızının sistem nihai yük taşıma kapasitesinde belirleyici olduğuna değinmişlerdir. Göreceli olarak hızlıca yapılan bir düşey yüklemenin temel sisteminde dönme ve farklı oturmalara sonuç verebileceği ve bu durumun özellikle üstyapıda meydana gelecek yanall ötelenmeleri azaltabileceğini belirtmişlerdir.



a) Doğrusal Yöntem



b) Doğrusal Olmayan Yöntem

Şekil 3. Doğrusal ve Doğrusal olmayan malzeme tanımlamasına örnek grafikler[11]

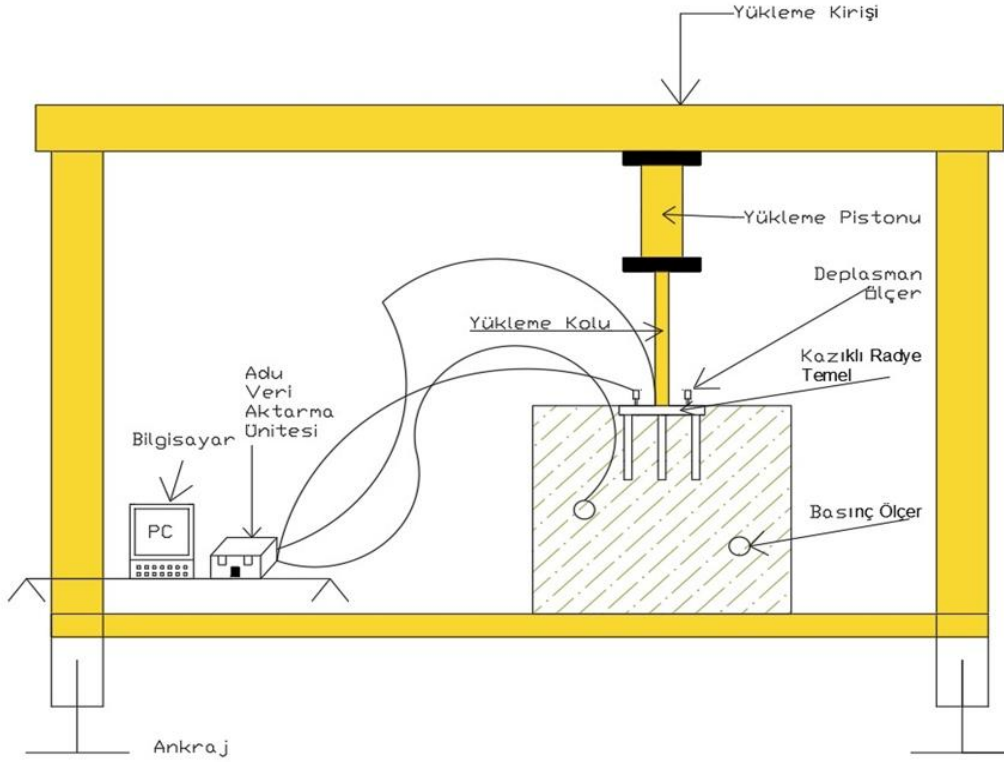
Şekil 3'te Doğrusal ve Doğrusal olmayan yöntemlerin malzeme tanımlamasına örnek gösterilmiştir [11], buna göre sonlu elemanlar programına doğrusal olarak tanımlanan zemin temel v.b. malzemelerin oturma, deformasyon, gerilme v.b. analizlerde doğrusal olmayan duruma göre daha az gerçekçi sonuçlarla karşılaştırılması söz konusudur.

Bu çalışmada, kohezyonsuz zeminde %50 ve %85 olmak üzere iki farklı sıklıkta ve aynı alana sahip kare ve dairesel olmak üzere iki farklı geometride, model deneylerden doğrulanan sekiz adet sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analizlerin dört tanesi Şekil 3a'da belirtildiği gibi doğrusal olarak diğer dört tanesi Şekil 3b'de belirtildiği gibi doğrusal olmayan bünye modeli ile sonlu elemanlar programına tanımlanarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, kohezyonsuz zeminde farklı sıklıkların ve farklı geometrideki temellerin davranışsal özellikleri doğrusal olan ve

doğrusal olmayan analizler ile değerlendirilmesi ve gerek model testlere gerekse performans halindeki saha koşullarına söz konusu sonlu elemanlar yönteminin uygunluğunu araştırmak amaçlanmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Ansys Workbench sonlu elemanlar programı ile analizler yapılabilmesi için, Başar vd.,[6], çalışmasında yer alan iki farklı sıklıktaki kohezyonsuz zemine ait indeks özellikleri, kesme kutusu deneyi sonuçları ile elde edilen zemine ait mukavemet özellikleri ve model test deney şematiği Şekil 3 ve Tablo 1,2,3'te yer almaktadır.



Şekil 4. Deney Düzenekinin Şematik Gösterimi[6]

Şekil 4'te yer alan deney düzenekinin şematik gösterimi yer almakta, buna göre istenilen sıklıkta yerleştirilen kum tankına radye temel veya kazıklı radye temel yerleştirildikten sonra yükleme başlatılarak yük hücresi sayesinde yük değeri, deplasman ölçer sayesinde oturma değeri basınç ölçer sayesinde zeminde oluşan basınç değerlerinin okumaları alınabilmektedir.

Tablo 1,2,3'te yer alan Zemin indeks özellikleri, piknometre, direct kesme kutusu, elek analizi, maksimum ve minimum boşluk oranı deneyi ve tüm bunlardan elde edilen tablo 2'de yer alan kayma modülü, elastisite v.b. zeminin her iki sıklıkta parametreleri elde edilmiş buna göre Ansys 3 boyutlu sonlu elemanlar programına Mohr Coulomb bünye modelince tanımlanabilen parametreler haline getirilmiştir.

Tablo 1. Elek Analizi Sonuçları[6]

Granülometri Parametreleri	Birim	Değer
Kaba Kum Yüzdesi	%	0
Orta Kum Yüzdesi	%	100
İnce Kum Yüzdesi	%	0
D <sub>10</sub>	mm	0.48
D <sub>30</sub>	mm	0.65
D <sub>60</sub>	mm	0.85
D <sub>50</sub>	mm	0.75
Üniformluk Katsayısı C <sub>u</sub>	-	1.77
Derecelenme Katsayısı C <sub>c</sub>	-	1.03
Zemin Sınıfı	-	SP

Tablo 2. Zemin İndeks Özellikleri[6]

Rölatif Sıklık Parametreleri	Birim	Değer
Dane Birim Hacim Ağırlığı	kN/m <sup>3</sup>	26.8
Maksimum Boşluk Oranı( $e_{maks}$ )	-	0.85
Minimum Boşluk Oranı( $e_{min}$ )	-	0.51
$\gamma_{kmaks}$	kN/m <sup>3</sup>	17.41
$\gamma_{kmin}$	kN/m <sup>3</sup>	14.21

Tablo 3. İki Farklı Sıklıkta Zemin Özellikleri[6]

	%85 Sıklık	%50 Sıklık
$\gamma_{kuru}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	15.8
E(kN/m <sup>2</sup> )	36010	21060
$\nu$	0.3	0.3
G(kN/m <sup>2</sup> )	13850	8100
$\phi$ (°)	42	38
c(kN/m <sup>2</sup> )	0	0

Bu çalışmada kullanılan kare ve dairesel olmak üzere aynı yüzey alanına sahip iki farklı geometrideki temellere ait malzeme özellikleri Tablo 4'te yer almaktadır.

Burada çalışmada kullanılan çelik malzeme özellikleri ve geometrik özellikleri yer almaktadır.

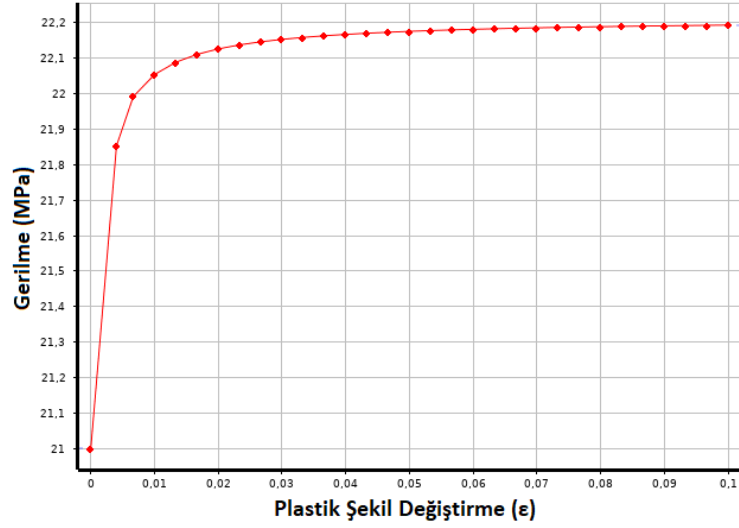
Tablo 4. Analizlerde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Malzeme Cinsi	Malzeme Niteliği	B(mm.)	L(mm.)	D(mm.)	$L_p$ (m m.)	$L_p / D$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E(kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
Çelik	Birinci Temel	120	120	-	-	77	$2 \cdot 10^8$	0.30	
	İkinci Temel(Dairesel)	136(Çap)	-	-	-	77	$2 \cdot 10^8$	0.30	

## 2.1. Model testin sonlu elemanlar ile doğrulanması

Çalışmada sayısal analizlerin yapılabilmesi için Şekil 4 ve Tablo 1, 2 ve 3'te Başar vd.[6], çalışmasında yer alan ve Tablo 5'te E1 olarak isimlendirilen model test analizinin öncelikle sonlu elemanlar yönteminde doğrulanması yapılmıştır. Bu sayede sonlu elemanlar ile oluşturulan modellerin sayısal analizleri için

deneysel altyapının doğruluğundan faydalanılması amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde zemin elemanının programa tanıtılması Solid element olarak Mohr-Coulomb bünye modeli kullanılarak yapılmıştır.

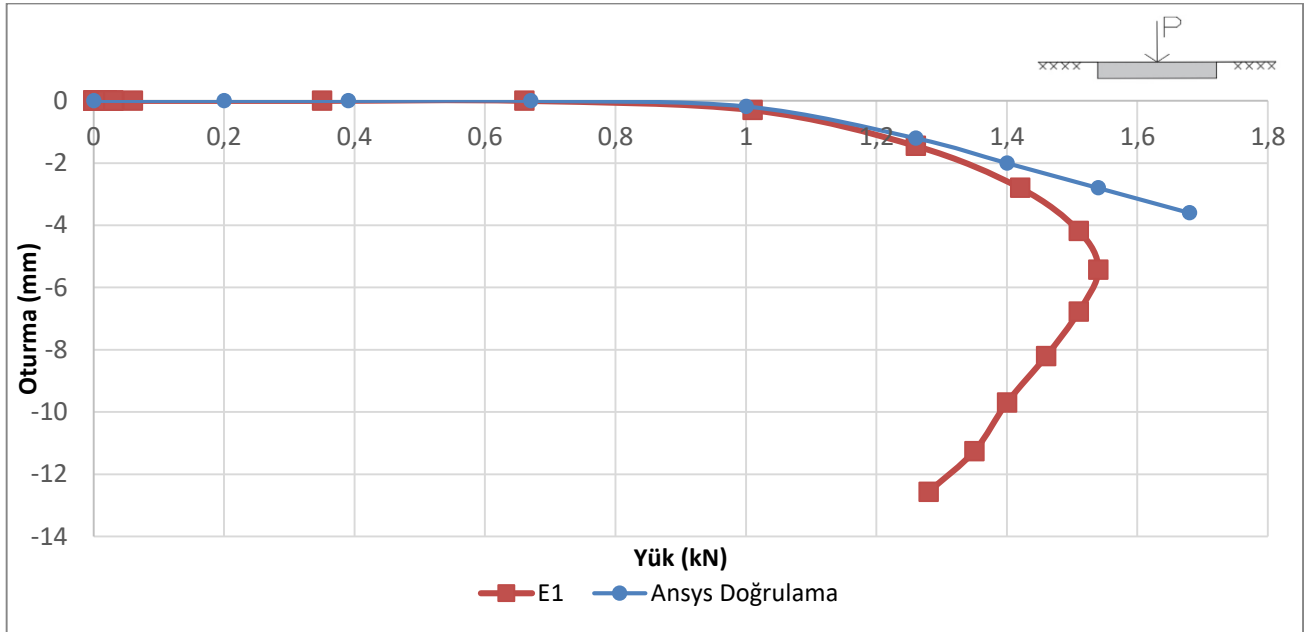


Şekil 5. Doğrusal olmayan analizlerde kullanılan gerilme-şekil değiştirme davranışı

Şekil 5'te çalışmada Doğrusal olmayan analizler için kullanılan gerilme-şekil değiştirme grafiği yer almaktadır. Doğrusal analizler için Şekil 3.a'daki gerilme-şekil değiştirme davranışı nümerik analizler için kullanılmıştır.

Çalışmada bahsedildiği gibi sonlu elemanlar ile yapılan analizlerin deney veya saha/vaka analizler ile örtüşmesi sonlu

elemanlar çalışmalarının hassasiyeti açısından önem arz etmektedir. Şekil 6'da E1 deneyinin model test yük-oturma eğrisi ile sonlu elemanlar analizinden elde edilmiş olan yük-oturma eğrisi sunulmuştur. Sonuçların yeterli miktarda örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 6. Yük-Oturma eğrilerinin nümerik analizler için doğrulaması

Çalışmada iki farklı sıklıkta iki farklı temel geometrisinde olan ve model test deneyleri ile doğrulanan Ansys sonlu elemanlar

analizlerine ait doğrusal ve doğrusal olmayan bünye modelleri ile tanımlanan test programı Tablo 5'te yer almaktadır[4].



Tablo 5. Analiz Programı

*G Orta Sıkı		Deney No	B(mm.)	L(mm.)
*S Sıkı Durum				
Doğrusal	G	E1	120	120
Doğrusal	G	E2	136(Çap)	-
Doğrusal	S	E3	120	120
Doğrusal	S	E4	136(Çap)	-
Doğrusal Olmayan	G	E5	120	120
Doğrusal Olmayan	G	E6	136(Çap)	-
Doğrusal Olmayan	S	E7	120	120
Doğrusal Olmayan	S	E8	136(Çap)	-

Bu çalışmada özellikle sonlu elemanlar programında modellenen doğrusal ve doğrusal olmayan temel-zemin etkileşimi

analizlerinin davranışsal farkları iki farklı sıklıkta öne çıkan özellikleri ile belirtilmesi amaçlanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Kohezyonsuz zeminde iki farklı rölatif sıklıkta(% 50 ve % 85 olmak üzere) iki farklı geometride aynı alana sahip kare ve dairesel temelin ansys 3D sonlu elemanlar programı ile doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere 8 farklı analizi yapılmıştır. Analiz programı Tablo 5'te gösterilmiştir. Çalışmada tüm

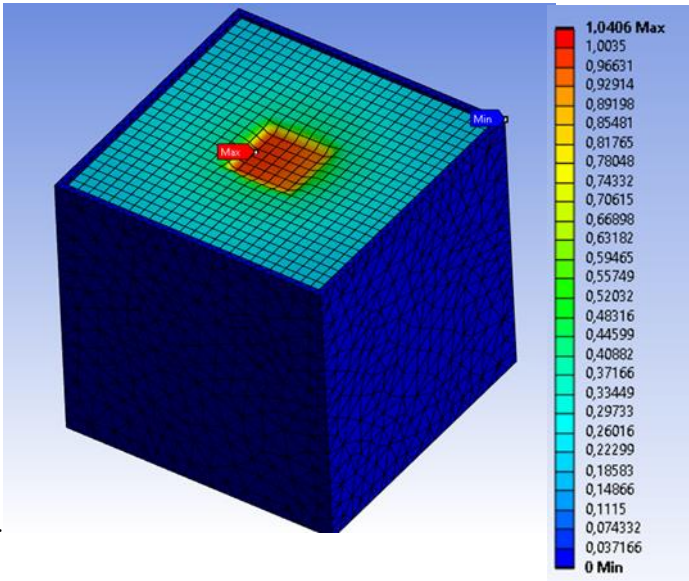
analizlerde 1.5 kN düşey yükleme altında kademeli artımsal olarak sonlu elemanlar programı Ansys'te uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına ait sunulan görsellerde temel oturması değerleri "mm" cinsinden, gerilme değerleri ise "MPa" cinsinden verilmiştir.

#### 3.1. Doğrusal Analizler

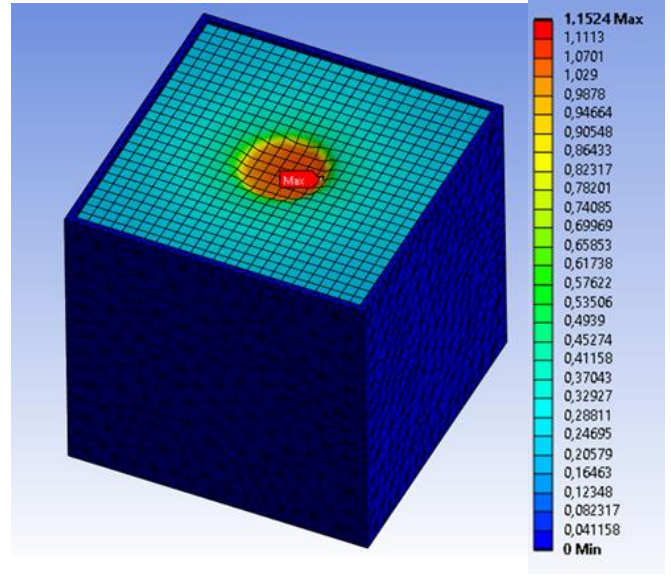
Bu çalışmada, doğrusal analizlerde uygulanan yöntemlerde başlangıç elastisite ve kayma değerine bağlı olarak program arayüzünde bulunan bünye modeline göre 1,5 kN düşey yönde statik artımsal yükleme uygulanarak oturma ve temel basınç

dağılımı görselleri Tablo 5'e uygun olarak yapılmıştır. Analizlerde elastik bölge Tablo 3'teki veriler kullanılarak tanımlanmıştır.

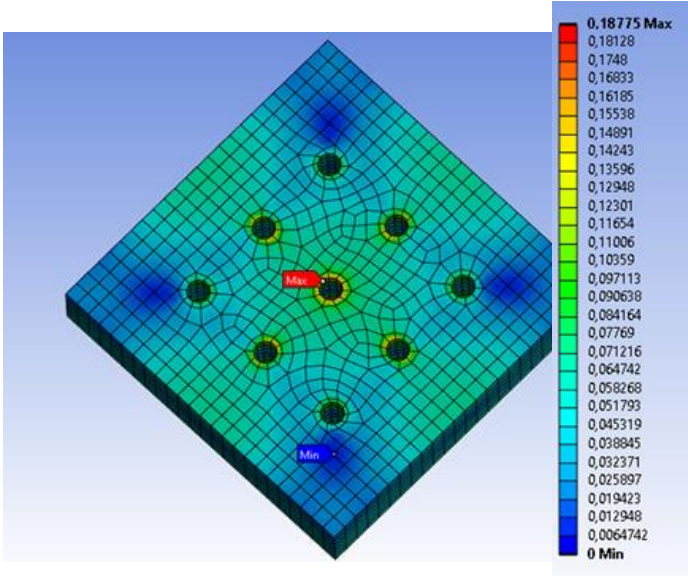




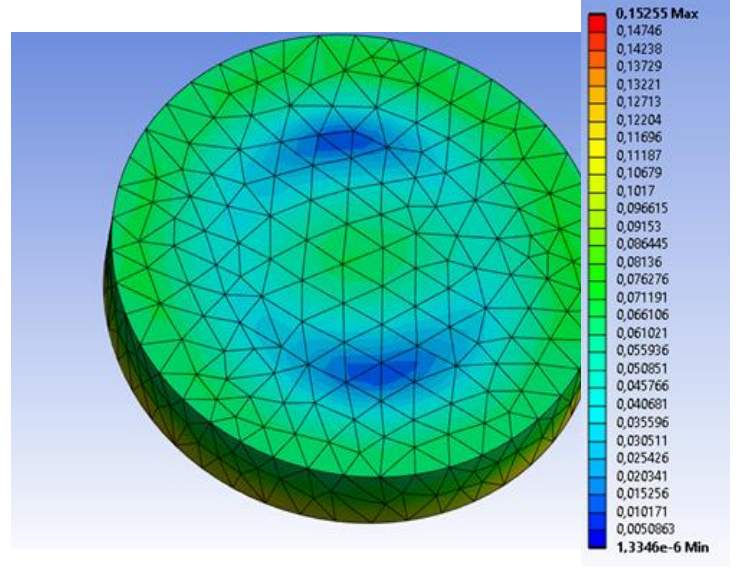
a)E1 Kare Temele Ait Oturma Görseli



b)E2 Dairesel Temele Ait Oturma Görseli



c)E1 Kare Temele Ait Basınç Görseli

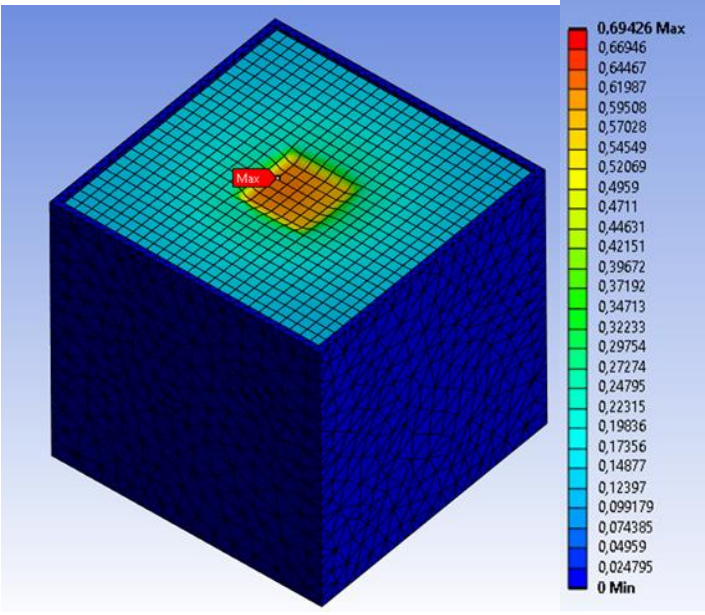


d)E2 Dairesel Temele Ait Basınç Görseli

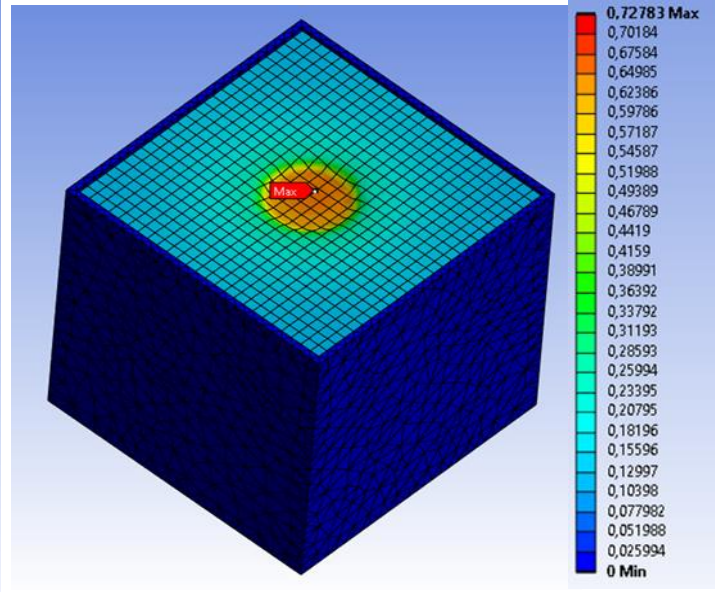
Şekil 7. % 50 Sıklıkta Kare ve Dairesel Temele Ait Doğrusal Analizleri

Şekil 7'de %50 sıklıkta kohezyonsuz zemin için doğrusal sayısal analiz sonuçları görülmektedir. Buna göre 1,5 kN düşey yük mertebesinde oturma değeri aynı alanlara sahip silindirik temelde daha yüksek çıkmıştır. Temel geometrisi yük oturma davranışını etkilemektedir. Buna göre, zemin gerilmesi silindirik

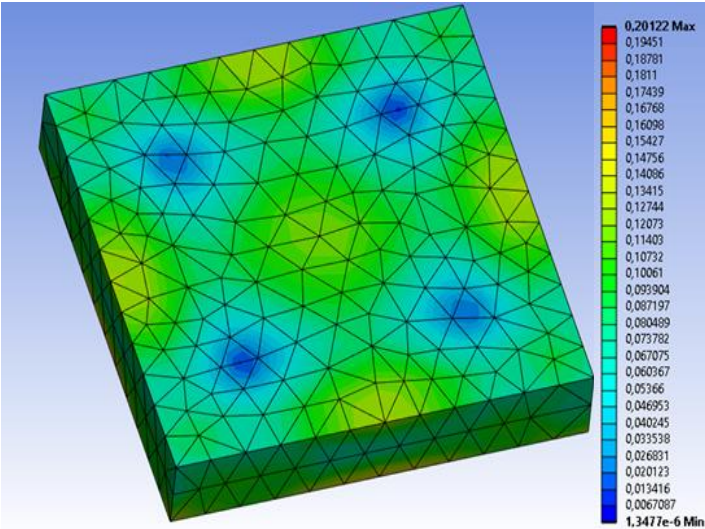
temelde daha düşük çıkmış ve yüksek gerilmeler kare temelin aksine daha üniform dağılmıştır[9]. Temel tasarımı yapılırken, üniform dağılımla temel gerilmeleri donatı ihtiyacı açısından üniform olmayana göre daha ekonomik olması söz konusudur.



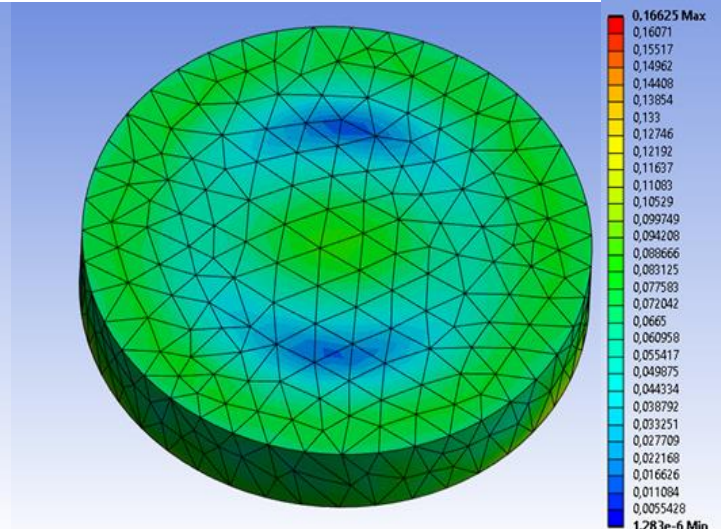
a)E3 Kare Temele Ait Oturma Görseli



b)E4 Dairesel Temele Ait Oturma Görseli



c)E3 Kare Temele Ait Basınç Görseli



d)E4 Dairesel Temele Ait Basınç Görseli

**Şekil 8.** % 85 Sıklıkta Kare ve Dairesel Temele Ait Doğrusal Analizleri

Şekil 8'de kohezyonsuz zeminde %85 sıklıkta kare ve dairesel temelin 1,5 kN düşey yük mertebesinde doğrusal sayısal analiz sonuçları ile oturma değerleri ve zemin gerilmeleri görülmektedir. Buna göre, daha düşük sıklıktaki davranışa benzer şekilde silindirik temelde daha yüksek oturma değerleri çıkmıştır. Ancak, oturma değerlerindeki fark yüzdesel olarak dairesel ve kare temel için dairesel temelde %5 daha yüksek

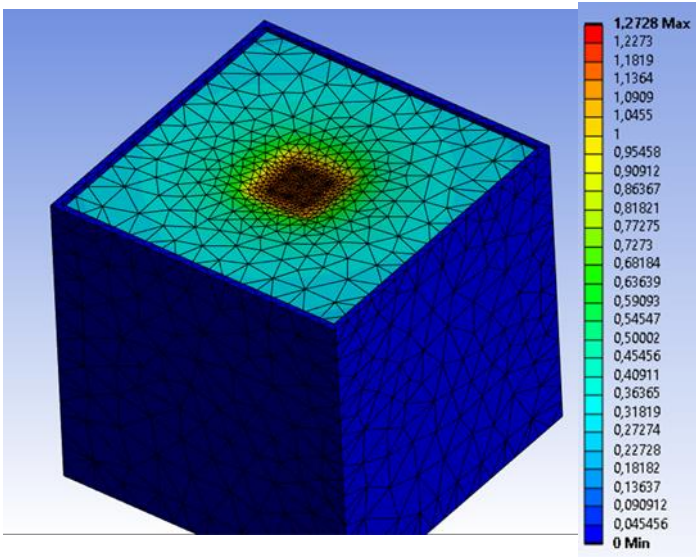
çıkılmaktadır. Daha düşük sıklık için bu fark %11 değerindedir. Buna göre, zemin matrisinde boşluk oranı arttıkça temel geometrisinin zemin matrisi davranışını daha çok etkilemektedir, diğer bir deyişle temel ve zemin etkileşimi kompozit bir malzeme olarak düşünüldükçe bu kompozit yapı boşluk oranının fazla olması durumunda söz konusu zemin haricindeki yapı elemanlarının daha fazla tesiri altında kalmaktadır.

### 3.2. Doğrusal Olmayan Analizler

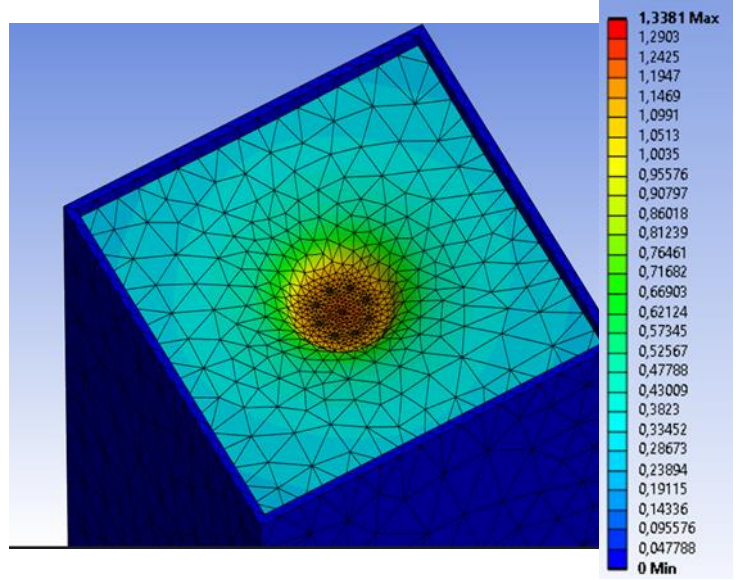
Bu çalışmada, doğrusal olmayan analizlerde uygulanan yöntemlerde başlangıç elastisite modülünden sonra zemin-temel etkileşiminin elastik ötesi davranışa bağlı olarak program arayüzünde bulunan bünye modeline göre 1,5 kN düşey yönde

statik artımsal yükleme uygulanarak oturma ve temel basınç dağılımı görselleri Tablo 5'e uygun olarak yapılmıştır. Analizlerde elastik ötesi bölge Şekil 5'te sunulduğu şekilde Ansys programına tanıtılmıştır.

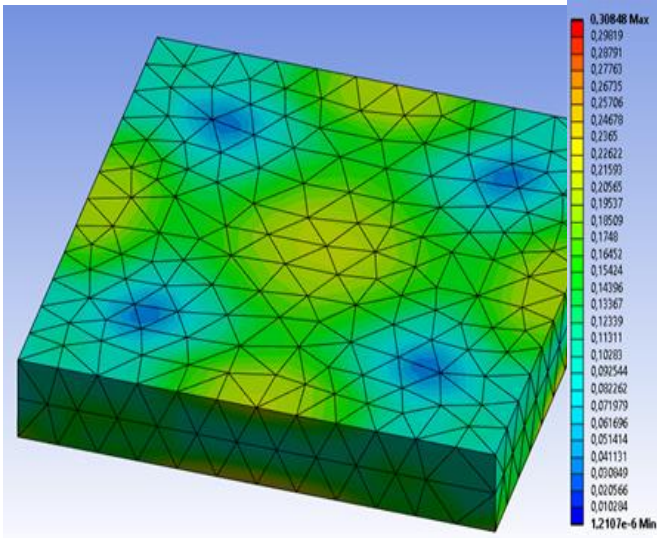




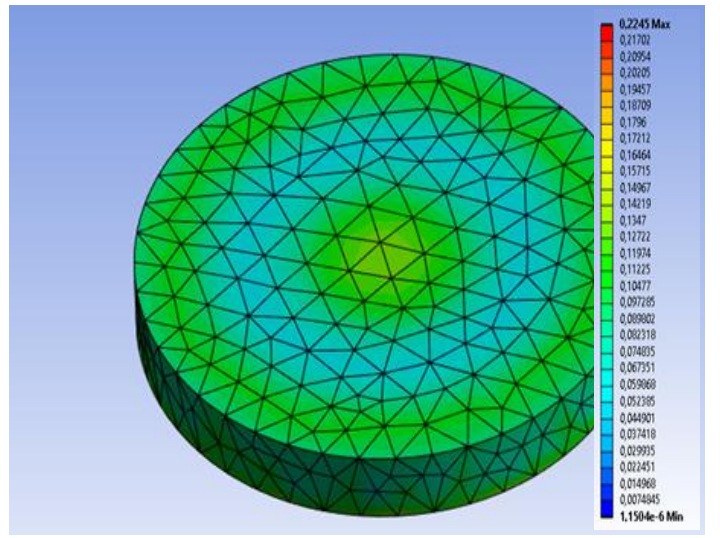
a)E5 Kare Temele Ait Oturma Görself



b)E6 Dairesel Temele Ait Oturma Görself



c)E5 Kare Temele Ait Basınc Görself

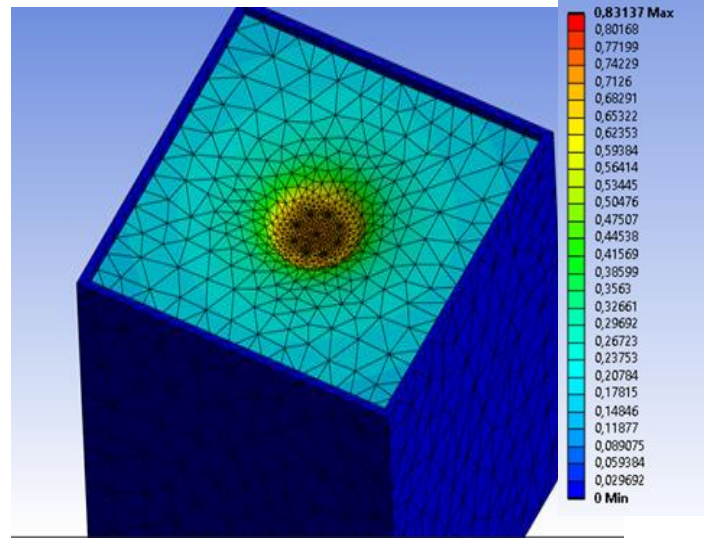
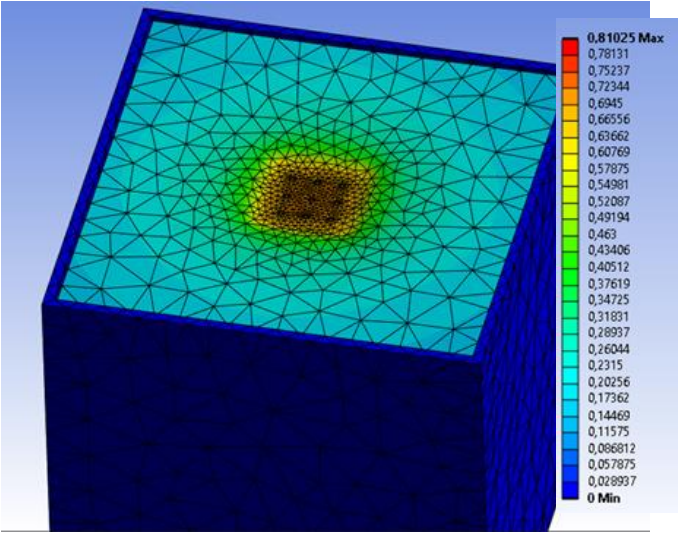


d)E6 Dairesel Temele Ait Basınc Görself

Şekil 9. % 85 Sıklıkta Kare ve Dairesel Temele Ait Doğrusal Analizleri

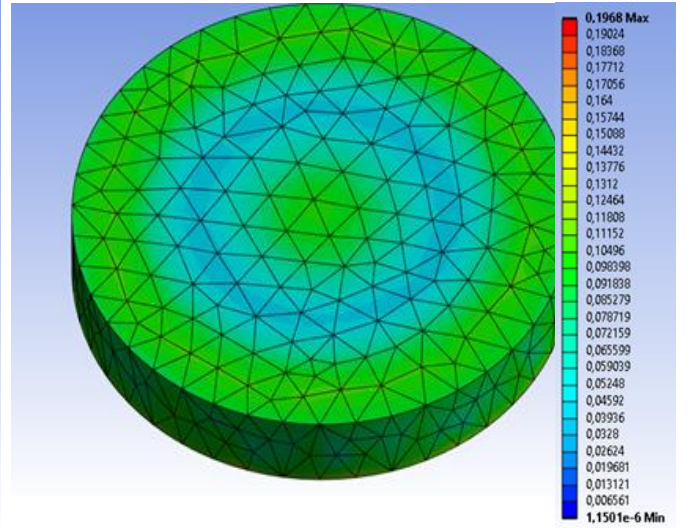
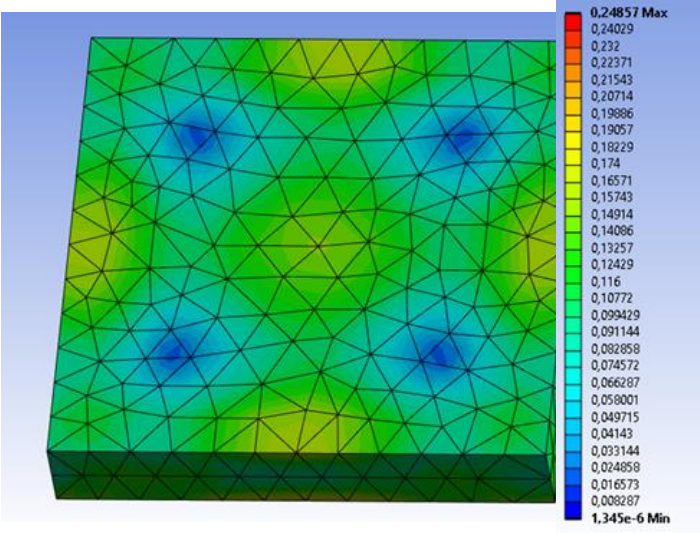
Şekil 9'da kohezyonsuz zeminde %50 sıklıkta 1,5 kN düşey yük mertebesinde doğrusal olmayan analizlere ait kare ve silindirik temelin oturma ve zemin gerilmesi davranışı görülmektedir. Burada silindir temelin, doğrusal davranışa benzer bir şekilde oturma değeri daha yüksek çıkmıştır. Silindir temel ile kare temel arasındaki oturma değerlerinin yüzdesel farkı % 5 olarak sonuçlanmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde Şekil 9'da belirtilen gerilme-şekil değıştirme davranışlarında başlangıç elastisite modülü zeminin göçmeye yakın elastisite modülü arasında her gerilme kademesinde doğrusal davranışa göre deformasyonun daha yüksek çıkması sebebi ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizler arasında doğrusal olmayan daha

düşük çıkmakta söz konusu temel geometrisinden daha az etkilenmektedir. Diğer yandan doğrusal olmayan analizde doğrusal olana göre her iki temel geometrisinde temel gerilmeleri daha uniform dağılmıştır. Ancak, silindir temel ile kare temel gerilmeleri kıyaslandığında zemin göçme davranışına bağlı olarak dairesel temelin merkezinde doğrusal duruma göre gerilmeler yoğunlaşmıştır. Söz konusu analizlerin veya gerek zemin için gerek yapı elemanları için sonlu elemanlar programına tanıtılan bünye modellerinin doğrusal olmayan veya bu davranışın literatürde günden güne gelişsel modelleri ile analizler yapmak daha gerçekçi sonuçlanmaktadır.



E7 Kare Temele Ait Oturma Görseli

E8 Dairesel Temele Ait Oturma Görseli



E7 Kare Temele Ait Basınç Görseli

E8 Dairesel Temele Ait Basınç Görseli

Şekil 10. % 85 Sıklıkta Kare ve Dairesel Temele Ait Doğrusal Olmayan Analizleri

Şekil 10'da kohezyonsuz zeminde %85 sıklıkta kare ve dairesel temele ait Doğrusal olmayan temel oturma ve zemin gerilme davranışları görülmektedir. Buna göre, daha düşük sıklıkların aksine doğrusal olmayan analizde temel oturması değerleri doğrusal analize göre daha yüksek çıkmıştır. Diğer yandan, doğrusal olmayan analizlerde daha sıkı zeminde oturma değeri yüzdesel olarak kare ve silindir geometriler için %3 çıkmıştır. Doğrusal analizlerde ise bu fark %5 olarak daha yüksek sonuçlanmıştır. Diğer bir deyişle performans halindeki ve söz

konusu performansın düşey yüklemde kademeli olarak 1,5 kN olarak etkilendiği bu çalışmada doğrusal olmayan analizlerde performans halindeki zemin matrisinde boşluk oranları yüklem mertebesi arttıkça kapanacağından bu fark davranışsal olarak daha doğru sonuçlanmakta ve daha düşük çıkmaktadır. Kompozit davranışta zemin matrisi arasına sızabilen yapı elemanları performans halinde iken boşluk oranları sıkı zeminde daha hızlı kapanacağından gerek temel geometrisinden etkilenme durumu gerekse zemin sıklığı farkından etkilenme durumu azalmaktadır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada kohezyonsuz zeminde model testler ile doğrudan Ansys 3D sonlu elemanlar programı ile iki farklı sıklıkta, %50 ve %85 olmak üzere, aynı alana sahip iki farklı

temel geometrisi, kare ve dairesel, için sekiz adet sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Buna göre sonuçlar şu şekildedir;

Orta sıkı ve çok sıkı durumda dairesel temel kare temele göre, düşey yüklemeye karşı daha fazla oturma almaktadır. Ancak daha



sıkı zemin durumunda bu oturma farkı yüzdesel olarak daha düşük sonuçlanmaktadır. Diğer bir deyişle, çok sıkı zeminin matrisindeki boşluk, orta sıkı zemin durumuna göre daha az olduğundan temel geometrisi veya temel malzemesi bu matrise daha az sızmaktadır.

Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerde dairesel temelde, temel gerilmeleri daha uniform olarak dağılma davranışı göstermiş buna göre temel gerilmelerine bağlı olarak donatılardırma durumu temel geometrisine bağlı olarak daha ekonomik sonuçlanabilmektedir.

## Kaynakça

- [1]Ateş, B., Şadoglu, E., (2021), Kum Zeminlerdeki Kazıklı Radye Temellerin Optimum Kazık Aralığının Deneysel Olarak İncelenmesi. Teknik Dergi, 10.18400/tekderg.644885,.
- [2]Azevedo, G., Garcia, J. (2021),. Evaluation Of The Behaviour Of Piled Foundations For Different Spacings Using Analytical And Hybrid Methods İn FEM-2D, International Journal of Geotechnical Engineering, 1-15. 10.1080,19386362.2021.1968622.
- [3]Anand, V., Kumar, S.R.S., (2018). Seismic Soil Structure Interaction: A State of the Art Review, Structures, (16): 317-326
- [4]ANSYS (2023) Inc, APDL Programmer's Guide, SAS IP,
- [5]Bağrıçık, B. (2015). Kohezyonsuz Zeminlerde Düşey Yüklü Kazıklı Radye Temellerin Analizi, Çukurova Üniversitesi Doktora Tezi.
- [6]Başar, E. E., Çelik, İ. D., Fındık, M., Uzundurukan, S. (2023). Kohezyonsuz Zeminde Kazık Aralığının Belirlenmesi ve Temel Davranışının Deneysel İncelenmesi. Turkish Journal of Civil Engineering, 34(2), 145-172. <https://doi.org/10.18400/tjce.1244594>
- [7]Çicek, E., Guler, E., Yetimoglu, T. (2014). Comparison of Measured and Theoretical Pressure Distribution below Strip Footings on Sand Soil, International Journal of Geomechanics. 14. 06014009. 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000347.
- [8]Coduto, D., Kitch, W., Yeung, M., (2015). Foundation Design Principles and Practices, Third Edition, Pearson Publication.
- Literatürde analitik yöntemler ile başlayan temel taşıma kapasitesi ve davranışı günden güne yay katsayıları, sonlu elemanlar yöntemi vb. metotlarla gelişmektedir. Söz konusu bu gelişim özellikle sonlu elemanlar yönteminde zemin veya temel davranışına bağlı olarak bünye modellerince doğrusal olmayan durum için geliştirilmesi ile daha gerçekçi analiz verileri ve yapı-zemin davranışları ortaya çıkmaktadır. Söz konusu kompozit davranış yalnızca zemin gerilmesi veya temel gerilmesine bağlı değil zemin ve temelin deformasyonsal analiz değerlerine bağlı olarak doğrusal olmayan durum için daha gerçekçi sonuçlanmaktadır.
- [9]Efe, M.,E., Çelik İ.,D., Başar, E.,E., (2024), Kohezyonsuz Zeminde Temel Geometrisinin Yük-Oturma Davranışına Etkisi, 12. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık Ve Tasarım Kongresi
- [10]Elwakil, A., Azzam, W., (2015). Experimental And Numerical Study Of Piled Raft System, Alexandria Engineering Journal, 55. 10.1016/j.aej.2015.10.001.
- [11]Emin, H., Amjad, A.,h., (2019), Effect of soil properties on the seismic damage assessment of historical masonry minaret-soil interaction systems, Wiley Journal.
- [12]Limkar SD, Kalyanshetti MG, Halkude SA (2005) Analysis of raft foundation using finite element approach. Int J Latest Trends Eng Technol 8(3):014–028
- [13]Mahmood, M., R., Abbas, M., M., Mahmood, M., M., (2021), Linear and Nonlinear 3D Finite Element Analysis for Mat Foundations.
- [14]Niwa, A., Clough, R.W., (1982). Buckling Of Cylindrical Liquid-Storage Tanks Under Earthquake Loading. Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 10, 107-122.
- [15]Potts, D., M., Zdravkovic, L. (1999). Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Theory, Thomas Telford, Heron Quay, London.
- [16]Rashed YF (2005) A boundary/domain element method for analysis of building raft foundations. Eng Anal Boundary Elem 29(9):859–877
- [17]Small, J., Zhang, H., Chow, H., (2016), Behaviour of Piled Rafts with Piles of Different Lengths and Diameters, Geotechnical Conference, University of Sydney, Pp.124-131.