



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KOHEZYONLU ZEMİNLERE OTURAN  
YÜZEYSEL TEMELLERİN SAYISAL  
YÖNTEMLERLE ANALİZİ**

**Abdifatah Dahir MOHAMUD**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Temmuz-2025  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Abdifatah Dahir MOHAMUD tarafından hazırlanan “KOHEZYONLU ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL TEMELLERİN SAYISAL YÖNTEMLERLE ANALİZİ” adlı tez çalışması 17/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Dr. Öğretim Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN .....

#### Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Yavuz YENGİNAR .....

#### Üye

Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 27/06/2025 gün ve 2025/24-15 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Abdifatah Dahir MOHAMUD

Tarih: 17/07/2025

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### KOHEZYONLU ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL TEMELLERİN SAYISAL YÖNTEMLERLE ANALİZİ

**Abdıfatah Dahır MOHAMUD**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğretim Üyesi YAVUZ YENGİNAR**

**2025, 241 Sayfa**

**Jüri**

**Dr. Öğretim Üyesi YAVUZ YENGİNAR**

**Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI**

**Dr. Öğretim Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN**

Tez çalışması kapsamında, kohezyonlu zeminler üzerindeki sıg temellerin oturma davranışı sayısal ve analitik yaklaşımlar kullanılarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmada, yapısal gerilme ( $q_0$ ), temel genişliği (B), temel uzunluğunun genişliğine oranı (L/B), temel derinliği ( $D_f$ ), yeraltı su seviyesi ( $D_{su}$ ) ve zemin türü (yumuşak kil ve sert kil) gibi kritik parametreler dikkate alınmıştır ve Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak toplam 42 farklı durum senaryosu geliştirilmiştir. Analitik hesaplamalar ile temel zemindeki ani, konsolidasyon ve toplam oturma değerleri hesaplanmıştır. Detaylı sonlu eleman modellemesi PLAXIS 3D'de gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde, temel kazısı sırasındaki kabarma, yapısal yükleme sonundaki ani oturma ve %90 konsolidasyon aşamasındaki toplam oturmalar, boşluk suyu basıncı değişimleri, yapısal gerilme ile oturma etki derinlikleri ve radye temelde oluşan moment etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, girdi değişkenlerinin önemini değerlendirmek ve farklı oturma aşamaları için regresyon tabanlı tahmin modelleri geliştirmek için Yanıt Yüzey Yöntemi ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak istatistiksel modelleme yapılmıştır.

Yumuşak kil üzerine yerleştirilen sıg temeller hem yapısal yükleme hem de konsolidasyon aşamalarında sert kile kıyasla önemli ölçüde daha büyük oturma büyüklükleri sergilemektedirler. Sayısal analizlerde efektif gerilmelerin ve boşluk suyu basınçlarının zamanla ve derinlikle değişimleri killi zeminin oturma davranışını açık bir şekilde göstermiştir. Genellikle oturma etki derinliği, yapı gerilmesi etki derinliğinden ortalama %40 daha büyük belirlenmiştir. Bu durum, kil katmanındaki efektif gerilmeler değişmese bile zamana bağlı oturmaların devam ettiğini göstermektedir (düşük geçirimsizlik ve artık boşluk suyu basıncı dengelenmesi).

Killi zeminlerin zamana bağlı konsolidasyon davranışı önemli olmakla birlikte hem analitik hesaplama hem de sayısal analiz sonuçları toplam oturmaların büyük kısmının yapısal yükleme aşamasında (%40-100, ortalama %75) olduğunu göstermektedir. Analitik yöntemde, net taban basıncının ( $q_{net}=q_0-\gamma_n D_f$ ) sıfır veya negatif

olduğu durumlarda konsolidasyon oturması olmazken, sayısal analizlerde konsolidasyon oturması görülmüştür. Bu nedenle analitik hesaplamalarda, özellikle yumuşak killerde, kazı derinliğinin fazla olduğu ( $q_{net}<0$  ve  $\gamma_n D_f/q_0>0.7$ ) durumlarda net taban basıncı yerine yapı yükünün belli bir bölümü alınması tavsiye edilmektedir.

Analitik yöntemde, elastik oturma üzerinde en etkili parametreler  $q_0$ , B ve elastisite modülü (E) iken sayısal analizlerde bunlara ilave olarak etki derinliği ve temel kazısı sırasındaki kabarma-yeniden yükleme olaylarının etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sayısal analizlerde elastik oturma  $D_f<3m$  iken analitik hesaplardan büyük,  $D_f>3m$  iken ise daha küçük elde edilmiştir. Çünkü,  $D_f>3m$  iken temel kazısı sırasındaki kabarma miktarı elastik oturmanın %35'inden daha büyük olmaktadır.

Temel kazısı sırasında, yumuşak killerde 191.5mm'ye kadar (ortalama 61.2mm), sert killerde ise 28.1mm'ye kadar (ortalama 12.3mm) kabarma gözlenmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen önemli bir bulgu temel zeminindeki kabarmanın yapısal gerilmenin uygulanmasından sonra da devam edebileceğini göstermiştir. Derin kazının yapıldığı fakat yapı yüklerinin nispeten az olduğu durumlarda ( $\gamma_n D_f/q_0>1.5-2$ ) yapısal gerilme aşamasında oturma gözlenirken, zamanla bu olay kabarmaya dönmüştür. Bu olaydaki kabarma miktarı çalışmadaki yapı-temel-zemin özelliklerine bağlı olarak en fazla 5-6mm olmasına rağmen, başka vakalar için zemin profilindeki kil mineralojisine göre daha yüksek değerlere ulaşma ihtimali göz ardı edilmemelidir.

Analitik ve sayısal yöntemlerle temel zeminindeki düşey deformasyon değerlerini tahmin etmek için istatistiki çalışmalar yürütülmüş ve yüksek regresyon katsayılarına sahip denklemler üretilmiştir. Genel olarak, düşey deformasyonlar üzerinde yapısal gerilme ( $q_0$ ), temel genişliği (B) ve kazı derinliği ( $D_f$ ) en etkili parametreler olarak belirlenirken, etkileşim parametrelerinin (örneğin,  $q_0 \times B$ ,  $q_0 \times D_f$ ,  $B^2$ ,  $(L/B)^2$ ) modellerde yer alması yapı-zemin etkileşiminin doğrusal olmayan davranışını benzetmeye olanak tanımıştır.

**Anahtar Kelimeler:** elastik oturma, konsolidasyon, kohezyonlu zemin, sonlu elemanlar yöntemi, pekleşen zemin modeli, radye temel, zemin-yapı etkileşimi.

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **ANALYSIS OF SHALLOW FOUNDATIONS ON COHESIVE SOILS USING NUMERICAL METHODS**

**Abdifatah Dahir MOHAMUD**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN CIVIL ENGINEERING**

**Advisor: Asst. Prof. Yavuz YENGİNAR**

**2025, 241 Pages**

#### **Jury**

**Asst. Prof. Yavuz YENGİNAR**

**Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI**

**Asst. Prof. İbrahim Hakkı ERKAN**

In this thesis, the settlement behavior of shallow foundations on cohesive soils was comprehensively analyzed using both numerical and analytical approaches. Critical parameters such as structural stress ( $q_0$ ), foundation width ( $B$ ), aspect ratio ( $L/B$ ), foundation depth ( $D_f$ ), groundwater level ( $D_w$ ), and soil type (soft clay and stiff clay) were considered. A total of 42 different scenario combinations were developed using the Response Surface Methodology (RSM). Analytical calculations were conducted to determine immediate, consolidation, and total settlement values in the foundation soil. Detailed finite element modeling was carried out using PLAXIS 3D. In the numerical analyses, settlements during excavation-induced heave, structural loading, and 90% consolidation phases, changes in pore water pressures, stress-influenced settlement depths, and bending moments in the raft foundation were examined. Furthermore, statistical modeling was performed using RSM and analysis of variance (ANOVA) to assess the significance of input variables and to develop regression-based prediction models for different stages of settlement.

Shallow foundations placed on soft clay exhibited significantly higher settlements during both the structural loading and consolidation phases compared to those on stiff clay. The changes in effective stresses and pore water pressures over time and with depth clearly demonstrated the settlement behavior of cohesive soils. Typically, the depth of settlement influence was found to be on average 40% greater than the depth of structural stress influence. This indicates that time-dependent settlements continue even when effective stresses in the clay layer remain unchanged—mainly due to low permeability and delayed dissipation of excess pore water pressure.

Although the time-dependent consolidation behavior of clayey soils is notable, both analytical and numerical results showed that the majority of the total settlements occurred during the structural loading phase (ranging from 40% to 100%, with an average of 75%). In analytical calculations, no consolidation settlement was observed when the net foundation pressure ( $q_{net}=q_0-\gamma_n D_f$ ) was zero or negative. However, in numerical analyses, consolidation settlements were still observed. Therefore, in analytical calculations, especially in soft soils, where the excavation depth is excessive ( $q_{net}<0$  and  $\gamma_n D_f/q_0>0.7$ ), it is recommended to use a certain portion of the structure load instead of the net base pressure.

In the analytical method, the most effective parameters on elastic settlement are  $q_0$ ,  $B$ , and the elastic modulus ( $E$ ), while numerical analyses have shown that the depth of influence and the heave-reloading phenomena during foundation excavation also play a significant role. In numerical analyses, elastic settlement is larger than analytical calculations when  $D_f<3\text{m}$  and smaller when  $D_f>3\text{m}$ . This is because, when  $D_f>3\text{m}$ , the amount of heave during foundation excavation exceeds 35% of the elastic settlement.

During excavation, heave values up to 191.5 mm (average: 61.2 mm) were observed in soft clays and up to 28.1 mm (average: 12.3 mm) in stiff clays. A key finding from the numerical analyses was that heaving in the foundation soil may continue even after the application of structural loads. In cases where deep excavation was performed but structural loads were relatively low ( $\gamma_n D_f/q_0>1.5-2$ ), settlements were initially observed during the loading phase but later transitioned into heave over time. Although the maximum heave in these scenarios was limited to 5–6 mm depending on the specific structure–foundation–soil properties studied, higher values may occur in other cases depending on the clay mineralogy in the soil profile and should not be overlooked.

Statistical analyses were conducted to predict vertical deformation values in the foundation soil using both analytical and numerical methods, and regression equations with high correlation coefficients were developed. In general, structural stress ( $q_0$ ), foundation width ( $B$ ), and excavation depth ( $D_f$ ) were identified as the most influential parameters on vertical deformations. The inclusion of interaction terms (e.g.,  $q_0\times B$ ,  $q_0\times D_f$ ,  $B^2$ ,  $(L/B)^2$ ) in the models enabled the representation of the nonlinear behavior of the structure–soil interaction.

**Keywords:** clayey soil, elastic settlement, consolidation, Hardening Soil model, numerical modelling, raft foundation, soil-structure interaction

## ÖNSÖZ

Bu tez, Necmettin Erbakan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans programı kapsamında, Geoteknik Anabilim Dalı'nda sunulmak üzere hazırlanmıştır. Çalışma, kohezyonlu zeminler üzerine oturan sığ temellerin oturma davranışını; analitik, sayısal ve istatistiksel yaklaşımların bir araya getirilmesiyle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu süreçte, klasik teorik yöntemlerle modern sayısal araçlar olan PLAXIS 3D ve Design-Expert yazılımları arasında bir köprü kurarak; yumuşak ve sert kil zemin koşullarında temel davranışına dair kapsamlı bir bakış açısı sunulmuştur.

Bu araştırma, akademik bilgimi artırmakla kalmamış, aynı zamanda zemin-yapı etkileşimi, sonlu elemanlar modellemesi ve tasarım optimizasyonu konularında pratik bilgimi de derinleştirmiştir. Edindiğim bu yetkinlikleri, ülkeme döndüğümde gerçek mühendislik problemlerine çözüm üretmek için kullanmayı umuyorum. Bu yolculukta bana destek olan, teşvikleri, iş birliği ve paylaştıkları bilgiyle katkı sunan tüm arkadaşlarıma, akademisyenlerime ve geoteknik laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Yenginar'a, akademik rehberliği ve sürekli desteğiyle bu çalışmanın şekillenmesindeki katkılarından dolayı içten teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, beni Konya Zemin Laboratuvarı ile tanıştıran ve teknik bilgisi, PLAXIS 3D yazılımı ve diğer geoteknik kaynaklarla çalışmama büyük katkı sağlayan Prof. Dr. Adnan Özdemir'e özel olarak teşekkür ederim.

Konya Zemin Laboratuvarı'nda görev yapan laboratuvar teknikeri Özcan Gençay'a, daha önce hiç deneyimlemediğim pratik laboratuvar tekniklerini bana öğrettiği için teşekkür ederim. jeofizik Yüksek Mühendisi Oğuz Kağan Kılıç'a da, Konya içi ve dışındaki saha ziyaretleri sırasında bana sağladığı destek ve saha tecrübesi sayesinde geoteknik uygulamalar hakkında değerli bilgiler kazandırdığı için minnettarım. Laboratuvar müdürü Şenol Çaylak'a, ekibinde çalışmama ve uygulamalı deneyim kazanmama olanak tanıdığı için içten teşekkür ederim. Ayrıca, laboratuvarın deney sorumlusu mühendisi olan geoloji Yüksek Mühendisi Büşra Gençay'a da, sorularımı içtenlikle yanıtladığı, karmaşık geoteknik kavramları açıkladığı ve bilgi ile sonuçlarını benimle cömertçe paylaştığı için teşekkür ederim.

Ayrıca, bir eğitim ortamında tanışmamıza rağmen zamanla bana gerçek bir abi gibi davranan Sami Başgil'e de teşekkür ederim. Türkiye'de bulunduğum süre boyunca hem kişisel hem de akademik anlamda bana büyük destek sağlamıştır. Son olarak, bu tezi sevgili annem Mumino Dhiesow Barow'a ithaf ediyorum. Onun fedakârlıkları ve duaları, akademik yolculuğumun gerçek temeli olmuştur. Bu çalışmanın, gelecekte geoteknik mühendisliği alanına katkı sağlayacak bir başlangıç olmasını diliyorum.

Abdıfatah Dahır MOHAMUD  
KONYA-2025

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>ix</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Arka Plan .....	1
1.2. Problem Durumu.....	3
1.3. Araştırma Hedefleri .....	4
1.4. Araştırma Kapsamı ve Sınırlamaları.....	5
1.5. Çalışmanın Önemi .....	7
1.6. Tezin Yapısı.....	8
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>11</b>
2.1. Sığ Temeller ve Oturma Davranışları .....	11
2.2. Temel Oturmasını Etkileyen Faktörler .....	14
2.3. Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Modellemeye Genel Bakış .....	17
2.4. PLAXIS 3D'nin Temel Analizinde Kullanımı.....	19
2.5. Literatür Özeti ve Araştırma Boşluğu.....	22
<b>3. MATERYAL VE METHOD .....</b>	<b>25</b>
3.1. Malzemeler .....	26
3.1.1. Zemin özellikleri.....	26
3.1.2. Betonarme elemanların özellikleri.....	31
3.2. Analiz Programı .....	31
3.3. Oturma Analiz Yöntemleri .....	33
3.3.1. Analitik hesaplama yöntemi .....	33
3.3.2. Sayısal hesaplama yöntemi .....	36
3.4. İstatistiksel Analiz ve Değerlendirme.....	46
3.4.1. Yanıt yüzey yöntemi .....	46
3.5. Araştırma Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	48
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....</b>	<b>50</b>
4.1. Analitik Hesaplama Sonuçları .....	50
4.1.1. İstatistiksel değerlendirme .....	57
4.2. Sayısal Analiz Sonuçları .....	64
4.2.1. Kazı çukurundaki kabarmalar .....	65
4.2.2. Oturma sonuçları.....	66
4.2.3. Oturma-zaman ilişkisi.....	70
4.2.4. Aşırı boşluk suyu basıncı.....	71

4.2.5. Yapı gerilmesi ve oturma etki derinlikleri .....	73
4.2.6. Eğilme momentleri .....	78
4.3. İstatistiksel Analiz Sonuçları .....	80
4.3.1. Kazı çukurundaki kabarma .....	80
4.3.2. Yapısal yüklemdeki oturma değerleri .....	87
4.3.3. %90 konsolidasyon oturması .....	93
4.4. Analitik ve Sayısal Sonuçların Kıyaslanması .....	99
4.4.1. Etki derinliği .....	100
4.4.2. Elastik oturmalar .....	103
4.4.3. Konsolidasyon oturmaları .....	108
4.4.4. Toplam oturmalar .....	112
4.4.5. Analitik ve sayısal oturma sonuçlarının özeti .....	118
4.5. Optimizasyon Sonuçları .....	121
4.5.1. Analitik toplam oturma .....	121
4.5.2. Sayısal analiz toplam oturma .....	124
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>130</b>
5.1. Sonuçlar .....	130
5.2. Çalışmanın Katkıları .....	135
5.3. Çalışmanın Sınırlamaları .....	135
5.4. Gelecekteki Araştırmalar için Öneriler .....	136
<b>6. KAYNAKÇA .....</b>	<b>138</b>
<b>EK: PLAXİS 3D ANALİZ SONUÇLARI .....</b>	<b>147</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$q_o$	Temel taban basıncı (kPa)
$B$	Temel genişliği (m)
$L$	Temel uzunluğu (m)
$D_f$	Temel gömülme derinliği (m)
$H$	Sıkışabilir tabaka kalınlığı (m)
$\gamma_{sat}$	Doygun birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
$\gamma_w$	Suyun birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
$\gamma'$	Efektif birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
$e_o$	İlk boşluk oranı
$C_c$	Sıkışma indisi
$S_c$	Konsolidasyon oturması (m)
$S_e$	Elastik oturma (m)
$E'$	Elastisite modülü (kPa)
$\nu$	Poisson oranı
$k$	Geçirimsizlik katsayısı (m/s)
$I_s$	Etki faktörü
$\sigma'_o$	Başlangıç efektif gerilme (kPa)
$\Delta\sigma$	Gerilme artışı (kPa)
$A$	Temel alanı (m <sup>2</sup> )

### Kısaltmalar

FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
YYY	Yanıt Yüzeyi Yöntemi
PZM	Pekleşen Zemin Modeli
LL	Likit Limit
OCR	Aşırı konsolidasyon oranı
ANOVA	Varyans Analizi

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Arka Plan

Sığ temeller, maliyet etkinliği, inşaat kolaylığı ve yüzey zeminlerinin yük aktarımı için yeterli olduğu durumlarda yapıları destekleme kabiliyeti nedeniyle inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle kil gibi kohezyonlu zeminler şişme, büzülme ve konsolidasyon davranışları nedeniyle hem fırsatlar hem de zorluklar ortaya koymaktadır (Elbeih ve Soliman, 2015). Yapısal güvenliği sağlamak ve maliyetli hasarları önlemek için oturma ve taşıma kapasitesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi şarttır (Ahmad vd., 2021). Bu tahminler, granüler zeminlerdekinden önemli ölçüde farklıdır ve kohezyonlu malzemelere uyarlanmış benzersiz yaklaşımlar gerektirir (Fattah vd., 2013). Terzaghi'nin konsolidasyon teorisi gibi geleneksel analitik yöntemler faydalıdır ancak idealize edilmiş varsayımlar ve doğrusal olmayan veya tabakalı zemin koşullarının ele alınamaması nedeniyle genellikle yetersiz kalmaktadır (Shahin vd., 2005a).

Sayısal yöntemlerin, özellikle de PLAXIS 3D gibi Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanan yöntemlerin geliştirilmesi, zemin-yapı etkileşimlerinin nasıl analiz edildiğini önemli ölçüde geliştirmiştir. PLAXIS 3D, mühendislerin karmaşık yükleme koşullarını, aşamalı inşaatı, gözenek basıncı etkilerini ve doğrusal olmayan davranışı gelişmiş esneklikle simüle etmesine olanak tanır (Gowthaman ve Nasvi, 2017). Bu yetenekler, davranışın zamana bağlı olduğu ve zemin kıvamı, gerilme geçmişi ve su muhtevası değişiminden etkilendiği killerle çalışırken çok önemlidir. Bununla birlikte, kohezyonlu zeminlerin doğasında bulunan değişkenlik nedeniyle oturmayı doğru bir şekilde tahmin etmek zor olmaya devam etmektedir. Deneyimli mühendisler bile aynı verileri farklı yorumlayabilir ve bu da tutarsız sonuçlara yol açabilir (Doherty vd., 2018). Duvar çatlakları ve devrilme gibi oturmaya bağlı arızalar yaygındır ve (Şekil 1.1)'de gösterildiği gibi gelişmiş geoteknik değerlendirme ihtiyacının altını çizmektedir.

Klasik yöntemlerin sınırlamaları arasında ani oturmanın olduğundan az tahmin edilmesi ve özellikle kohezyonlu zeminlerle ilgili olan yükleme hızı etkilerinin hesaba katılmaması yer almaktadır (Waheed ve Asmael, 2023). Bu durum, sayısal modellemeye doğru bir kaymaya yol açmıştır, ancak bu tür modeller uygun doğrulama ve doğru kullanım gerektirmektedir. Bu alandaki zorluklar, heterojen zemin koşullarının modellenmesindeki ve simülasyonların gerçek dünyadaki değişkenlikle uyumlu hale getirilmesindeki güçlükler nedeniyle devam etmektedir (Zhao vd., 2017). Buna rağmen, sayısal araçların avantajları açıktır: klasik yöntemlerin genellikle aşırı basitleştirdiği

plastisite, konsolidasyon ve gerilmelerin yeniden dağılımını daha iyi benzetirler (Bezih vd., 2020).



Şekil 1.1. Zemindeki oturma problemi sonrası oluşan yapısal hasar

PLAXIS 3D, zemin-yapı sistemlerinin ayrıntılı 3 boyutlu temsillerini sağlayarak gerilme yollarının, etkileşim etkilerinin ve hatta sismik tepkilerin gelişmiş simülasyonuna olanak tanır (Nguyen vd., 2016). Ayrıca çoklu fizik modellemeyi destekleyerek mühendislerin su akışı ve termal etkileri içeren etkileşimleri hesaba katmasına olanak tanır (Tao Zhang, 2024). Pekleşen zemin gibi kurucu modelleri dahil etme ve tamamen birleştirilmiş analizler gerçekleştirme yeteneği, simülasyonlarda gerçekçiliği artırmaktadır. Birtakım deneysel çalışmalar, doğrulanmış sayısal modellerin dinamik davranışı yakalamada ve tasarım düzeyinde doğruluk sağlamada ampirik formüllerden daha etkili olduğunu doğrulamaktadır (Zhang ve Far, 2022).

Özetle, geleneksel analitik yöntemler hala kullanışlı olmakla birlikte, basitleştirilmeleri onları karmaşık davranışlara sahip kohezyonlu zeminler için daha az güvenilir kılmaktadır. PLAXIS 3D gibi gelişmiş sayısal yöntemlerin benimsenmesi, oturma tahmin edilmesi ve sığ temellerin güvenli tasarlanması için daha sağlam ve

gerçekçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu araçlar, mühendislerin sahadaki etkileşimleri daha doğru bir şekilde modellemelerine olanak tanıyarak hem yapısal güvenliğe hem de uygun maliyetli geoteknik tasarıma katkıda bulunur.

## 1.2. Problem Durumu

Klasik teorik yöntemler, geoteknik mühendisliğinde kohezyonlu zeminlerde oturmayı tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak, aşırı basitleştirilmiş varsayımlar nedeniyle genellikle yanlışlıklara yol açmaktadır. Bu yöntemler tipik olarak izotropik, doğrusal elastik zemin davranışı varsaymakta, doğal zeminlerin gerçek heterojen ve doğrusal olmayan özelliklerini ihmal etmektedir. Bu tür hesaplamalarda kullanılan zemin ortamını tabakalara ayırarak oturmaları toplama yaklaşımı, tabakalı zeminlerin kümülatif etkileşimini göz ardı eder ve özellikle yumuşak veya doygun zeminler üzerine inşa edilen temeller için yetersiz tahminlere neden olur. Ayrıca, klasik yöntemler esas olarak birincil konsolidasyona odaklanmakta, uzun vadeli oturmayı önemli ölçüde etkileyen ikincil konsolidasyon (sünme) gibi zamana bağlı etkileri ihmal etmektedir.

Ampirik saha doğrulamasının olmaması, elle yapılan hesaplamaların sınırlamalarını daha da artırmakta ve onları çeşitli jeolojik ve yükleme koşulları altında güvenilir hale getirmektedir. Buna karşılık, PLAXIS 3D gibi sayısal simülasyon araçları, klasik yöntemlerle ele alınmayan doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme tepkisi, gözenek basıncı değişimi ve aşamalı inşaat etkileri gibi karmaşık zemin davranışlarını dahil ederek daha gelişmiş bir yaklaşım sağlar. PLAXIS 3D, zaman içinde hem ani hem de konsolidasyon oturmalarını simüle edebilir ve mekanik modellerle entegre edildiğinde tahmin doğruluğunu artırır. Bu araçlar, çeşitli yük koşulları altında kohezyon, aşırı yük basıncı ve zemin kalınlığı gibi parametrelerin ayrıntılı analizine olanak tanır.

Sayısal simülasyonlar yoluyla doğrulama sadece güvenilirliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda el hesaplama yöntemlerini iyileştirebilecek ampirik veri tabanlarına da katkıda bulunur. Simülasyon sonuçları, teorik modelleri geliştiren bir geri bildirim döngüsü oluşturulmasına yardımcı olur. Örneğin, aşamalı yükleme konsolidasyon teorisi gibi gelişmiş formülasyonlar, oturma tahminini iyileştirmek için sayısal simülasyonlarda etkili bir şekilde uygulanabilir. Bu araştırma, özellikle PLAXIS 3D kullanarak karşılaştırmalı doğrulama çalışmaları yapmak suretiyle geleneksel hesaplamalar ile

sayısal modelleme arasındaki boşluğu doldurmaya yönelik açık bir ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Son olarak, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi gelişmekte olan teknolojilerin oturma tahminine dahil edilmesi ihtiyacı giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu araçlar modelleme doğruluğunu artırmak için umut verici yollar sunsa da ampirik doğrulama hala sınırlıdır. Oturma tahminlerindeki belirsizliği azaltmak için klasik geoteknik bilgiyi veri odaklı araçlarla birleştiren hibrit sistemler geliştirmek için güçlü bir fırsat vardır. Bu araştırma eksikliklerinin giderilmesi, temel tasarım uygulamalarının hem güvenilirliğini hem de güvenliğini artıracaktır.

### 1.3. Araştırma Hedefleri

Sığ temellerin hem teorik hesaplamaları hem de PLAXIS 3D kullanılarak analiz edilmesinin temel amacı, çeşitli zemin ve yükleme koşulları altında oturma davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktır. Bu ikili yöntem yaklaşımı, geleneksel analitik teknikleri gelişmiş sayısal simülasyonlarla birleştirerek daha güvenilir ve doğru tahminler sunar. Teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçların PLAXIS 3D'den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması, oturma değerlendirmelerinin sağlamlığını artırarak temel tasarımında daha iyi karar vermeyi destekler.

Teorik hesaplama yöntemleri, basitlikleri ve ani ve konsolidasyon oturmalarını tahmin etmek için teorik ilkelere dayanmaları nedeniyle değerlidir. Ancak, genellikle değişken zemin özellikleri ve yükleme şekilleri gibi gerçek dünyadaki geoteknik koşulların karmaşıklığını yakalamakta başarısız olurlar. PLAXIS 3D ile sayısal modelleme, aşamalı inşaat ve zamana bağlı zemin davranışı da dahil olmak üzere çeşitli senaryolar altında zemin-yapı etkileşimini etkili bir şekilde simüle ettiği için burada önemli hale gelmektedir. Bu karşılaştırmalı analiz, yöntemler arasındaki tutarsızlıkların belirlenmesine yardımcı olacak ve hem manuel hem de dijital tahmin teknikleri için iyileştirmelere rehberlik edecektir.

Çalışmada, temel boyutu, temel kazı derinliği, zemin türü, uygulanan yükler, zemin kıvamı, nem içeriği, yükleme oranı ve inşaat sırası dahil olmak üzere temel oturmasını etkileyen temel parametreleri sistereadyeik olarak incelenmiştir. Bu değişkenler, kohezyonlu zeminlerin oturma tepkisi üzerindeki etkilerini araştırmak için ayarlanacaktır. Bu yaklaşım, mevcut geoteknik araştırmalarındaki en iyi uygulamaları takip etmekte ve bu tür parametrelerin temel performansını etkilemek için nasıl etkileşime girdiğini ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır.

Sonuçların yorumlanmasını geliştirmek için çalışmada, yapılandırılmış veri organizasyonu ve istatistiksel analizi destekleyen Design Expert yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, ANOVA, regresyon analizi ve faktöriyel tasarım gibi yöntemleri uygulayarak temel boyutları, kazı derinliği ve yükleme koşulları gibi değişkenlerin yönetilmesine yardımcı olur. Ayrıca, oturmayı en aza indirmek ve temel stabilitesini iyileştirmek için ideal koşulları belirlemek üzere yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) ve optimizasyon sağlar. Design Expert'teki grafiksel araçlar, karmaşık etkileşimlerin net bir şekilde iletilmesini daha da destekler.

Sonuç olarak, bu çalışma hem teorik hesaplamalar hem de istatistiksel analiziyle doğrulanan PLAXIS 3D modellemesini kullanarak geleneksel ve gelişmiş oturma analizi yöntemleri arasında köprü kurmayı amaçlamaktadır. Parametrik çalışma, ampirik gözlemler ve veri odaklı optimizasyonun entegrasyonu, kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin oturma performansını anlamaya ve iyileştirmeye yönelik titiz bir yaklaşım sağlamaktadır.

#### **1.4. Araştırma Kapsamı ve Sınırlamaları**

Bu araştırma, sığ temellerin, özellikle de kohezyonlu zeminlerdeki belirli koşullar altında oturma davranışlarının değerlendirilmesine odaklanmıştır. Çalışma kendisini üç temel hususla sınırlamaktadır: zemin türleri, yükleme koşulları ve analiz yöntemleri. Zemin türleriyle ilgili olarak, kapsam yalnızca geoteknik projelerde sıkça görülmeleri ve statik yükler altında oturma davranışını önemli ölçüde etkileyen farklı mekanik özellikleri nedeniyle seçilen yumuşak kil ve sert kili içermektedir. Yükleme koşulları için, çalışma statik senaryolarla sınırlandırılmış, basitliği korumak ve ani ve konsolidasyon oturması tahminlerine odaklanmak için dinamik, sismik veya yanal yükleme etkileri kasıtlı olarak hariç tutulmuştur. Analiz yöntemleri açısından, çalışma üç yaklaşımı entegre etmektedir: (1) ani ve birincil oturmalar için klasik teorik hesaplamaları, (2) aşamalı inşaat ve doğrusal olmayan zemin-yapı etkileşimini içeren PLAXIS 3D kullanılarak sayısal modelleme ve (3) teorik ve sayısal analiz sonuçlarını desteklemek ve sonuçları yorumlamak için istatistiksel yorumlama araçlarını (yanıt yüzey yöntemi) kullanmak.

Tanımlanan sınırlar çeşitli kısıtlamalara yol açmaktadır. Çalışma, gerçek dünyadaki temel davranışını önemli ölçüde etkileyebilecek dinamik yüklemenin etkilerini hariç tutmaktadır. Ayrıca, saha ölçeğindeki anomalileri göz ardı ederek varsayılan veya laboratuvarında türetilen zemin parametrelerine dayanmaktadır. Ayrıca, gerçek sahalarda görülen değişkenlikle tezat oluşturan izotropik ve homojen zemin

koşulları varsayılmaktadır. Bu basitleştirmeler, yönetilebilir analiz için gerekli olsa da bulguların gerçek dünyaya uygulanabilirliğini sınırlayabilir.

Hem analitik hem de sayısal yaklaşımlarda belirli varsayımlar geçerlidir. Analitik hesaplamalarda, temel varsayımlar arasında zeminin homojenliği ve izotropluğu, laboratuvar testlerinden veya literatürden elde edilen sabit zemin parametre değerleri ve akmaya kadar doğrusal elastik davranış yer alır. Bu hesaplamalar ayrıca zamanla değişen veya sismik etkileri göz ardı ederek sadece statik yüklemeyi dikkate alır. PLAXIS 3D simülasyonlarında varsayımlar arasında ağ inceltme ve hesaplama verimliliğini dengeleyen sonlu eleman modelleme çerçevesi, gerçek gerilme yollarını aşırı basitleştirebilecek Mohr-Coulomb veya Cam-Clay gibi kurucu modellerin kullanımı ve gerçek sahaya özgü etkileşimleri yansıtmayabilecek basitleştirilmiş sınır koşulları yer alır. Ayrıca, yükler aşamalı veya anlık olarak yarı statik bir varsayımla uygulanır, bu da hızlı değişen yükleri yanlış gösterebilir. Doğrulama deneysel veriler kullanılarak yapılsa da bu yine de laboratuvar sonuçlarına dayalı olarak zemin parametrelerinin doğru kalibrasyonunu varsayar.

Bu çalışma, odağı korumak için bazı kilit faktörleri açıkça hariç tutmaktadır. Bunlar arasında, oturma davranışını ve gerilme dağılımını önemli ölçüde etkilediği bilinen ancak basitlik açısından burada ihmal edilen sismik veya titreşim kuvvetleri gibi dinamik yükleme etkileri yer almaktadır. Çalışma aynı zamanda zemin heterojenliğini de göz ardı etmekte, zemin kütlesi boyunca tek tip özellikler varsaymaktadır; bu da modellemeyi basitleştirmekte ancak katmanlı veya geçişli zeminlerde görülen önemli varyasyonları göz ardı edebilmektedir. Ayrıca, rüzgar, zemin basıncı veya trafikten kaynaklanan yanal yükler, yalnızca dikey yükleme mekanizmalarına odaklanmak için hariç tutulmuştur. Son olarak, yağış infiltrasyonu, yeraltı suyu değişiklikleri veya donma-çözülme döngüleri gibi çevresel faktörler de ihmal edilmiştir, ancak bunlar zemin davranışını ve oturma modellerini önemli ölçüde değiştirebilir. Çizelge 1.1 tezin sınırlarını özetlemektedir: konsolidasyonu simüle etmek için PLAXIS 3D'deki Pekleşen Zemin modeli kullanılarak farklı geometriler ve yeraltı suyu seviyeleri altında kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ radye temellere odaklanmaktadır. Çalışma derin temelleri, granüler zeminleri, saha deneylerini ve dinamik veya sismik yükleri kapsamamaktadır.

**Çizelge 1.1.** Yumuşak ve sert kil zeminler için geoteknik parametrelerin özeti

<b>Kapsam Ögesi (Dahil)</b>	<b>Sınırlamalar / Hariç Tutulanlar (Kapsam Dışı)</b>
Sadece sığ temel tipleri (radye temeller)	Derin temeller (kazıklar, iskeleler, vb.)
Kohezyonlu zemin: yumuşak ve sert kil	Kohezyonsuz zeminler (kum, çakıl, karışık zeminler)
PLAXIS 3D kullanarak sayısal modelleme	Winkler veya Pseudo-Eşlenik hesaplama yöntemleri
İnşaat aşamaları (Başlangıç, Temel kazısı, Radye temel imalatı, Yükleme, Konsolidasyon)	Çevresel etkiler, maliyet analizi ve uzun vadeli bozulma etkileri
Yeraltı suyu tablası etkisinin simülasyonu	Zemin stabilizasyon yöntemleri
Literatüre ve mühendislik yargılarına dayalı varsayılan parametrelerin kullanımı (Toplam 42 adet PLAXIS 3D temel-zemin vakası)	Laboratuvar temelli zemintestleri ve yerinde saha incelemeleri
Tipik mühendislik varsayımlarından türetilen girdi parametreleri	Mohr-Coulomb veya diğer temel zemin modelleri
Drenajsız A ile zemin davranışı için kullanılan Pekleşen Zemin Modeli	Oturmanın ötesinde yapısal arıza analizi
Temel geometrisi etkileri (L/B oranları ve derinlikler)	Üstyapının yapısal tasarımı
İstatistiksel tasarım yazılımı kullanımı (Design Expert)	Uzun vadeli çevresel veya sürdürülebilirlik etkileri

Özetle, bu çalışma statik yükler altında kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin oturma davranışını incelemek için dikkatlice sınırlandırılmıştır. Dinamik, yanal, çevresel ve heterojen etkileri hariç tutarak netliği ve operasyonel fizibiliteyi korumaktadır. Bu istisnalar analizi basitleştirse de gerçek dünyadaki temel performansı üzerindeki etkileri kabul edilmektedir. Bu kısıtlamalar, temel oturma mekaniğini anlamak için odaklanmış bir çerçeve sağlarken, gelecekteki araştırmaların genelleştirilebilirliği artırmak için ihmal edilen bu karmaşıklıkları dikkate alması gerektiğini kabul etmektedir.

### 1.5. Çalışmanın Önemi

Tez çalışması, özellikle temel sistemlerinin geliştirilmesi ve tasarımında geoteknik mühendislerine önemli faydalar sağlamaktadır. Başlıca katkılarından biri, mühendislerin özellikle karmaşık kohezyonlu zeminlerde zemin-yapı etkileşimini daha iyi anlamalarını sağlamaktır. Araştırma, geleneksel analitik yöntemler ile PLAXIS 3D gibi gelişmiş sayısal araçlar arasında ayrıntılı bir karşılaştırma yaparak, uygulayıcılara çeşitli yükleme koşulları altında kohezyonlu zeminlerin davranışı hakkında fikir vermektedir. Bu karşılaştırmalı analiz, her bir yöntemin avantaj ve sınırlamalarının daha

iyi anlaşılmasını sağlayarak hem güvenlik hem de hizmet verilebilirliğin sağlanması için çok önemli olan temel tasarımında daha bilinçli kararlar alınmasına olanak tanır.

Çalışmanın yapılandırılmış iş akışı, hassasiyeti korurken oturma değerlendirmesini basitleştirmektedir; bu da oturmadaki küçük yanlış hesaplamaların bile maliyetli yapısal onarımlara veya güvensiz koşullara neden olabileceği düşünüldüğünde önemli bir faktördür.

Bu çalışmanın akademik katkısı da aynı derecede önemlidir. Araştırma, geleneksel el hesaplamaları ile PLAXIS 3D'deki sayısal simülasyonları yan yana getirerek geoteknik söylemi zenginleştiren ikili bir bakış açısı sunmaktadır. Önemli bir akademik katkı, karmaşık zemin davranışlarına uygulandığında klasik yöntemlerin sınırlamalarını vurgulamakta yatmaktadır. Bu yöntemler genellikle doğrusal olmayan gerilme dağılımını aşırı basitleştirerek potansiyel olarak yanlış oturma tahminlerine yol açmaktadır. Buna karşılık, PLAXIS 3D modelleri gözenek basıncı dağılımını ve gerilme lokalizasyonunu simüle ederek daha güvenilir tahminler sunabilmektedir. Bu etkileri modelleme yeteneği hem teorik hem de pratik değer sunarak daha sağlam modelleme tekniklerinin benimsenmesini teşvik eder.

Ayrıca çalışma, çeşitli analiz yöntemlerini entegre etmek için yapılandırılmış bir çerçeve sunarak tekrarlanabilirliğe yardımcı olmakta ve gelecekteki araştırmacılara rehberlik etmektedir. Bu tezdeki vaka çalışmaları, hibrit modelleme stratejileri için zemin hazırlayarak gelecekteki çalışmalar için referans modeller olarak hizmet etmektedir. Yanıt yüzey yöntemi gibi istatistiksel araçlar, istatistiksel analizin tahmin doğruluğunu artırdığı geoteknik modellemedeki mevcut eğilimleri takip ederek sonuçları yorumlamak için sofistike yollar sunarak araştırmayı daha da güçlendirmektedir. Bulgular, entegre modelleme yöntemlerine ilişkin daha geniş akademik diyalog için bir sıçrama tahtası görevi görmektedir.

## 1.6. Tezin Yapısı

Bu tezin yapısı, giriş bölümünden sonuç ve önerilere kadar açık, mantıklı ve tutarlı bir akış sağlayacak şekilde dikkatlice tasarlanmıştır. Tez, arka plan bilgileri, açıkça tanımlanmış bir problem cümlesi ve belirlenmiş araştırma hedefleri ile çalışmanın temelini oluşturarak başlar. Ayrıca çalışmanın kapsamı ve sınırlamaları ana hatlarıyla belirtilmekte ve tez için bir yol haritası sunularak okuyucunun kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin araştırılmasının uygunluğunu anlamasına yardımcı olunmaktadır.

Giriş bölümünü takiben, bir sonraki bölümde mevcut literatürün detaylı bir incelemesi sunulmaktadır. Bu, sığ temellerin davranışı, oturma mekanizmaları ve PLAXIS 3D gibi sayısal modelleme tekniklerinin uygulanmasına ilişkin önceki araştırmaların eleştirel bir sentezini içermektedir. Temel bulgular vurgulanmakta ve bu tezin ele almayı amaçladığı mevcut bilgi boşlukları tanımlanmakta, böylece araştırma geoteknik mühendisliğinin daha geniş akademik bağlamı içinde konumlandırılmaktadır.

Metodoloji bölümü, çalışmanın nasıl yürütüldüğüne dair kapsamlı bir açıklama sunmaktadır. Zemin özelliklerinin karakterizasyonu için kullanılan prosedürler, oturmayı tahmin etmek için kullanılan elle hesaplama yöntemleri ve PLAXIS 3D'de kullanılan kurulum ve simülasyon stratejileri açıklanmaktadır. Ayrıca, deneysel tasarım, vaka seçimi ve bulguların doğrulanması için Yanıt Yüzey Yöntemi gibi istatistiksel araçların entegrasyonunu açıklamaktadır. Bu şeffaf ve sisteradyeik sunum, tekrarlanabilirliği sağlamakta ve çalışmanın güvenilirliğini güçlendirmektedir.

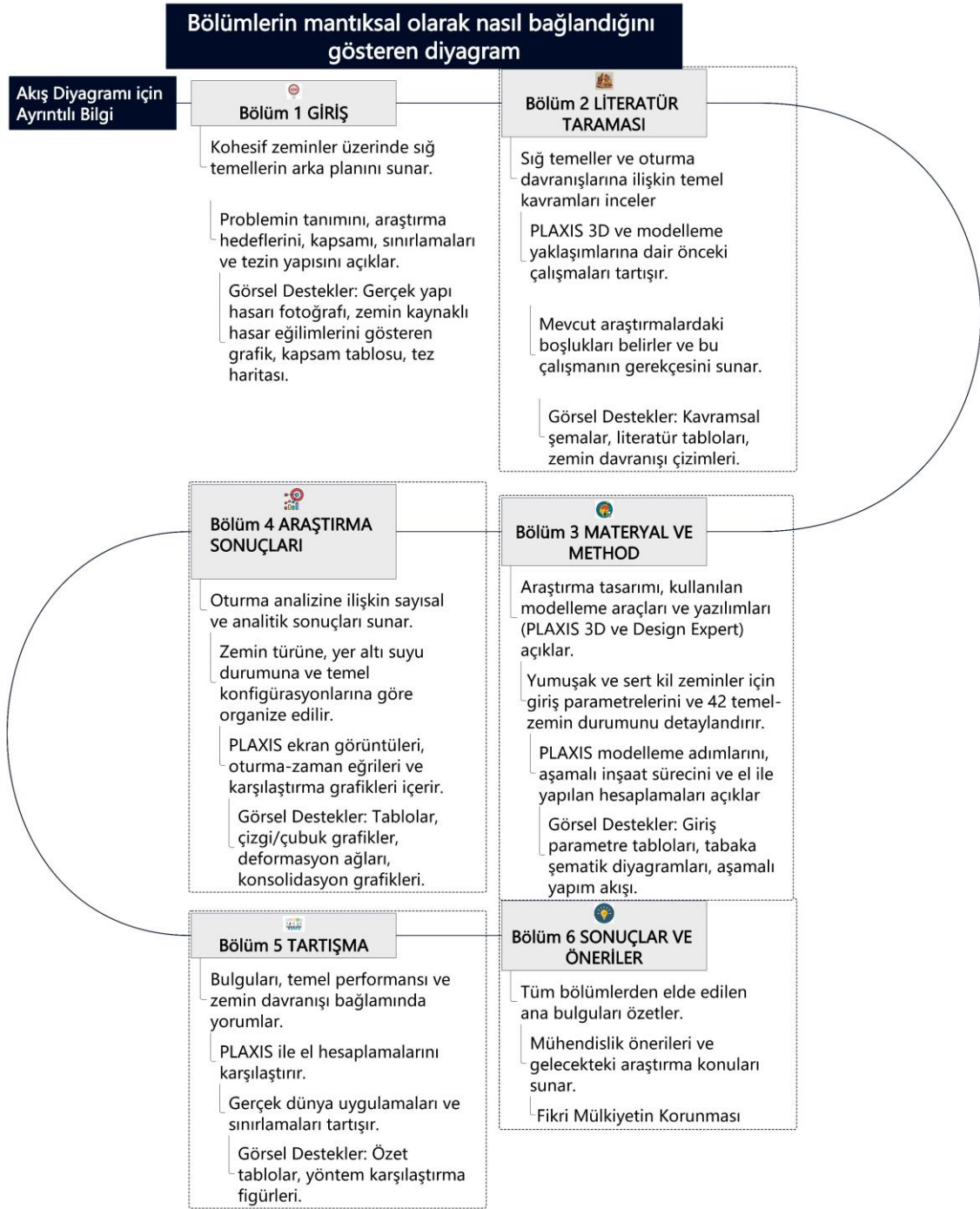
Bunu takiben, sonuçlar bölümü hem analitik hesaplamalardan hem de sayısal simülasyonlardan elde edilen verileri sunmaktadır. Sonuçlar, çeşitli zemin ve yükleme koşulları altındaki oturma davranışını açıkça gösterecek şekilde yapılandırılmıştır. Grafiklerin, çizelgelerin ve görsel temsillerin dahil edilmesi, karmaşık bilgilerin daha erişilebilir bir şekilde aktarılmasına yardımcı olarak okuyucu katılımını ve anlayışını artırmaktadır.

Tartışma bölümünü, bulguları yorumlamakta ve bunları incelenen literatürle ilişkilendirmektedir. Bu bölümde gözlemlenen eğilimler analiz edilmekte, sonuçların temel tasarımına etkileri vurgulanmakta ve çalışmanın kısıtlamaları tartışılmaktadır. Tartışma, sonuçları mevcut bilgiler bağlamına yerleştirerek, araştırmanın gerçek dünyaya uygulanabilirliği hakkında değerli bilgiler sunmakta ve kohezyonlu zeminlerdeki oturma davranışının daha derinlemesine anlaşılmasını sağlamaktadır.

Tezi sonlandıran son bölüm, temel bulguları sentezleyerek çalışmanın en önemli katkılarını özetlemektedir. Mühendislik uygulamaları için pratik öneriler ve gelecekteki araştırma yönelimleri için öneriler sunmakta, böylece çalışmanın önemini pekiştirmektedir.

Son olarak, ayrıntılı hesaplama tabloları, PLAXIS 3D çıktıları ve ek veriler gibi tamamlayıcı radyeeryaller eklerde sunulmaktadır. Bu radyeeryaller ana içeriği desteklemekte, şeffaflığı artırmakta ve çalışmanın teknik detaylarıyla ilgilenen okuyucular için daha fazla bağlam sunmaktadır.

Tezin mantıksal ilerleyişi, araştırmanın problem tanımlamasından metodolojik tasarıma, sonuç analizine ve nihai önerilere nasıl ilerlediğinin görsel bir özetini sunan (Şekil 1.2)'deki akış şemasında gösterilmiştir. Bu akış şeması, çalışmanın sistematik yapısını güçlendirirken tez çalışmasının anlaşılabilirliğini ve gezilebilirliğini artırmaktadır.



**Şekil 1.2.** Tez bölümleri ve içerik akış şeması

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Sığ Temeller ve Oturma Davranışları

Sığ temeller, inşaat ve geoteknik mühendisliğinin temel bileşenleridir ve yapısal yüklerin zemin yüzeyine yakın zemine aktarılmasına hizmet eder. Tipik olarak yeraltı tabakaları yeterli taşıma kapasitesine sahip olduğunda seçilirler ve tekil temeller, şerit temeller ve radye temeller gibi türleri içerirler (Vanapalli, 2013). Tekil temeller, tek tek kolonları destekler ve genellikle kare veya dikdörtgen şeklindedir. Bunlar, özellikle yeterli taşıma kapasitesine ve minimum konsolidasyon sorunlarına sahip zeminlerde, az katlı binalar ve daha az konsantre yükler için çok uygundur (Salih vd., 2023). Düşey yüklerin baskın olduğu ve farklı oturmanın olmadığı durumlarda kullanımları tercih edilir (Salih vd., 2023). Sürekli temeller olarak da adlandırılan şerit temeller, yük taşıyan duvarların veya kolon sıralarının altına uzanır. Bunlar özellikle düzgün bir şekilde sıkıştırılabilen zeminlerde faydalıdır ve yapının uzunluğu boyunca farklı oturmaları azaltmaya yardımcı olurlar. Bunlar az katlı inşaatlarda ve sınırlı yanal dirence sahip kohezyonlu zeminlerde yaygındır (Vanapalli, 2013). Tüm yapının altında büyük bir beton plakadan oluşan radye temeller, tipik olarak tekil temellerin yetersiz kalabileceği yumuşak veya sıkıştırılabilir zeminlerde kullanılır. Bu temeller yükleri daha eşit bir şekilde dağıtır ve özellikle yüksek veya ağır yapılarda kullanışlıdır. Hem üniform hem de farklı oturma risklerini etkili bir şekilde yönetir (Besharatinezhad vd., 2019; Qiu vd., 2012).

Sığ temellerin seçimi ve tasarımı zemin kıvamı, yeraltı suyu koşulları ve yapısal yük özellikleri gibi çok sayıda faktöre bağlıdır. Sismik aktivite de dahil olmak üzere sahaya özgü hususlar da taşıma kapasitesini ve oturma davranışını etkilemekte olup nihai amaç desteklenen yapının uzun vadeli stabilitesini ve hizmet verilebilirliğini sağlamaktır (Samui vd Sitharam, 2008). Sığ temel performansında merkezi bir endişe, yüklemeye altında düşey yer değiştirme olarak ortaya çıkan oturmadır. Tipik olarak üç ana oturma türü analiz edilir: ani (elastik), birincil konsolidasyon ve ikincil konsolidasyon (sünme). Ani oturma, zeminin elastik deformasyonu nedeniyle anında gerçekleşir ve en çok kum gibi granüler zeminlerde yaygındır (Samui and Sitharam, 2008; Shahin vd., 2005b). Bu oturmanın büyüklüğü elastisite modülü, Poisson oranı, temel boyutları ve yüklemeye özelliklerinden etkilenir (Jahanandish vd., 2010) ve aşırı olması durumunda yapısal riskler oluşturabilir (Shahin vd., 2005b).

Birincil konsolidasyon oturması zamana bağlıdır ve ağırlıklı olarak kil gibi kohezyonlu zeminlerde meydana gelir. Sürekli yüklemeye altında gözenek suyunun

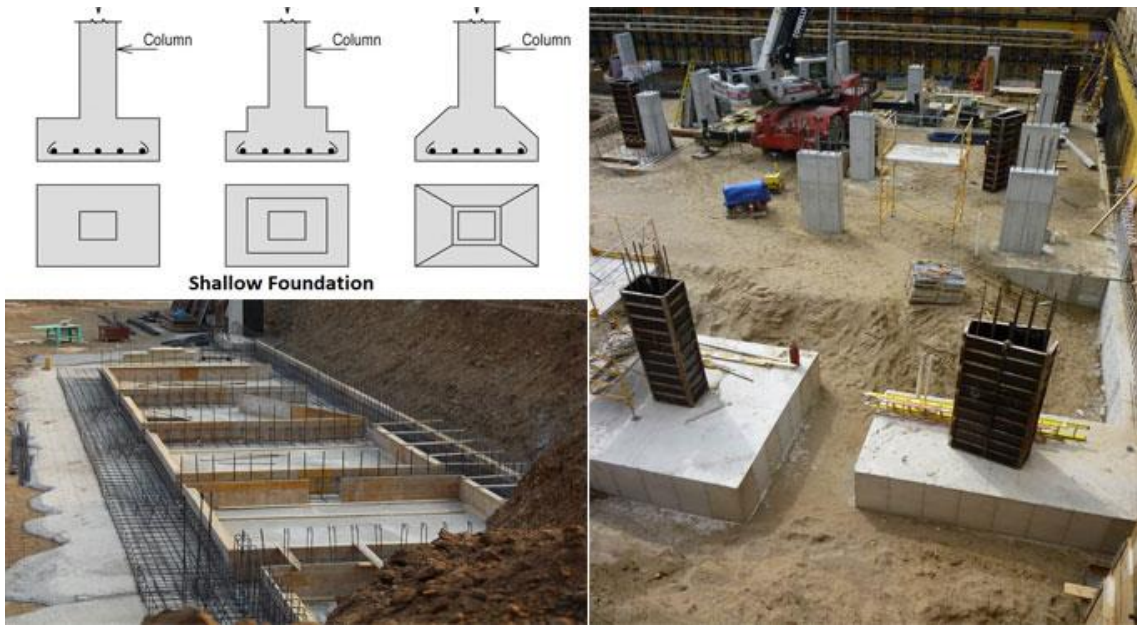
kademeli olarak dışarı atılmasından kaynaklanır ve zemin hacminde bir azalmaya yol açar (Salih vd., 2023). Konsolidasyonun hızı ve büyüklüğü sıkıştırılabilirlik, zemin tabakası kalınlığı ve su geçirimsizliğinden etkilenir ve saha koşullarına bağlı olarak tamamlanması aylar veya yıllar alabilir (Vanapalli, 2013). Kil bakımından zengin bölgelerde, bu oturma zaman içinde yüksekliği ve yapısal hizalamayı önemli ölçüde değiştirebilir (Salih vd., 2023). Birincil konsolidasyondan sonra, özellikle organik killerde, zemin parçacıkları sabit gerilme altında kademeli olarak yeniden düzenlendiğinden ikincil konsolidasyon veya sünme yavaşça devam eder (Alhassan, 2015). Büyüklüğü daha küçük olmasına rağmen, onlarca yıl devam edebilir ve uzun vadeli performans değerlendirmeleri için önemli etkileri vardır (Jagan ve Samui, 2024; Sia vd., 2022).

Her bir oturma türünün farklı mekanizmaları, süreleri ve yapısal etkileri vardır. Ani oturma elastik deformasyondan kaynaklanır, birincil konsolidasyon gözenek basıncı dağılımını içerir ve ikincil konsolidasyon parçacıkların yeniden düzenlenmesinden kaynaklanır. Ani oturma yüklemeye birlikte gerçekleşirken, konsolidasyon ve sünme zaman içinde ortaya çıkar. Etkiler, erken kullanılabilirlik endişelerinden uzun vadeli deformasyon risklerine kadar uzanmaktadır. Bu davranışları anlamak, mühendislerin doğru tasarım tahminleri yapmaları ve bir binanın hizmet ömrü boyunca yapısal güvenliği sağlamaları için gereklidir (Zhang ve Zhang, 2010).

Birkaç kritik faktör, oturma davranışını doğru bir şekilde tahmin etmenin ve analiz etmenin önemini vurgulamaktadır. Yapısal bütünlük çok önemlidir; oturma, özellikle kalıcı veya farklı ise, sismik olaylar sırasında temelleri tehlikeye atabilir ve yanlış hizalamalara, çatlaklara ve hatta çökmeye neden olabilir (Hakhamaneshi vd., 2016; Oh ve Vanapalli, 2011). Köprüler veya çok katlı binalar gibi karmaşık yapılar için oturma dinamiklerini anlamak hayati önem taşımaktadır. Özellikle heterojen kumlu zeminlerde farklı oturmalar ciddi mimari ve yapısal hasarlara yol açabilir. Mühendisler, düşey gerilme ve yük-oturma etkileşimlerini modelleyerek bu riskleri azaltabilir ve onarım ve arıza süresi maliyetlerini düşürebilirler (Ateş ve Şadoğlu, 2021).

Zemin-yapı etkileşimi de oturmalarda merkezi bir rol oynamaktadır. Yapının salınımı gibi dış yüklere verilen doğrusal olmayan tepkiler, özellikle depremler veya yüksek rüzgar yükleri gibi aşırı koşullar altında hem zemin hem de temel sistemlerinde kalıcı deformasyona neden olabilir (Khezri vd., 2024). Ayrıca, oturma davranışının farkında olmak tasarımda ekonomik verimliliğe katkıda bulunur. Yeni inşaat teknolojileri ortaya çıktıkça, mühendisler aşırı muhafazakâr tasarımlardan ve gereksiz derin temellerden kaçınarak temel sistemlerini yalnızca mukavemet açısından değil, aynı

zamanda maliyet açısından da optimize (Al-Neami vd., 2021). Temel tasarımında, temel tipinin seçimi yerel zemin koşullarına, yapısal yüklere ve ekonomik hususlara bağlıdır. Sığ temeller genellikle üç ana tipte sınıflandırılır: tekil temeller, şerit temeller ve radye temeller. Bu temel tiplerinin genel oturma ve yük taşıma özellikleri (Şekil 2.1)'de gösterilmektedir. Bu sınıflandırma, çeşitli mühendislik uygulamaları için hangi temel tipinin uygun olduğunu anlamak için gereklidir.



Şekil 2.1. Yüzeysel temel türleri (tekil, şerit, radye temeller)

Uzun vadeli yapısal performans, oturmaların ne kadar iyi tahmin edildiği ve yönetildiği ile yakından ilişkilidir. Gelecekteki bakım ihtiyaçlarını en aza indirmek ve zaman içinde hizmet verebilirliği sağlamak için özellikle mevsimsel değişikliklerin yaşandığı bölgelerde toprağın sıkışabilirliği ve nem değişimi dikkate alınmalıdır (Hokmabadi ve Fatahi, 2016; Marto ve Amaludin, 2015). Sonuç olarak, sığ temel tipinin doğru seçilmesi ve ani, birincil ve ikincil oturma tiplerinin bilinçli bir şekilde anlaşılması, yapılarda stabilite ve uzun ömürlülük elde etmek için vazgeçilmezdir. Bu faktörlerin göz ardı edilmesi ciddi yapısal arızalara ve ekonomik kayıplara yol açabilir, bu da temel tasarımında geoteknik analiz ihtiyacını güçlendirir.

## 2.2. Temel Oturmasını Etkileyen Faktörler

Temel oturması, özellikle sığ temellerde, zemin özellikleri, yapısal yükler, çevresel faktörler ve inşaat tekniklerinin karmaşık bir etkileşimi tarafından yönetilir. Oturmanın doğru bir şekilde tahmin edilmesi, zemin kıvamı, uygulanan yük yoğunluğu, temel boyutları, yeraltı suyu koşulları ve inşaat hızı veya yöntemi gibi çeşitli kritik unsurların dikkatle değerlendirilmesini gerektirir. Bu faktörler hem ani hem de uzun vadeli (konsolidasyon) oturma davranışını birlikte etkiler.

Zemin türü ve kıvamı, oturmanın büyüklüğünü ve oranını önemli ölçüde etkiler. Kil gibi kohezyonlu zeminler, düşük geçirimsizlik ve yüksek sıkışabilirlikleri nedeniyle tipik olarak zamana bağlı konsolidasyon sergilerken, kum gibi granüler zeminler sınırlı zamana bağlı davranışla daha ani, elastik oturma gösterir (Laskar ve Pal, 2017; Mohamed, 2019). Yumuşak killer, kayma mukavemetinin azalması nedeniyle daha büyük oturmalara neden olurken, sıkı kumlar, artan partiküller arası sürtünme nedeniyle oturmaya daha etkili bir şekilde direnir (Al-Taie vd., 2016; Bo v., 2011). Genellikle sıkışma indisi kullanılarak ölçülen bir zeminin sıkışabilirliği, nem içeriğine ve yapısına göre değişir; örneğin, daha yüksek su içeriği sıkışabilirliği ve oturma potansiyelini artırır (Habibbeygi, 2017). Kil kıvamının yumuşak, orta ve sert formlarda sınıflandırılması da bir rol oynar; daha yumuşak killer benzer yükler altında daha fazla deformasyona neden olur (Abu-Farsakh vd., 2011a, 2011b). Heterojen zeminlerde, kısa mesafeler içinde kıvam ve türdeki farklılıklar nedeniyle farklı oturmalar meydana gelebilir (Al-Taie vd., 2015). Bu nedenle, güvenilir oturma tahmini, ayrıntılı geoteknik araştırmalar, oturma testleri ve saha genelinde zemin tutarlılığının anlaşılmasını gerektirir (Qian vd., 2014).

Uygulanan yapısal yüklerin yoğunluğu ve dağılımı, oturma davranışının bir diğer belirleyicisidir. Yüksek yoğunluklu yükler zemin altındaki düşey gerilimi artırarak potansiyel olarak daha büyük deformasyona ve zamana bağlı oturmaya yol açmaktadır (Al-Taie vd., 2016). Temel geometrisi de bir rol oynamaktadır, daha büyük temeller yükü daha geniş alanlara dağıtarak gerilme konsantrasyonlarını azaltmaktadır, ancak yine de temas halindeki alanın artması nedeniyle sıkıştırılabilir zeminlerde önemli oturmalara neden olabilir (Al-Taie vd., 2015). Değişken yük koşulları altında zeminlerin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme tepkileri tahminleri daha da karmaşık hale getirmektedir (Zhang vd., 2022). Sonuç olarak, oturma riskinin modellenmesinde hem yükün büyüklüğü hem de dağılım şekli dikkate alınmalıdır.

Temel boyutu, şekli ve gömme derinliği, yüklerin zeminle nasıl etkileşime girdiğini ve bunun sonucunda oluşan oturmayı etkiler. Daha geniş temeller gerilmeleri daha büyük bir zemin hacmine dağıtma eğilimindedir, bu da merkezin altındaki oturmayı azaltır ancak potansiyel olarak kenarlardaki farklı oturmayı artırır (Ahmad vd., 2025). Düzensiz şekilli veya eksantrik yüklü temeller bölgesel gerilme yoğunluğu oluşturarak düzensiz oturma modellerine yol açabilir (Salih vd., 2023). Gömme derinliği de çok önemlidir. Daha derin temeller, daha yüksek taşıma kapasitesine sahip daha yetkin zemin katmanlarıyla etkileşime girerek genel oturmayı azaltmaya yardımcı olur (Thongpong, 2021). Bununla birlikte, zayıf üst katmanların varlığı, özellikle farklı katmanların uygulanan yüklere farklı tepki verdiği katmanlı zeminlerde, derin temellerde bile önemli ölçüde oturmaya neden olabilir (Arab vd., 2021; Liu vd., 2021). Bir temelin yakındaki yamaçlara göre konumu da davranışı etkileyebilir; yamaç tepelerine yakın temeller, daha uzaktakilere kıyasla farklı gerilme ve oturma tepkileri sergiler (M. Abd ve Obaid Abbas, 2022).

Yeraltı suyu koşulları, öncelikle efektif gerilme üzerindeki etkileri yoluyla temel oturması üzerinde önemli bir çevresel etkiye sahiptir. Terzaghi'nin ilkesine göre efektif gerilme ( $\sigma'$ ), toplam gerilme ( $\sigma$ ) ile boşluk suyu basıncı ( $u$ ) arasındaki farktır:  $\sigma' = \sigma - u$ . Yeraltı suyu seviyesindeki artış efektif gerilmeyi azaltarak, özellikle doymuş kil ve siltlerde zeminleri daha sıkıştırılabilir ve konsolidasyona eğilimli hale getirir (Quintero vd., 2018). Azalan efektif gerilme ile zemin sertliği azaldıkça ani oturma artarken, daha yavaş gözenek suyu dağılımı nedeniyle konsolidasyon oturması uzar (Shen ve Xu, 2011; Wahyudi, 2020; Zhu vd., 2015). Yeraltı suyu seviyelerindeki hızlı dalgalanmalar, farklı temel alanları farklı boşluk suyu basınçlarına maruz kalabileceğinden farklı oturmalara neden olabilir (Rui vd., 2016). Tabakalı zeminlerde bu varyasyon, yeraltı suyu değişikliklerine farklı tepkiler veren katmanlar arasında düzensiz deformasyona yol açar (Rodríguez Rincon vd., 2021; Wang vd., 2021). Bu nedenle, drenaj tasarımı ve izleme dahil olmak üzere uygun yeraltı suyu yönetim stratejileri, aşırı veya düzensiz oturma risklerini sınırlamak için gereklidir (Krutov, 2008).

Son olarak, inşaat yöntemleri ve yükleme oranları oturma davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Hızlı yükleme, kohezyonlu zeminlerde yüksek boşluk suyu basıncına yol açarak boşluk suyu basıncı dağılmadan önce ani ve aşırı oturmalara neden olabilir (ZHANG vd., 2019). Öte yandan, aşamalı veya kademeli yükleme, boşluk suyunun kademeli olarak dağılmasını sağlayarak oturma büyüklüğünü ve süresini azaltır (Forsat vd., 2022). Hassas kentsel ortamlarda, inşaat kaynaklı zemin hareketi bitişikteki

altyapıyı etkileyebilir, bu da dikkatlice planlanmış yükleme stratejilerine ve gerçek zamanlı oturma izleme ihtiyacının altını çizer (Forsat vd., 2022).

Zemin kıvamı, yük yoğunluğu ve temel derinliği dahil olmak üzere temel oturmasını etkileyen birkaç önemli faktör vardır. Çizelge 2.1'de bu etkiler özetlenmekte ve geoteknik analizde oturma davranışının tahmin edilmesindeki rolleri vurgulanmaktadır.

**Çizelge 2.1.** Oturmayı etkileyen faktörlerin özeti (Zemin kıvamı, yük, derinlik, vb.)

<b>Faktör</b>	<b>Oturma Üzerindeki Etkisi</b>
Zemin kıvamı	Kohezyonlu zeminler (killer) genellikle konsolidasyon nedeniyle granüler zeminlerden daha fazla oturur ve yumuşak killer sert killere kıyasla daha yüksek oturmalara neden olur.
Uygulanan Yük	Daha yüksek yükler, özellikle yumuşak zeminlerde ani ve uzun vadeli oturmayı artırır.
Temel Derinliği ( $D_f$ )	Daha derin temeller genellikle oturmayı azaltır ancak daha zayıf katmanlarla karşılaşabilir.
Temel Boyutu ve Şekli	Daha büyük temeller yükü dağıtır ve basıncı azaltarak oturma büyüklüğünü etkileyebilir.
Yeraltı Suyu Seviyesi	Yüze yakın yüksek yeraltı suyu konsolidasyonu hızlandırır ve efektif gerilmeyi azaltabilir.
Zemin Sıkışabilirliği	Yüksek sıkışabilirlik, daha yüksek birincil konsolidasyona ve toplam oturmaya yol açar.
Zemin Kayma Dayanımı	Düşük kesme mukavemeti, yük altında daha yüksek deformasyon ile ilişkilidir.
İlk Boşluk Oranı ( $e$ )	Daha yüksek boşluk oranı, gerilme altında daha fazla sıkışma potansiyeli olduğunu gösterir.
Zemin Geçirimsizliği ( $k$ )	Düşük geçirimsizlik, aşırı gözenek basıncının dağılmasını yavaşlatır ve oturmayı uzatır.
Gerilme Geçmiş / OCR	Aşırı konsolide edilmiş zeminler, aynı yük altında normal konsolide edilmiş zeminlere kıyasla daha az oturur.
Zemin Rijitliği ( $E_s$ )	Daha sert zeminler, benzer yükler altında daha düşük oturmalara yol açar.
İnşaat Yöntemi	Yanlış yöntem zemini bozarak oturma riskini artırabilir.

Sonuç olarak, oturma davranışı zemin kıvamı ve kıvamı, uygulanan yükleme koşulları, temel geometrisi ve derinliği, yeraltı suyu değişimleri ve inşaat metodolojisi tarafından yönetilen çok faktörlü bir süreçtir. Etkili temel tasarımı ve oturma tahmini, bu etkileşimli parametreleri değerlendirmek için ampirik verileri, analitik hesaplamaları ve sayısal simülasyonları entegre etmelidir. Bu kapsamlı anlayış, mühendislerin riskleri azaltmasını, yapısal hizmet verilebilirliği artırmasını ve çeşitli geoteknik koşullarda uzun vadeli stabiliteyi sağlamasını sağlar.

### 2.3. Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Modellemeye Genel Bakış

Sayısal modelleme, özellikle doğrusal elastisite, malzeme homojenliği ve tekdüzelik gibi varsayımlara dayanan geleneksel el hesaplamalarının sınırlamalarını ele aldığı için geoteknik mühendisliğinde önemli bir yöntem haline gelmiştir. Bu varsayımlar, özellikle değişen yükleme koşulları altında katmanlı veya anizotropik zeminlerde genellikle yanlış tahminlerle sonuçlanmaktadır (Conti vd., 2014). Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için, karmaşık geoteknik davranışları daha iyi simüle etmek amacıyla Sonlu Eleman Yöntemi (FEM), Sonlu Fark Yöntemi (FDM) ve Sınır Eleman Yöntemi (BEM) gibi gelişmiş sayısal teknikler geliştirilmiştir (Rashiddel vd., 2018).

Geleneksel analitik yaklaşımlar, temel tasarımlarda faydalı olsa da geometriyi basitleştirdikleri ve sabit malzeme özellikleri varsaydıkları için genellikle çeşitli ve doğrusal olmayan koşullar altında zemin davranışını modellemede başarısız olurlar (Griffiths ve Lane, 1999; Xiong ve Huang, 2020). Bu yöntemler tipik olarak zemin özelliklerinin değişkenliğini göz ardı etmekte ve deterministik değerlere dayanarak sahadaki belirsizliklerden kaynaklanan riskleri hafife almaktadır (Cho ve Park, 2010). Örneğin, limit denge yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak olasılıksal zemin davranışını ve karmaşık zamana bağlı faktörleri ele almada sınırlıdır. Buna karşılık, sayısal yaklaşımlar aşamalı yükleme, yeraltı suyu değişimi ve dinamik yükleme gibi etkileşimleri barındıran daha bütüncül bir çerçeve sunar (Xu vd., 2022).

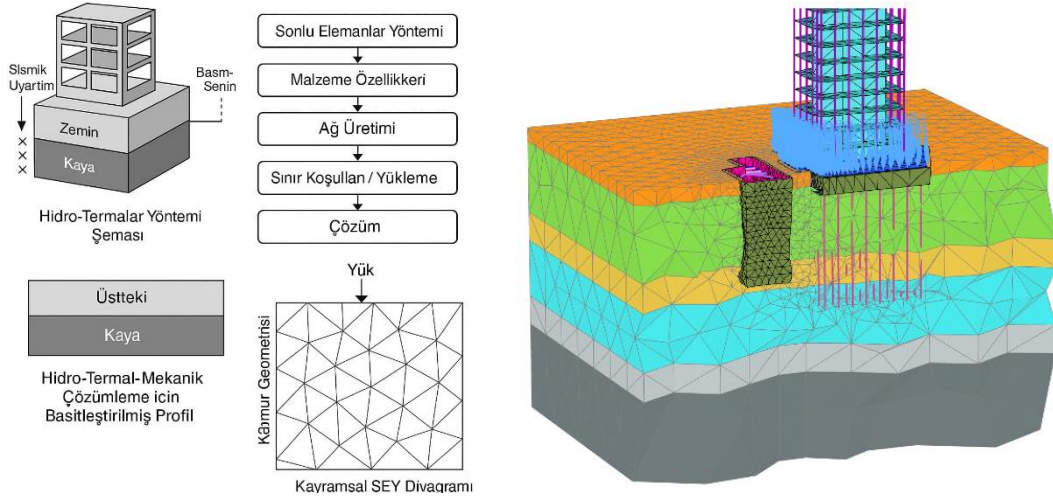
Özellikle FEM, Mohr-Coulomb ve Duncan-Chang gibi modeller aracılığıyla doğrusal olmayan zemin davranışının simülasyonunu mümkün kılarak gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini ve deformasyon süreçlerini gelişmiş doğrulukla belirlemeyi mümkün kılar (Niemeec vd., 2019; Yang vd., 2020). Özellikle kazı veya kazık çakma gibi dinamik olayların simülasyonunda etkili olan Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formülasyonu gibi yaklaşımları kullanarak düzensiz geometrilerin, katmanlı zemin profillerinin ve karmaşık yükleme koşullarının modellenmesinde esneklik sunar (Alsamia ve Koch, 2023; Perminov, 2019). FEM aynı zamanda gerçek dünya sınır koşullarını da içerir ve hidro-mekanik modelleme gibi birleşik analizlerin gözenek basıncını ve deformasyonu aynı anda değerlendirmesini sağlar (Guo vd., 2021; Zhang vd., 2021).

FEM'in bir diğer gücü de sayısal modelleri deneysel verilerle doğrulama yeteneğidir; bu da simülasyon sonuçlarına olan güveni artırır ve sahaya özgü model kalibrasyonuna olanak tanır (Alsamia ve Koch, 2023). Modern bilgi işlem gücünün FEM

ile entegrasyonu, birden fazla senaryonun verimli bir şekilde araştırılmasını ve tasarım parametrelerinin optimizasyonunu sağlar (Lı ve Zhao, 2016). Makine öğrenimi gibi gelişmekte olan teknikler, tahmine dayalı analitiğe ve sonuçların hızlı bir şekilde yorumlanmasına yardımcı olarak bu süreci daha da geliştirebilir (Qader vd., 2023).

FEM, güçlü yönlerine rağmen kayda değer zorluklar da sunmaktadır. Karmaşık yapısal modelleme, gerçek zemin davranışının yanlış temsil edilmesini önlemek için önemli hesaplama uzmanlığı ve dikkatli parametre seçimi gerektirir (Galvín vd., 2010; Zhang vd., 2019). Mesh oluşturma bir diğer kritik konudur ve zayıf meshleme yakınsama hatalarına veya yanlış sonuçlara yol açarak zaman alıcı hassasiyet analizleri gerektirebilir (Galvin vd., 2010). Ayrıca, yüksek hesaplama talepleri genellikle özel donanıma erişim gerektirir ve bu da büyük ölçekli veya dinamik projeler için yaygın kullanımı sınırlar (Romero vd., 2013; Van Genechten vd., 2011).

Girdi parametrelerindeki belirsizlik, simülasyonların doğruluğunu ve güvenliğini etkileyen kritik bir sorun olmaya devam etmektedir. Birçok uygulayıcı, karmaşık zemin ortamlarında kapsamlı risk değerlendirmesi için gerekli olan olasılıksal yöntemler konusunda resmi eğitimden yoksundur (Bednarski vd., 2021; Fisher ve Eberhardt, 2012; Lı ve Zhao, 2013). Bu nedenle, model doğrulama, sayısal simülasyonların güvenilirliğini sağlamak için çok önemli bir adım haline gelmektedir. Model çıktılarının deneysel veya saha verileriyle karşılaştırılması, modellerin kalibre edilmesine ve gerçekçiliklerinin ve doğruluklarının artırılmasına yardımcı olur (Galvín vd., 2010; Lı ve Zhao vd., 2022). Şekil 2.2, zemin-yapı etkileşimini simüle etmek için kullanılan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çerçevesini vurgulayarak, bu çalışmada benimsenen sayısal modelleme yaklaşımının kavramsal bir şemasını göstermektedir. Diyagram, PLAXIS 3D modelleme sürecinin kritik yönlerini temsil eden katmanlı zemin alanları, uygulanan yükler, sınır koşulları ve ağ ayrıklaştırması gibi temel bileşenleri tasvir etmektedir. Bu şema, karmaşık geoteknik senaryoların nasıl idealize edildiğini ve hesaplamalı olarak nasıl analiz edildiğini anlamak için görsel bir temel görevi görmektedir. Çalışma, bu kavramsal temsili entegre ederek model kurulumunun arkasındaki mantığı güçlendirmekte ve sonlu eleman simülasyonlarında geometriyi, malzeme özelliklerini ve yük uygulamalarını doğru bir şekilde tanımlamanın önemini vurgulamaktadır. Şekil ayrıca teorik modelleme kavramları ile geoteknik analizde pratik uygulama arasında köprü kurulmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 2.2. Sayısal modelleme şeması (Kavramsal FEM diyagramı)

Sonuç olarak, sayısal modelleme, özellikle de FEM, zemin-yapı etkileşimini simüle etmek ve zeminlerin karmaşık davranışlarını yakalamak için güçlü ve esnek bir yaklaşım sunmaktadır. Model karmaşıklığı, ağ oluşturma, hesaplama yükü ve doğru girdi verilerine duyulan ihtiyaç gibi zorlukları beraberinde getirir de bunlar uygun doğrulama ve uzmanlık yoluyla ele alınabilir. Gelişmiş sayısal araçların geoteknik analize dahil edilmesi yalnızca doğruluğu ve tasarım güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda mühendislerin karmaşık ve değişken saha koşullarına etkili bir şekilde yanıt vermesine olanak tanır.

#### 2.4. PLAXIS 3D'nin Temel Analizinde Kullanımı

PLAXIS 3D, karmaşık zemin-yapı etkileşimlerini simüle etmedeki gelişmiş yetenekleri nedeniyle geoteknik mühendisliğinde sığ temellerin modellenmesi için güçlü bir araç olarak kabul edilmektedir. Üç boyutlu sonlu eleman analizi (FEM) çerçevesini kullanarak, zemin ve temel sistemlerinin mekansal davranışını doğru bir şekilde temsil eder. Güçlü yönlerinden biri, doğrusal olmayan zemin tepkilerini ve plastik deformasyonları etkili bir şekilde yakalayan ve böylece oturma tahminlerini ve yük dağılımı analizini iyileştiren Mohr-Coulomb ve Pekleşen Zemin Modelleri de dahil olmak üzere sofistike bünye modellerinin uygulanmasında yatmaktadır (Zedan ve Maulood, 2017). Yazılım ayrıca, inşaat süreci boyunca gözenek basınçlarındaki ve efektif gerilmelerdeki değişiklikleri izleyerek temellerin zamana bağlı davranışını analiz etmek için gerekli olan gerçekçi aşamalı inşaat simülasyonlarına da izin vermektedir (Shaaban vd., 2024; Shan vd., 2020).

PLAXIS 3D ayrıca, mühendislerin doymuş zeminlerdeki yapısal davranışı değerlendirmek için kritik olan yükleme altında aşırı boşluk suyu basıncının birikmesini ve dağılmasını modellemelerine olanak tanıyan sağlam boşluk basıncı analiz araçlarını da içerir (Alam vd., 2021; Szepesházi vd., 2016). Kontur çizimleri ve grafik çıktılar gibi gelişmiş görselleştirme özellikleri, temellerin etrafındaki gerilme dağılımını, yer değiştirme alanlarını ve plastik bölgeleri yorumlamaya yardımcı olarak daha iyi tasarım kararlarına katkıda bulunur (Alasadı ve Mustafa, 2022; Alsamia ve Koch, 2023). Bu yetenekler, yazılımın temel performans değerlendirmelerinin doğruluğunu ve gerçekçiliğini artırmadaki rolünü toplu olarak geliştirmektedir.

PLAXIS 3D'nin önemli bir özelliği, mühendislerin aşamalı yük uygulama ve kazı süreçlerini simüle etmelerini sağlayan aşamalı inşaat modellemesidir. Bu yaklaşım, gerçek dünyadaki inşaat dizilerini yakından taklit eder ve zaman içinde zemin tepkisinin analiz edilmesine yardımcı olur. Çalışmalar, aşamalı inşaat simülasyonlarının, özellikle yumuşak zeminlerde gözenek basıncı gelişimi ve oturma tahminlerini iyileştirdiğini, temel performansı ve uzun vadeli stabilitenin daha kesin değerlendirilmesine yol açtığını göstermiştir (Alı ve Ansary, 2021; Putra Pratama ve Ganjar Asandi, 2022).

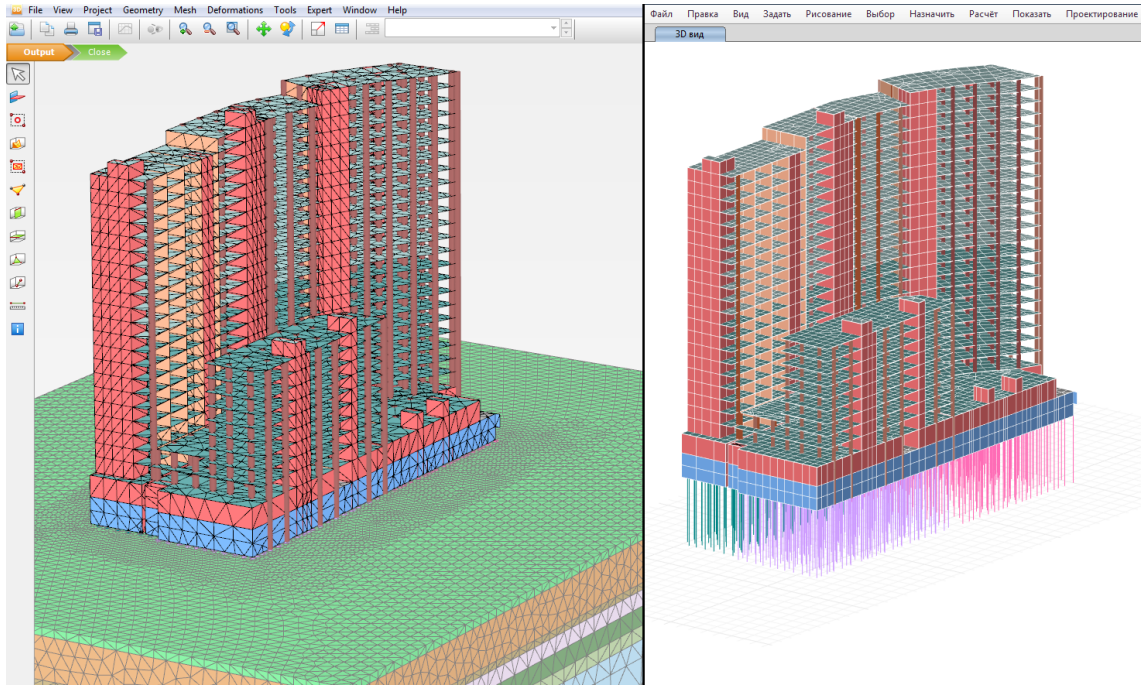
Ayrıca, PLAXIS 3D birden fazla gelişmiş zemin yapısal modelini desteklemektedir. Mohr-Coulomb modeli, çeşitli geoteknik uygulamalarda başarılı bir şekilde doğrulanan zemin plastisitesi ve mukavemet özelliklerinin basitleştirilmiş ancak etkili bir temsilini sunar (Hemeda, 2022; Putra Pratama ve Ganjar Asandi, 2024). Pekleşen Zemin modeli ise gerilmeye bağlı rijitliği ve doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini hesaba katarak yük altındaki karmaşık zemin davranışını analiz etmek için özellikle uygun hale getirmektedir. Bu model, pratik uygulamalarda öngörülen ve gözlemlenen davranışlar arasındaki tutarsızlıkları azaltarak oturma ve taşıma kapasitesinin daha doğru bir şekilde araştırılmasını sağlar (Alnmr ve Alsırawan, 2024; Rebolledo vd., 2019).

Gelişmiş bünye modellerinin ve aşamalı inşaat simülasyonlarının entegrasyonu, PLAXIS 3D modellemesinin doğruluğunu önemli ölçüde artırır. Bu araçlar, oturma, konsolidasyon ve taşıma kapasitesi ile ilgili tahminlerin güvenilirliğini artırarak yapının ömrü boyunca beklenmedik deformasyon riskini azaltır (Alsamia ve Koch, 2023; Tarenia ve Patra, 2019). Saha verileri karşılaştırmaları, yazılımın çeşitli geoteknik koşullarda doğruluğunu ve güvenilirliğini teyit ederek bu yetenekleri doğrulamıştır.

Birkaç önemli araştırma çalışması, PLAXIS 3D'nin gerçek dünyadaki geoteknik zorlukları ele almada geniş uygulanabilirliğini daha da göstermektedir. Geo-hücre

takviyeli kum yataklarını modellemek için PLAXIS 3D kullanılan bir çalışmada yazılımın Eşdeğer Kohezyonlu Alan (ECA) yönteminden daha doğru sonuçlar verdiğini tespit etmiştir (Sanjeı ve De Silva, 2016). Kıyı zemini arıtımı için üç eksenli test simülasyonlarında PLAXIS 2D kullanılmış ve çalışmalar 2D versiyona odaklanmış olsa da gerçekçi modelleme için PLAXIS araçlarına artan güveni göstermiştir. PLAXIS 3D ile güvenlik faktörlerini hesaplamada yararlı olduğu kanıtlanan kaymayı önleyici kazıklar kullanarak şev stabilitesini analiz edilmiştir (Zhou vd., 2024). PVD ile güçlendirilmiş yumuşak zeminlerdeki oturmalar modellenerek yazılımın yumuşak zemin analizindeki değerini teyit edilmiştir (Kuganeswaran vd., 2021). Kumlu zeminde tekil kazıklarda çekme kuvvetleri ve yer değiştirmeler incelenmiş ve sayısal sonuçlar deneysel verilerle doğrulamıştır (Alsami ve Koch, 2023). Killi zeminlerde kazıklı radye temeller altında boşluk suyu basınçları üzerindeki sismik etkileri araştırmak için PLAXIS 3D kullanılmıştır (Nafel ve Karkush, 2024). Son olarak, yumuşak zemindeki taban külü kolonları üzerindeki dolgular modellenerek PLAXIS 3D'nin zorlu yeraltı koşullarındaki faydası gösterilmiştir (Abbıl vd., 2022). Şekil 2.3 Kafesli yapısal elemanları ve katmanlı zemin alanlarını gösteren PLAXIS 3D model görünümü, sayısal modellemede kullanılan sonlu eleman ayrıklaştırmasını ve malzeme tabakalaşmasını göstermektedir.

Bu çalışmalar, PLAXIS 3D'nin çeşitli geoteknik senaryoların modellenmesindeki çok yönlülüğünü ve hassasiyetini göstermekte ve temellerin etkili tasarım ve analizine katkılarını vurgulamaktadır. Bu tez projesi kapsamında, *Sayısal Yöntemler Kullanılarak Kohezyonlu Zeminler Üzerindeki Sığ Temellerin Analizi* PLAXIS 3D'nin kullanımı önemli bir rol oynamaktadır. Yazılımdan elde edilen simülasyon sonuçları, temel analizinde sonlu eleman modellemesinin avantajlarını vurgulamak için geleneksel el hesaplama sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır. Bu entegrasyon sadece tezin teorik temellerini desteklemekle kalmamakta, aynı zamanda sonuçların güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini de artırmaktadır.



Şekil 2.3. PLAXIS model görünümü katmanlı örgü model örneği

## 2.5. Literatür Özeti ve Araştırma Boşluğu

Kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin oturma analizine ilişkin mevcut literatür, çeşitli yükleme ve çevresel koşullar altındaki performansı anlamak için sağlam bir temel sunmaktadır. Yapılan çalışmalar, temel oturması ile yapısal hasar arasındaki güçlü bağı vurgulayarak geoteknik değerlendirmelerin önemini pekiştirmektedir (Hotala ve Ignatowicz, 2019). Literatürdeki çalışmalar, oturmanın zemin türü, yeraltı suyu seviyeleri, yükleme şekilleri ve temel geometrisinden etkilendiğini sürekli olarak vurgulamaktadır.

Terzaghi'nin konsolidasyon teorisi gibi klasik teorilere dayanan analitik el hesaplama yöntemleri, basitlikleri ve hızları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemler genellikle zemin homojenliği ve doğrusal elastik davranış gibi basitleştirici varsayımlara dayanır ve bu da karmaşık, katmanlı veya anizotropik zeminlere uygulanabilirliklerini sınırlar. Bu basitleştirmeler, özellikle geleneksel yöntemlerin doğrusal olmayan zemin davranışını ve zemin hareketlerini yakalamakta zorlandığı dinamik veya aşırı yükleme koşulları altında yanlışlıklara yol açabilir (Besharatinezhad vd., 2019).

Buna karşılık, PLAXIS 3D'de uygulanan Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) gibi sayısal modelleme yaklaşımları, ayrıntılı zemin-yapı etkileşimlerini simüle etmek için güçlü araçlar olarak ortaya çıkmıştır. (Rashiddel vd., 2018; Shan vd., 2020) gibi çalışmalar, FEM modellerinin gelişmiş bünye kanunlarını ve aşamalı yapıyı dahil ederek nasıl daha doğru ve temsili simülasyonlar sağlayabileceğini göstermektedir. Bu güçlü yönlerine rağmen, sayısal yöntemlerin de yüksek hesaplama talepleri ve özel uzmanlık ihtiyacı gibi sınırlamaları vardır. Ayrıca, tamamen sayısal modeller bazen muhafazakar tahminler üreterek beklenen ve gözlemlenen oturma performansı arasında bir tutarsızlık yaratabilir.

Literatürde tespit edilen önemli bir araştırma boşluğu, özellikle değişken rijitliğe veya katmanlaşmaya sahip kohezyonlu zeminler için elle yapılan hesaplamaları sayısal simülasyonlarla karşılaştıran kapsamlı doğrulama çalışmalarının eksikliğidir. Önceki çalışmaların çoğu, genellikle tutarlı sınır koşulları altında yan yana değerlendirmeler yapmadan, tek başına analitik veya sayısal yöntemlere odaklanmaktadır. (Besharatinezhad vd., 2019)'in belirttiği gibi, çoğu çalışma değişen zemin profillerinin getirdiği gerçek dünya karmaşıklıklarını ele almayı ihmal etmekte, bu da her bir yöntemin nasıl ve ne zaman etkili bir şekilde uygulanacağı konusunda sınırlı rehberlik sağlamaktadır.

Salih vd. (2023) gibi çalışmalar PLAXIS'in özellikle yumuşak zeminler için oturma tahminindeki yeteneklerini doğrularken, literatürde aynı geoteknik senaryolar altında analitik ve sayısal yaklaşımları doğrudan karşılaştıran yeterli vaka bazlı değerlendirme bulunmamaktadır. Ayrıca, farklı zemin parametrelerinin (konsolidasyon özellikleri, drenaj koşulları ve rijitlik değişimi gibi) bu yöntemler arasında öngörülen oturma sonuçlarındaki farklılaşmayı nasıl etkilediğine dair çok az araştırma vardır.

Bu araştırma, çeşitli kohezyonlu zeminler üzerindeki 42 sığ temel vakası için teorik hesaplamaları ile PLAXIS 3D simülasyonları arasında sistematik bir karşılaştırma yaparak bu boşluğu ele almaktadır. Çalışma, temel boyutu, derinliği, yük yoğunluğu ve zemin kıvamı gibi değişkenlerin etkisini inceleyerek, analitik ve sayısal sonuçların aynı hızda olduğu veya ayrıştığı koşulları belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu, tabakalı kohezyonlu zemin bağlamında doğrulama eksikliği ile uyumludur (Besharatinezhad vd., 2019). Araştırma boşluğunu vurgulamak için sığ temel oturması üzerine yapılan temel çalışmaların bir özeti Çizelge 2.2'de sunulmuştur. Tabloda analitik, laboratuvar ve FEM yaklaşımları da dahil olmak üzere her bir çalışmanın yöntemleri, odak alanları ve sınırlamaları özetlenmektedir. Değerli olmakla birlikte, çoğu çalışma 2D analizlere,

basitleştirilmiş zemin koşullarına dayanmakta veya 3D simülasyonlarla karşılaştırma yapmamaktadır. Bu tez, çeşitli temel ve zemin koşullarının ayrıntılı 3D modellemesi yoluyla bu boşlukları ele almaktadır.

Bu araştırmadan elde edilecek bulguların, her bir yöntemin en güvenilir olduğu bağlamları netleştirmesi ve böylece uygulayıcılara uygun analiz araçlarını seçme konusunda daha fazla güven vermesi beklenmektedir.

**Çizelge 2.2.** Literatürde temel oturmasının incelendiği örnek çalışmalar

Kaynak	Zemin kıvamı / Temel Tipi	Kullanılan Metodoloji	Temel Odak / Katkı	Sınırlamalar
<b>Shahin ve diğerleri (2005)</b>	Killi zeminler / Sığ temeller	Ampirik korelasyonlar	Kohezyonlu zeminler için ampirik yöntemlerin sınırlamaları vurgulanmıştır	İdeal zemin davranışı varsayıldı, sayısal doğrulama yapılmadı
<b>Fattah ve diğerleri (2013)</b>	Yumuşak kil / Şerit temel	Analitik + deneysel	Statik yük altında analiz edilen konsolidasyon davranışı	Basitleştirilmiş sınır koşulları ve tekdüze zemin
<b>Elbeih ve Soliman (2015)</b>	Kohezyonlu zeminler / Tampon temel	Laboratuvar testleri	Zemin sıkışabilirliğinin oturma üzerindeki vurgulanmış etkisi	Sayısal modelleme yapılmamıştır
<b>Nguyen ve diğerleri (2016)</b>	Yumuşak kil / Radye temel	PLAXIS 2D FEM	Modellenmiş gözenek basıncı ve stres etkileşimi	Yalnızca 2D, karmaşık geometriler için sınırlı 3D gerçekçilik
<b>Waheed ve Asmael (2023)</b>	Yumuşak ve sert killer / Radye temel	Analitik hesaplama vs PLAXIS 3D	Analitik ve FEM'den elde edilen oturma tahminleri karşılaştırıldı	Eksik istatistiksel model doğrulaması
<b>Tao Zhang (2024)</b>	Killi zeminler / Derin radye + termal yükler	Çoklu fizik FEM modellemesi	Tanımlanmış birleşik termal-mekanik davranış	Yüksek karmaşıklık; sığ temellere odaklanılmamış

Analitik ve sayısal sonuçları niceliksel ve niteliksel olarak karşılaştıran bu çalışma aynı zamanda tasarım uygulamalarının iyileştirilmesi, aşırı muhafazakâr varsayımların azaltılması ve deneysel ve hesaplamalı tekniklerin entegre kullanımının teşvik edilmesine yönelik içgörüler sağlayacaktır. Bunu yaparken, bu tez sadece akademik anlayışa değil, aynı zamanda kohezyonlu zeminler için geoteknik tasarımdaki pratik gelişmelere de katkıda bulunmaktadır.

### 3. MATERYAL VE METHOD

Bu çalışmada kullanılan araştırma metodolojisi, kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin oturma davranışını sayısal ve analitik yaklaşımlar kullanarak kapsamlı bir şekilde analiz etmek üzere yapılandırılmıştır. Bu bölümde PLAXIS 3D kullanılarak sonlu eleman analizinin gerçekleştirilmesi, destekleyici el hesaplamalarının yapılması ve sonuçların Yanıt yüzey Yöntemi gibi istatistiksel araçlarla doğrulanmasında izlenen adım adım prosedürler sunulmaktadır. Metodoloji, hem gerçek dünyadaki inşaat aşamalarının simülasyonunu hem de temel girdi parametrelerinin kontrollü değişimini entegre etmektedir.

Bu bölüm araştırma tasarımına genel bir bakışla başlamakta, ardından sayısal modellerde kullanılan yumuşak ve sert kil özelliklerinin ayrıntılı açıklamaları yer almaktadır. Zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, gerçekçi modelleme koşullarını sağlamak için laboratuvar tabanlı karakterizasyona ve literatür destekli değerlere dayalı olarak dikkatlice seçilmiştir.

Araştırma, sayısal modelleme, ampirik hesaplamalar ve istatistiksel değerlendirmenin bir kombinasyonu yoluyla kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin oturma davranışını araştırmak için tasarlanmıştır. Çalışmada, radye temel geometrisi, zemin özellikleri ve yeraltı suyu konumu gibi önceden tanımlanmış değişkenler kullanılarak yükleme altındaki zemin davranışının sistematik olarak değerlendirildiği nicel bir araştırma metodolojisi kullanılmıştır.

Temel genişliği (B), temel uzunluğunun genişliğine oranı (L/B), temel derinliği ( $D_f$ ) ve yapısal gerilme ( $q_0$ ) ve yeraltı su seviyesi değişkenleri ile zemin türü (yumuşak kil ve sert kil) olmak üzere toplam 42 farklı durum senaryosu geliştirilmiştir. Bu parametrik kurulum, kontrollü koşullar altında her bir faktörün oturmayı nasıl etkilediğinin araştırılmasına olanak tanımaktadır. Metodoloji üç ana bileşenden oluşmaktadır:

1. Analitik Hesaplamalar: Sayısal çıktılarla karşılaştırmak için klasik yöntemler (örn. Terzaghi'nin konsolidasyon ve elastik teorisi) kullanılarak basitleştirilmiş oturma hesaplamaları yapılmıştır.
2. PLAXIS 3D Kullanılarak Sayısal Simülasyon: Her bir vaka PLAXIS 3D'de Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak modellenmiş ve aşamalı inşaat koşulları altında gerçekçi zemin davranışını simüle etmek için Pekleşen Zemin Modeli uygulanmıştır.

3. İstatistiksel Analiz ve Değerlendirme: Oturma sonuçları elde edildikten sonra, araştırılan parametreler arasındaki etkileşimleri ve bu parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkilerini incelemek ve öngörücü denklemler oluşturmak için regresyon analizi ve yanıt yüzeyi metodolojisi (YYY) kullanılmıştır.

Araştırma iş akışı, sayısal modellerin yalnızca gerçekçi olmasını değil, aynı zamanda analitik muhakeme ve istatistiksel doğrulanmasını ve desteklenmesini sağlar. Yöntemlerin bu şekilde üçgenleştirilmesi, sonuçların güvenilirliğini ve yorumlanabilirliğini artırarak bulguları pratik geoteknik uygulamalar için daha sağlam hale getirmektedir.

### **3.1. Malzemeler**

#### **3.1.1. Zemin özellikleri**

Sığ temellerin davranışı, altta yatan zeminin geoteknik özelliklerine karşı oldukça hassastır. Bu nedenle, zemin parametrelerinin doğru bir şekilde tanımlanması, herhangi bir analitik veya sayısal analizde çok önemli bir adımdır. Bu bölümde, çalışmada kullanılan iki kohezyonlu zeminin (yumuşak kil ve sert kil) sınıflandırılması, fiziksel özellikleri ve mekanik özellikleri sunulmaktadır. Bu özellikler, anlamlı bir karşılaştırma ve model güvenilirliği sağlamak için hem analitik hesaplamalarda hem de PLAXIS 3D simülasyonlarında tutarlı bir şekilde kullanılmıştır.

Sığ temellerin performansı, zeminin türü ve özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu çalışmada, iki temel kohezyonlu zemin türü olan Yumuşak Kil ve Sert Kil, yüksek derecede sıkışabilirlikten nispeten daha az sıkışabilir koşullara kadar bir geoteknik davranış spektrumunu temsil edecek şekilde ele alınmıştır. Bu sınıflandırmalar geleneksel zemin mekaniği ilkelerine ve mühendislik yargılarına dayanmaktadır.

Yumuşak kil genellikle yüksek doğal nem içeriği, düşük kayma mukavemeti, yüksek sıkışabilirlik ve yük altında önemli oturma potansiyeli ile karakterize edilir. Zamana bağlı konsolidasyon davranışı ve düşük gerilme seviyeleri altında deforme olma eğilimi nedeniyle genellikle ayrıntılı analiz gerektirir. Buna karşılık, sert kil daha yüksek kayma mukavemeti, daha fazla sertlik ve daha düşük sıkışabilirlik sergiler, bu da onu minimum oturma ile yapısal yükleri desteklemek için daha uygun hale getirir. Bununla birlikte, sert killer bile, özellikle konsolidasyon nedeniyle uzun vadeli oturma açısından dikkatli bir değerlendirme gerektirir.

Zeminlerin fiziksel özellikleri (Çizelge 3.1)'de, mekanik özellikleri (Çizelge 3.2)'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1.** Zeminlerin fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	Zemin kıvamı	
	Yumuşak Kil	Sert Kil
Zemin sınıfı	Düşük plastisiteli kil, CL	Düşük plastisiteli kil, CL
Doğal birim hacim ağırlık, $\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.0	19.0
Doygun birim hacim ağırlık, $\gamma_r$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.5	19.5
Plastisite indisi, PI (%)	20.0	20.0
Poisson oranı, $\nu$	0.30	0.25
Boşluk oranı, $e$	0.9	0.7
Permeabilite katsayısı, $k$ (m/gün)	2.2E-4	5.8E-5
Sıkışma indisi, $C_c$	0.166	0.031
Kabarma indisi, $C_s$	0.041	0.009

**Çizelge 3.2.** Zeminlerin mekanik özellikleri

Zemin davranışı	Mekanik özellik	Zemin kıvamı	
		Yumuşak Kil	Sert Kil
Kısa dönem (drenajsız)	Kohezyon, $c$ (kPa)	22.5	86.25
	İçsel sürtünme açısı, $\phi$ (°)	0	0
	Elastisite modülü, $E_u$ (kPa)	6600	25300
Uzun dönem (drenajlı)	Hacimsel sıkışma katsayısı, $m_v$ (m <sup>2</sup> /kN)	1.52E-4	3.95E-5
	Kohezyon, $c'$ (kPa)	2.25	8.63
	İçsel sürtünme açısı, $\phi'$ (°)	30.8	30.8
	Elastisite modülü, $E'$ (kPa)	2640	12650
	Hacimsel sıkışma katsayısı, $m_v'$ (m <sup>2</sup> /kN)	3.79E-4	7.91E-5

Bu çalışmada, kohezyonlu zeminlerin (yumuşak ve sert killi zeminler) mekanik özellikleri, Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) değerleri, zemin kıvamı ve plastisite özelliklerine dayanan yaygın olarak kabul görmüş ampirik korelasyonlar kullanılarak tahmin edilmiştir. Parametreler geoteknik literatürden seçilmiş olup, aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) değerlerine dayalı olarak zeminler ve zayıf kayalar için basitleştirilmiş bir sınıflandırma sistemi (Çizelge 3.3) sunmaktadır. Çizelge, kum ve kil gibi farklı zemin türlerini, karşılık gelen  $N_{60}$  değerlerine göre “çok yumuşak”, ‘sert’ veya “çok yoğun” gibi kıvam veya sıklık aralıklarına göre sınıflandırmaktadır. Bu sınıflandırma, ön saha araştırmaları sırasında zemin davranışını ve mukavemetini değerlendirmek için geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada yumuşak kil için ve sert kil özellikleri belirlenirken  $N_{60}$  değerleri sırasıyla 6 ve 23 alınmıştır.

**Çizelge 3.3.** SPT-*N* değerine bağlı zemin ve kaya sınıflandırması (Clayton, 1995)

Zemin Türü	SPT- <i>N</i>	Zemin Sınıflandırması	
Kum	$(N1)_{60}$	0 – 3	Çok gevşek
		3 – 8	Gevşek
		8 – 25	Orta sıkı
		25 – 42	Sıkı
		42 – 58	Çok sıkı
Kil	$N_{60}$	0 – 4	Çok yumuşak
		4 – 8	Yumuşak
		8 – 15	Orta Katı
		15 – 30	Katı
		30 – 60	Çok katı
		> 60	Sert
Zayıf Kaya	$N_{60}$	0 – 80	Çok zayıf
		80 – 200	Zayıf
		> 200	Orta derecede zayıftan çok serte kadar

Çeşitli vaka çalışmalarında Butler (1975), toprağın drenajsız elastik modülünün  $E_u$ , Standart Penetrasyon Testi darbe sayısı  $N_{60}$  ile ampirik olarak ilişkili olabileceğini göstermiştir. Bu ilişki Denklem (3.1) ile ifade edilir ve drenajsız koşullarda zemin sertliğini tahmin etmek için yararlı bir yaklaşımdır: 1.1 MN/m<sup>2</sup> ortalama değeri alınarak, genel saha tabanlı sertlik tahmin uygulamalarıyla tutarlılık sağlanır ve kısa vadeli sertliği belirlemek için, drenajsız elastik modül şu şekilde tahmin edilmiştir:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_u / N_{60} = (1 - 1.2)MN/m^2 \\ E_u = N_{60} \times (1000 - 1200)kPa \Rightarrow E_u = N_{60} \times 1100kPa \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Kohezyonlu zeminler için, uzun vadeli davranışı temsil eden drenajlı elastisite modülü  $E_s$ , genellikle Denklem (3.2)'de gösterildiği gibi  $E_u$  ve bir azaltma faktörü  $\beta'$  arasındaki ilişki kullanılarak tahmin edilir: Yumuşak kil için  $\beta'=0.4$  ve sert kil için  $\beta'=0.6$  alınmıştır.

$$E'_s = \beta' \cdot E_u \quad (3.2)$$

Burada,  $\beta'$  faktörü zeminin türüne ve kıvamına bağlıdır. Çizelge 3.4, (Poulos H.G. ve Small J.C., 2000) tarafından önerilen farklı zemin türleri için önerilen  $\beta'$  değerlerini göstermektedir. Bu yöntemde, zeminin Poisson oranı ve plastisite indeksi (PI) modül azalması üzerindeki etkisi genellikle dikkate alınmaz.

**Çizelge 3.4.** Değişik zemin türleri için önerilen  $\beta'$  faktörleri (Poulos H.G. ve Small J.C., 2000)

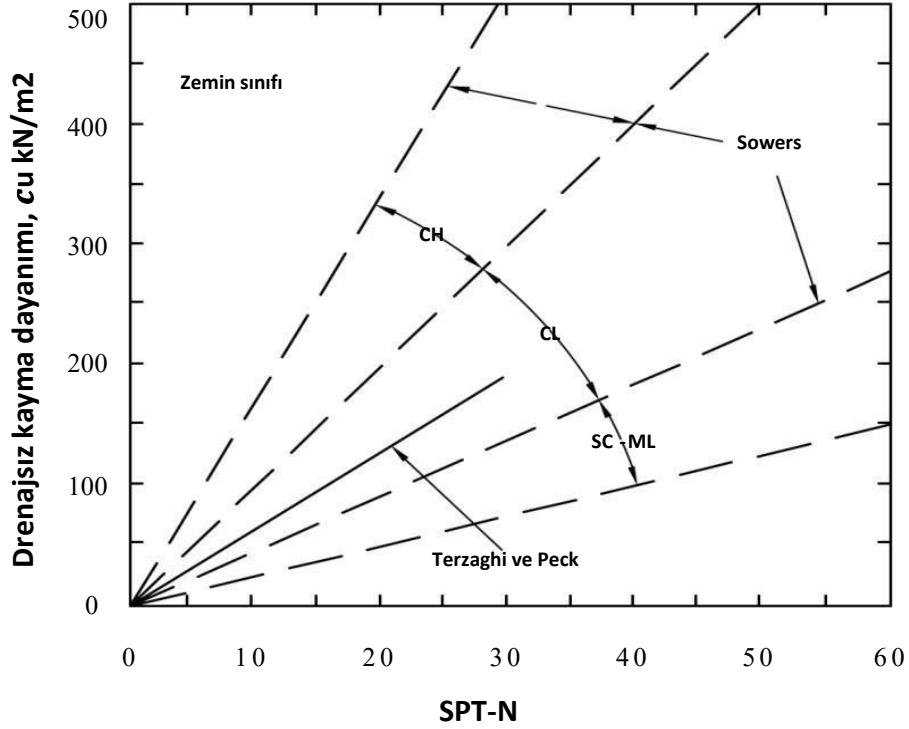
Fiziksel özellik	$\beta'$ faktörü
Çakıl	0.9
Silt	0.8
Silt, siltli kil	0.7
Sert kil	0.6
Yumuşak kil	0.4

Daha sonra, toprağın kısa vadeli (drenajsız) sıkıştırılabilirlik davranışını temsil etmek için, hacimsel sıkıştırılabilirlik katsayısı  $m_v$ , drenajsız elastik modül  $E_u$ 'nun tersi olarak hesaplandı. Benzer şekilde, uzun vadeli drenajlı koşullar için, karşılık gelen sıkıştırılabilirlik  $m_v'$ , zemin türüne bağlı olarak uygun indirgeme faktörleri kullanılarak drenajsız modülden türetilen drenajlı modül  $E_s$ 'nin tersi alınarak hesaplandı.

Kohezyonlu zeminlerin drenajsız kesme mukavemetini  $c_u$  tahmin etmek için, SPT-N değeri ile  $c_u$  arasında ampirik bir korelasyon kabul edilmiştir. (Terzaghi ve Peck, 1967) tarafından önerilen ve daha sonra (Sowers, 1980) tarafından zeminin plastisitesini hesaba katmak için geliştirilen bu ilişki, Denklem (3.3) ile analitik olarak ifade edilmektedir. Bu denkleme göre,  $c_u$  ile  $N_{60}$  arasındaki katsayı plastisite düzeyine göre değişir: yüksek plastisiteli killer için 12.5, orta plastisiteli killer için 7.5 ve düşük plastisiteli killer için 3.75 (Denklem 3.3). Bu çalışmada, düşük plastisiteli kil (CL) zeminler analiz edildi ve bu nedenle  $c_u=3.75*N_{60}$  ifadesi uygulandı. Seçilen  $N_{60}$  değerleri, (Çizelge 3.3)'te sunulan zemin sınıflandırma aralıklarına göre belirlenmiştir. Bu çizelge, kohezyonlu zeminleri standart penetrasyon direncine göre sınıflandırmaktadır. Örneğin,  $N_{60}=6$  olduğunda, hesaplanan drenajsız kesme mukavemeti  $c_u=22.5$  kPa iken,  $N_{60}=23$  olan daha sert kil için sonuç  $c_u=86.25$ 'tir. Bu korelasyon, farklı zemin türleri ve plastisite aralıkları için SPT-N ile  $c_u$ 'nin değişimini gösteren (Şekil 3.1)'de görsel olarak gösterilmiştir. Terzaghi–Peck ve Sowers çizgilerini birleştiren bu grafik, toprağın plastisitesinin drenajsız mukavemet tahminine etkisini vurgulamaktadır.

Uzun vadeli drenaj koşulları altında efektif kohezyonu ( $c'$ ) tahmin etmek için, drenajlı kesme mukavemeti parametreleri drenajsız parametrelerden türetildi. Spesifik olarak,  $c'$  değeri, doğrudan üç eksenli test verileri mevcut olmadığında pratik geoteknik tasarımda yaygın olarak kabul edildiği gibi, karşılık gelen  $c_u$  değerinin %10'u olarak alındı.

$$c_u(kN / m^2) = \begin{cases} \text{Yüksek plastisiteli kil:} & 12.5 N \\ \text{Orta plastisiteli kil:} & 7.5 N \\ \text{Düşük plastisiteli kil:} & 3.75 N \end{cases} \quad (3.3)$$



Şekil 3.1. SPT-N –  $c_u$  ilişkisi (Sowers, 1980; Terzaghi ve Peck, 1967)

Uzun vadeli (drenajlı) koşullar için efektif içsel sürtünme açısı ( $\phi'$ ) tanımlamak için, Plastisite İndeksi (PI) ile  $\phi'$  arasındaki ilişki kullanılmıştır. Drenajsız koşullar kısa vadeli davranışı temsil ettiğinden,  $\phi'$  genellikle sıfır olarak alınır. Ancak, uzun vadeli analiz için  $\phi'$  değerleri toprağın plastisite özelliklerine göre seçilmiştir. Spesifik olarak, plastisite indeksi  $PI = 20$  için, karşılık gelen  $\phi' = 30.8^\circ$  benimsenmiştir. Bu değer, geoteknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan PI ve  $\phi'$  arasındaki ampirik korelasyonları gösteren Çizelge 3.5'ten belirlenmiştir.

Çizelge 3.5. Plastisite indeksi (PI) ile efektif iç sürtünme açısı ( $\phi'$ ) arasındaki ilişki (terzaghi ve peck 1967)

Plastisite Endeksi	İçsel sürtünme açısı, $\phi'$ ( $^\circ$ )
10	33.3
20	30.8
30	29.2
40	27.1
50	25.6
60	24.6
70	23.8
80	23.1

### 3.1.2. Betonarme elemanların özellikleri

Sayısal modellemede, üst yapı ile alttaki zemin arasındaki yük aktarım mekanizmasını simüle etmek için temel sistemi doğru bir şekilde tanımlanmalıdır. Bu çalışmada, sığ temeli temsil etmek üzere bir radye temel kullanılmıştır. Bu temel türü, yapısal yükleri daha geniş bir alana dağıtma, temel taban basıncını azaltma ve özellikle yumuşak veya orta derecede sert kohezyonlu zeminlerde faydalı olan farklı oturmaları en aza indirme kabiliyeti nedeniyle seçilmiştir. Bununla birlikte, sayısal modellemelerde temel kazısı sırasında zeminde göçme veya yatay deplasman olmaması için bodrum duvarı tanımlanmıştır. Betonarme elemanların C30/37 beton kalitesinde olacağı düşünülmüş olup, malzeme özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Betonarme yapı elemanlarının özellikleri

Özellik	Eleman Türü	
	Radye Temel	Bodrum Duvarı
Doğal birim hacim ağırlık, $\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	24.0	24.0
Kalınlık (m)	1.2	0.4
Elastisite modülü, E (kPa)	30.0E6	30.0E6
Kayma modülü, G (kPa)	12.5E6	12.5E6
Poisson oranı, $\nu$	0.20	0.20

### 3.2. Analiz Programı

Çalışmada iki tür sığ temel şekli dikkate alınmıştır: kare ve dikdörtgen. Bu şekiller, gerçek dünyadaki geoteknik ve yapı mühendisliği uygulamalarında karşılaşılan yaygın tasarım senaryolarını yansıtacak şekilde seçilmiştir. Kare temeller eşit uzunluk ve genişlikte modellenirken, dikdörtgen temeller en-boy oranının oturma performansı üzerindeki etkisini araştırmak için daha büyük bir uzunluk-genişlik (L/B) oranına sahiptir. Temellere uygulanan yapısal gerilme değerleri 50 kPa ila 500 kPa arasında değişmekte olup hafif ila orta dereceli yapısal yükleri temsil etmektedir. Temel derinlikleri 0.0 m (yüzey temeli) ile 6.0 m arasında değişmekte olup farklı gömülme seviyelerinde oturma performansının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Yeraltı su seviyesinin en yüksekte temel kotunda, en alçakta ise yapı-temel sistemini etkilemeyecek kadar derinde olacağı farklı senaryolar düşünülmüştür. Yapı-zemin etkileşimi sonucu temel zeminindeki oturmaların araştırıldığı çalışmada kullanılan bağımsız değişkenler şunlardır: temel genişliği (B), temel derinliği ( $D_f$ ), en boy oranı (L/B), yapısal gerilme ( $q_0$ ), yeraltı su seviyesi derinliği ( $D_{su}$ ) ve zemin kıvamı.

Analiz programı, Design-Expert yazılım ortamında ve Yanıt Yüzey Yöntemiyle oluşturulan yapılandırılmış bir deneysel tasarıma dayanmaktadır. Birden fazla bağımsız değişkenin sığ temellerin oturma davranışı üzerindeki etkisini sistematik olarak araştırmak için kısmi faktöriyel tasarım benimsenmiştir. Bu yöntem, değişken seviyelerinin kısmi kombinasyonlarının dikkate alınmasını sağlayarak hem ana etkilerin hem de etkileşim etkilerinin gözlemlenmesine olanak tanımaktadır.

**Çizelge 3.7.** Analiz programı

Analiz numarası	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	B (m)	L/B	$D_f$ (m)	Zemin türü
1	50	10.4	5.0	5.0	6.0	Yumuşak Kil
2	50	36.0	5.0	5.0	0.8	Yumuşak Kil
3	120	20.6	10.2	1.0	6.0	Yumuşak Kil
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil
5	95	6.0	15.0	2.9	6.0	Yumuşak Kil
6	110	36.0	5.0	5.0	6.0	Yumuşak Kil
7	95	6.0	15.0	2.9	6.0	Yumuşak Kil
8	250	6.0	9.9	4.8	6.0	Sert Kil
9	50	6.0	5.0	3.1	3.1	Sert Kil
10	50	36.0	15.0	3.0	0.0	Sert Kil
11	50	36.0	5.0	1.5	6.0	Yumuşak Kil
12	275	36.0	15.0	1.0	6.0	Sert Kil
13	50	6.0	10.0	1.0	6.0	Sert Kil
14	120	36.0	15.0	2.9	2.9	Yumuşak Kil
15	60	20.3	15.0	5.0	0.0	Yumuşak Kil
16	80	36.0	10.1	1.0	0.0	Yumuşak Kil
17	50	36.0	5.0	5.0	6.0	Sert Kil
18	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil
19	120	20.4	5.0	2.9	1.0	Yumuşak Kil
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil
21	500	6.0	5.0	3.0	6.0	Sert Kil
22	500	36.0	10.0	5.0	1.5	Sert Kil
23	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil
24	50	6.0	15.0	5.0	3.0	Sert Kil
25	275	6.0	5.0	5.0	0.0	Sert Kil
26	500	36.0	5.0	1.0	3.0	Sert Kil
27	130	6.0	15.0	1.3	0.5	Sert Kil
28	50	20.9	15.0	1.0	2.9	Yumuşak Kil
29	50	6.0	10.1	2.9	0.0	Yumuşak Kil
30	500	6.0	15.0	1.0	1.5	Sert Kil
31	80	6.0	5.0	1.0	2.9	Yumuşak Kil
32	50	6.0	10.1	2.9	0.0	Yumuşak Kil
33	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil
34	50	36.0	13.8	5.0	6.0	Yumuşak Kil
35	120	6.0	10.2	5.0	2.9	Yumuşak Kil
36	50	21.0	5.0	1.0	0.0	Sert Kil
37	50	20.9	15.0	1.0	2.8	Yumuşak Kil
38	120	21.0	10.0	4.1	6.0	Yumuşak Kil
39	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil
40	80	6.0	5.0	1.0	2.9	Yumuşak Kil
41	500	21.0	15.0	5.0	6.0	Sert Kil
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil

Araştırma programında 5 adet numerik 1 adet de kategorik faktör bulunmaktadır. Numerik parametrelerin alt ve üst sınır değerleri; yapısal gerilme için 50-500kPa, temel genişliği için 5-15m, temel en boy oranı için 1-5, YASS derinliği için 6-30m ve temel derinliği için 0-6m seçilmiştir. Kategorik faktör olarak zemin cinsi için yumuşak ve sert kil zemin seçilmiştir. Her değişkene birden fazla seviye atanmış (örneğin,  $D_f$  için 4 değer, L/B için 4 değer, vb.) ve sonuçta tüm kombinasyonları kapsayan toplam 42 adet analiz elde edilmiştir (Çizelge 3.7). Bu vakalar, PLAXIS 3D analizlerde ve analitik hesaplamalarında halihazırda modellenmiş ve analiz edilmiş parametrik vakalara tam olarak karşılık gelmektedir. İstatistiksel modellemede kullanılan tepki değişkeni hem analitik hesaplamalar hem de PLAXIS 3D simülasyonları kapsamında hesaplanan oturma değerleridir.

### 3.3. Oturma Analiz Yöntemleri

#### 3.3.1. Analitik hesaplama yöntemi

PLAXIS 3D'de gerçekleştirilen gelişmiş sonlu eleman analizlerini tamamlamak amacıyla, sığ temellerin oturmasını tahmin etmek için klasik geoteknik formüller de kullanılmıştır. Analitik hesaplama yönteminin amacı iki yönlüdür. Birincisi, sayısal sonuçların doğruluğunu ve geçerliliğini değerlendirmek için basitleştirilmiş bir analitik temel sağlamak; ikincisi, teorik tahminlerin pratik koşullar altında nasıl performans gösterdiğine dair şeffaf bir görünüm sunmak.

Oturma hesaplarında iki ana bileşeni ele alınmıştır:

1. Elastik (Ani) Oturma: Killer için drenajsız koşullar varsayılarak modül tabanlı denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.
2. Birincil Konsolidasyon Oturması: Sıkışma indisi ( $C_c$ ) yöntemiyle tek boyutlu Terzaghi teorisi kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalar, temel geometrisi, uygulanan yük, zemin özellikleri (ör. modül, boşluk oranı, birim ağırlıklar) ve sınır koşulları (derinlik, su seviyesi) gibi girdilerle birlikte her vaka için standartlaştırılmış denklemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PLAXIS 3D sonuçları ile doğrudan karşılaştırılabilirliği sağlamak için 42 vakanın tamamında tutarlı bir metodoloji uygulanmıştır. Gerektiğinde, sonuçları kalibre etmek ve sayısal modelde yakalanan katmanlı, zamana bağlı davranışı daha iyi yansıtmak için düzeltme faktörleri veya revize edilmiş parametre varsayımları gibi ayarlamalar yapılmıştır.

### **Elastik oturma hesabı:**

Elastik oturma, uygulanan yükleme altında zeminin aniden düşey deformasyonunu temsil eder ve özellikle drenajsız koşullar altında doymuş kohezyonlu zeminlerde önemli bir zaman gecikmesi olmadan meydana gelir. Bu çalışma için elastik oturma, temel boyutları, yapısal gerilme ve zemin rijitlik özelliklerini içeren klasik elastisite tabanlı formül kullanılarak (Denklem 3.4) hesaplanmıştır.

$$S_e = \frac{q_0 \cdot B (1-v^2)}{E_s} \cdot I_s \quad (3.4)$$

burada;  $S_e$ : Elastik (ani) oturma (m),  $q_0$ : yapısal gerilme (kPa),  $B$ : temel genişliği (m),  $E_s$ : drenajsız elastisite modülü (kPa),  $v$ : Poisson oranı,  $D_f$ : temel derinliği (m),  $I_s$ : temel şekil katsayısı

Hesaplanan elastik oturmalar daha sonra PLAXIS analizlerinde elde edilen ve toplam oturma profilinin ilk bileşeni olarak hizmet eden ani tepki ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, basitleştirilmiş elastik teorinin sayısal modelde gözlemlenen erken aşama deformasyon davranışına yakın bir yaklaşım sağlayıp sağlamadığının doğrulanmasına yardımcı olmuştur.

### **Birincil konsolidasyon oturmasının hesabı:**

Birincil konsolidasyon oturması, sürekli yükleme altında aşırı boşluk suyu basıncının dağılması nedeniyle doymuş kohezyonlu zeminlerin zamana bağlı düşey sıkışmasını temsil eder. Bu çalışma için birincil oturma, klasik Terzaghi'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisi kullanılarak ve sıkıştırma indisi yöntemi ( $C_c$  tabanlı) dahil edilerek hesaplanmıştır (Denklem 3.5).

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \text{Log}_{10} \left( \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_o} \right) \quad (3.5)$$

$$\Delta\sigma = 4 \cdot k \cdot q_{net} \quad (3.6)$$

$$k = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \cdot \left( \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1} \right) \right] \quad (3.7)$$

$$m = \frac{B}{2z}, \quad n = \frac{L}{2z} \quad (3.8)$$

burada,  $S_c$  = birincil konsolidasyon oturması (m),  $C_c$  = sıkışma indisi,  $H$  = sıkışabilir katmanın kalınlığı (m),  $e_0$  = kilin başlangıç boşluk oranı,  $\sigma'_0 = \gamma' \cdot z$  sıkışabilir tabakanın orta derinliğindeki düşey efektif gerilme (kPa),  $\Delta\sigma$  = sıkışabilir tabakanın ortasına aktarılan ilave düşey gerilme (kPa),  $\gamma'$ , yeraltı suyu seviyesinin altındayken doymuş birim ağırlıktan su birim ağırlığının çıkarılmasıyla hesaplanan zeminin efektif birim ağırlığı,  $k$  boyutsuz Boussinesq gerilme etki faktörüdür.

Sıkışabilir tabaka kalınlığı (H), TBDY 2018 Madde 16A.1.4'ün gerektirdiği şekilde  $\Delta\sigma$ 'nın  $\sigma'_v$ 'nin %10'una eşit olduğu derinlik ile 1.5B derinlikten büyük olanı seçilmiştir.

Bu yöntem basitliği ve geoteknik uygulamalarda yaygın kullanımı nedeniyle seçilmiştir. Karmaşık 3B veya zamana bağlı etkileşimleri yakalayamasa da oturmaların büyüklük sırasını değerlendirmek ve gelişmiş sonlu eleman sonuçlarıyla karşılaştırıldığında büyük sapmaları belirlemek için bir ölçüt sağlar.

### **Analitik yönteminin varsayımları ve sınırlamaları**

Bu çalışmada elastik ve birincil konsolidasyon oturmalarını tahmin etmek için kullanılan analitik yöntemler klasik zemin mekaniği formülasyonlarına dayanmaktadır. Bu yöntemler ön tasarım ve akademik karşılaştırma için değerli olmakla birlikte, kabul edilmesi gereken çeşitli varsayımlara ve sınırlamalara tabidir:

1. Tek boyutlu konsolidasyon varsayımı: Birincil konsolidasyon oturma formülü, yanal zemin hareketini veya 3D etkileri ihmal ederek yalnızca düşey gerilmeyi varsayar. Gerçekte, bir temelin altındaki zemin, özellikle büyük yükler ve değişen rijitlik profilleri altında üç boyutlu bir şekilde davranır.
2. Homojen zemin tabakası ve özellikleri: Analitik hesaplamada zemin katmanının homojen, izotropik ve tamamen doymuş olduğu varsayılmaktadır. Buna karşılık PLAXIS 3D, değişken katmanlar, sertlik değişiklikleri ve su tablasının üzerindeki doymamış bölgeler ile daha gerçekçi modellemeye olanak tanır.
3. Sabit modül ve  $C_c$  değerleri: Her bir zemin türü için sabit bir Young modülü ( $E_s$ ) ve sıkışma indisi ( $C_c$ ) varsayılırken, uygulamada bu parametreler derinliğe, gerilme geçmişine veya yükleme oranına göre değişebilmektedir. PLAXIS, gelişmiş bünye modelleri (örneğin, Pekleşen Zemin modeli) aracılığıyla bu tür doğrusal olmayan davranışı modeller.

4. Basitleştirilmiş gerilme dağılımı: Temelin altındaki gerilmedeki artış, yaklaşık olan 2:1 gerilme dağılımı yöntemi veya etki faktörleri kullanılarak tahmin edilmektedir. PLAXIS gerilimi sonlu eleman ayrıklaştırması ve gerçek sınır etkileşimi kullanarak hesaplar.
5. İkincil konsolidasyon ve zaman etkisinin ihmal: Analitik yöntem ikincil oturmayı veya zamana bağlı sünmeyi hesaba katmaz. Ayrıca, PLAXIS'te drenaj sınırları ve zemin geçirimsizliği kullanılarak simüle edilen konsolidasyon hızı davranışını da basitleştirir.
6. Sınır etkileri: Sonlu elemanlar analizinde oturmaları önemli ölçüde etkileyebilecek olan sınırların yakınlığı veya zemin alanının geometrisi dikkate alınmamıştır.

Bu sınırlamalara rağmen, analitik hesaplamalar eğilimleri kontrol etmek ve büyük sapmaları tespit etmek için faydalı bir karşılaştırma çerçevesi olarak hizmet etmektedir. Önemli farklılıklar gözlemlendiğinde, bunlar parametre ayarlaması, daha derin modelleme veya zemin davranışı girdisini iyileştirmek için daha gelişmiş laboratuvar testlerine ihtiyaç duyulduğunu gösterir.

### 3.3.2. Sayısal hesaplama yöntemi

Bu bölümde, kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin sonlu eleman analizini gerçekleştirmek için birincil araç olarak kullanılan PLAXIS 3D'deki modelleme aşamaları açıklanmaktadır. Model yapılandırması, zemin alanının geometrik ölçeklendirmesini, sınır koşulu tanımlarını, ağ inceltmeyi ve malzeme özelliği atamalarını içerir. Amaç, daha önce geliştirilen 42 vakanın her birini yansıtan sayısal bir ortamı dikkatlice oluşturarak zemin yapısı etkileşimini gerçekçi bir şekilde kopyalamaktır.

Tüm simülasyonlar hem yumuşak hem de sert kil tabakaları için Pekleşen Zemin Modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir temel, duruma bağlı olarak zemine veya bir kazı içerisine yerleştirilmiş radye temeli temsil eden bir plaka elemanı olarak modellenmiştir. PLAXIS'te ilk gerilme oluşumundan başlayarak temel kazısı, temel inşaatı, yapısal yükleme ve konsolidasyon aşamaları boyunca ilerleyen aşamalı bir inşaat sırası tanımlanmıştır. Bu bölümde sunulan adımlar, tüm simülasyonlarda tutarlılık, tekrarlanabilirlik ve gerçek dünyayla uygunluk sağlamaktadır.

### **Zemin Modeli ve Geoteknik Parametreler:**

PLAXIS 3D'de, Pekleşen Zemin Modeli hem yumuşak hem de sert kil davranışlarını simüle etmek için kullanılmış ve seçilen zemin türlerinde dayanım ve gerilme-şekil değiştirme ilişkilerindeki farklılıkları yakalayabilmektedir.

Pekleşen Zemin Modeli (PZM), geoteknik sayısal analizde, özellikle kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin değişken yükleme koşulları altındaki davranışını simüle etmek için çok uygun olan gelişmiş bir kurucu modeldir. PZM, doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışını, plastisiteyi ve gerilme yoluna bağlı rijitlik bozulmasını dikkate almaktadır. Mohr-Coulomb gibi sabit rijitlik parametreleri kullanan daha basit modellerin aksine, Pekleşen Zemin Modeli gerilme değişimine bağlı rijitlik ve plastik şekil değiştirme sertleşmesi sunarak hem kısa hem de uzun vadeli yükler altında zemin davranışının daha gerçekçi bir temsilini sağlar. PZM, elasto-plastisite teorisine dayanır ve rijitlik için üç farklı modül tanımlar:

- $E_{50}^{ref}$  : standart bir drenajlı üç eksenli testte %50 gerilme seviyesindeki sekant modülü,
- $E_{oed}^{ref}$  : birincil tek boyutlu konsolidasyon için oedometre testlerinden elde edilen tanjant modülü
- $E_{ur}^{ref}$  : boşaltma-yeniden yükleme modülü.

Bu modüller, modelin ilk yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme yolları arasında ayırım yapmasını sağlar, bu da özellikle inşaat dizilerinin simülasyonunda ve konsolidasyon gibi zamana bağlı davranışlarda önemlidir. Ayrıca, sırasıyla deviatorik ve hacimsel gerilmeler altında akma davranışını yansıtmak için kayma rijitliğini de içerir.

Bu çalışmada, literatürden ve pratik deneyimlerden elde edilen zemin parametreleri kullanılarak hem Yumuşak Kil hem de Sert Kil profillerini simüle etmek için Pekleşen Zemin Modeli seçilmiştir. Model, efektif kohezyon ( $c'$ ), sürtünme açısı ( $\phi'$ ), dilatans açısı ( $\psi$ ), Poisson oranı ( $\nu$ ) ve geçirimsizlik katsayısı ( $k$ ) gibi girdi değerleri ile kalibre edilmiştir. Bu yaklaşım, PLAXIS 3D'deki oturma tahminlerinin sığ temeller altındaki kohezyonlu zeminlerin doğrusal olmayan, gerçekçi tepkisini yansıtmalarını sağlar. Sayısal analizlerde kullanılan parametreler Çizelge 3.8'de verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Yumuşak ve sert kil zeminler için geoteknik parametrelerin özeti

Parametreler	Yumuşak Kil	Sert Kil
Malzeme modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Malzeme davranışı	Drenajsız A	Drenajsız A
Doğal birim ağırlık ( $\gamma_n$ )	18.0 kN/m <sup>3</sup>	19.0 kN/m <sup>3</sup>
Doygun birim ağırlık ( $\gamma_r$ )	18.5 kN/m <sup>3</sup>	19.5 kN/m <sup>3</sup>
Boşluk oranı (e)	0.9	0.7
$E_{50}^{ref}(P_{ref} = 100 \text{ kPa})$	2640	12650
$E_{oed}^{ref}(P_{ref} = 100 \text{ kPa})$	2640	12650
$E_{ur}^{ref}(P_{ref} = 100 \text{ kPa})$	7920	37950
m, Güç	1	1
Kohezyon (c')	2.25 kPa	8.63 kPa
Sürtünme açısı ( $\phi'$ )	30.8°	30.8°
Dilatans açısı ( $\psi$ )	0°	0°
Poisson oranı ( $\nu$ )	0.30	0.25
Geçirimlilik katsayısı $k_x=k_y=k_z$	2.2E-4 m/gün	5.8E-5 m/gün
$R_{inter}$ (Arayüz)	0.67	0.67
Sıkışma indisi, Cc	0.166	0.031
Kabarma indisi, Cs	0.041	0.009

### **Radye Temel ve Duvar Özellikleri**

Radye temel, PLAXIS 3D'de eğilme rijitliği, normal rijitlik ve alttaki zeminle etkileşimin simülasyonuna izin veren bir plaka elemanı olarak modellenmiştir. Radyenin fiziksel ve mekanik özellikleri, Çizelge 3.6'da özetlendiği üzere kalınlık, elastisite modülü, Poisson oranı, kayma modülü ve birim ağırlık gibi elastik parametreler kullanılarak tanımlanmıştır. Bu parametreler, sıg temel sistemlerinde kullanılan betonarme temeller için tipik değerlere göre seçilmiştir.

Bir bodrum duvarının mevcut olduğu durumlarda (ileri aşamalı inşaat için), geometriye bağlı olarak dikey yapısal elemanlar plaka veya hacim elemanları kullanılarak da tanımlanabilir. Ancak çalışmanın bu aşamasında, karmaşık yapısal duvarlar olmaksızın yalnızca radye temelin yük aktarım davranışına odaklanılmaktadır. Basitlik ve genel modelleme çerçevesiyle uyumluluk için tüm malzemelerin doğrusal elastik elemanlar olarak davrandığı varsayılmıştır.

### **Sayısal Modelleme:**

**Model geometrisi:** Sonlu eleman modellemesinde doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için, her modelin geometrisi temel boyutlarına göre uygun şekilde ölçeklendirilmelidir. Bu çalışmada hem kare hem de dikdörtgen temeller farklı genişlikler (B), uzunluklar (L), derinlikler ( $D_f$ ) ve yapısal gerilmeler ile analiz edilmiştir. Temeli çevreleyen model hacmi, simülasyon sonuçları üzerindeki sınır etkilerini ortadan kaldırmak için yeterince büyük olmalıdır.

Her bir analiz durumu için model alanının geometrisi aşağıdaki ölçeklendirme kuralları kullanılarak tanımlanmıştır:

- X yönü (Model uzunluğu):  $5 \times L$
- Y yönü (Model genişliği):  $5 \times B$
- Z yönü (Model derinliği):  $D_f + 3 \times L$

Bu oranlar, deformasyon modelini ve oturma sonuçlarını etkileyen yapay kısıtlamalardan kaçınmak için sınırların yüklenme alanından yeterince uzağa yerleştirilmesini sağlar. 42 vakanın her biri, temel boyutuna ve zemin türüne (Yumuşak veya Sert Kil) bağlı olarak kendine özgü geometri konfigürasyonuna sahiptir.

#### Hacim Konturları ve Zemin Katmanları:

Tüm modellerde:

- Üst sınır zemin yüzeyini temsil eder.
- Alt sınır, geçirimsiz bir ana kaya tabakasını simüle etmek için yeraltı suyu akışına kapalı tutulmuştur.
- Yanal sınırlar (X, Y) konsolidasyon aşamalarında yeraltı suyu akışına açık olarak belirlenmiştir.
- Bodrum kazısı, erken aşamalarda zemin hacimleri çıkarılarak ve bodrum duvarları için dikey plaka elemanları eklenerek temsil edilmiştir.

Bu kurulum, konsolidasyon analizi sırasında sızıntı ve dağılmanın gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamıştır.

Sınır Koşulları ve Mesh Oluşturma: Doğru gerilme dağılımı, yer değiştirme davranışı ve çevredeki zemin kütlesi ile gerçekçi etkileşim sağlamak için sonlu eleman modellemesinde uygun sınır koşulu ataması esastır. Bu çalışmadaki tüm modeller için PLAXIS 3D'de kullanılan sınır ayarları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

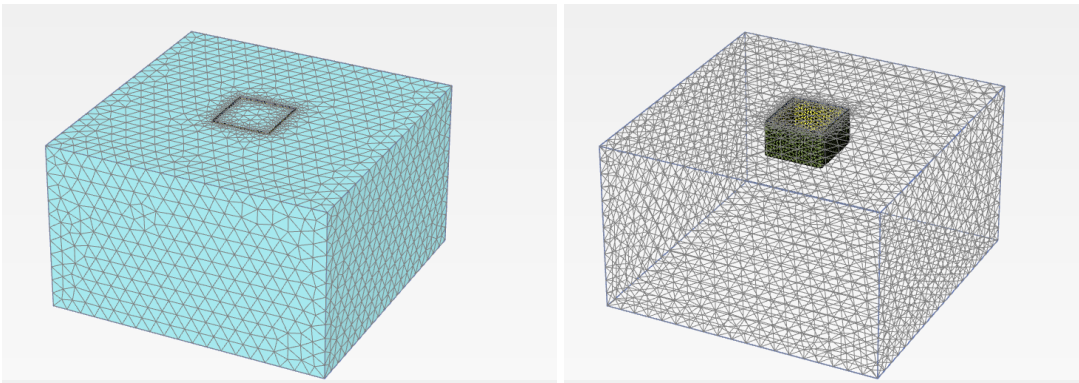
- Yer Değiştirme Sınırları: Alt sınır ( $Z_{min}$ ), altta yatan sert bir tabaka veya ana kayanın varlığını simüle etmek için tüm yönlerde (X, Y, Z) sabittir. Yanal sınırlar ( $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ), yalnızca normal yönde sabit (yani, X veya Y yönünde sabit, ancak dikey Z yönünde hareket etmekte serbest).
- Yeraltı Suyu Akış Sınırları (sadece konsolidasyon aşamaları için): Alt sınır, geçirimsiz bir taban tabakasını simüle etmek için yeraltı suyu akışına kapalı

seçilmiştir. Tüm yan taraflar ve üst yüzey, yeraltı suyu akışına açıktır, gözenek basıncının zaman içinde gerçekçi bir şekilde dağılmasına izin verir.

Mesh Üretimi: Özellikle katmanlı zeminleri ve ara yüzeyleri içeren konsolidasyon analizlerinde sayısal kararlılık ve doğru sonuçlar elde etmek için yüksek kaliteli bir ağ çok önemlidir. Bu çalışmada:

- Küresel kabalık başlangıçta 0.25 olarak ayarlanmış ve temelin altındaki lokalize oturmayı yakalamak için uygun rafine bir ağ üretilmiştir.
- Yüksek gerilim yoğunlaşması olan bölgelerde sonuç çözünürlüğünü daha da iyileştirmek için temel alanı ve bodrum kazı bölgesi çevresinde manuel iyileştirme uygulanmıştır.
- Arayüz elemanları,  $R_{inter}$  (Arayüz) değerleri kullanılarak radye temel/bodrum duvarları ile çevredeki zemin arasına yerleştirilmiştir. Bu, göreceli hareketin ve sürtünme etkileşiminin gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamıştır.

Temelin altındaki aktif bölgede, hesaplama verimliliğini optimize etmek için daha kaba ağ ile çevrelenmiş yoğun ve daha ince üçgen elemanları seçilmiştir (Şekil 3.2). Ağ konfigürasyonunun ve iyileştirme sürecinin daha iyi görsel olarak anlaşılmasını sağlamak için bu şekil, tüm zemin gövdesi ve temel sistemi boyunca eleman dağılımını gösteren renkli bir izometrik görünüm sunmaktadır.



**Şekil 3.2.** Temsili bir temel modeli için oluşturulan ağ yapısının gösterimi

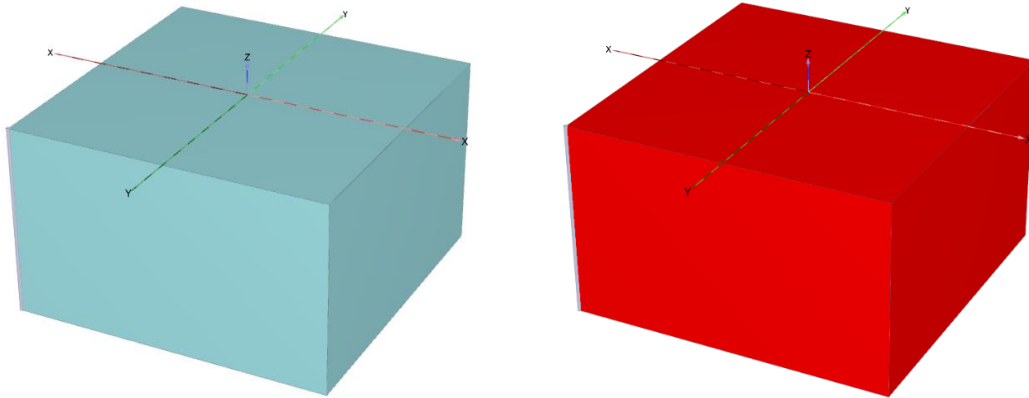
Ağ, tüm inşaat aşamaları tanımlandıktan sonra ve hesaplamadan önce oluşturulmuş ve eleman düzeninin tüm aktif yapısal ve zemin bileşenlerini yansıtması sağlanmıştır.

Zemin Modeli Ataması: Zemin modellerinin doğru atanması, geoteknik sonlu eleman analizinde gerçekçi ve temsili sonuçlar elde etmek için esastır. Bu çalışmada, iki temel zemin türü modellenmiştir: yumuşak kil ve sert kil. Her biri PLAXIS 3D'de bulunan Pekleşen Zemin Modeli (HSM) kullanılarak temsil edilmiştir.

Yumuşak ve sert killeri birbirinden ayırmak için, önceden tanımlanmış laboratuvar test verilerine ve standart geoteknik literatürden elde edilen ampirik korelasyonlara dayalı olarak her bir zemin katmanına farklı parametre setleri atanmıştır.

Her bir model vakası için zemin hacmi, temel genişliği ve şekline dayalı boyutlar kullanılarak tanımlanmıştır. Ardından, uygun zemin parametreleri seti (Çizelge 3.8) PLAXIS 3D arayüzündeki zemin sekmesi aracılığıyla ilgili zemin bölgesine atanmıştır. Zemin hacimleri geometri kurulumu sırasında tanımlanmış ve malzeme özellikleri girilmiştir.

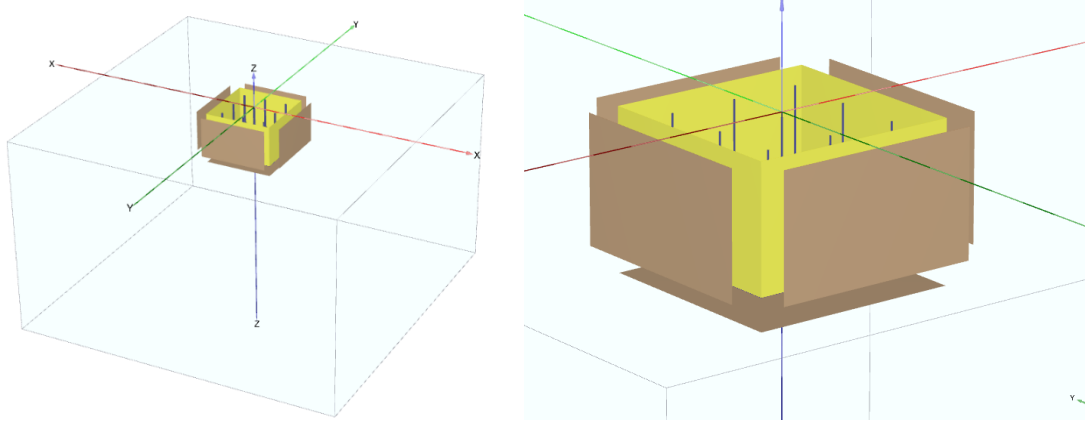
Her iki zemin için de drenajsız A drenaj koşulunun seçilmesi, simülasyonun toplam gerilme analizine dayanmasını sağlamış ve gözenek basıncı gelişimi yazılım tarafından otomatik olarak freatik seviye kullanılarak ele alınmıştır. PLAXIS 3D içinde oluşturulan tipik bir zemin hacmi Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Burada Pekleşen Zemin Modeli, vaka için belirli zemin türüne dayalı olarak etki alanı boyunca atanmıştır.



**Şekil 3.3.** PLAXIS modelinde yumuşak kil (solda) ve sert kil (sağda) zemin için pekleşen zemin modeli uygulanmış zemin hacimleri

Arayüz Parametreleri: PLAXIS 3D'de, zemin ile temeller veya plakalar gibi yapısal elemanlar arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde simüle etmek için arayüz elemanları eklenir (Şekil 3.4). Bu arayüzler, gerçekçi zemin-yapı davranışının modellenmesinde çok önemli olan göreceli yer değiştirmeye ve olası kayma veya ayrılmaya izin verir. Tüm temel-zemin temasları için, arayüz elemanları bir azaltma

faktörü olan  $R_{inter}$  (Arayüz) ile etkinleştirilmiştir. Bu faktör arayüz boyunca kayma mukavemetini yönetir. Bu çalışmada, arayüzdeki potansiyel sürtünme kaybını yansıtmak amacıyla tüm temas yüzeyleri için  $R_{inter}$  (Arayüz) = 0.67 gibi muhafazakar bir değer atanmıştır. Bu değer, beton temeller ile killi zeminler arasındaki etkileşim davranışının gerçekçi bir tahminine karşılık gelmektedir.



Şekil 3.4. Radye temel ile alttaki zemin katmanları arasına yerleştirilen arayüz elemanları

Başlangıç Koşulları: Zemindeki ilk gerilme durumu, herhangi bir kazı veya yükleme uygulanmadan önce geostatik bir durum olduğunu varsayan  $K_0$  prosedürü kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yöntem doğal zemin birikintileri için uygundur ve durağan haldeki zemin basıncı katsayısına ( $K_0$ ) dayalı olarak yerinde düşey ve yatay gerilmeleri belirler. Pekleşen Zemin Modeli ile modellenen killi zeminler için başlangıç  $K_0$  değeri, zemin mukavemet parametreleri ve Poisson oranına dayalı olarak türetilir. Yeraltı suyu tablası da bu aşamasında her bir vaka kurulumuna göre atanmış ve efektif gerilme dağılımını ve gözenek basınçlarını etkilemiştir.

Aşamalı İnşaat Süreci: PLAXIS 3D, zemin-yapı etkileşimini ve yükleme altındaki temel performansını gerçekçi bir şekilde simüle etmek için aşamalı inşaat modellemesi yapma olanağı sunar. Bu yöntem, kullanıcının belirli hesaplama aşamalarında modelin farklı bileşenlerini (zemin hacimleri, yapılar ve yükler gibi) etkinleştirmesine veya devre dışı bırakmasına olanak tanır. Bu sayede model, gerçek dünyadaki kazı, inşaat, yükleme ve oturma davranışını daha doğru bir şekilde taklit eder. Bu çalışmada, PLAXIS 3D'de beş inşaat aşaması tanımlanmıştır: Başlangıç Aşaması, temel kazısı ve bodrum duvarı inşaatı, radye temel inşaatı, yapısal yükleme ve konsolidasyon. Her aşama, kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin kısa ve uzun vadeli davranışlarını yansıtan belirli bir

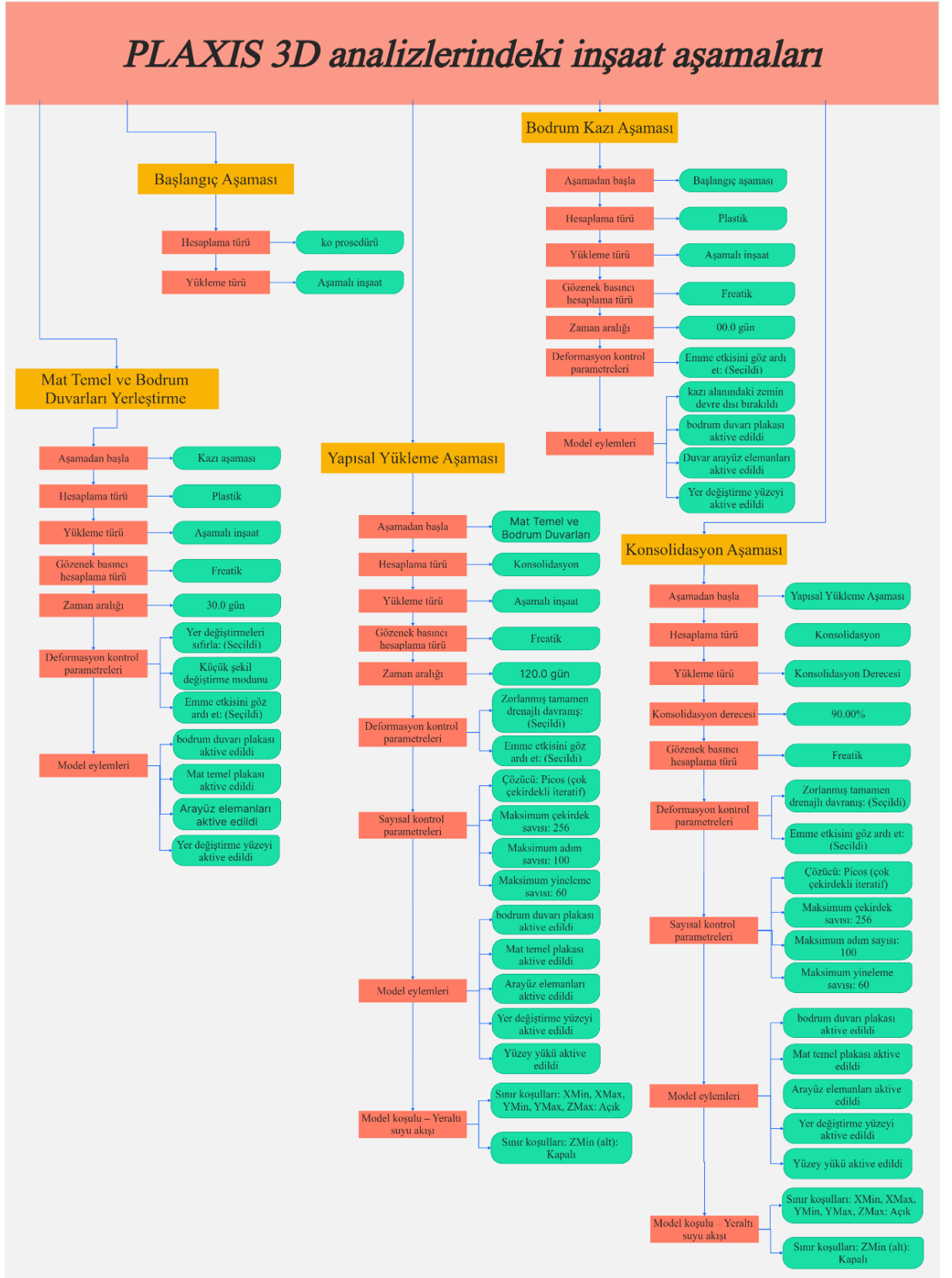
hesaplama türü, zaman kontrolü ve model sınır ayarları ile tasarlanmıştır. Belirli adımlarda yer değiştirmeleri sıfırlamak ve yeraltı suyu koşullarını uygun şekilde yönetmek için özel dikkat gösterilmiştir. İnşaat süreci, Ko prosedürünü kullanarak geostatik gerilme durumunu belirleyen “Başlangıç Aşaması” ile başlar. Bunu, zemin hacminin kaldırıldığı “Kazı Aşaması” takip eder. Ardından, “radye temel” kurulur ve harici yapısal yük tekdüze bir yüzey yükü olarak uygulanır. Son olarak, aşırı gözenek suyu basıncı dağılımından kaynaklanan uzun vadeli oturmaları simüle etmek için bir “konsolidasyon” aşaması getirilir.

- Başlangıç Aşaması: Ko prosedürü aracılığıyla zeminin inşaat öncesi denge durumunun doğru bir şekilde simüle edilmesi için gereklidir. Gerçekçi boşluk basıncı dağılımlarını simüle etmek için her bir vaka senaryosuna göre freatik seviye atanmıştır. Bu aşamada hiçbir yapısal eleman veya yük etkinleştirilmemiştir; sadece zemin kütlesi ve yeraltı suyu tablası dikkate alınmıştır. Deformasyon kontrol parametresi "*Ignore suction*" kontrol edilmiş ve yer değiştirmeler sıfırlanmayarak sonraki kazı ve yükleme aşamaları için doğal gerilme alanı korunmuştur. Bu kurulum, sonraki tüm inşaat aşamaları için temel oluşturmaktadır.
- Bodrum Kazı Aşaması: Bu aşamada, sığ temelin kurulacağı yerde toprağın kaldırılmasını temsil etmek için kazı simülasyonu yapılır. Bu adımın amacı, aşırı yüklemeyi azaltmak ve toprağın kaldırılması nedeniyle gerilme alanındaki değişiklikleri başlatmaktır. Kazı derinliği, parametrik analizde 0 m ile 6 m arasında değişen temel gömme derinliğine ( $D_f$ ) karşılık gelir. Bu aşama için hesaplama türü Plastik olarak ayarlanmış ve modelin kazı nedeniyle doğrusal olmayan gerilme yeniden dağılımını hesaba katmasına izin verilmiştir. Temel alanının altındaki ilgili zemin hacmi sağ tıklanarak ve model görünümünde "devre dışı bırak" seçilerek devre dışı bırakılmıştır. Bu, kohezyonlu zeminler için tipik olan kısa vadeli drenajsız davranışı varsayarak herhangi bir destek sistemi olmadan kazıyı simüle eder.
- Radye Temel Oturma: Kazı işleminin ardından, yapısal elemanların doğrudan zeminle temas halinde yerleştirilmesini simüle etmek için bu aşamada radye temel ve bodrum duvarları etkinleştirilir. PLAXIS 3D'de radye bir plaka eleman kullanılarak modellenirken, daha önce tanımlanan arayüz elemanları alttaki killi zemin katmanlarıyla uygun etkileşimi sağlar. Bu aşamada herhangi bir yük

uygulanmaz ancak sadece yapısal bileşenler tanıtılır. Hesaplama türü, rijit yapının devreye girmesi nedeniyle zemindeki herhangi bir gerilme ayarlamasını yakalamak için uygun olan Plastik olarak kalır. Temel artık yerinde olduğundan, sonraki aşamada yük aktarımı için çok önemli bir sınır haline gelir. Deformasyon analizi için temiz bir durum sağlamak amacıyla bu noktada yer değiştirmeler sıfırlanır. Temel inşaatının 30gün devam ettiği düşünülmüştür.

- **Yapısal Yük Uygulaması:** Bu aşamada, üst yapıdan zemine aktarılan dış basıncı temsil eden yapısal yük radye temele uygulanır. Yük, tüm temel alanı üzerinde etkili olan üniform gerilme olarak modellenir. Bu basınç, parametrik analizdeki durum konfigürasyonuna bağlı olarak 50 ila 500 kPa arasında değişir. Bu aşamadaki hesaplama türü “Konsolidasyon” olarak ve modelin hem ani (drenajsız) oturmayı hem de aşırı gözenek basıncı oluşumunun başlangıcını hesaba katmasına izin verilmiştir. Bu adım, yük uygulamasından hemen sonra zeminin kısa vadeli tepkisini simüle eder. Boşluk basıncı dağılımı bir sonraki aşamada da devam edeceğinden, burada erken konsolidasyon dönemini temsil etmek üzere 120 günlük bir zaman aralığı tanımlanmıştır. Sayısal kontrol parametrelerine ve yeraltı suyu sınır koşullarına özel dikkat gösterilmiştir. Tüm yan ve üst sınırlar gözenek basıncı dağılımına izin vermek için açık tutulmuştur. Alt sınır, düşey drenajı önlemek ve killi profillerde yaygın olan düşük geçirgenlik sınırını simüle etmek için kapalıdır.
- **Konsolidasyon Aşaması:** Nihai konsolidasyon aşaması, sürekli yapısal yük altında aşırı gözenek suyu basınçları dağılırken zeminin uzun vadeli oturma davranışını simüle eder. Bu adım, özellikle düşük geçirgenliğe sahip kohezyonlu (kil) zeminlerde kritik olan birincil konsolidasyon oturmasını değerlendirmek için gereklidir. Bu aşama, toprağın kademeli olarak uyum sağladığı ve stabilize olduğu inşaat sonrası süreyi temsil eder. Hesaplama türü “Konsolidasyon” olarak ayarlanmıştır, ancak önceki aşamadan farklı olarak bu adımda yer değiştirmeler sıfırlanmamıştır. Bu, toplam oturmanın önceki tüm inşaat aşamalarından gelen birikmiş deformasyonları içermesini sağlar. Yumuşak ve sert killi zeminlerde tam birincil konsolidasyonu yakalamak için yeterli olan aşırı boşluk suyu basınçlarının neredeyse tamamen dağılmasına izin vermek için oturmaların %90 konsolidasyon oranına ulaşana kadar devam etmesi sağlanmıştır. Yeraltı suyu akışı sınır koşulları bir önceki aşamayla aynı bırakılmıştır. Tüm kenarlar ve üst kısım açıkken, alt sınır geçirimsiz bir katmanı simüle etmek için kapalıdır. PLAXIS 3D modellemesinde

killi zeminler üzerindeki sığ temeller için kullanılan aşamalı inşaat süreci Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Aşamalı inşaat aşaması akış şeması

### 3.4. İstatistiksel Analiz ve Değerlendirme

Sayısal ve analitik modellemeyi tamamlamak amacıyla bu çalışmada istatistiksel değerlendirme ve regresyon analizi için Design Expert yazılımı kullanılmıştır. Amaç, temel genişliği, derinliği, en-boy oranı ve yeraltı suyu seviyesi gibi çoklu temel ve zemin değişkenlerinin öngörülen oturma değerleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Yazılımın faktöriyel tasarım ve yanıt yüzeyi metodolojisi (YYY) araçlarını kullanarak, değişkenler arasındaki etkileşimleri modellemek ve toplam oturma için öngörücü denklemler oluşturmak mümkün olmuştur.

Design-Expert, deneysel tasarım, model uydurma, anlamlılık testi ve optimizasyon konusundaki güçlü yetenekleri nedeniyle seçilmiştir. Bu aşamada kullanılan tüm girdi ve çıktı verileri doğrudan analitik hesaplamalar ve PLAXIS 3D simülasyonlarının sonuçlarından elde edilmiştir.

#### 3.4.1. Yanıt yüzey yöntemi

Analitik olarak hesaplanan ve sayısal olarak simüle edilen 42 adet vaka, öngörücü modeller oluşturmak için Design-Expert® yazılımında Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, çeşitli girdi değişkenleri ile bu durumda karşılık gelen yanıt hem el hesaplamaları hem de PLAXIS 3D simülasyonları altındaki toplam oturma arasındaki ilişkiye yaklaştırmaya yardımcı olur. Design-Expert, formun ikinci dereceden polinom regresyon denklemlerini uygulamıştır:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3.9)$$

burada, Y: Yanıt değişkeni (oturma analiz sonuçları),  $X_i$ : bağımsız değişkenler (örneğin, B,  $D_f$ , L/B,  $q_0$ , YASS, zemin kıvamı),  $\beta$ : Regresyon katsayıları,  $\varepsilon$ : Rastgele hata

Altı girdi faktörünün tamamı yazılıma sayısal veya kategorik değişkenler olarak girilmiştir. Yazılım, en uygun modeli belirlemek için en küçük kareler regresyonunu kullanmıştır. Düzeltilmiş  $R^2$ , öngörülen  $R^2$  ve artık grafikleri gibi tanı araçları daha sonra modelin yeterliliğini ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır.

Model Yeterlilik Kontrolü ve Teşhis Araçları: Regresyon modellerini oluşturduktan sonra Design-Expert®, kurulan modellerin yeterliliğini ve istatistiksel güvenilirliğini test etmek için otomatik olarak tanısal değerlendirmeler gerçekleştirmiştir. Bu kontroller, regresyon denklemlerinin yalnızca eğitim verilerine uymasını değil, aynı zamanda tahmin gücüne sahip olmasını ve sistematik hatalardan arınmış olmasını sağlar. Model yeterliliğini değerlendirmek için aşağıdaki istatistiksel göstergeler ve görsel araçlar kullanılmıştır:

- Regresyon katsayıları:  $R^2$ , analiz sonuçlarındaki varyasyonun ne kadarının model tarafından açıklandığını gösterir. Düzeltilmiş  $R^2$ , tahmin edicilerin sayısını ayarlayarak modelin aşırı uyum sağlamamasını sağlar. Tahmin edilen  $R^2$ , modelin yeni gözlemleri ne kadar iyi tahmin ettiğini değerlendirir. İyi bir modelde tipik olarak düzeltilmiş ve tahmin edilen  $R^2$  değerleri arasında en fazla  $\sim 0.2$  fark olmalıdır.
- Yeterli Hassasiyet: Bu sinyal-gürültü oranı, ilişki hatasına göre öngörülen yanıt aralığını ölçer. Yeterli model ayırımını gösteren 4'ten büyük bir oran arzu edilir.
- Artık Analizi: Artık analiz sonuçlarını değerlendirmek için, artıkların normal olasılık grafiği (düz bir çizgi göstermelidir), artıklar ve tahmin edilenler (rastgele dağılım göstermelidir), çalışma sırasına karşı kalıntılar (bağımsızlığı kontrol etmek için) gözden geçirilmiştir. Bu kontroller aykırı değerlerin, değişen varyansın (sabit olmayan varyans) ve potansiyel model yanlılığının belirlenmesine yardımcı olur.

Optimizasyon ve Arzu Edilebilirlik Fonksiyonları: Model geliştirme ve tanısal doğrulamanın ardından, Design-Expert'in sayısal optimizasyon aracı, oturmayı en aza indirecek ideal tasarım değişkenleri kombinasyonlarını belirlemek için kullanılmıştır. Bu adım, pratik tasarım amaçları için çok önemlidir ve mühendislerin güvenlik ve fizibiliteyi korurken deformasyonu azaltmak için temel parametrelerini ayarlamasına olanak tanır. Yazılım, her bir yanıtı ve değişkeni 0 (tamamen istenmeyen) ile 1 (tamamen istenen) arasında değişen bir ölçeğe dönüştüren arzu edilebilirlik fonksiyonu yaklaşımını kullanmaktadır. Bireysel arzu edilebilirlik ( $d_i$ ) için maksimizasyon durumu (en büyük en iyi) için Denklem 3.10, minimizasyon durumu (en küçük en iyi) için Denklem 3.11 kullanılmaktadır. Genel arzu edilebilirlik ( $D$ ) fonksiyonu, bireysel arzu edilebilirliklerin geometrik ortalaması olarak hesaplanır (Denklem 3.12). Bu çalışma için optimizasyon

hedefi toplam oturmayı en aza indirmektir. En yüksek genel arzu edilebilirliğe sahip çözüm ( $D \approx 1.0$ ) optimum durum olarak kabul edilmiştir.

$$d_i(y_i) = \begin{cases} 0 & , y_i(x) < L_i \\ \left(\frac{y_i(x)-L_i}{U_i-L_i}\right)^r & , L_i \leq y_i(x) \leq U_i \\ 1 & , y_i(x) > U_i \end{cases} \quad (3.10)$$

$$d_i(y_i) = \begin{cases} 1 & , y_i(x) < L_i \\ \left(\frac{U_i-y_i(x)}{U_i-L_i}\right)^r & , L_i \leq y_i(x) \leq U_i \\ 0 & , y_i(x) > U_i \end{cases} \quad (3.11)$$

$$D = (d_1(y_1) \times d_2(y_2) \times \dots \times d_m(y_m))^{1/m} \quad (3.12)$$

burada,  $d_i$  her bir yanıtın veya kısıtın bireysel arzu edilebilirliği,  $x$  değişken,  $y_i$  yanıt,  $U_i$  ve  $L_i$  sırasıyla yanıtın en büyük ve en küçük sonucu,  $r$  yanıt parametresinin ağırlığı ve  $m$  yanıtların sayısıdır.

### 3.5. Araştırma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temel oturmalarını değerlendirmek için teorik, sayısal ve istatistiki çalışmalar yürütülmüştür. Bu kapsamda, farklı yapı, temel ve zemin özelliklerine göre zemin ortamındaki oturmalar analitik hesaplamalar ve gelişmiş sonlu eleman simülasyonları (PLAXIS 3D) kullanılarak belirlenmiş daha sonra Design-Expert yazılımı aracılığıyla istatistiksel modelleme yapılmıştır.

İlk olarak, temel zeminindeki oturmalar klasik geoteknik teorileri kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Hem elastik (ani) hem de birincil konsolidasyon oturmaları, derinlik ve şekil için etki faktörlerinin yanı sıra gerilme dağılımı varsayımlarını da içeren oturma formülleri kullanılarak hesaplanmıştır. Zemin parametreleri literatür verilerine dayalı olarak belirlenmiş ve sayısal modellerde kullanılanlarla uyumlu hale getirilmiştir.

İkinci olarak, çeşitli yükleme ve zemin koşulları altında aşamalı inşaat ve zamana bağlı oturma davranışını simüle etmek için PLAXIS'te ayrıntılı 3B sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Model aşamaları arasında temel kazısı, radye temel kuruluşu, yüzey yüklemesi ve konsolidasyon yer almıştır. Arayüz davranışı, ağ oluşturma ve sınır koşulları gerçek dünya koşullarını yansıtacak şekilde dikkatlice yapılandırılmıştır.

Analizler sonucunda, temel kazısı sonrası zeminde oluşan kabarma miktarı ile yapısal yükleme ve %90 konsolidasyon sonrası temel zeminindeki oturma miktarları belirlenmiştir. Yapısal yükleme sonucunda, radye temelde oluşan moment değerleri belirlenerek, yapı-zemin etkileşiminin betonarme hesaplara etkisi değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, sayısal modellemedeki değişkenlerin zemindeki oturmaları nasıl etkilediği oturma-zaman grafikleri ile açıklanmaya çalışılmıştır. Yapısal yükleme ve konsolidasyon aşamalarında zemindeki ilave oşluk suyu basınçlarının zamanla ve derinlikle değişimleri incelenmiştir. Zemin ortamındaki gerilmelerin ve oturmaların derinlikle değişimi farklı inşaat aşamaları için değerlendirilmiş ve yapı etki derinliği belirlenmiştir.

Son olarak, analitik hesaplamalardan ve PLAXIS çıktılarından elde edilen sonuçlar Design-Expert kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Tahmine dayalı regresyon modelleri geliştirmek, girdi faktörlerinin önemini değerlendirmek ve arzu edilebilirlik fonksiyonlarını kullanarak minimum oturma için optimize edilmiş parametre kombinasyonlarını belirlemek için kısmi faktöriyel deneysel tasarım (Yanıt Yüzey Yöntemi) kullanılmıştır.

Klasik oturma tahmini yöntemlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için, analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar PLAXIS 3D sonlu elemanlar yazılımı tarafından üretilenlerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalı yaklaşım, basitleştirilmiş teorik modellerin aynı zemin ve yükleme koşulları altında daha gelişmiş sayısal simülasyonlara ne kadar yakın olduğunun değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Her bir temel konfigürasyonu için, analitik hesaplamalarda kullanılan girdi parametreleri (örneğin, temel genişliği, derinliği, yapısal gerilme, zemin sertliği ve drenaj durumu) PLAXIS 3D modelinde kullanılan kurulumla tam olarak eşleştirilmiştir. Bu, her iki analiz yaklaşımının da aynı sınır koşulları altında yürütülmesini sağlamıştır.

PLAXIS 3D'de düşey oturma değerleri, Output programı kullanılarak son hesaplama aşamasından (tipik olarak konsolidasyon aşaması) elde edilmiştir. Oturma, tipik olarak maksimum oturmanın meydana geldiği temel tabanının altındaki merkez düğümde kaydedilmiştir. Toplam düşey yer değiştirme ( $U_z$ ) PLAXIS'ten nihai oturma tahmini olarak alınmıştır.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu bölümde, kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin oturma davranışına ilişkin hem analitik hesaplama yönteminden hem de PLAXIS 3D simülasyonlarından elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Ayrıca, Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak yapılan istatistiksel modelleme, çeşitli temel ve zemin parametrelerinin gözlemlenen oturmalar üzerindeki önemini değerlendirmek için dahil edilmiştir. Analizler hem kısa vadeli (drenajsız) hem de uzun vadeli (drenajlı) koşullara odaklanmaktadır.

Sonuçlar üç ana grup halinde düzenlenmiştir. İlk olarak, klasik geoteknik yöntemlerle hesaplanan oturmalar elastik ve birincil konsolidasyon oturmaları özetlenmekte ve incelenmektedir. İkinci olarak, PLAXIS 3D'den elde edilen sonlu eleman analizi çıktıları tanıtılmakta ve 42 farklı temel-zemin konfigürasyonunda düşey yer değiştirme modelleri, gerilme dağılımları, eğilme momentleri, aksel ve kesme kuvvetleri ve gözenek basıncı tepkileri vurgulanmaktadır. Üçüncü olarak, analitik olarak hesaplanan oturmalar ile PLAXIS simülasyonları aracılığıyla elde edilen değerler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılarak uyum düzeyi değerlendirilmiş ve basitleştirilmiş yöntemlerin oturmaları hangi noktalarda fazla veya eksik tahmin edebileceği belirlenmiştir.

Sayısal çıktıların ötesinde, bu bölümde Design-Expert yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen istatistiksel analiz sonuçları da sunulmaktadır. Girdi değişkenlerine dayalı olarak regresyon modelleri geliştirilmiş ve hangi parametrelerin toplam oturma üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu değerlendirmek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Oturmayı en aza indiren tasarım parametrelerinin kombinasyonlarını belirlemek için optimizasyon sonuçları da dahil edilmiştir.

Bu bölümde yer alan tüm tablolar, şekiller ve grafikler, değişen temel boyutları, yükleme yoğunlukları, yeraltı suyu seviyeleri ve zemin koşulları altında oturma davranışının açık ve yapılandırılmış bir şekilde anlaşılmasını desteklemeyi amaçlamaktadır.

### 4.1. Analitik Hesaplama Sonuçları

Temel geometrisi, yapı yükü, kazı derinliği, yeraltı su seviyesi ve zemin özellikleri gibi değişkenlerin olduğu 42 adet vaka için temel altı zeminindeki oturmalar (elastik, konsolidasyon ve toplam oturma) hesaplanmış ve Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

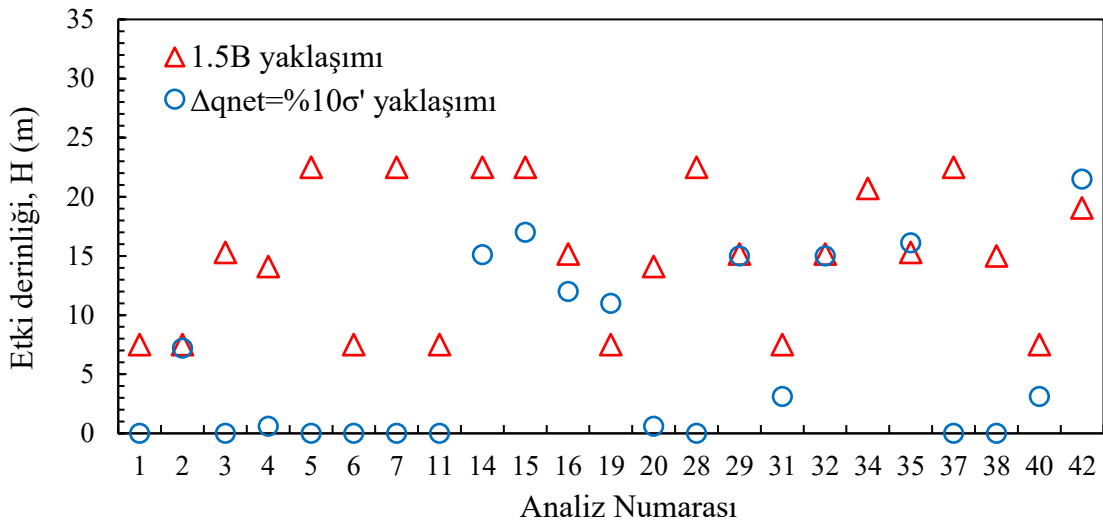
Çizelge 4.1. Analitik olarak hesaplanan oturma değerleri

Analiz numarası	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	B (m)	L/B	$D_f$ (m)	Zemin türü	H (m)	$\sigma_1$ (kPa)	$\Delta\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$S_{c,a}$ (mm)	$S_{c,a}$ (mm)	$S_{T,a}$ (mm)
1	50	10.4	5.0	5.0	6.0	Yumuşak Kil	7.5	175.5	0	32.7	0.0	32.7
2	50	36.0	5.0	5.0	0.8	Yumuşak Kil	7.5	81.9	2.2	32.7	67.5	100.3
3	120	20.6	10.2	1.0	6.0	Yumuşak Kil	15.3	245.7	0.27	189.0	6.3	195.3
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	14.1	188.1	0.44	90.7	12.3	103.1
5	95	6.0	15.0	2.9	6.0	Yumuşak Kil	22.5	205.8	0	206.3	0.0	206.3
6	110	36.0	5.0	5.0	6.0	Yumuşak Kil	7.5	175.5	0.07	72.0	1.1	73.2
7	95	6.0	15.0	2.9	6.0	Yumuşak Kil	22.5	205.8	0	206.3	0.0	206.3
8	250	6.0	9.9	4.8	6.0	Sert Kil	19.0	206.1	5.075	87.1	33.0	120.2
9	50	6.0	5.0	3.1	3.1	Sert Kil	7.5	122.2	0	9.3	0.0	9.3
10	50	36.0	15.0	3.0	0.0	Sert Kil	22.5	213.8	3.3	29.2	25.5	54.7
11	50	36.0	5.0	1.5	6.0	Yumuşak Kil	7.5	175.5	0	37.9	0.0	37.9
12	275	36.0	15.0	1.0	6.0	Sert Kil	22.5	327.8	4.5	171.2	22.9	194.1
13	50	6.0	10.0	1.0	6.0	Sert Kil	15.0	186.7	0	20.8	0.0	20.8
14	120	36.0	15.0	2.9	2.9	Yumuşak Kil	22.5	254.7	3.74	260.6	116.6	377.2
15	60	20.3	15.0	5.0	0.0	Yumuşak Kil	22.5	202.5	4.1	117.9	156.9	274.8
16	80	36.0	10.1	1.0	0.0	Yumuşak Kil	15.2	136.8	4	124.8	147.5	272.3
17	50	36.0	5.0	5.0	6.0	Sert Kil	7.5	185.3	0	8.8	0.0	8.8
18	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil	21.0	256.5	8.715	101.9	48.5	150.4
19	120	20.4	5.0	2.9	1.0	Yumuşak Kil	11.0	117.0	4.23	86.9	128.4	215.3
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	14.1	188.1	0.44	90.7	12.3	103.1
21	500	6.0	5.0	3.0	6.0	Sert Kil	16.0	191.5	5.72	97.3	33.0	130.3
22	500	36.0	10.0	5.0	1.5	Sert Kil	34.5	356.3	14.7	176.0	94.1	270.1
23	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil	21.0	256.5	8.715	107.0	48.5	155.5
24	50	6.0	15.0	5.0	3.0	Sert Kil	22.5	193.9	0	26.4	0.0	26.4
25	275	6.0	5.0	5.0	0.0	Sert Kil	22.0	162.5	7.16	48.4	63.4	111.8
26	500	36.0	5.0	1.0	3.0	Sert Kil	11.0	161.5	6.565	103.8	29.6	133.4
27	130	6.0	15.0	1.3	0.5	Sert Kil	22.5	169.7	6.54	79.5	57.9	137.4
28	50	20.9	15.0	1.0	2.9	Yumuşak Kil	22.5	254.7	0	115.8	0.0	115.8
29	50	6.0	10.1	2.9	0.0	Yumuşak Kil	15.2	121.9	3.36	73.1	140.0	213.1
30	500	6.0	15.0	1.0	1.5	Sert Kil	34.5	237.5	11.71	311.3	109.2	420.4
31	80	6.0	5.0	1.0	2.9	Yumuşak Kil	7.5	113.6	0.6	61.8	14.6	76.4
32	50	6.0	10.1	2.9	0.0	Yumuşak Kil	15.2	121.9	3.36	73.1	140.0	213.1
33	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil	21.0	256.5	8.715	107.0	48.5	155.5
34	50	36.0	13.8	5.0	6.0	Yumuşak Kil	20.7	294.3	0	90.4	0.0	90.4
35	120	6.0	10.2	5.0	2.9	Yumuşak Kil	16.1	151.0	3.55	160.3	128.6	288.9
36	50	21.0	5.0	1.0	0.0	Sert Kil	7.5	71.3	2.39	10.4	17.1	27.5
37	50	20.9	15.0	1.0	2.8	Yumuşak Kil	22.5	252.9	0	115.8	0.0	115.8
38	120	21.0	10.0	4.1	6.0	Yumuşak Kil	15.0	243.0	0.52	157.2	12.0	169.2
39	275	21.0	10.0	3.0	3.0	Sert Kil	21.0	256.5	8.715	107.0	48.5	155.5
40	80	6.0	5.0	1.0	2.9	Yumuşak Kil	7.5	113.6	0.6	61.8	14.6	76.4
41	500	21.0	15.0	5.0	6.0	Sert Kil	41.0	452.3	12.81	264.0	80.7	344.8
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	21.5	202.5	6.3	220.6	220.3	440.9

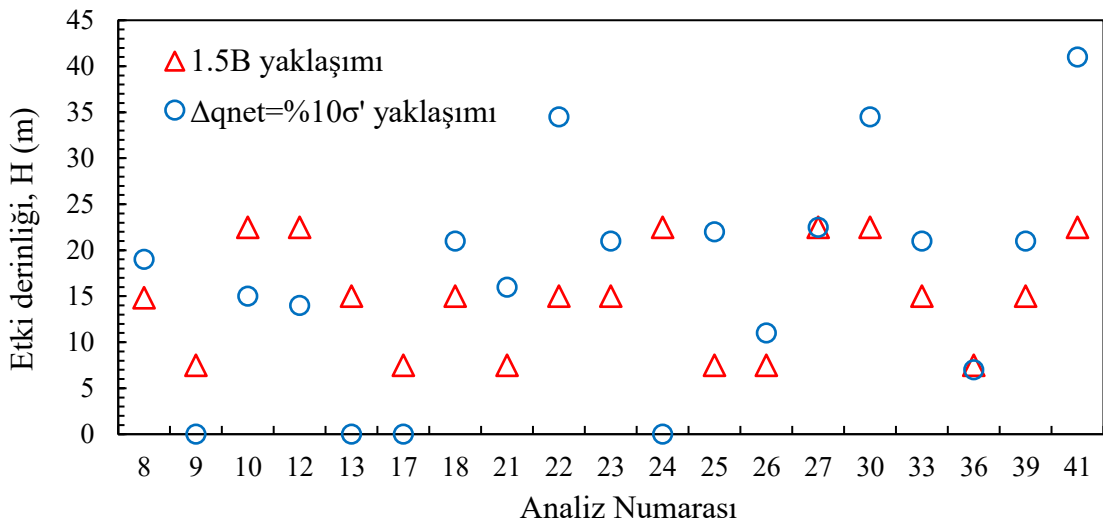
Not: H, yapı etki derinliği olup tablodaki değerler temel altından itibaren derinliği göstermektedir. Oturma değerlerindeki "a" alt indis analitik hesaplama sonucu elde edildiğini göstermektedir.

Yapı etki derinliği belirlenirken net taban basıncından ( $q_{net}=q_0-\gamma D_f$ ) kaynaklanan ilave gerilmelerin zemindeki efektif gerilmenin %10'una denk geldiği derinlik ile 1.5B olarak hesaplanan derinlikten büyük olanı dikkate alınmıştır (TBDY, 2018). Yapı etki

derinliği hem yumuşak hem de sert kil vakalarında her iki yaklaşımdan biri olabilmektedir genellikle net taban basıncının düşük olduğu durumlarda etki derinliği temel tabanından itibaren 1.5B olmaktadır (şekil 4.1 ve şekil 4.2). Yapı etki derinliği sıkışabilir tabaka kalınlığı olarak düşünülmüştür. Konsolidasyon oturma hesaplarında, sıkışabilir tabaka ortasındaki ilave gerilme artışı hesaplanırken net taban basıncından kaynaklanan gerilmeler dikkate alınmıştır. Net taban basıncının zemin içindeki dağılımlı hesaplanırken Boussinesq yöntemi kullanılmıştır.



şekil 4.1. Yumuşak kil için etki derinliği (analitik yöntem)



şekil 4.2. Sert kil için etki derinliği (analitik yöntem)

Elastik, konsolidasyon ve toplam oturma değerleri incelendiğinde, elastik oturmaların ( $S_{e,a}$ ) 8.8-311.3mm, konsolidasyon oturmalarının ( $S_{c,a}$ ) 0-220.3mm ve toplam

oturmaların ( $S_{T,a}$ ) 8.8-440.9mm arasında değiştiği görülmektedir. Elastik otumanın en düşük olduğu tasarımı, 17 numaralı analizde elde edilmiştir. Bu tasarımda sert kil zemin bulunmakta, yearltı su seviyesi 36m'de, yapı gerilmesi 50kPa ve kazı derinliği 6m'dir. Elastik oturma en yüksek 30 numaralı tasarımda ( $q_0=500$  kPa,  $D_{su}=6m$ ,  $D_f=1m$ ) elde edilmiştir. Konsolidasyon oturmaları en düşük 1, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 24, 28, 34 ve 37 numaralı analizlerde elde edilmiştir. Bu tasarımlarda  $\gamma_n D_f > q_0$  olduğundan dolayı, temel tabanına aktarılan net gerilme  $q_{net} < 0$  olmakta ve analitik olarak konsolidasyon oturması 0 elde edilmelidir. Konsolidasyon oturmasının en fazla olduğu tasarım (analiz 42) yumuşak killi zeminde ve  $q_0=120kPa$ ,  $D_{su}=16.5m$  ve  $D_f=0.5m$  koşullarında elde edilmiştir. Toplam oturmanın en düşük ve en fazla olduğu tasarımlar ise sırasıyla 8 ve 42 numaralı tasarımlardır.

Yumuşak killi zeminleri içeren durumlarda, yüzey yüklemesi, kil kalınlığı ve su tablası koşullarındaki farklılıklardan kaynaklanan geniş bir toplam oturma aralığı gözlemlenmiştir. Vaka 1, 5, 7 ve 28 dahil olmak üzere bazı vakalarda toplam oturmanın tamamen elastik olduğu sıfır konsolidasyon grlmştir. Bu sonuç tipik olarak derinde bulunan yeraltı suyu tablaları veya önemli gözenek basıncı gelişimini veya dağılımını önleyen kısa süreli yüklemelerle ilişkilidir. Öte yandan, Vaka 2, 14, 15 ve 42 gibi vakalar,  $S_{c,a}$  genellikle 100 mm'yi aşan baskın konsolidasyon davranışı sergilemiştir. Vaka 42'de, esas olarak yüksek yüzey basıncı ( $q_0 = 120$  kPa), nispeten sığ bir yeraltı suyu ve zamana bağlı oturma için ideal koşullar yaratan kalın bir yumuşak kil tabakası ( $H=21.5$  m) nedeniyle toplam oturma 440.9 mm'ye ulaşmıştır.

Yumuşak kilden elde edilen bu sonuçlar ayrıca gerilme artışı ( $\Delta\sigma$ ) ile oturma büyüklüğü arasında tutarlı bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük  $\Delta\sigma$  değerleri (rneğin, Vaka 5, 6, 7) küçük deformasyonlara karşılık gelirken, yüksek  $\Delta\sigma$  değerleri (Vaka 14, 15, 29 ve 42) artan konsolidasyon oturması ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Kil tabakasının kalınlığı ( $H$ ), aktif sıkıştırma bölgesini tanımladığı için burada önemli bir rol oynamaktadır; yumuşak kil senaryolarında  $H$  değerleri genellikle 7.5 m ile 22.5 m arasında değişmektedir.

Sert killi zeminler söz konusu olduğunda, özellikle uygulanan yüksek yükler altında oturmalar ihmal edilebilir olmasa da genellikle daha düşüktür. Elastik oturma ( $S_{e,a}$ ) değerleri 8.8 mm (Vaka 17) ile 311.3 mm (Vaka 30) arasında değişmektedir. Daha yüksek  $S_{e,a}$  değerleri tipik olarak büyük temeller ve yüksek yapısal gerilmelerle ilişkilidir. Örneğin,  $B = 15$  m ve  $q_0 = 500$  kPa olan Vaka 30 en yüksek elastik oturmayı göstermiştir.

Benzer şekilde, yine 500 kPa yük altındaki Vaka 41, 80.7 mm'lik önemli bir konsolidasyon katkısı ile 344.8 mm'lik bir toplam oturma göstermiştir.

Vaka 9, 13, 17 ve 24 gibi birkaç sert kil vakası, etkin drenaj, düşük kil kalınlığı veya kısa süreli yükleme nedeniyle sıfır veya ihmal edilebilir konsolidasyon sergilemiştir. Ancak Vaka 22'de, nispeten sığ bir temele ( $D_f = 1.5$  m) rağmen, yüksek yüzey yükü ve büyük H (34.5 m) 94.1 mm'lik bir konsolidasyon oturmasına yol açmıştır. Bu, sert killerin bile kalın, daha az geçirgen tabakalar üzerinde yüksek gerilime maruz kaldıklarında önemli gecikmiş oturmalar biriktirebileceğini göstermektedir.

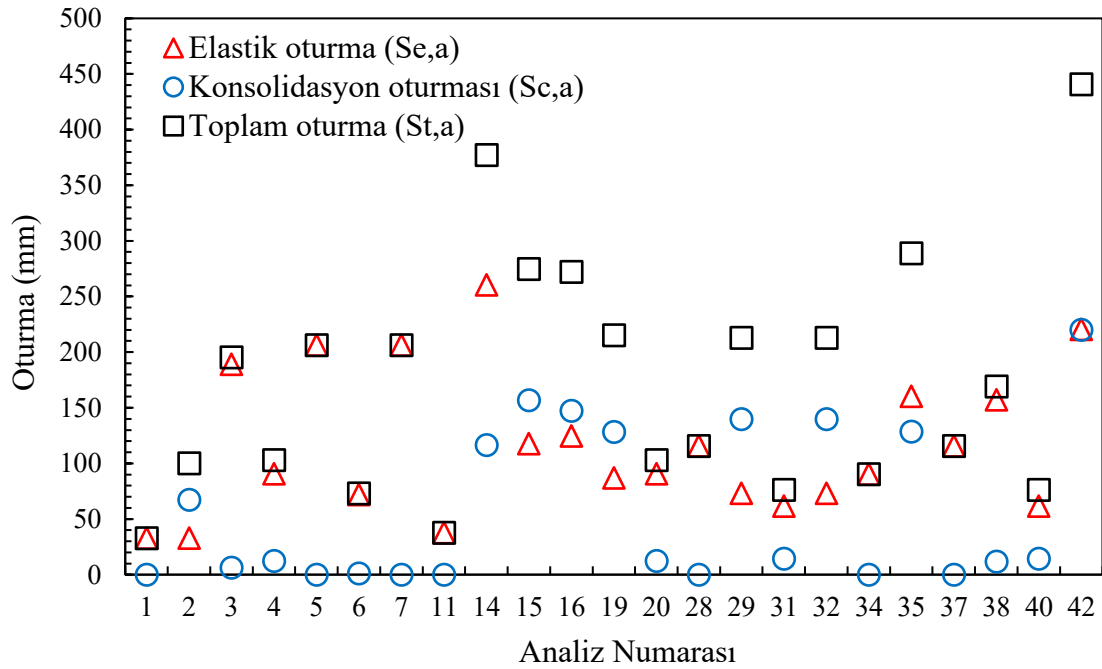
Boussinesq teorisi ile hesaplanan orta derinlikteki gerilme artışı ( $\Delta\sigma$ ), her iki kili de etkileyen kritik bir değişken olarak ortaya çıkmıştır. Sert kil vakalarında,  $\Delta\sigma$  0.0 kN/m<sup>2</sup> ile 147.0 kN/m<sup>2</sup> arasında değişirken, ilk dikey gerilme ( $\sigma_1$ ) gömme derinliğine ve yeraltı suyu seviyesine bağlı olarak tipik olarak 71.3 kPa ile 452.3 kPa arasında değişmiştir. Yumuşak kilde olduğu gibi, 80-100 kN/m<sup>2</sup>'nin üzerindeki  $\Delta\sigma$  değerleri, 22, 30 ve 41 numaralı vakalarda olduğu gibi, sıklıkla 150 mm'yi aşan toplam oturmalarla sonuçlanmıştır.

42 vakanın tamamında, analitik oturma değerleri önemli ölçüde değişkenlik göstermiştir: elastik oturmalar ( $S_{e,a}$ ) 8.8 mm ile 311.3 mm arasında, konsolidasyon oturmaları ( $S_{c,a}$ ) 0.0 mm ile 220.3 mm arasında ve toplam oturmalar ( $S_{t,a}$ ) 8.8 mm ile 440.9 mm arasında değişmiştir. En düşük elastik oturma, 36 m'de yeraltı suyu tablasına sahip sert bir kil profili, düşük yapısal gerilme ( $q_0 = 50$  kPa) ve derin gömme ( $D_f = 6$  m) içeren Vaka 17'de meydana gelmiştir. En yüksek elastik oturma, yüksek yükleme ve büyük bir temel kombinasyonunun önemli ölçüde ani deformasyona neden olduğu Vaka 30'da ( $q_0 = 500$  kPa,  $D_{su} = 6$  m,  $D_f = 1.0$  m) gözlemlenmiştir.

1, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 24, 28, 34 ve 37 gibi birkaç vaka sıfır konsolidasyon oturması ile sonuçlanmıştır. Bu senaryolarda,  $\gamma_n D_f > q_0$  koşulu nedeniyle temel tabanındaki net gerilme negatiftir ( $q_{net} < 0$ ), yani yapısal gerilme zeminden gelen aşırı yük basıncı ile tamamen dengelenmiştir. Sonuç olarak, aşağıdaki sıkıştırılabilir katmana net yük aktarılmamıştır ve analitik olarak  $S_{c,a} = 0$ 'dır.

Maksimum konsolidasyon oturması, 120 kPa yüzey basıncı, sığ yeraltı suyu derinliği ( $D_{su} = 16.5$  m) ve sığ bir temel ( $D_f = 0.5$  m) altında yumuşak kil koşullarını içeren Vaka 42'de meydana gelmiştir. Bu kurulum, aşırı gözenek basıncı oluşumu ve konsolidasyon için ideal koşulları yaratmış ve tüm vakalar arasında en yüksek değer olan 440.9 mm'lik toplam oturmaya yol açmıştır. Buna karşılık, Vaka 8, uygun zemin ve yükleme parametreleri nedeniyle en düşük toplam oturmaya yaşamıştır.

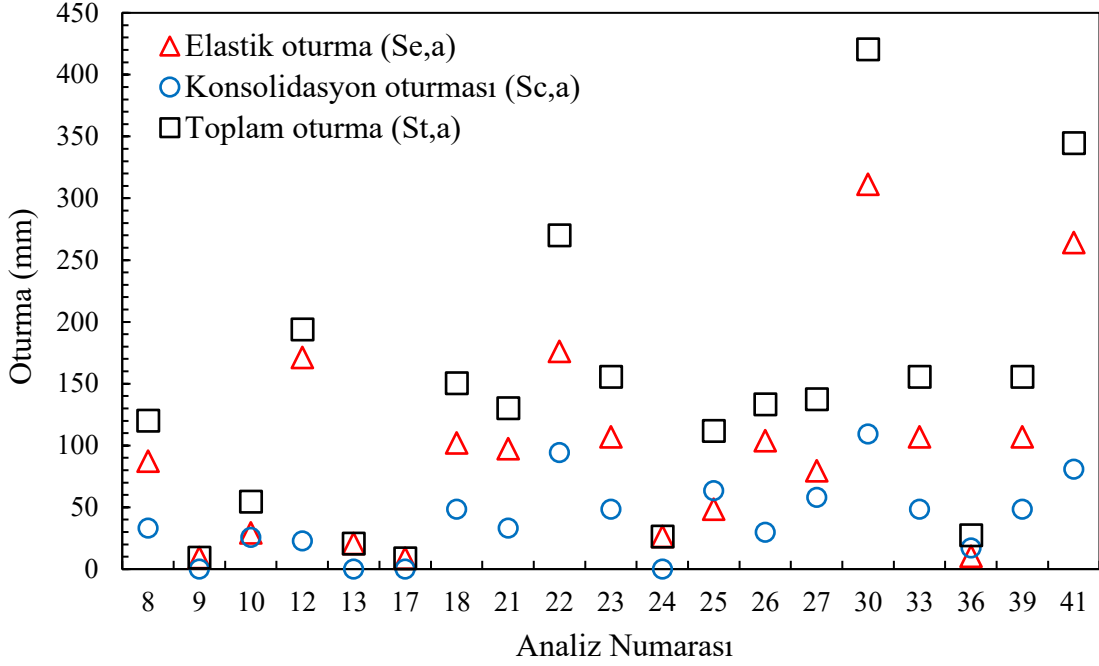
Yumuşak kil üzerindeki 22 sığ temel vakası için analitik elastik ( $S_{e,a}$ ), konsolidasyon ( $S_{c,a}$ ) ve toplam ( $S_{t,a}$ ) oturmaları (Şekil 4.3) sunmaktadır. 1, 5, 7, 11, 28 ve 34 gibi durumlarda, negatif net gerilme ( $q_{net} < 0$ ) nedeniyle sadece elastik oturma meydana gelmekte ve konsolidasyon önlenmektedir. Sonuç olarak, sıkıştırılabilir kil tabakasına ilave gerilme aktarılmaz ve konsolidasyon gelişmez. Buna karşılık, 14, 15 ve 42 gibi vakalar baskın konsolidasyon göstermekte ve 42 numaralı vaka 440.9 mm ile en yüksek toplam oturmaya ulaşmaktadır. Sonuçlar, uygulanan yüksek basıncın, sığ yeraltı suyunun ve kalın sıkıştırılabilir tabakaların toplam oturmaya önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu rakam, yumuşak kil tasarımında hem anlık hem de uzun vadeli oturmaların dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Verilerin genel dağılımına bakıldığında hem yumuşak hem de sert kilde oturmaların büyük bölümünü elastik oturmanın oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Yumuşak kil zemine ait oturma sonuçları

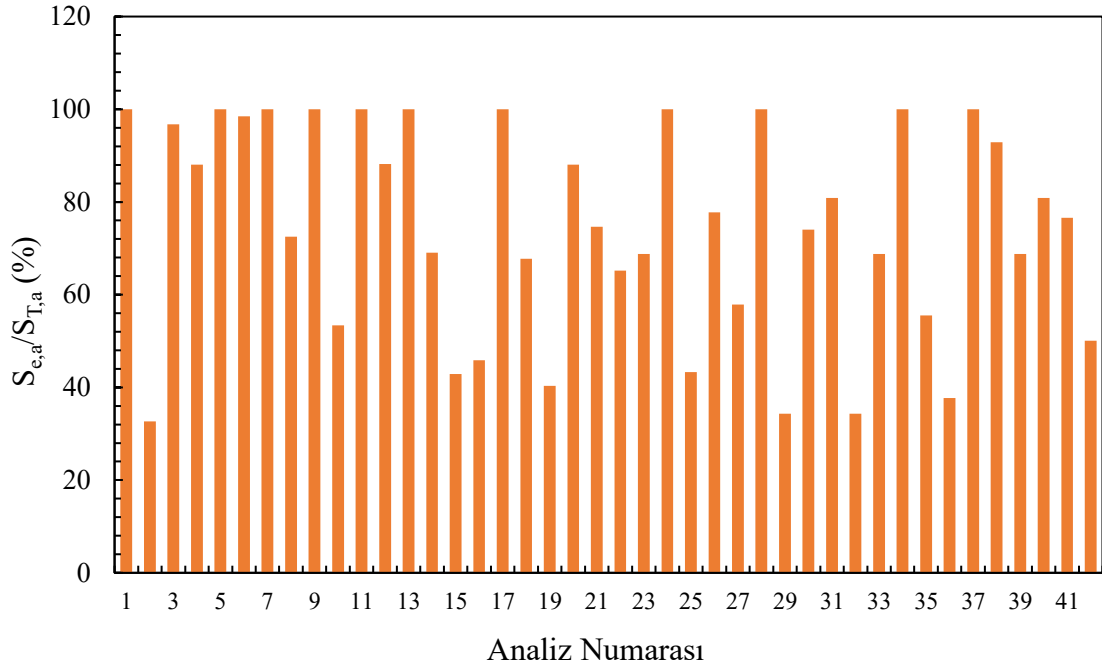
Sert kil zeminler üzerindeki 21 temel vakası boyunca elastik ( $S_{e,a}$ ), konsolidasyon ( $S_{c,a}$ ) ve toplam oturmaların ( $S_{t,a}$ ) değişimini (Şekil 4.4) göstermektedir. Elastik oturmalar genel olarak baskındır ve 8.8 mm ile 311.3 mm arasında değişmektedir; yüksek uygulanan gerilme ( $q_0 = 500$  kPa) ve büyük temel boyutu ( $B = 15$  m) nedeniyle en yüksek değer Vaka 30'da gözlemlenmiştir. Konsolidasyon oturması, kalın sıkıştırılabilir tabakaların ve yüksek yüklerin önemli gecikmeli oturmaya yol açtığı Vaka 22 ve Vaka

30 gibi birkaç vaka dışında, çoğunlukla 100 mm'nin altında olmak üzere orta düzeyde kalmıştır. 9, 13, 17 ve 24 gibi vakalar, derin yeraltı suyu seviyeleri veya düşük gerilme artışları nedeniyle ihmal edilebilir konsolidasyon göstermektedir. Sonuçlar, sert killerin daha az sıkıştırılabilir olmasına rağmen, yüksek yüzey basıncı veya kalın katmanlar altında yine de önemli oturmaların meydana gelebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.4. Sert kil zemine ait oturma sonuçları

Analitik hesaplama sonuçlarına göre, temel zemininde meydana gelebilecek toplam oturmaların büyük bir kısmının elastik oturma sonucunda olduğu görülmektedir. Elastik oturmanın toplam oturmaya oranı ( $S_{e,a}/S_{T,a}$ ) %32.7-100 arasında (ortalama %74.4) değişmektedir (Şekil 4.5). Bu, çoğu senaryoda, özellikle sert killerde veya düşük net gerilimli durumlarda, ani elastik tepkinin oturma davranışına hakim olduğunu göstermektedir. Grafik ayrıca bazı durumlarda (örn. 1, 5, 7, 17, 35) elastik oturmanın katkısının %100'e yaklaştığını veya ulaştığını, yani konsolidasyonun ihmal edilebilir düzeyde olduğunu veya hiç olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.5. Elastik oturmanın toplam oturma içindeki yeri

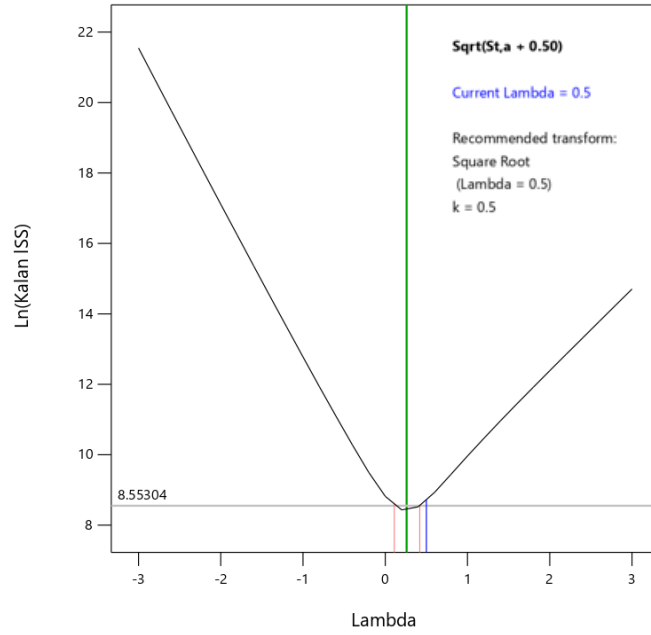
#### 4.1.1. İstatistiksel değerlendirme

Analitik hesaplamalardan elde edilen oturma sonuçları, Design-Expert yazılımı içindeki Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) kullanılarak değerlendirilmiştir. Artıkların normalliğini iyileştirmek ve varyansı dengelemek için, Box-Cox analizinin önerdiği şekilde, oturma yanıt değişkenine bir karekök dönüşümü uygulanmıştır. Box-Cox grafiği (Şekil 4.6), en uygun dönüşümün, artık kareler toplamının minimum değere ulaştığı  $\lambda = 0.5$ 'e karşılık geldiğini açıkça göstermektedir. Bu da karekök dönüşümünün regresyon modelinin istatistiksel sağlamlığını ve tahmin kabiliyetini artırdığını teyit etmektedir.

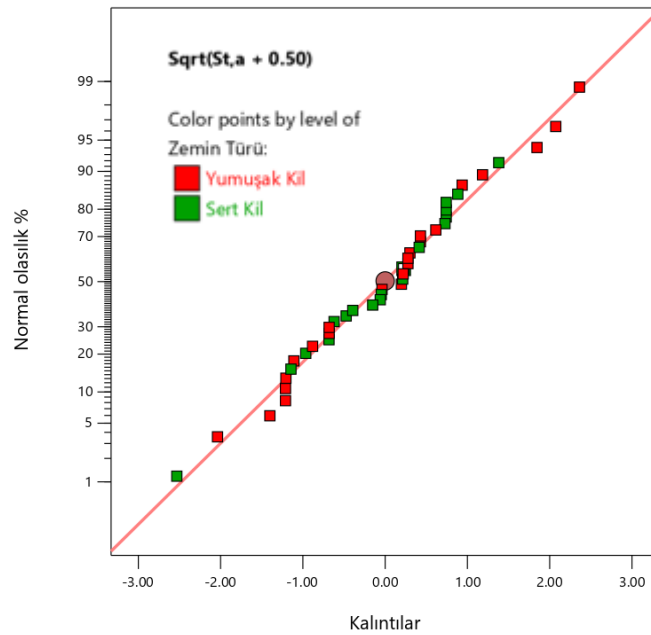
Dönüşümün ardından, p-değeri kriterleri ( $\alpha_{in} = 0.05$ ,  $\alpha_{out} = 0.05$ ) kullanılarak adimsal regresyona dayalı "Değiştirilmiş" süreç sırası seçilerek regresyon modelleri geliştirilmiştir. Bu sayede yazılım otomatik olarak sadece istatistiksel olarak anlamlı terimleri modele dahil ederek hem model basitliğini (parsimoni) hem de tahmin doğruluğunu artırmıştır. Analitik olarak hesaplanan oturmalar için nihai model, Uyum Özeti istatistiklerine göre istatistiksel anlamlılık ve model yorumlanabilirliği arasında en iyi dengeyi sağladığı için ikinci dereceden bir yüzeye uydurulmuştur.

Harici olarak öğrencileştirilmiş artıkların normal olasılık grafiği (Şekil 4.7), artıkların doğrusala yakın bir eğilim izlediğini ve dağılımlarında yaklaşık normallik olduğunu göstermektedir. Çoğu veri noktası kırmızı referans çizgisi boyunca belirgin bir

eğrilik veya kümelenme olmaksızın yakın bir şekilde uzanmaktadır, bu da normallik varsayımının geçerliliğini desteklemektedir. Ek olarak, hem yumuşak kil (kırmızı) hem de sert kil (yeşil) vakaları eğilim çizgisiyle tutarlı bir hizalama göstermekte, bu da regresyon modelinin farklı zemin türlerinde güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu görsel teyit, modelin istatistiksel güvenilirliğini güçlendirmekte ve daha ileri tahmin analizi ve yorumlama için uygunluğunu desteklemektedir.



Şekil 4.6. Box-Cox güç dönüşüm grafiği



Şekil 4.7. Kalıntıların normal olasılık grafiği

Analitik oturma sonuçlarını değerlendirmek için, yanıt değişkenine karekök dönüşümü uygulandıktan sonra Design-Expert yazılımı kullanılarak bir ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ikinci dereceden regresyon modeli mükemmel istatistiksel performans göstermiştir. Spesifik olarak, model 0.9843'lük bir belirleme katsayısı ( $R^2$ ), 0.9762'lik bir Düzeltmiş  $R^2$  değeri ve 0.9608'lik bir Öngörülen  $R^2$  değeri elde etmiştir. Düzeltmiş ve Tahmini  $R^2$  arasındaki fark (sadece 0.0154) kritik eşik olan 0.2'nin oldukça altındadır ve bu da güçlü bir uyum ve yüksek tahmin kabiliyeti olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, modelin Yeterli Hassasiyet değeri 42.37 olarak hesaplanmıştır ve kabul edilebilir seviye olan 4'ün çok üzerindedir. Bu, yüksek bir sinyal-gürültü oranını teyit etmektedir, yani model tasarım uzayında gezinmek ve tahminler yapmak için güvenilir bir şekilde kullanılabilir.

ANOVA sonuçlarına göre (Çizelge 4.2), genel model 121.1 F-değeri ve 0.0001'den küçük p-değeri ile istatistiksel olarak anlamlıdır. Ana etkiler arasında en etkili parametreler, toplam varyasyona %22.12 oranında katkıda bulunan uygulanan düşey gerilme (A) olurken, bunu %26.58'lik katkıyla temel genişliği (C) izlemiştir. Temel derinliği (E) de değişkenliğin %17.09'unu oluşturarak önemli bir rol oynarken, zemin türü (F) %15.99'lük bir katkı sağlamıştır.

**Çizelge 4.2.** Analitik olarak hesaplanan toplam oturma değerleri için anova sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Katkı yüzdesi (%)	Ortalama	F-değeri	p-değeri
Model	819.23	14		58.52	121.1	< 0.0001
A-qo	131.32	1	22.124	131.32	271.77	< 0.0001
B-Dsu	0.0125	1	0.002	0.0125	0.0259	0.8732
C-B	157.77	1	26.580	157.77	326.49	< 0.0001
D-L/B	0.0435	1	0.007	0.0435	0.09	0.7665
E-Df	101.49	1	17.098	101.49	210.03	< 0.0001
F-Zemin Türü	95.04	1	16.011	95.04	196.69	< 0.0001
AC	21.1	1	3.555	21.1	43.67	< 0.0001
AF	31.22	1	5.260	31.22	64.62	< 0.0001
CF	8.98	1	1.513	8.98	18.59	0.0002
EF	16.37	1	2.758	16.37	33.89	< 0.0001
A <sup>2</sup>	14.76	1	2.487	14.76	30.54	< 0.0001
B <sup>2</sup>	1.87	1	0.315	1.87	3.86	0.0598
C <sup>2</sup>	3.62	1	0.610	3.62	7.49	0.0109
E <sup>2</sup>	9.98	1	1.681	9.98	20.66	0.0001
Artık	13.05	27		0.4832		
Uyum	13.02	20		0.6508	143.6	< 0.0001
Hata	0.0317	7		0.0045		
Toplam	832.28	41				

Tüm bu faktörler son derece düşük p-değerlerine ( $p < 0.0001$ ) sahip olup güçlü istatistiksel önemlerini teyit etmektedir. Buna karşılık, yeraltı suyu seviyesinin (B) (Dsu olarak gösterilir) ve L/B oranının etkisi ihmal edilebilir düzeyde bulunmuştur; B'nin katkısı sadece %0.0026 ve p-değeri 0.8558 iken, L/B oranının (D) katkısı %0.0073'tür ve bu da oturma davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir. Bu durum, oturmanın yüzey boyutlarındaki veya yeraltı suyu koşullarındaki küçük değişikliklerden ziyade ağırlıklı olarak uygulanan yük ve temel geometrisi tarafından yönetildiği kohezyonlu zeminler için beklentilerle uyumludur.

Etkileşim terimleri de anlamlı bilgiler sağlamıştır. Yapısal gerilme ile temel genişliği (AC) arasındaki etkileşim %3.54'lük bir katkı sağlamış ve istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ( $p < 0.0001$ ). Benzer şekilde, gerilme ile zemin türü (AF) arasındaki etkileşim %5.25, temel genişliği ile zemin türü (CF) arasındaki etkileşim ise %1.51'lik bir katkı sağlamıştır ve her ikisi de güçlü bir öneme sahiptir. Temel derinliği ve zemin kıvamı (EF) arasındaki etkileşim de 0.0001'in çok altında bir p-değeri ile modele %2.75 oranında katkıda bulunarak önemli olduğunu kanıtlamıştır. Bu etkileşim terimleri, gerilme gibi bir değişkenin davranışının zemin kıvamı veya geometrisindeki değişikliklerden etkilendiğini göstermekte ve oturma tahmininde birleşik etkilerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

İkinci dereceden (kuadratik) etkilerle ilgili olarak, stresin karesel terimi ( $A^2$ ) %2.48'lik bir katkıya sahiptir ve oldukça anlamlıdır ( $p < 0.0001$ ), bu da uygulanan yük ile oturma arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi ortaya koymaktadır.  $C^2$  (temel genişliğinin karesi) ve  $E^2$  (temel derinliğinin karesi) gibi diğer ikinci dereceden terimler de sırasıyla %0.60 ve %1.68'lik katkılarıyla istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu bulgular, oturma davranışının tamamen doğrusal olmadığını, eğrilik etkileri içerdiğini ve daha iyi gerçekçilik ve doğruluk için ikinci dereceden bir model yapısının seçilmesini desteklemektedir.

Uyum Eksikliği F-değeri 143.6 olarak hesaplanmış ve p-değeri  $< 0.0001$  uyum eksikliğinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiş olsa da, bu dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır. Genel artık hata (Saf Hata = 0.0045) son derece düşüktü ve model deneysel eğilimlerle güçlü bir uyum ve mükemmel  $R^2$  ölçümleri gösterdi. Bu nedenle, önemli Uyum Eksikliğine rağmen, modelin daha fazla yorumlama ve karşılaştırma için istatistiksel olarak geçerli ve güvenilir olduğu düşünülmektedir.

Özetle, analitik modelde toplam oturmaya katkıda bulunan başlıca faktörler dikey gerilme seviyesi, temel geometrisi (özellikle genişlik ve derinlik) ve killi zemin türüdür.

Bu değişkenler hem güçlü bireysel etkiler hem de ilgili etkileşim davranışı göstermiştir. Önemli ikinci dereceden terimlerin varlığı, kohezyonlu zeminlerde oturmanın doğrusal olmayan doğasını doğrulamakta ve ikinci dereceden regresyon modelini bu çalışma için uygun ve sağlam bir seçim haline getirmektedir. Doğrulaması yapılan bu model, adresini ilerleyen bölümlerde PLAXIS 3D sayısal simülasyonlarından elde edilen oturma değerleriyle karşılaştırmak için bir ölçüt sağlamaktadır.

Yumuşak kil ve sert kil zeminlerde toplam oturmayı tahmin etmek için geliştirilen regresyon denklemleri sırasıyla Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'de verilmiştir.

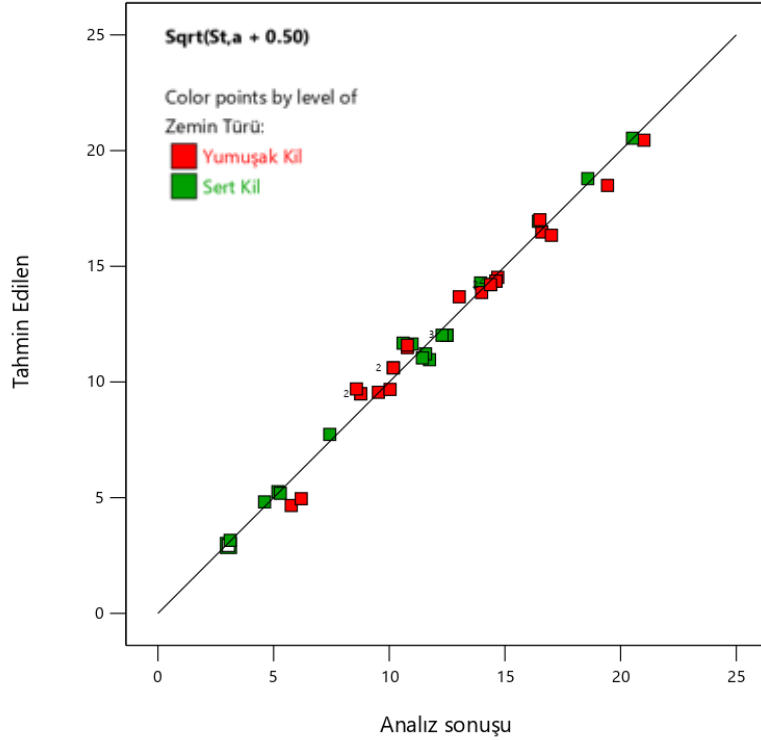
$$\sqrt{(S_{T,a} + 0.50)} = 3.20 + 0.08*q_o - 0.09*D_{su} + 0.98*B - 0.02*L/B - 1.79*D_f + 0.001*q_o*B - 0.000004*q_o^2 - 0.002*D_{su}^2 - 0.002*B^2 - 0.03*B^2 + 0.13*D_f^2 \quad (4.1)$$

$$\sqrt{(S_{T,a} + 0.50)} = 1.54 + 0.03*q_o - 0.09*D_{su} + 0.70*B - 0.02*L/B - 1.21*D_f + 0.001*q_o*B - 0.000004*q_o^2 + 0.002*D_{su}^2 - 0.03*B^2 + 0.13*D_f^2 \quad (4.2)$$

Geliştirilen regresyon modelinin tahmin performansı, Tahmin Edilen ve Gerçekleşen grafiğinde gösterilmektedir (Şekil 4.8). Bu şekilde, veri noktalarının çoğu 45° referans çizgisi boyunca sıkıca hizalanmıştır; bu da analitik olarak hesaplanan oturmalar ile ikinci dereceden regresyon modeli tarafından tahmin edilenler arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. Bu yakın hizalama, modelin el hesaplamalarından elde edilen oturma sonuçlarının davranışını minimum tahmin hatasıyla doğru bir şekilde yakaladığını doğrulamaktadır. Hem yumuşak kil (kırmızı) hem de sert kil (yeşil) vakaları referans çizgisini tutarlı bir şekilde takip ederek modelin farklı zemin türlerinde güvenilir bir performans sergilediğini göstermektedir. Köşegene yakın noktaların kümelenmesi de düşük sistematik yanlılığa işaret etmekte ve modelin deneysel aralık içinde iyi genelleme yapabilme kabiliyetini vurgulamaktadır. Bu görsel doğrulama, istatistiksel sonuçları desteklemekte ve regresyon modelinin sağlamlığını ve tahmin kalitesini teyit etmektedir.

Design-Expert kullanılarak geliştirilen regresyon modelinin doğruluğunu değerlendirmek için, öngörülen oturma değerleri 42 test vakasının tamamı için hesaplanan gerçek analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'te gösterildiği gibi, öngörülen değerler çok çeşitli yükleme koşulları, temel geometrileri ve zemin tiplerinde gerçek oturma sonuçlarıyla yakından eşleşmektedir. Örneğin, Vaka 3'te analitik oturma 195.34 mm iken öngörülen değer 191.89 mm'dir ve %2'den daha az bir sapma göstermektedir. Benzer şekilde, Vaka 18'de analitik sonuç 150.41 mm iken öngörülen

değer 144.36 mm'dir. Farklı konfigürasyonlardaki bu tutarlı yaklaşımlar modelin sağlamlığını teyit etmektedir.



Şekil 4.8. Analitik hesaplama ve istatistiksel model sonuçlarının karşılaştırılması

Analitik sonucun 440.94 mm ve öngörülen değer 417.80 mm olduğu Vaka 42 gibi bazı uç vakalarda küçük farklılıklar gözlemlense de model yine de oturma davranışını kabul edilebilir bir aralıkta yakalamıştır. Artık hatalar, yüksek gerilimli veya sığ derinlikli senaryolarda bile tüm değer spektrumu boyunca nispeten küçük kalmıştır. Ayrıca, hem yumuşak hem de sert kil vakaları benzer tahmin doğruluğu sergilemiş, bu da regresyon modelinin farklı zemin koşullarında güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermiştir.

Genel olarak, sayısal karşılaştırma, karekök dönüşümü ile geliştirilen ikinci dereceden regresyon modelinin analitik oturma sonuçlarını yüksek tutarlılıkla doğru bir şekilde yeniden üretebildiğini doğrulamaktadır. Gerçek ve öngörülen değerler arasındaki yakın uyum, modelin geçerliliğini ve öngörücü geoteknik analizde kullanım için uygunluğunu güçlendirmektedir.

Çizelge 4.3. Analitik hesaplama ve regresyon tabanlı tahminlerle toplam oturma sonuçları

Analiz numarası	Parametreler					Zemin türü	Analitik Hesaplama, $S_{T,a}$ (mm)	Tahmini Oturma (mm)
	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	B (m)	L/B	$D_f$ (m)			
1	50	10.4	5	5	6	Yumuşak Kil	32.75	21.27
2	50	36	5	5	0.8	Yumuşak Kil	100.25	93.22
3	120	20.6	10.2	1	6	Yumuşak Kil	195.34	191.89
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	103.06	112.18
5	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	206.30	201.54
6	110	36	5	5	6	Yumuşak Kil	73.17	93.69
7	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	206.30	201.54
8	250	6	9.9	4.8	6	Sert Kil	120.16	135.33
9	50	6	5	3.1	3.1	Sert Kil	9.26	9.47
10	50	36	15	3	0	Sert Kil	54.69	59.35
11	50	36	5	1.5	6	Yumuşak Kil	37.92	24.08
12	275	36	15	1	6	Sert Kil	194.05	203.83
13	50	6	10	1	6	Sert Kil	20.75	22.71
14	120	36	15	2.9	2.9	Yumuşak Kil	377.21	341.72
15	60	20.3	15	5	0	Yumuşak Kil	274.82	271.25
16	80	36	10.1	1	0	Yumuşak Kil	272.26	288.98
17	50	36	5	5	6	Sert Kil	8.80	8.12
18	275	21	10	3	3	Sert Kil	150.41	144.36
19	120	20.4	5	2.9	1	Yumuşak Kil	215.29	210.56
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	103.06	112.18
21	500	6	5	3	6	Sert Kil	130.29	122.51
22	500	36	10	5	1.5	Sert Kil	270.12	288.31
23	275	21	10	3	3	Sert Kil	155.50	144.36
24	50	6	15	5	3	Sert Kil	26.40	27.18
25	275	6	5	5	0	Sert Kil	111.84	136.26
26	500	36	5	1	3	Sert Kil	133.38	126.48
27	130	6	15	1.3	0.5	Sert Kil	137.40	119.84
28	50	20.9	15	1	2.9	Yumuşak Kil	115.82	131.46
29	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	213.09	205.67
30	500	6	15	1	1.5	Sert Kil	420.44	423.41
31	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	76.37	89.57
32	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	213.09	205.67
33	275	21	10	3	3	Sert Kil	155.50	144.36
34	50	36	13.8	5	6	Yumuşak Kil	90.38	90.81
35	120	6	10.2	5	2.9	Yumuşak Kil	288.92	266.62
36	50	21	5	1	0	Sert Kil	27.51	26.45
37	50	20.9	15	1	2.8	Yumuşak Kil	115.82	133.91
38	120	21	10	4.1	6	Yumuşak Kil	169.20	186.77
39	275	21	10	3	3	Sert Kil	155.50	144.36
40	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	76.37	89.57
41	500	21	15	5	6	Sert Kil	344.76	354.49
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	440.94	417.80

## 4.2. Sayısal Analiz Sonuçları

PLAXIS 3D sayısal analizi, uygulanan gerilme ( $q_0$ ), yeraltı suyu seviyeleri ( $D_{su}$ ), temel boyutları ( $B$ ,  $L$ ,  $D_f$ ) ve kohezyonlu zemin özelliklerindeki varyasyonları kapsayan çok çeşitli temel senaryolarını içermiştir. Sayısal analiz sonuçlarından elde edilen düşey deformasyon değerleri Çizelge 4.4’de sunulmuştur. Sayısal analiz sonuçlarını gösteren kanıtlar Ek’te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Sayısal analizlerden elde edilen düşey deformasyon sonuçları

Analiz numarası	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	$B$ (m)	$L/B$	$D_f$ (m)	Zemin türü	$S_{kabarma}$ (mm)	$S_{e,s}$ (mm)	$S_{T,s}$ (mm)	$t$ (gün)
1	50	10.4	5	5	6	Yumuşak Kil	76.11	23.3	20.0	2125
2	50	36	5	5	0.8	Yumuşak Kil	18.62	107.0	173.6	2138
3	120	20.6	10.2	1	6	Yumuşak Kil	79.53	55.9	66.1	1643
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	71.39	59.8	71.5	2928
5	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	191.54	114.4	116.9	1769
6	110	36	5	5	6	Yumuşak Kil	67.49	52.3	56.9	998
7	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	191.54	114.4	116.9	1769
8	250	6	9.9	4.8	6	Sert Kil	26.58	73.8	103.2	2835
9	50	6	5	3.1	3.1	Sert Kil	10.76	5.8	6.0	715
10	50	36	15	3	0	Sert Kil	0.00	33.8	71.4	5404
11	50	36	5	1.5	6	Yumuşak Kil	57.59	12.7	12.3	580
12	275	36	15	1	6	Sert Kil	20.00	53.8	75.8	1194
13	50	6	10	1	6	Sert Kil	19.90	4.4	3.8	1464
14	120	36	15	2.9	2.9	Yumuşak Kil	83.17	218.3	353.9	4473
15	60	20.3	15	5	0	Yumuşak Kil	0.00	282.5	574.1	6190
16	80	36	10.1	1	0	Yumuşak Kil	0.00	547.1	699.0	790
17	50	36	5	5	6	Sert Kil	13.52	3.6	2.9	1301
18	275	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	121.8	167.2	1889
19	120	20.4	5	2.9	1	Yumuşak Kil	23.33	343.6	449.2	1241
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	71.39	59.8	71.5	2928
21	500	6	5	3	6	Sert Kil	16.75	247.1	284.0	1481
22	500	36	10	5	1.5	Sert Kil	7.38	656.4	775.7	7140
23	275	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	121.8	167.2	1889
24	50	6	15	5	3	Sert Kil	19.58	58.3	76.1	6461
25	275	6	5	5	0	Sert Kil	0.00	399.7	451.6	1517
26	500	36	5	1	3	Sert Kil	6.97	167.7	188.6	447
27	130	6	15	1.3	0.5	Sert Kil	3.42	97.7	139.1	1295
28	50	20.9	15	1	2.9	Yumuşak Kil	63.94	243.2	301.2	2274
29	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	0.00	236.3	410.5	2592
30	500	6	15	1	1.5	Sert Kil	8.74	1361.0	1503.0	1026
31	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	39.09	214.7	244.5	1039
32	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	0.00	236.3	410.5	2592
33	275	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	121.8	167.2	1889
34	50	36	13.8	5	6	Yumuşak Kil	106.69	39.7	33.5	2410
35	120	6	10.2	5	2.9	Yumuşak Kil	37.62	247.5	373.0	3754
36	50	21	5	1	0	Sert Kil	0.00	26.0	32.8	551
37	50	20.9	15	1	2.8	Yumuşak Kil	62.30	235.6	292.4	1882
38	120	21	10	4.1	6	Yumuşak Kil	110.37	90.0	106.0	3815
39	275	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	121.8	167.2	1889
40	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	39.09	214.7	244.5	1039
41	500	21	15	5	6	Sert Kil	28.07	386.2	494.7	2751
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	16.65	594.8	847.8	2716

Temel kazısı sırasında, zeminde göçme veya kayma olmaması için analizlerde bodrum duvarı eklenmiştir. Temel kazısı sırasında  $D_f > 0m$  olan durumlarda kazı seviyesinden yukarı yönlü deformasyonlar (Skabarma) belirlenmiştir. Daha sonra radye temelin inşaatı ve yapısal gerilmenin 120gün süre boyunca uygulanmasıyla, yapı yükü altındaki oturmaların elastik oturma ( $Se_{,s}$ ) olduğu kabul edilmiştir. Bu aşamadan sonra, sabit ve uniform gerilme altında her bir vakada %90 konsolidasyon zamanına ulaşana kadar zemindeki oturmaların tamamlanması sağlanmıştır. Bu aşamadaki oturma değeri toplam oturma ( $ST_{,s}$ ) olarak dikkate alınmıştır ve oturma zamanı ise  $t$  (gün) olarak sunulmuştur. Deformasyon değerlerindeki “s” alt indis, sonuçların sayısal analizlerden elde edildiğini göstermektedir. Bu koşullar altında iç gerilme davranışını değerlendirmek için radye temeldeki eğilme momentleri kaydedilmiştir. Ayrıca oturma-zaman ilişkisi ve aşırı boşluk suyu basıncındaki değişimler de incelenmiştir.

#### 4.2.1. Kazı çukurundaki kabarmalar

Sığ temel inşaatında kazı aşaması genellikle yük basıncının kaldırılması nedeniyle düşey zemin hareketini tetikler. PLAXIS 3D simülasyonlarında bu olgu, zemin türüne, temel boyutlarına ve yeraltı suyu seviyesine bağlı olarak önemli ölçüde değişen değerlerle yukarı doğru kabarma olarak açıkça gözlemlenmiştir.

Yumuşak killer, ortalama 61.2 mm'lik bir yükselme ile belirgin şekilde daha yüksek bir kabarma tepkisi sergilemiş ve aşırı durumlarda 191.5 mm'ye (örneğin, Vaka-5 ve Vaka-7) kadar ulaşmıştır. Bu davranış, yumuşak kilin daha düşük sertliğine ve daha yüksek sıkıştırılabilirliğine bağlanmaktadır, bu da boşaltma gerçekleştiğinde daha fazla elastik geri tepmeye izin vermektedir. Aslında, yumuşak kil vakalarının %50'den fazlasında 50 mm'yi aşan kabarma değerleri görülmüştür ve bu da inşaat aşamalarında ve izlemede bu etkinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Buna karşılık, sert kil vakaları, maksimum 28.1 mm olmak üzere ortalama sadece 12.3 mm ile nispeten kısıtlı bir kabarma göstermiştir. Bu durum, sert killerin elastik deformasyona karşı daha yüksek direncini ve gerilimin azaltılmasından sonra genişleme eğilimlerinin azaldığını yansıtmaktadır.

Kazı kaynaklı kabarma, özellikle yumuşak zeminlerde çevredeki yapıların stabilitesini ve temelin kendi davranışını önemli ölçüde etkileyebileceğinden, sonlu eleman modellemesine dahil edilmesi çok önemlidir. Sonuçlar, özellikle yumuşak,

doymuş killerin mevcut olduğu ve derin kazı yapılması gereken yerlerde, tasarımda kabarma deformasyonunun dikkate alınmasının önemini teyit etmektedir.

#### 4.2.2. Oturma sonuçları

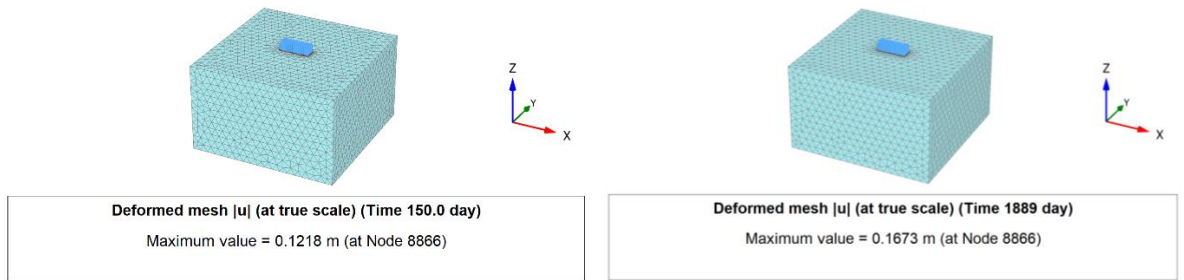
Sayısal analizlerde, yapısal yükleme aşaması sonundaki oturma değeri elastik ( $S_{e,s}$ ) oturma, %90 konsolidasyon aşaması sonundaki oturma değeri ise toplam oturma ( $S_{T,s}$ ) olarak dikkate alınmıştır. Yoplam ve ani oturma farkı ise konsolidasyon oturması ( $S_{c,s}$ ) olarak kabul edilmiştir. Oturma terimlerindeki “s” alt indisi sonuçların sayısal analizlerden elde edildiğini göstermektedir.

Çalışmada, yapı oturması için bir üst limit belirlenmemiştir. Düşük yapısal yük neticesinde çok küçük oturma değerleri hesaplandığı gibi, zeminde göçme vakalarını gösteren yüksek oturma değerleri ile de karşılaşılmıştır. Çalışmada zeminin oturma davranışı incelendiği için, gerekse bile zemin iyileştirme alternatifleri üzerinde durulmamıştır. Bu nedenle, yapılar için 50-60mm oturma değerinin güvenli olacağı unutulmamalıdır.

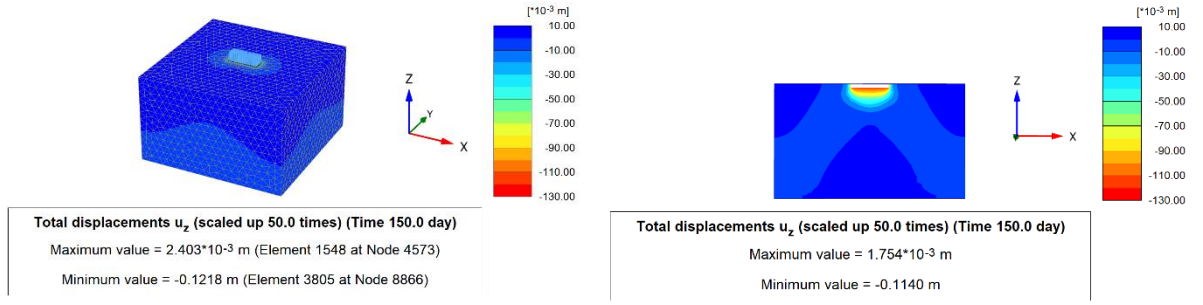
Analiz serisindeki önemli bir bulgu, yumuşak kil üzerine yerleştirilen sığ temellerin hem yapısal yükleme hem de konsolidasyon aşamalarında sert kile kıyasla önemli ölçüde daha büyük oturma büyüklükleri sergilemesi ve yumuşak kil vakalarının yarısından fazlasında ortalama konsolidasyon oturmalarının 300 mm'yi aşmasıdır. Yumuşak kilde en yüksek konsolidasyon oturması, yüksek yapısal gerilme ( $q_0=120$  kPa), geniş temel ( $L=36$  m) ve minimum gömme derinliği ( $D_f=0.5$ m) kombinasyonunun  $S_{T,s}=847.8$ mm'ye yol açtığı Vaka-42'de meydana gelmiştir. Benzer şekilde, en uzun konsolidasyon süresi Vaka-15'te gözlemlenmiş, aşırı yumuşak kil konfigürasyonu, kazı kabarması tespit edilmemesine rağmen 6190 günde (yaklaşık 17 yıl) %90 konsolidasyona ulaşmıştır. Bu durum, düşük geçirgenliğe sahip zeminlerde oturma performansının sadece büyüklüğe göre değil, zamana bağlı risklere göre de değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Vaka 18, 3.0 m'lik sığ bir derinliğe gömülü büyük bir dikdörtgen temele ( $B = 10$  m,  $L = 30$  m) uygulanan 275 kPa'lık yüksek bir yüzey yüküne maruz kalan sert bir kil durumunu temsil etmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 21 m olarak ayarlanmış ve temel etkin bir şekilde kuru çalışma koşuluna yerleştirilmiştir. Tüm inşaat aşamaları sırasında sert kilin gerilme-şekil değiştirme tepkisini simüle etmek için Drenajsız A davranışına sahip Sertleşen Zemin Modeli kullanılmıştır. Kazı aşamasında, sert kilin daha düşük

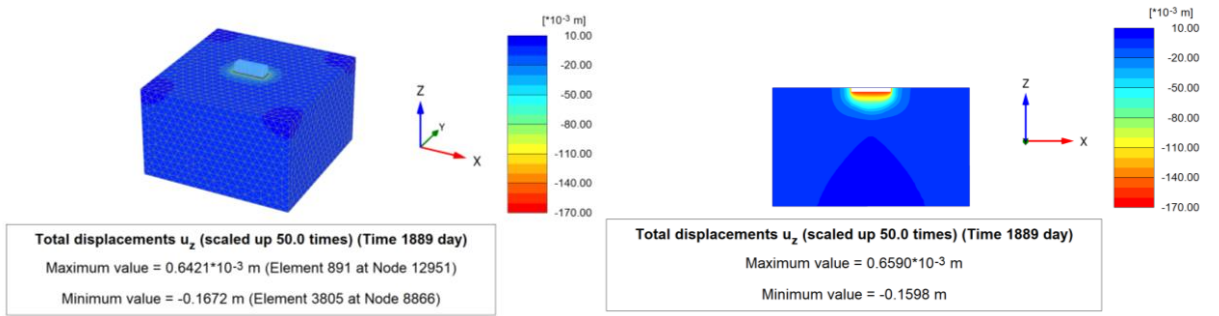
elastikiyetini ve geri tepme kapasitesini yansıtan 13.03 mm'lik nispeten küçük bir kabarma kaydedilmiştir. Şekil 4.9 iki kritik aşamada Vaka-18 için zemin alanının deforme olmuş ağını göstermektedir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 sırasıyla yapısal yükleme ve %90 konsolidasyon aşamalarındaki düşey deplasmanları hem 3B hem de kesit görünümü olarak göstermektedir. Temelin merkez hattı boyunca alınan kesitte deformasyonun aşağıya ve yanal olarak çevredeki zemin kütesine nasıl yayıldığı gösterilmektedir. Oturma bölgesinin en derin kısmı doğrudan temel merkezinin altında yer alırken, köşelere doğru küçük yükselmeler gözlemlenebilir. Yapısal yükleme aşamasındaki deplasmanlar esas olarak sert kilin yapısal yüklemeye verdiği ani elastik ve plastik tepkiyi yansıtmaktadır. Bu arada, konsolidasyon sırasındaki enine kesit görünümü, radye temelin merkezinin altında daha belirgin ve konsantre bir oturma bölgesi göstermekte ve maksimum 159.8 mm'ye ulaşarak sert kilde birincil konsolidasyonun zamana bağlı doğasını yansıtmaktadır. Renk konturları, daha derin tonlar daha önemli deformasyona işaret edecek şekilde oturma gradyanını açıkça göstermektedir. Bu yan yana grafikler, ani elastik tepkinin ötesinde konsolidasyondan kaynaklanan ek oturma katkısını etkili bir şekilde vurgulamaktadır. Görsel karşılaştırma, konsolidasyon döneminde oturmanın önemli ölçüde arttığını açıkça göstermektedir. Yapısal yükleme aşamasında maksimum deformasyon 121.8 mm olarak gözlemlenirken, konsolidasyon sonunda bu değer 167.2 mm'ye ulaşmıştır. Bu artış, aşırı gözenek basınçlarının dağılması ve uzun süreli yükleme altında kademeli zemin sıkışması nedeniyle sert kilin zamana bağlı davranışını yansıtmaktadır. Deforme olmuş geometri ayrıca, bu senaryoda kullanılan geniş genişlik ve orta gömme derinliği ( $D_f = 3.0$  m) ile tutarlı olarak, radye temelin altındaki tekdüze oturma dağılımını da vurgulamaktadır. Bu gözlemler, sert tabakalar için bile killi zeminlerde konsolidasyon etkilerinin açıkça modellenmesinin gerekliliğini desteklemektedir.



**Şekil 4.9.** Gerçek ölçekli 3d deforme mesh görünümü: yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 18)



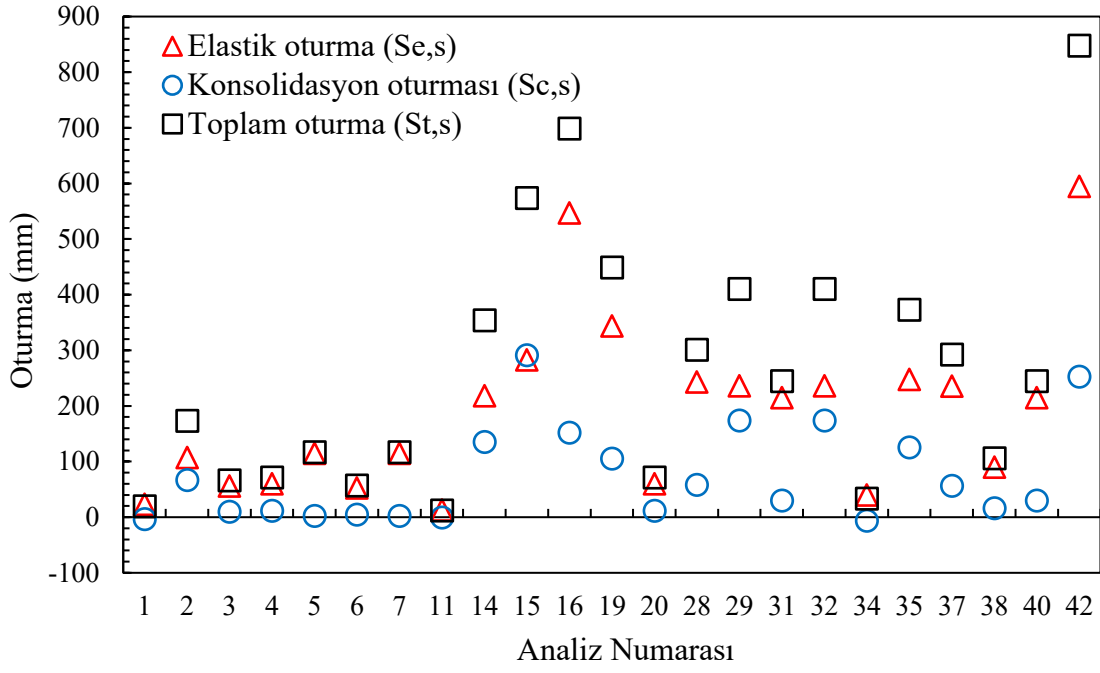
**Şekil 4.10.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 18)



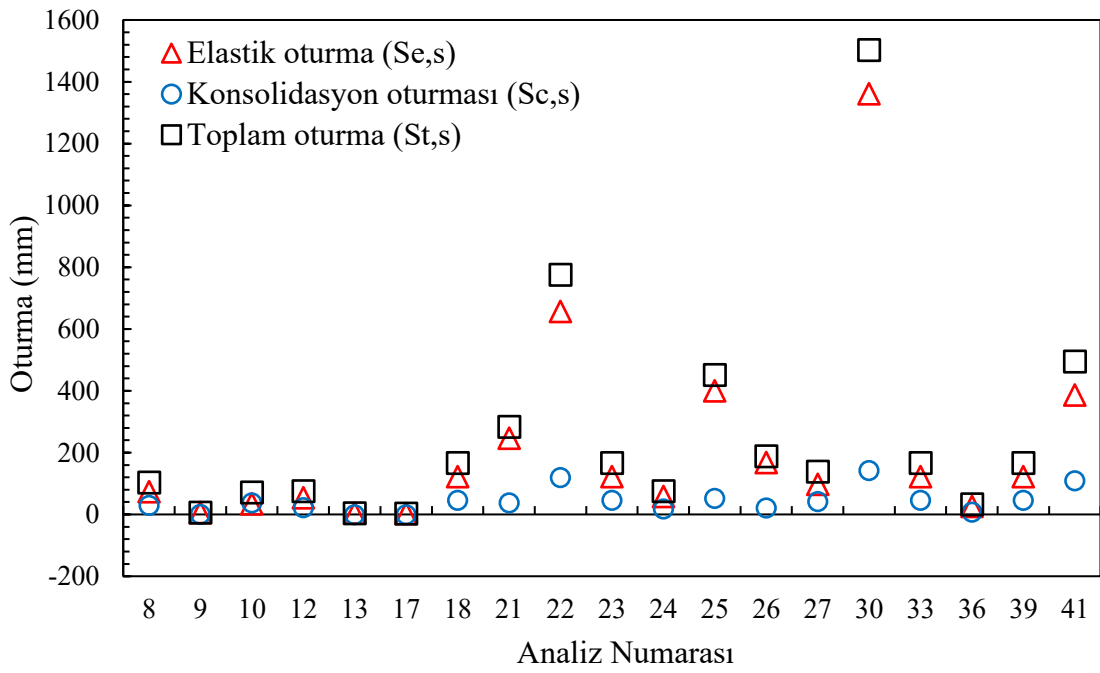
**Şekil 4.11.** 90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 18)

Yumuşak kil zeminde %90 konsolidasyon ve yapısal yükleme aşamaları arasındaki oturma farkı sert kile göre daha fazladır (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). Buna rağmen her iki zemin türünde de oturmaların büyük bölümü yapısal yükleme aşamasında tamamlanmaktadır. Genel olarak toplam oturmanın %47.4-100'ü (ortalama %80) yapısal yükleme aşamasında tamamlanmaktadır. Geoteknik mühendisliği açısından killi zeminlerde zamana bağlı olarak oturmaların arttığı bilinse de oturmaların büyük bölümünün yapısal yükleme aşamasında tamamlandığı belirlenmiştir (Şekil 4.14).

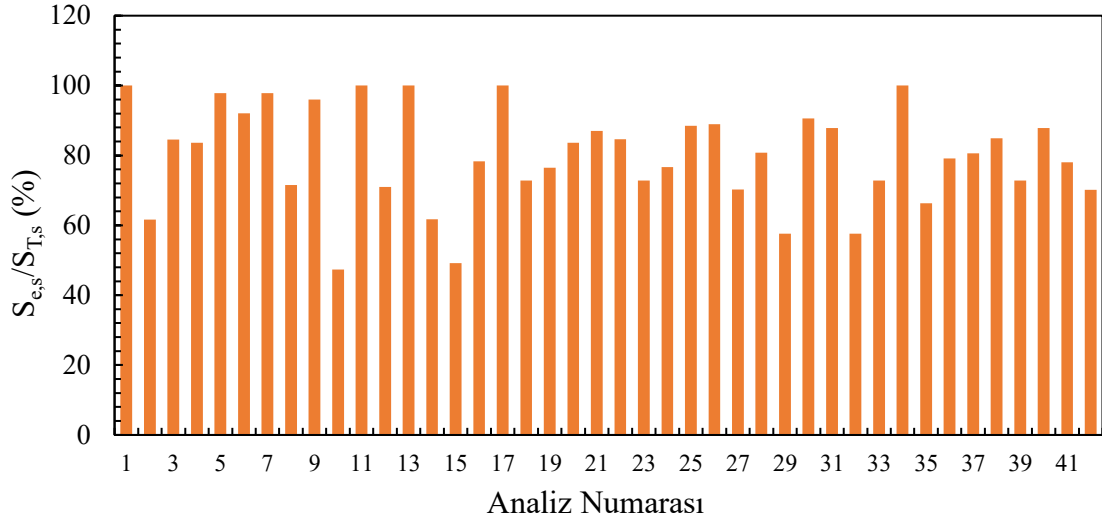
Yumuşak kil zemindeki 1-11-34 numaralı vakalarda ve sert kil zemindeki 13 ve 17 numaralı vakalarda yapı yükü aşamasından sonra konsolidasyon oturması gözlenmemiş, aksine zeminde küçük miktar da olsa kabarma meydana gelmiştir (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). Bu tasarımlarda kazı derinliği 6m ve yapısal gerilme 50kPa'dır. Temel kazısı sırasında zeminden kaldırılan gerilme yapısal gerilmeden fazladır. Yapısal gerilme uygulanınca zeminde bir miktar oturma olmuş, daha sonra oturma davranışı kabarmaya dönmüştür. Zemin, geçmişte maruz kaldığı gerilmeden daha az bir yükü yüklediği için zamanla yapısal yükün etkisi ortadan kalkmış ve zemin eski gerilme geçmişine doğru bir hareket yapmıştır. Bahsedilen vakalarda oturmaların elastik bölgede kalmış, yapısal yükün az olması nedeniyle de zemin yukarı yönlü deformasyon yapmıştır.



Şekil 4.12. Sayısal analiz sonucu yumuşak kilde oluşan oturmalar



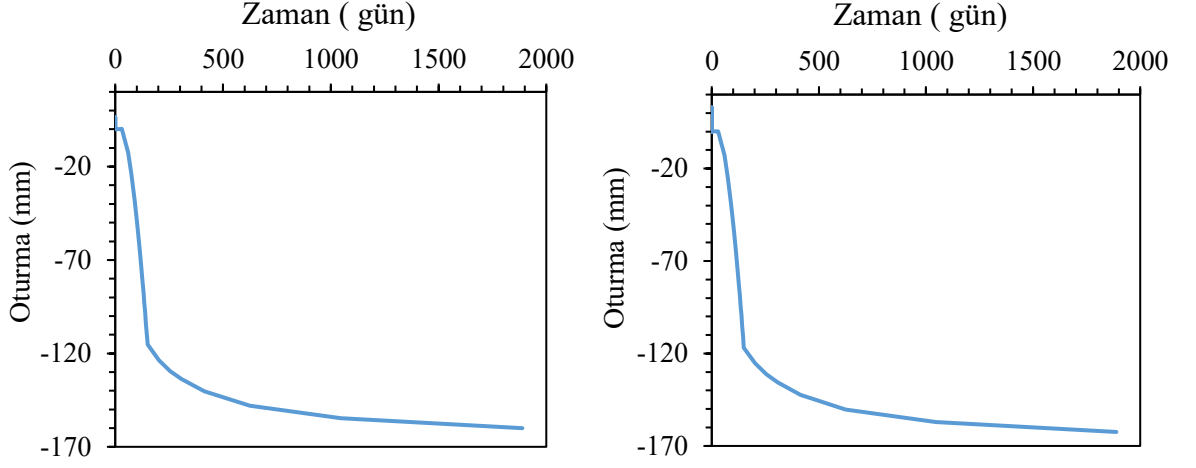
Şekil 4.13. Sayısal analiz sonucu sert kilde oluşan oturmalar



Şekil 4.14. Sayısal analiz sonucunda elastik oturmaların toplam oturma içindeki yeri

#### 4.2.3. Oturma-zaman ilişkisi

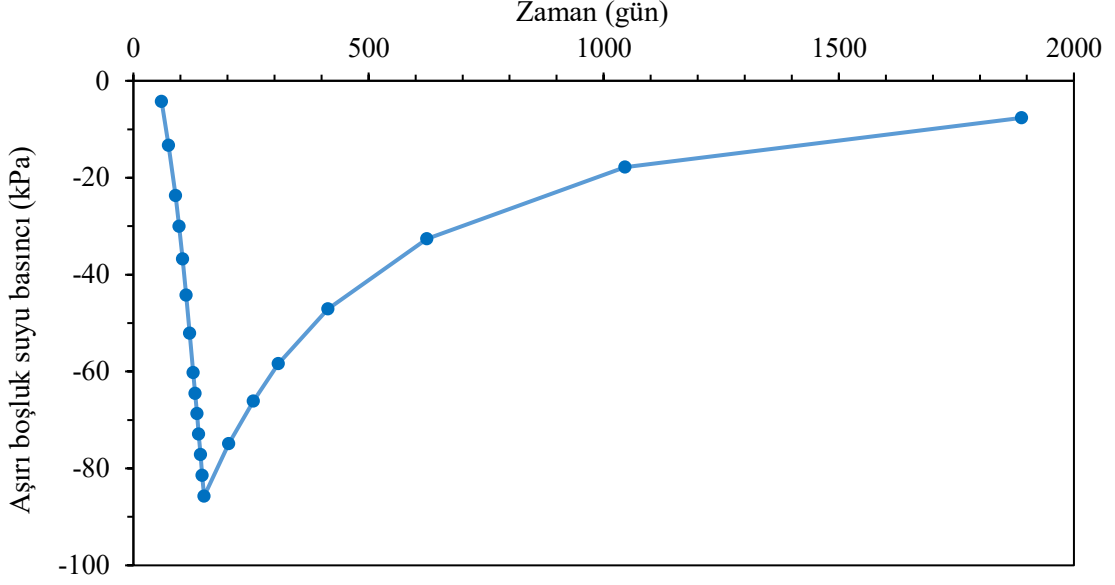
Vaka-18'de temelin merkez ve kenar noktaları altında zamana bağlı düşey oturma davranışı Şekil 4.15'de gösterilmektedir. Her iki grafik de başlangıç aşaması hariç olmak üzere, kazı aşamasının başlangıcından son konsolidasyon aşamasına kadar yer değiştirmenin gelişimini göstermektedir. Her iki noktada da yapısal yüklemenin uygulanmasından kısa bir süre sonra oturma eğrisinde dik bir düşüş gözlenmektedir, bu da deformasyonun çoğunun drenajsız veya kısa vadeli tepki sırasında meydana geldiğini göstermektedir. Zaman ilerledikçe, oturma oranı önemli ölçüde azalır ve eğriler düzleşmeye başlar, bu da fazla boşluk suyu basıncının kademeli olarak dağıldığını ve konsolidasyon aşamasına geçildiğini teyit eder. Özellikle, temel merkezinde ölçülen toplam yer değiştirmenin kenardakinden biraz daha yüksek olması, radye temel içinde küçük bir diferansiyel oturmanın meydana geldiğini göstermektedir. Genel olarak, bu eğriler dikey deformasyonların simülasyonun sonunda kararlı bir duruma ulaştığını doğrulamakta ve temel yükü altında sert kili modellerken hem anlık hem de zamana bağlı davranışları yakalamanın önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.15. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 18)

#### 4.2.4. Aşırı boşluk suyu basıncı

Vaka-18'de kil tabakası içinde seçilen bir izleme noktasında aşırı boşluk suyu basıncının (ABSB) zamanla değişimini (Şekil 4.16) göstermektedir. Yapısal yüklemenin hemen ardından ABSB keskin bir şekilde düşerek yaklaşık -87 kPa'lık en yüksek negatif değere ulaşmaktadır. Bu ilk düşüş, hızlı yüklemenin uygulanan gerilme ve gözenek basıncı dağılımı arasında ani bir dengesizliğe neden olduğu sert kilin drenajsız tepkisini yansıtmaktadır. Bu noktadan sonra grafikte gözenek basıncının zamanla sıfıra doğru kademeli olarak iyileştiği görülmektedir; bu da konsolidasyon ilerledikçe fazla basıncın aşamalı olarak dağıldığını göstermektedir. Eğrinin eğimi daha sonraki aşamalarda daha düz hale gelir, bu da konsolidasyonun büyük kısmının nispeten erken gerçekleştiğini ve toprağın yaklaşık 1888 günlük tam %90 konsolidasyon süresinden önce dengeye yaklaştığını gösterir. Bu davranış, düşük sıkıştırılabilirliğe ve orta derecede geçirgenliğe sahip sert killer için tipiktir; burada gözenek basıncının dağılması sabit ancak uzundur. Genel eğilim konsolidasyon etkilerinin simülasyonda yeterince yakalandığını ve seçilen düğümün bir radye temel altında beklenen gözenek basıncı gelişimini yansıttığını doğrulamaktadır.

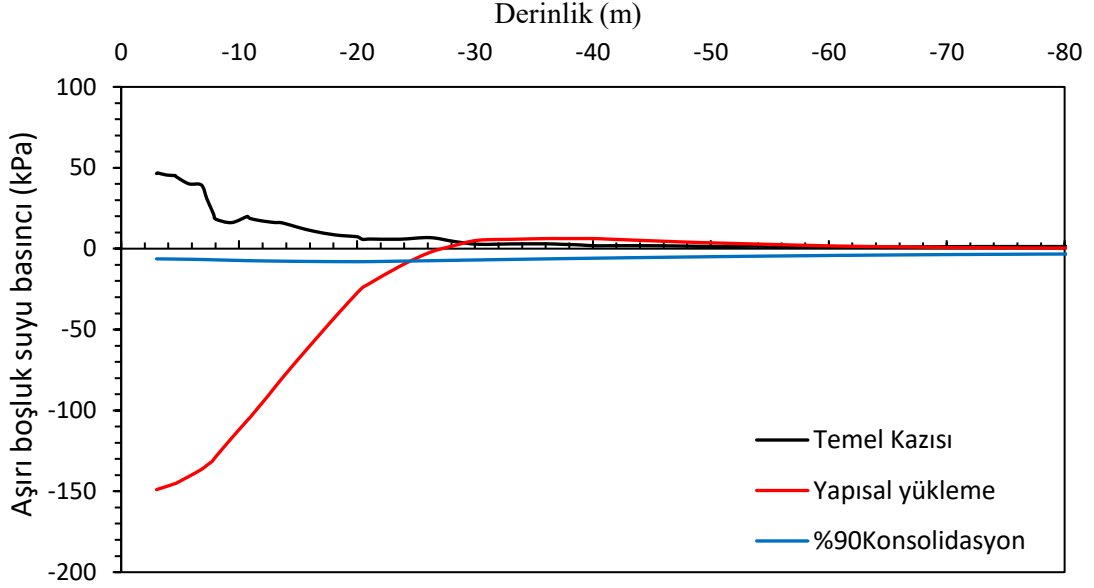


Şekil 4.16. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla değişimi (Analiz 18)

Şekil 4.17, inşaatın üç kritik aşamasında aşırı gözenek suyu basıncının dikey dağılımını göstermektedir: kazıdan hemen sonra (siyah çizgi), yapısal yükün uygulanmasından sonra (kırmızı çizgi) ve %90 konsolidasyonu takiben (mavi çizgi). Kazı aşamasında, aşırı yükün kaldırılması yüzeye yakın yerlerde, özellikle de boşaltmanın hızla gerçekleştiği sığ derinliklerde pozitif aşırı boşluk suyu basınçlarına neden olmuştur. Bu davranış, efektif gerilmenin azaldığı ve gözenek basıncının geçici olarak arttığı drenajsız koşullarda tipiktir.

Yapısal yük uygulandıktan sonra profil büyük ölçüde değişmiştir. Kırmızı eğri, özellikle yüklenen bölgenin yakınında ABSB'de keskin bir düşüş olduğunu ve değerlerin sığ ve orta derinliklerde -150 kPa'ya kadar düştüğünü göstermektedir. Bu belirgin negatif gözenek basıncı (emme), drenajsız yükleme altında kilin daha sert tepkisini ve uygulanan gerilime göre gözenek sıvısı basıncının gecikmeli ayarlanmasını yansıtmaktadır.

Zaman içinde sistem dengeye doğru ilerlemiştir. %90'lık konsolidasyon aşamasını temsil eden mavi eğri, gözenek basınçlarının derinlik boyunca kademeli olarak normaleştiğini göstermektedir. Negatif değerler devam etse de, özellikle maksimum etki bölgesinin yakınında büyüklükleri önemli ölçüde azalmıştır. Bu, aşamalı inşaatın uzun vadeli gözenek basıncı dağılımını simüle etmedeki etkinliğini doğrulamakta ve sert killer için zamana bağlı oturma davranışında konsolidasyonun rolünü vurgulamaktadır.



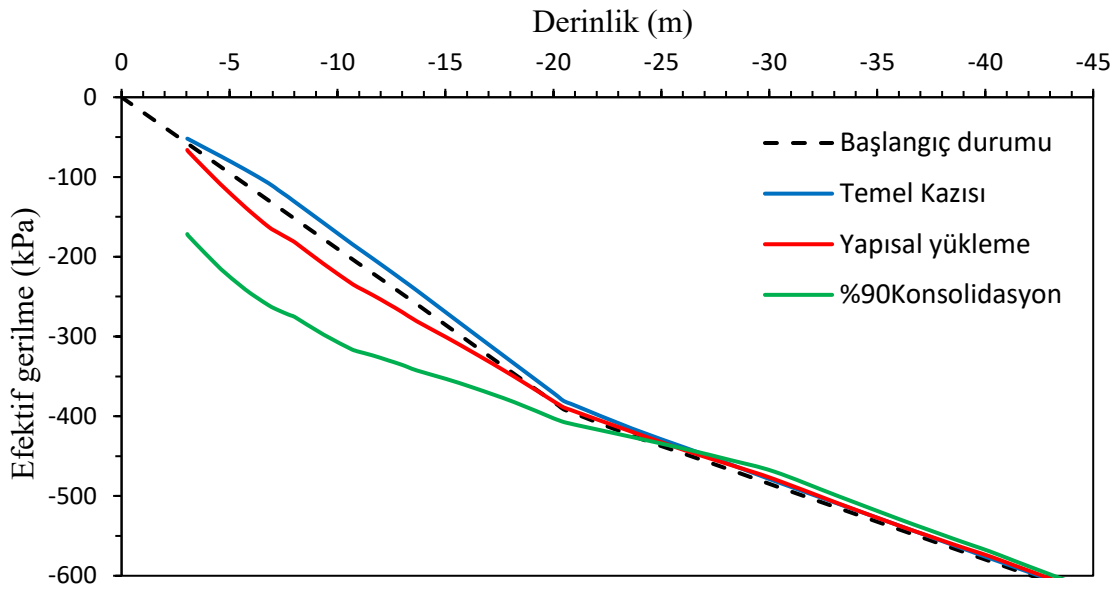
Şekil 4.17. Aşırı boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi (Analiz 18)

#### 4.2.5. Yapı gerilmesi ve oturma etki derinlikleri

Sayısal analiz sonuçlarından gerilme ve deformasyon değişimlerine göre yapı/oturma etki derinlikleri de tespit edilmiştir. Her bir inşaat aşamasında düşey efektif gerilmelerin derinlikle değişimi incelenmiş ve inşaat aşamaları sırasında (temel kazısı, yapısal yükleme ve konsolidasyon aşamaları) değişen efektif gerilmelerin tekrar eski konumuna (başlangıç efektif gerilmeye) ulaştığı yer “yapı gerilmesi etki derinliği” kabul edilmiştir. Buna ilave olarak, oturma-derinlik grafiklerinde özellikle %90 konsolidasyon aşamasında oturmaların hangi derinliğe kadar devam ettiği belirlenmiş ve bu değer de “oturma etki derinliği” olarak belirlenmiştir.

İnşaat aşamaları boyunca efektif gerilmenin düşey dağılımı, zemin kütleindeki gelişen gerilme durumunu yansıtmaktadır. Şekil 4.18'da gösterildiği gibi, başlangıçtaki gerilme profili (kesikli siyah çizgi) zeminin jeolojik ağırlık koşulları altında derinlikle birlikte beklenen doğrusal artışı takip etmektedir. Kazı aşamasında, aşırı yükün kaldırılması toplam gerilmeyi azaltır, bu da özellikle üst zemin katmanlarında efektif gerilme eğrisinde (mavi çizgi) yukarı doğru bir kaymaya neden olur. Yapısal yük uygulandığında, efektif gerilme tekrar artmaya başlar (kırmızı çizgi) ve bu da uygulanan yüzey yükünün etkisini gösterir. Son aşamada, %90 konsolidasyondan sonra, yeşil eğri gözenek basıncının dağılması ve zamana bağlı deformasyondan kaynaklanan yeniden dağılmış efektif gerilme profilini göstermektedir.

Bu gerilme yolları, sert kilin klasik konsolidasyon teorisine uygun olarak davrandığını, ilk boşaltmanın (kazı) efektif gerilmeyi geçici olarak azalttığını, ardından yapısal yükleme ve konsolidasyon nedeniyle aşamalı bir iyileşme olduğunu doğrulamaktadır. PLAXIS sonuçlarından çıkarılan ve veri setinde gösterilen etki derinliği Boussinesq yöntemi kullanılarak yapılan klasik gerilme dağılımı analizinden elde edilen değerlerle uyumludur ve analitik hesaplanan karşılaştırmalar için tanımlanan "Etki Derinliği" ile tutarlıdır. Bu yaklaşım, sayısal modelleme ile klasik teori arasındaki uyumu sağlamış ve modelin sığ temellerin altındaki gerçekçi gerilme yayılımını temsil etme kabiliyetini doğrulamıştır.

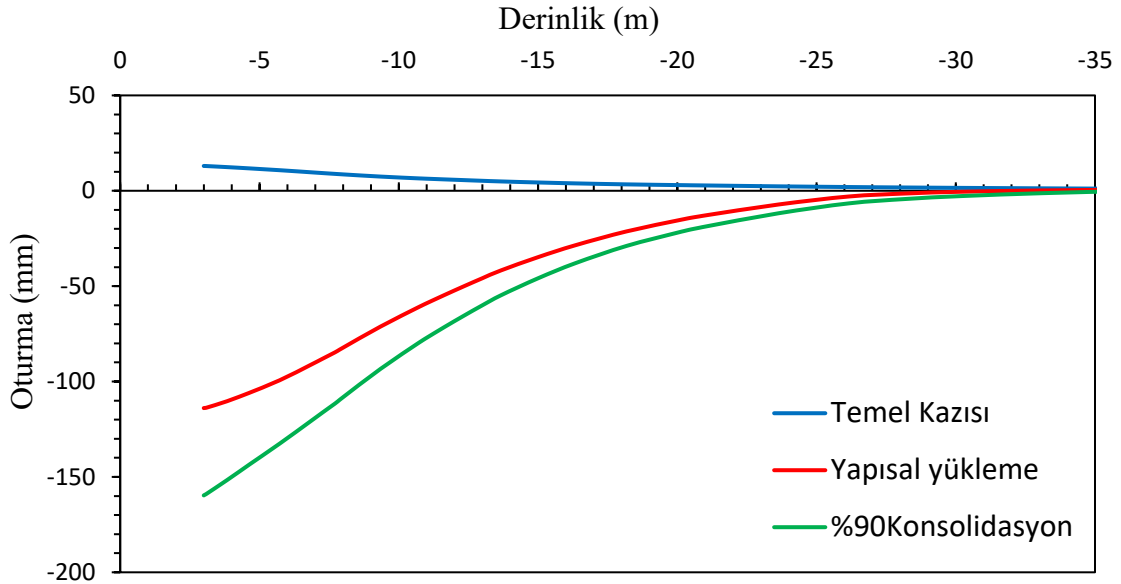


Şekil 4.18. Efektif gerilme değişimlerine göre yapı etki derinliğinin belirlenmesi (Analiz 18)

Farklı inşaat aşamalarındaki düşey yer değiştirme ( $U_z$ ) profili, zeminin derinliğe bağlı deformasyon davranışı hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Şekil 4.19'da gösterildiği gibi, kazı aşaması (mavi eğri) yüzeye yakın hafif bir yükselmeye neden olmakta ve ardından derinlikle birlikte oturmada kademeli bir azalma meydana gelmektedir. Yapısal yükleme uygulandığında, kırmızı eğri üst 15-25 metrede yoğunlaşan ve yüzeye yakın yerlerde maksimum deformasyonun gözlemlendiği belirgin bir oturma modelini göstermektedir. Zamanla, konsolidasyon aşamasında (yeşil eğri), gözenek basıncının dağılması ve killi tabakada devam eden hacim değişikliği nedeniyle genel profilin derinleşmesiyle birlikte yer değiştirme daha belirgin hale gelir.

Daha da önemlisi, yer değiştirme eğrileri belirli bir derinliğin ötesinde (Vaka-18 için yaklaşık 27 metre) yakınsamakta ve temelin oturma etki bölgesini göstermektedir.

Vaka-18'de düşey efektif gerilmelere göre yapı etki derinliği 22 m iken, oturmaların devam ettiği oturma etki derinliği 27m derinliğe ulaşmaktadır. Bu değerler, büyük radye temelden kaynaklanan gerilme yeniden dağılımının derin bir zemin kütesini etkilediğini doğrulamakta ve derin oturmuş kil tabakalarında düşey gerilme kontrolüne duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.



Şekil 4.19. Oturma-derinlik grafiğinden oturma etki derinliğinin belirlenmesi (Analiz 18)

Bu çalışmada, PLAXIS 3D analizlerinden elde edilen grafiksel çıktılar kullanılarak 42 temel-zemin vakasının tamamı için hem gerilme dağılımı hem de düşey oturma için etki derinlikleri sistematik olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.5). Her bir vaka için gerilme grafiği etki derinliği, düşey gerilme ( $\sigma_z$ ) ve derinlik grafikleri aracılığıyla görselleştirildiği gibi, temel yüklemesinden kaynaklanan gerilme artışının önemli ölçüde azaldığı noktaya göre belirlenmiştir. Bu derinlik değerleri, Boussinesq yöntemi kullanılarak yapılan analitik hesaplamalarla çapraz referanslanmış ve doğrulanmıştır. Öte yandan, oturma grafiği etki derinliği,  $U_z$ 'a karşı derinlik çıktı grafiklerinden, özellikle kazı, yapısal yükleme ve %90 konsolidasyon aşamaları için düşey yer değiştirme eğrilerinin kesiştiği veya yakınsadığı yerlerde belirlenmiştir. Bu yakınsama, düşey oturmanın ihmal edilebilir veya sabit hale geldiği etkili derinliği gösterir. Bu grafiksel tespitler tüm vakalara tutarlı bir şekilde uygulanmıştır. Örneğin, Vaka-1'de gerilme etki derinliği 24 metre ve oturma etki derinliği 32 metre olarak kaydedilirken, Vaka-18'de bu değerler sırasıyla 22 metre ve 27 metre olmuştur. Bu etki derinlikleri, temel kaynaklı gerilme ve deformasyondan etkilenen aktif bölgeyi tanımlamak için kritik bir girdi

sağlayarak sayısal sonuçların analitik tahminlerle daha doğru bir şekilde yorumlanmasına ve karşılaştırılmasına olanak tanır.

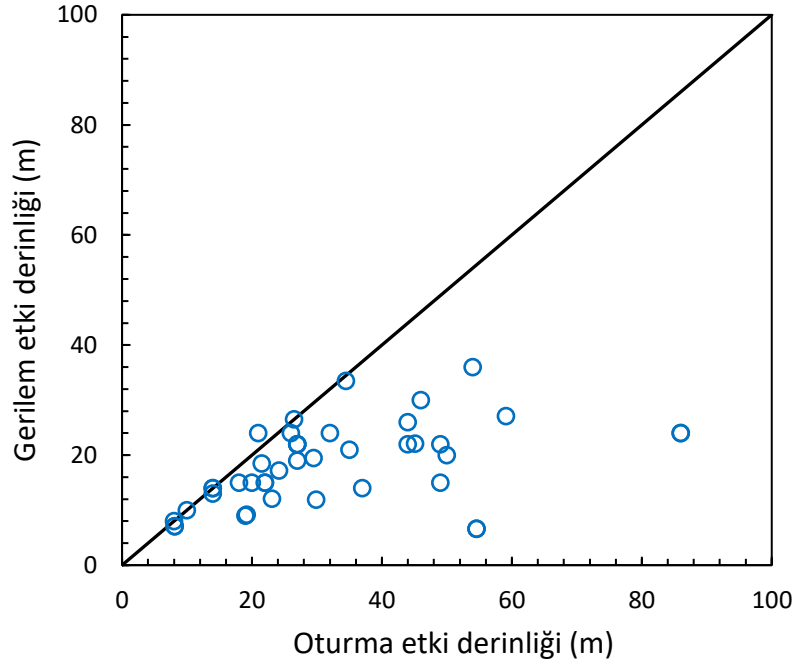
**Çizelge 4.5.** Sayısal analiz sonuçlarından elde edilen yapı gerilmesi ve oturma etki derinlikleri ile radye temel eğilme momentleri

Analiz no	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	B (m)	L/B	$D_f$ (m)	Zemin türü	Etki derinliği (m)		Moment (kNm/m)	
							Yapı gerilmesi	Oturma	$M_{11}$	$M_{22}$
1	50	10.4	5	5	6	Yumuşak Kil	24.0	32.0	6.7	11.7
2	50	36	5	5	0.8	Yumuşak Kil	9.2	19.2	11.3	22.3
3	120	20.6	10.2	1	6	Yumuşak Kil	9.0	19.0	134.2	134.5
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	6.6	54.6	41.1	119.3
5	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	24.0	86.0	138.9	450.9
6	110	36	5	5	6	Yumuşak Kil	14.0	37.0	20.6	59
7	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	24.0	86.0	138.9	450.9
8	250	6	9.9	4.8	6	Sert Kil	22.0	44.0	153.6	551.7
9	50	6	5	3.1	3.1	Sert Kil	11.9	29.9	11.3	27.3
10	50	36	15	3	0	Sert Kil	21.0	35.0	118.8	127.6
11	50	36	5	1.5	6	Yumuşak Kil	14.0	14.0	9.7	13.4
12	275	36	15	1	6	Sert Kil	24.0	26.0	490.9	491.3
13	50	6	10	1	6	Sert Kil	24.0	21.0	16.5	16.5
14	120	36	15	2.9	2.9	Yumuşak Kil	27.1	59.1	135.5	404.8
15	60	20.3	15	5	0	Yumuşak Kil	30.0	46.0	347.2	281
16	80	36	10.1	1	0	Yumuşak Kil	20.0	50.0	14.1	13
17	50	36	5	5	6	Sert Kil	14.0	14.0	7.578	6.69
18	275	21	10	3	3	Sert Kil	22.0	27.0	166.1	467.5
19	120	20.4	5	2.9	1	Yumuşak Kil	13.0	14.0	28	55.7
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	6.6	54.6	41.1	119.3
21	500	6	5	3	6	Sert Kil	15.0	18.0	156.3	433.1
22	500	36	10	5	1.5	Sert Kil	33.5	34.5	517.1	1798
23	275	21	10	3	3	Sert Kil	22.0	27.0	166.1	467.5
24	50	6	15	5	3	Sert Kil	22.0	49.0	97	293.1
25	275	6	5	5	0	Sert Kil	15.0	20.0	134.7	220.5
26	500	36	5	1	3	Sert Kil	10.0	10.0	114.1	112.4
27	130	6	15	1.3	0.5	Sert Kil	20.0	22.0	104.9	118.6
28	50	20.9	15	1	2.9	Yumuşak Kil	12.1	23.1	120	120.4
29	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	15.0	22.0	139.3	75.9
30	500	6	15	1	1.5	Sert Kil	26.5	26.5	917.6	923.9
31	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	7.1	8.1	38.4	41.8
32	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	15.0	22.0	139.3	75.9
33	275	21	10	3	3	Sert Kil	22.0	27.0	166.1	467.5
34	50	36	13.8	5	6	Yumuşak Kil	26.0	44.0	38.7	77.2
35	120	6	10.2	5	2.9	Yumuşak Kil	22.1	45.1	62.8	227.1
36	50	21	5	1	0	Sert Kil	8.0	8.0	14.8	14.9
37	50	20.9	15	1	2.8	Yumuşak Kil	17.2	24.2	116.7	117.1
38	120	21	10	4.1	6	Yumuşak Kil	15.0	49.0	55.9	210.5
39	275	21	10	3	3	Sert Kil	19.0	27.0	166.1	467.5
40	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	7.1	8.1	38.4	41.8
41	500	21	15	5	6	Sert Kil	36.0	54.0	776.6	2783
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	19.5	29.5	46.2	52.1

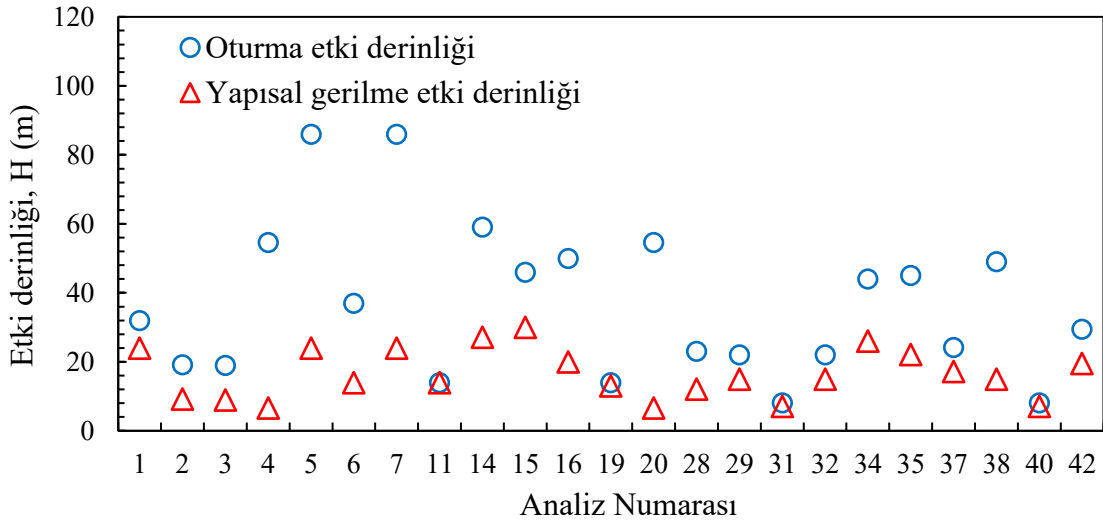
Not: Etki derinlikleri temel altından itibaren geçerlidir.  $M_{11}$  ve  $M_{22}$  momentleri sırasıyla radye temelin kısa ve uzun doğrultularına etkiyen moment değerleridir.

Oturma etki derinliğinin yapı etki derinliğinden ortalama %97 büyük olması (Şekil 4.20) kil katmanındaki efektif gerilmeler değişirse bile zamana bağlı oturmaların

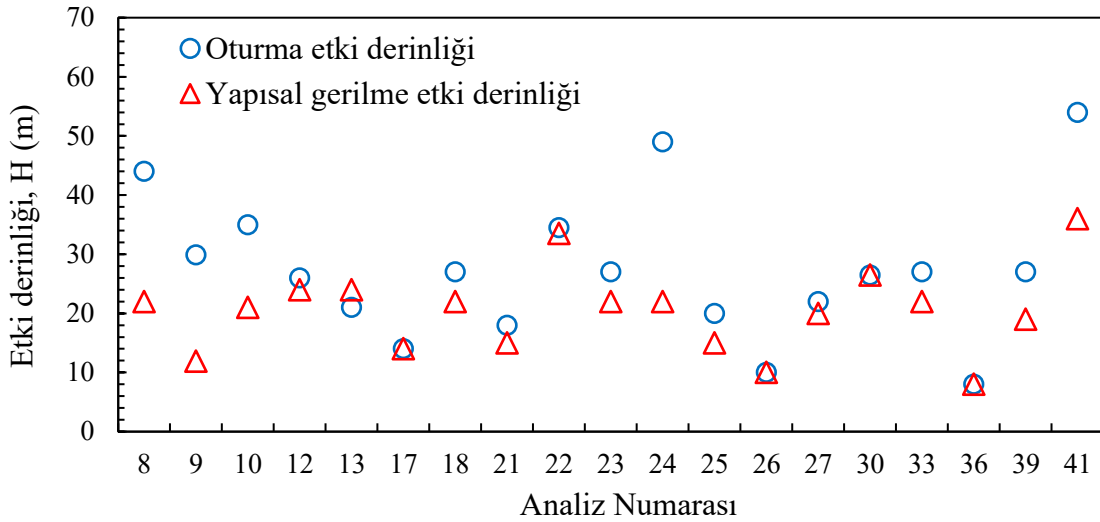
devam ettiğini göstermektedir. Oturma ve yapı gerilmesi etki derinlikleri arasındaki fark yumuşak killerde sert kile göre daha büyüktür (Şekil 4.21 ve Şekil 4.22). Bu sonuç, sabit yük altında yumuşak killerin sert killere göre daha çok oturma yaptığını ve daha derin tabakaların oturma olayından etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 4.20. Oturma ve gerilme etki derinlikleri



Şekil 4.21. Yumuşak killerde etki derinlikleri



Şekil 4.22. Sert killerde etki derinlikleri

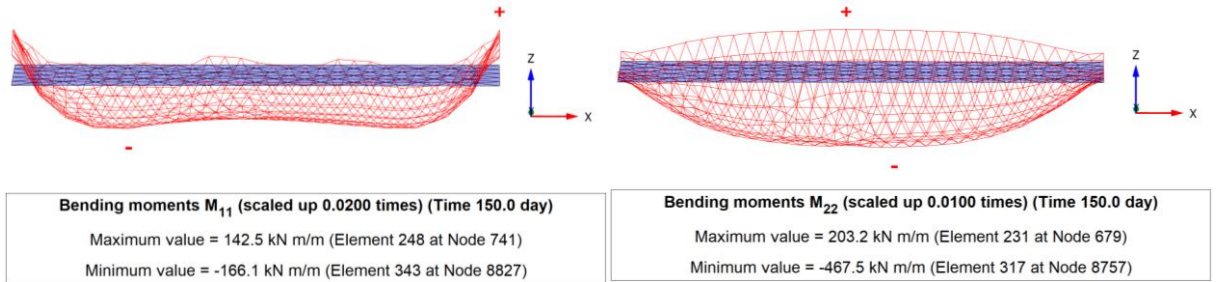
#### 4.2.6. Eğilme momentleri

Her bir analiz vakası için radye temelde oluşan eğilme momentleri Çizege 4.5'de verilmiştir.  $M_{11}$  ve  $M_{22}$  momentleri sırasıyla temelin kısa ve uzun doğrultularında oluşan moment değerleridir. PLAXIS 3D simülasyonlarından 42 vaka için elde edilen eğilme momenti dağılımları, farklı zemin ve yükleme koşulları altında mat temellere yüklenen yapısal talepler hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Yumuşak ve sert killi zeminlardaki moment tepkileri arasında belirgin bir zıtlık gözlenmiştir. Sert kil koşulları, deformasyona direnen ve dolayısıyla temele daha fazla gerilme aktaran yüksek sertlikleri nedeniyle genellikle çok daha yüksek iç momentlerle sonuçlanmıştır. Sert kil durumları için ortalama eğilme momenti değerleri  $M_{11}$  yönünde yaklaşık 226.0 kNm/m ve  $M_{22}$  yönünde 515.2 kNm/m olmuştur. Karşılaştırmalı olarak, yumuşak kil vakaları sırasıyla 80.9 kNm/m ve 145.4 kNm/m ortalama  $M_{11}$  ve  $M_{22}$  değerleri vermiştir.

Eğilme momenti tepkisi açısından, sert killer üzerindeki radye temeller yumuşak kile kıyasla önemli ölçüde daha yüksek iç gerilmeler geliştirmiştir. Örneğin, Vaka-30'da geniş bir alanda (15 m × 15 m) 500 kPa'lık bir  $q_0$ 'ya maruz kalan radye temel, 917.6 kNm/m'lik bir  $M_{11}$  değeri ve 923.9 kNm/m'lik bir  $M_{22}$  momenti üretmiştir. Vaka-41, 2783.0 kNm/m'lik aşırı bir  $M_{22}$  değeri sunarak nispeten sert alt zeminlerde büyük yüzey yüklerinin yapısal etkilerini vurgulamıştır. Bu aşırı değerler yüksek yüzey yüklemesi ve genişletilmiş temel boyutları ile ilişkilendirilmiş olup, bu tür koşulların radye içindeki iç bükülme kuvvetlerini yoğunlaştırdığını göstermektedir. Yumuşak killer tipik olarak daha küçük momentler üretmesine rağmen, büyük veya derine gömülü temellerde yine de

yüksek değerlere ulaşmıştır. Örneğin Vaka-15, 282.5 mm yapısal oturma altında 347.2 kNm/m'lik bir  $M_{11}$  momentine sahiptir. Bu sonuçlar, uygulanan yük ve temel boyutları önemli olduğunda düşük mukavemetli zeminlerin bile yüksek eğilme momentleri üretebileceğini vurgulamaktadır.

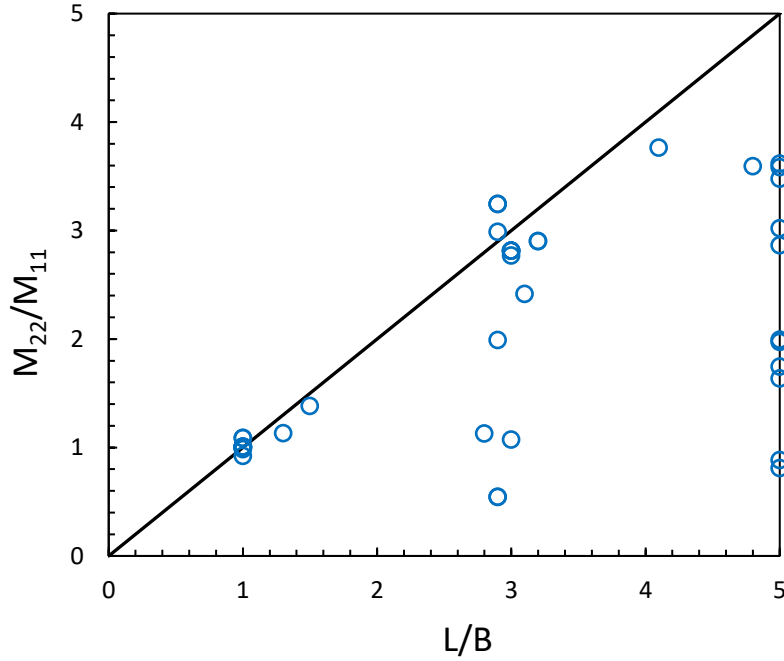
Vaka-18'de, hasır temelin yapısal tepkisi her iki asal yöndeki eğilme momentleri açısından analiz edilmiştir. Şekil 4.23'da gösterildiği gibi, kısa yön ( $M_{11}$ ) ve uzun yön ( $M_{22}$ ), temelin geometrisi ve alttaki sert kil ile etkileşim nedeniyle farklı moment dağılımları yaşamıştır.  $M_{11}$  yönündeki maksimum pozitif eğilme momenti +142.5 kNm/m olarak hesaplanırken, maksimum negatif moment -166.1 kNm/m'ye ulaşmıştır, bu da sırasıyla radyenin merkezine ve kenarlarına yakın yerlerde önemli eğilmelerin meydana geldiğini göstermektedir.  $M_{22}$  yönünde, temel maksimum +203.2 kNm/m pozitif moment ve maksimum -467.5 kNm/m negatif moment ile daha da yüksek bir eğrilik sergilemiştir. Bu değerler, muhtemelen temelin daha büyük en-boy oranına ( $L/B = 3$ ) bağlı olarak güçlü bir enine eğilme davranışına işaret etmekte ve büyük genişlik boyunca daha yüksek gerilme konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Her iki yönde de baskın olan negatif momentler, özellikle  $M_{22}$  yönünde belirgin olmak üzere, yapısal yükleme altında radye altında sarkma davranışı anlamına da gelmektedir. Bu durum, sert killer üzerinde radye temel tasarımında yönlü eğilmenin ayrı ayrı dikkate alınmasının önemini teyit etmektedir.



Şekil 4.23. Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 18)

Genel olarak,  $L/B < 1.5$  olan (özellikle  $L/B = 1$  olan kare temeller) radye temellerde zemin türünden bağımsız olarak kısa ve uzun doğrultudaki moment değerleri birbirine oldukça yakındır. Fakat  $L/B$  oranı arttıkça (özellikle  $L/B = 5$ )  $M_{22}/M_{11}$  oranının temel boyutlarıyla orantılı olmadığı anlaşılmaktadır Şekil 4.24. Genel olarak, bu bulgular temel tasarımında titiz moment analizinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Zemin rijitliği, yüzey yükü yoğunluğu ve temel geometrisi arasındaki etkileşim, radye temellerin iç gerilme tepkisinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. PLAXIS 3D'den elde edilen

ayrıntılı çıktı, donatı detaylandırması, radye kalınlığı tasarımı ve güvenlik kontrolleri hakkında bilgi vermek için güvenilir bir temel sağlayarak sahaya özgü zemin koşullarına göre uyarlanmış daha esnek bir temel sistemi sağlar.



Şekil 4.24. Radye temel eğilme momentleri oranının L/B ile değişimi

Elde edilen sonuçlar, entegre geoteknik ve yapısal değerlendirmenin önemini altını çizmektedir. Tasarımcılar sadece oturma büyüklüğünü değil aynı zamanda eğilme davranışını ve konsolidasyon zaman çizelgesini de dikkate almalıdır. Yumuşak killerdeki temeller en yüksek iç kuvvetleri oluşturmayabilir, ancak uzun vadede önemli oturma riskleri oluştururken, sert killer sağlam güçlendirme tasarımı gerektiren yüksek iç momentlere neden olabilir.

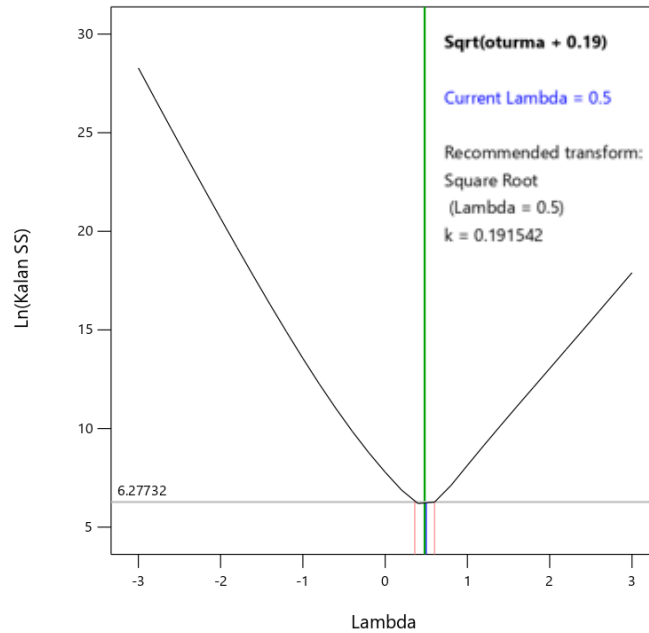
### 4.3. İstatistiksel Analiz Sonuçları

#### 4.3.1. Kazı çukurundaki kabarma

PLAXIS 3D simülasyonlarındaki kazı aşaması sırasında, zemin kütleindeki gerilme azalmasının bir sonucu olarak genellikle yukarı doğru yükselme veya kabarma olarak adlandırılan yukarı doğru zemin hareketi gözlemlenmiştir. Bu kabarma değerleri genellikle küçüktü ve özellikle kohezyonlu zemin koşulları altında doğrusal olmayan modeller sergiliyordu. Varyansı dengelemek ve Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) için gerekli

normallik ve homoscedasticity varsayımlarını karşılamak için bağımlı değişkene bir karekök dönüşümü uygulanmıştır. Kazı sırasında herhangi bir harici yükleme uygulanmadığından, yapısal gerilme faktörü ( $q_0$ ), tahmin üzerinde ilgisiz etkiden kaçınmak için modelden çıkarılmıştır.

Dönüştürülmüş yanıt ( $Y$ )  $=\sqrt{S_{kabarma} + k}$  olarak tanımlanmıştır; burada  $k = 0.191542$  sabiti, artık hatayı en aza indirmek ve veri seti genelinde geçerli dönüşümü sağlamak için Design-Expert içindeki Box-Cox analizi tarafından otomatik olarak seçilmiştir. Box-Cox grafiği Şekil 4.25 karekök dönüşümünün kullanımını açıkça destekleyerek  $\lambda = 0.5$ 'in model oluşturma için en iyi istatistiksel davranışı sağladığını doğrulamıştır.

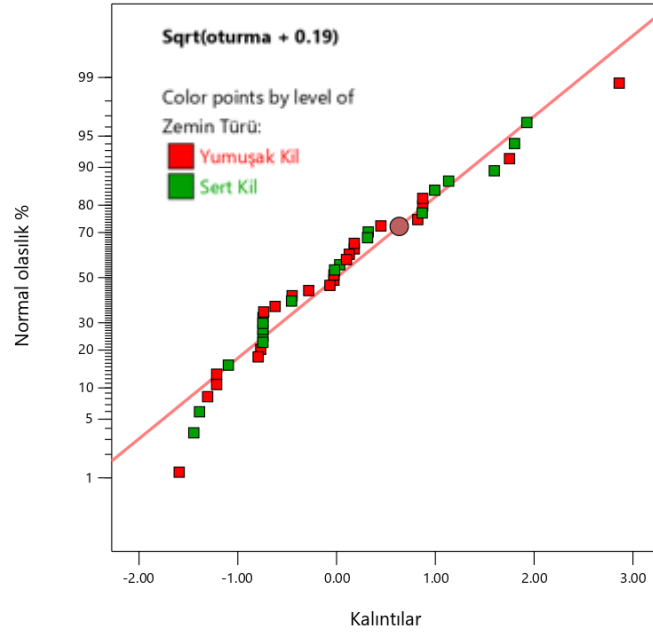


Şekil 4.25. Sayısal analiz kabarma sonuçları için geliştirilen modelde Box-Cox güç dönüşüm grafiği

Regresyon modelleri daha sonra p-değeri eşiklerine ( $\alpha_{in} = 0.05$ ,  $\alpha_{out} = 0.05$ ) dayalı kademeli bir regresyon yaklaşımı kullanılarak "Değiştirilmiş" süreç sırası seçilerek geliştirilmiştir. Bu yöntem, modelin otomatik olarak yalnızca istatistiksel olarak anlamlı ana etkileri, etkileşimleri ve ikinci dereceden terimleri içermesini sağlamış, böylece model basitliğini korurken tahmin doğruluğunu artırmıştır. Model, 0.9742 Düzeltilmiş  $R^2$  ve 0.9574 Tahmini  $R^2$  ile 0.9830 gibi yüksek bir belirleme katsayısına ( $R^2$ ) ulaşmıştır. Düzeltilmiş ve Öngörülen  $R^2$  arasındaki fark (0.02'den az) güçlü bir uyum ve güvenilir genelleme performansına işaret etmektedir. Buna ek olarak, modelin Yeterli Hassasiyet değeri 41.33'tür ve önerilen eşik değer olan 4'ün çok üzerinde olup güçlü bir sinyal-gürültü oranını teyit etmektedir. Bu ölçütler, modelin kohezyonlu zeminlerde kazı

sırasında yükselme davranışı için mükemmel açıklayıcı ve tahmin edici kabiliyete sahip olduğunu göstermektedir.

Artık teşhis grafikleri regresyon modelinin geçerliliğini daha da desteklemiştir. Harici olarak öğrencileştirilmiş artıkların normal olasılık grafiğinde gösterildiği gibi (Şekil 4.26), veri noktalarının çoğu kırmızı diyagonal referans çizgisi boyunca sıkıca kümelenmiştir, bu da artıkların yaklaşık olarak normal bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Bu örüntü, dönüşümün ve model yapısının yükselme tepkisi için istatistiksel olarak uygun olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, hem yumuşak kil (kırmızı) hem de sert kil (yeşil) veri noktaları, zemin türleri arasında büyük bir kümelenme veya sistematik sapma olmaksızın dağılım boyunca tutarlı bir hizalama göstermektedir. Normallikten sadece grafiğin alt ve üst uçlarında ( $\pm 2.0$  civarındaki aşırı kalıntılar) hafif sapmalar gözlenmiştir ve bunlar da kabul edilebilir tanısal eşikler dahilindedir. Bu sonuçlar, regresyon modelinin sağlam olduğunu ve kohezyonlu zeminlerde kazı aşamasındaki kabarma davranışını doğru bir şekilde yakalayabildiğini güçlü bir şekilde görsel ve istatistiksel olarak doğrulamaktadır.



**Şekil 4.26.** Sayısal analiz kabarma sonuçları için geliştirilen modelde kalıntıların normal olasılık grafiği

PLAXIS 3D yazılımı ile gerçekleştirilen kazı aşamasına ait kabarma verilerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi amacıyla Design-Expert yazılımı ile ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.6). Modelin p-değeri  $< 0.0001$  olup istatistiksel olarak anlamlıdır.

Çizelge 4.6. Kabarma değerleri için anova sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Katkı yüzdesi (%)	Ortalama	F-değeri	p-değeri
Model	499.34	14		35.67	111.78	< 0.0001
A-Dsu	0.4061	1	0.09	0.4061	1.27	0.2692
B-B	10.7	1	2.39	10.7	33.55	< 0.0001
C-L/B	0.6672	1	0.15	0.6672	2.09	0.1597
D-Df	220.67	1	49.28	220.67	691.6	< 0.0001
E-Zemin Türü	124.46	1	27.79	124.46	390.08	< 0.0001
AB	1.79	1	0.40	1.79	5.61	0.0253
AC	1.77	1	0.40	1.77	5.56	0.0259
AD	6.84	1	1.53	6.84	21.43	< 0.0001
BC	2.15	1	0.48	2.15	6.72	0.0152
BD	15.84	1	3.54	15.84	49.65	< 0.0001
DE	29.6	1	6.61	29.6	92.78	< 0.0001
B <sup>2</sup>	4.71	1	1.05	4.71	14.75	0.0007
C <sup>2</sup>	6.83	1	1.53	6.83	21.39	< 0.0001
D <sup>2</sup>	21.38	1	4.77	21.38	67.02	< 0.0001
Artık	8.61	27		0.3191		
Uyum	8.61	20		0.4307	212600000	< 0.0001
Hata	1.418E-08	7		2.026E-09		
Toplam	507.95	41				

Kabarma davranışını açıklamada en etkili faktör temel derinliğidir ( $D_f$ ) ve tek başına toplam varyasyonun %49.28'ine oldukça anlamlı bir p-değeri ( $p < 0.0001$ ) ile katkıda bulunmuştur. Bu sonuç, kazı derinliği ile yukarı doğru zemin hareketinin büyüklüğü arasındaki doğrudan ilişkiyi vurgulamaktadır. Zemin kıvamı de baskın bir faktör olarak ortaya çıkmış ve modele %27.79 oranında katkıda bulunmuştur. Hem yumuşak kil hem de sert kil senaryoları, kohezyon mukavemeti ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinin sonuçları önemli ölçüde etkilediği farklı yükselme tepkileri göstermiştir.

Kalan ana etkiler arasında, yeraltı suyu seviyesi (B) %2.39'luk orta düzeyde bir katkıya sahiptir ve L/B oranı (C) ve  $D_{su}$  (uygulanan uzunluk) modele dahil edilmiş olsa da, daha küçük veya istatistiksel olarak önemsiz etkileri olmuştur (C ve A için  $p > 0.05$ ). Özellikle %3.54 ( $p < 0.0001$ ) katkı ile BD (yeraltı suyu seviyesi  $\times$  temel derinliği), %6.61 ( $p < 0.0001$ ) katkı ile DE (temel derinliği  $\times$  zemin kıvamı) ve %1.53 ( $p < 0.0001$ ) katkı ile AD ( $D_{su} \times$  temel derinliği) olmak üzere çeşitli etkileşim terimleri de anlamlı çıkmıştır. Bu etkileşimler, zemin koşulları ile kazı geometrisi arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya koymaktadır. AB, AC, BC ve CE gibi diğer önemli iki faktörlü etkileşimleri de geometrik ve geoteknik değişkenler arasındaki ince bağımlılıkları yakalayarak modele anlamlı bir şekilde katkıda bulunmuştur.

Bu etkileşimler, zemin koşulları ile kazı geometrisi arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya koymaktadır. AB, AC, BC ve CE gibi diğer önemli iki faktörlü etkileşimler de

geometrik ve geoteknik değişkenler arasındaki ince bağımlılıkları yakalayarak modele anlamlı bir şekilde katkıda bulunmuştur.

Kuadratik (ikinci dereceden) terimler de doğrusal olmayan yükselme davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için gerekliydi. B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> ve D<sup>2</sup> gibi terimlerin tümü istatistiksel olarak anlamlıydı (p < 0.001) ve modele sırasıyla %1.05, %1.53 ve %4.77 katkı sağladı. Bunların dahil edilmesi, yükselme tepkisinin yalnızca doğrusal modeller kullanılarak yeterince tanımlanamayacağını doğrulamakta ve daha yüksek dereceli regresyon kullanımını haklı çıkarmaktadır.

Yüksek model performansına rağmen, Uyum Eksikliği testi istatistiksel olarak anlamlı bir sonuç göstermiştir (F = 2.12E+08, p < 0.0001). Bununla birlikte, bu durum muhtemelen son derece düşük saf hatadan (2.03E-09) kaynaklanmaktadır ve güçlü R<sup>2</sup> değerleri ve artık teşhisleri göz önüne alındığında, bu sonuç modelin genel güvenilirliğini zayıflatmamaktadır.

Sonuç olarak, regresyon modeli, en kritik geoteknik ve geometrik değişkenleri dahil ederek kazı sırasındaki yükselme davranışını doğru bir şekilde yakalamaktadır. Temel derinliği, zemin kıvamı ve yeraltı suyu seviyesinin etkileri, bunların etkileşimleri ve eğrilikleri ile birlikte iyi bir şekilde temsil edilmiştir. Model istatistiksel olarak sağlamdır ve farklı kohezyonlu zemin koşullarında ve temel düzenlerinde kazı kaynaklı kabarmayı tahmin etmek için uygundur.

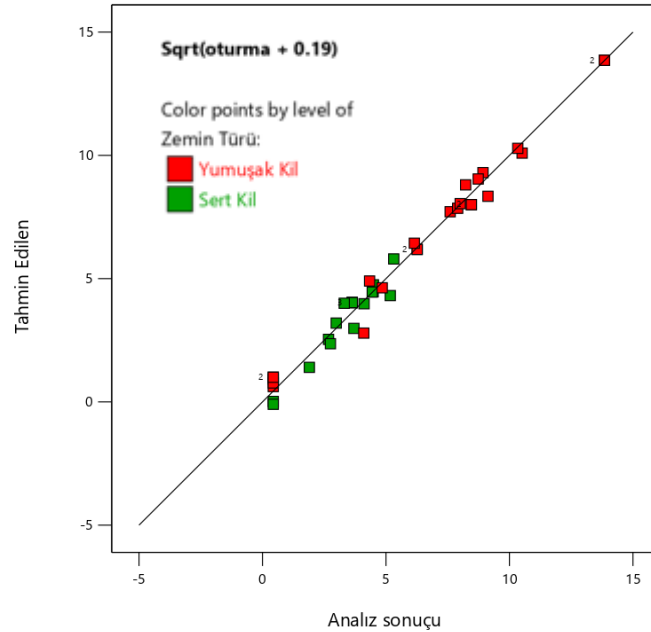
Yumuşak kil ve sert kil zeminlerde kabarma miktarını tahmin etmek için geliştirilen regresyon denklemleri sırasıyla Denklem 4.3 ve Denklem 4.4'de verilmiştir.

$$\sqrt{(S_{\text{kabarma}} + 0.19)} = 0.97 + 0.04 * D_{\text{su}} - 0.49 * B + 1.60 * (L/B) + 2.16 * D_f - 0.004 * (D_{\text{su}} * B) + 0.01 * (D_{\text{su}} * L/B) - 0.01 * (D_{\text{su}} * D_f) - 0.04 * (B * L/B) + 0.07 * (B - D_f) + 0.03 * B^2 - 0.23 * (L/B)^2 - 0.18 * D_f^2 \quad (4.3)$$

$$\sqrt{(S_{\text{kabarma}} + 0.19)} = -0.22 + 0.04 * D_{\text{su}} - 0.48 * B + 1.60 * (L/B) + 1.38 * D_f - 0.004 * (D_{\text{su}} * B) + 0.0 * (D_{\text{su}} * L/B) - 0.01 * (D_{\text{su}} * D_f) - 0.03 * (B * L/B) + 0.07 * (B * D_f) + 0.03 * B^2 - 0.23 * (L/B)^2 - 0.18 * D_f^2 \quad (4.4)$$

Şekil 4.27, PLAXIS 3D simülasyonlarından elde edilen gerçek kabarma değerleri ile Design-Expert kullanılarak geliştirilen regresyon modeli tarafından tahmin edilen değerler arasındaki korelasyonu göstermektedir. Zemin türüne göre renklendirilen veri noktaları (yumuşak kil için kırmızı, sert kil için yeşil) 45 derecelik diyagonal çizgi etrafında sıkıca kümelenmiştir ve bu da gözlemlenen ve tahmin edilen tepkiler arasında

güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. Bu yakın uyum, istatistiksel özetle bildirilen yüksek  $R^2$  değeri ile tutarlı olarak modelin yüksek tahmin doğruluğunu ve minimum artık hatasını yansıtmaktadır. Bu sonuçlar, modelin hem yumuşak hem de sert kil koşullarında kazı kaynaklı kabarma davranışının güvenilir bir temsilini sağladığını doğrulamaktadır.



Şekil 4.27. Sayısal analiz kabarma sonuçları ve istatistiksel model sonuçlarının karşılaştırılması

Model tahminleri ile gerçek PLAXIS kabarma sonuçları arasında, özellikle etkileşim etkilerinin (uygulanan gerilimi  $\times$  yeraltı suyu seviyesi veya  $B \times D_f$  gibi) oturma davranışında baskın bir rol oynadığı durumlarda güçlü bir uyum gözlenmiştir. Örneğin, kabarmanın oldukça yüksek olduğu (191.54 mm) Vaka 7'de, model benzer bir değeri (191.88 mm) doğru bir şekilde tahmin ederek, önemli yükselme potansiyeline sahip aşırı yumuşak kil koşullarında bile modelin sağlamlığını vurgulamıştır. Ayrıca, farklı ve uç durum parametre kombinasyonlarını temsil eden Vaka 15'ten Vaka 42'ye kadar olan doğrulama vakaları, modelin geniş bir koşul yelpazesinde yüksek doğruluğu koruduğunu doğrulamıştır. Bu senaryolarda tahmin hataları minimum düzeyde kalmıştır; örneğin Vaka 28'de PLAXIS 63.94 mm'lik bir kabarma verirken tahmin edilen değer 64.48 mm olmuştur ve Vaka 34'te 105.61 mm'lik bir tahminle 106.69 mm'lik bir kabarma görülmüştür. Bu yakın eşleşmeler, regresyon denklemindeki ikinci dereceden gerilme bileşenleri ve  $B \times D_f$  veya  $L/B^2$  gibi iki faktörlü etkileşimler gibi temel terimlerin, yükselme davranışının altında yatan mekaniği başarıyla yakaladığını göstermektedir. Genel olarak daha düşük kabarma değerlerine sahip sert kil vakalarında bile (örneğin, Vaka 9: 10.76 mm gerçek ve 15.81 mm tahmini), model tutarlı bir performans göstererek

farklı zemin tipleri ve tasarım konfigürasyonları arasında uygulanabilirliğini güçlendirmiştir. Bu sayısal karşılaştırmalar Çizelge 4.7'de kapsamlı bir şekilde özetlenmiştir.

**Çizelge 4.7.** Yumuşak kil ve sert kil için regresyon tabanlı tahminler ve nihai denklemler (Kazı/Çökme aşaması)

Analiz numarası	D <sub>su</sub> (m)	B (m)	L/B	D <sub>f</sub> (m)	Zemin türü	Kazı aşaması kabarma (mm)	Tahmini Kabarma (mm)
1	10.4	5	5	6	Yumuşak Kil	76.11	81.58
2	36	5	5	0.8	Yumuşak Kil	18.62	23.87
3	20.6	10.2	1	6	Yumuşak Kil	79.53	86.27
4	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	71.39	63.82
5	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	191.54	191.88
6	36	5	5	6	Yumuşak Kil	67.49	77.36
7	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	191.54	191.88
8	6	9.9	4.8	6	Sert Kil	26.58	18.42
9	6	5	3.1	3.1	Sert Kil	10.76	15.81
10	36	15	3	0	Sert Kil	0.00	0.67
11	36	5	1.5	6	Yumuşak Kil	57.59	59.33
12	36	15	1	6	Sert Kil	20.00	22.37
13	6	10	1	6	Sert Kil	19.90	19.78
14	36	15	2.9	2.9	Yumuşak Kil	83.17	69.38
15	20.3	15	5	0	Yumuşak Kil	0.00	0.40
16	36	10.1	1	0	Yumuşak Kil	0.00	0.20
17	36	5	5	6	Sert Kil	13.52	8.70
18	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	16.04
19	20.4	5	2.9	1	Yumuşak Kil	23.33	21.23
20	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	71.39	63.82
21	6	5	3	6	Sert Kil	16.75	15.66
22	36	10	5	1.5	Sert Kil	7.38	5.39
23	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	16.04
24	6	15	5	3	Sert Kil	19.58	19.65
25	6	5	5	0	Sert Kil	0.00	-0.18
26	36	5	1	3	Sert Kil	6.97	6.25
27	6	15	1.3	0.5	Sert Kil	3.42	1.77
28	20.9	15	1	2.9	Yumuşak Kil	63.94	64.48
29	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	0.00	0.81
30	6	15	1	1.5	Sert Kil	8.74	10.04
31	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	39.09	38.06
32	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	0.00	0.81
33	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	16.04
34	36	13.8	5	6	Yumuşak Kil	106.69	105.61
35	6	10.2	5	2.9	Yumuşak Kil	37.62	41.26
36	21	5	1	0	Sert Kil	0.00	-0.19
37	20.9	15	1	2.8	Yumuşak Kil	62.30	61.52
38	21	10	4.1	6	Yumuşak Kil	110.37	101.69
39	21	10	3	3	Sert Kil	13.03	16.04
40	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	39.09	38.06
41	21	15	5	6	Sert Kil	28.07	33.45
42	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	16.65	7.61

### 4.3.2. Yapısal yüklemdeki oturma değerleri

PLAXIS 3D'de yapısal yükleme aşamasından elde edilen oturma sonuçları Design-Expert yazılımı kullanılarak istatistiksel olarak modellenmiştir. Önceki aşamalarda olduğu gibi, bu analizin birincil amacı temel geometrisi, zemin kıvamı ve yeraltı suyu seviyesi gibi çeşitli faktörlerin oturma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek ve bu etkileri uygun bir regresyon modeli aracılığıyla ölçmektir.

Şekil 4.28'de sunulan Box-Cox dönüşüm grafiğine göre, analiz edilen veriler için önerilen dönüşüm doğal logaritmadır ( $\lambda = 0$ ).  $\lambda = 0$ 'daki dikey yeşil çizgi güven aralığı aralığına denk gelmektedir, bu da log dönüşümünün varyansı en aza indirdiğini ve verileri normalleştirmeye yardımcı olduğunu doğrulamaktadır. Bu adım, model güvenilirliğini ve tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığından, çok çeşitli oturma büyüklükleri içeren karmaşık veri kümeleriyle çalışırken özellikle kritiktir.

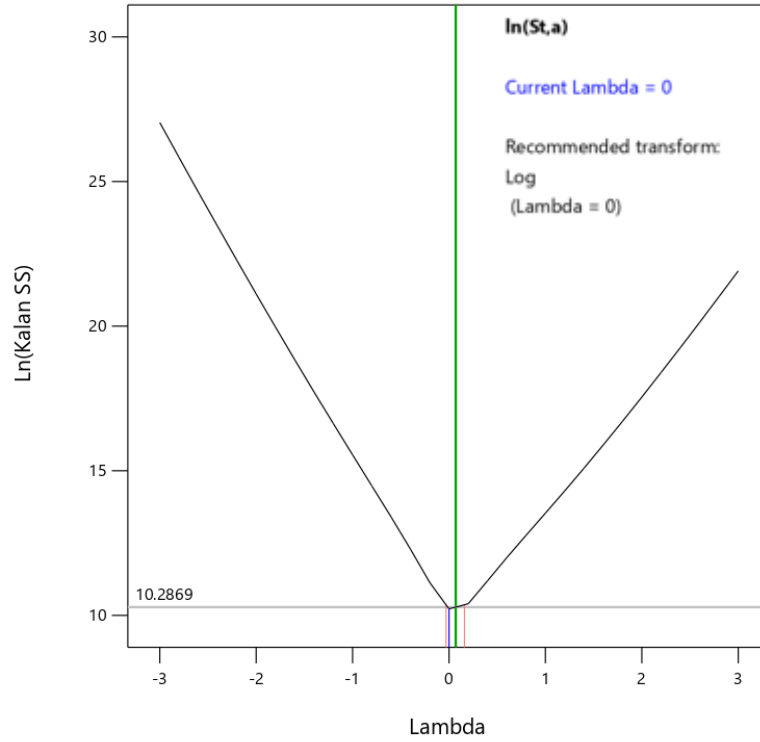
Geliştirilen modelin istatistiksel performansı  $0.9649 R^2$ ,  $0.9536$  Düzeltilmiş  $R^2$  ve  $0.9276$  Tahmini  $R^2$  ile sağlamdır. Düzeltilmiş ve Tahmini  $R^2$  arasındaki küçük fark ( $0.2$ 'den az) güçlü bir tahmin kabiliyetine işaret etmektedir. Ayrıca,  $40.71$ 'lik Yeterli Hassasiyet değeri minimum eşik değer olan  $4$ 'ün çok üzerindedir, bu da yeterli bir sinyal-gürültü oranını yansıtmakta ve modelin tasarım uzayında gezinmek için güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

Modelde kullanılan logaritmik dönüşüm, Şekil 4.28'de gösterildiği gibi  $\ln(y + k)$  formülasyonuna dayanmaktadır ve artık varyansı azaltmada ve veri setini stabilize etmede etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu dönüşüm, yapısal yükleme aşaması sırasında oturma davranışının doğru bir şekilde modellenmesini sağlamıştır.

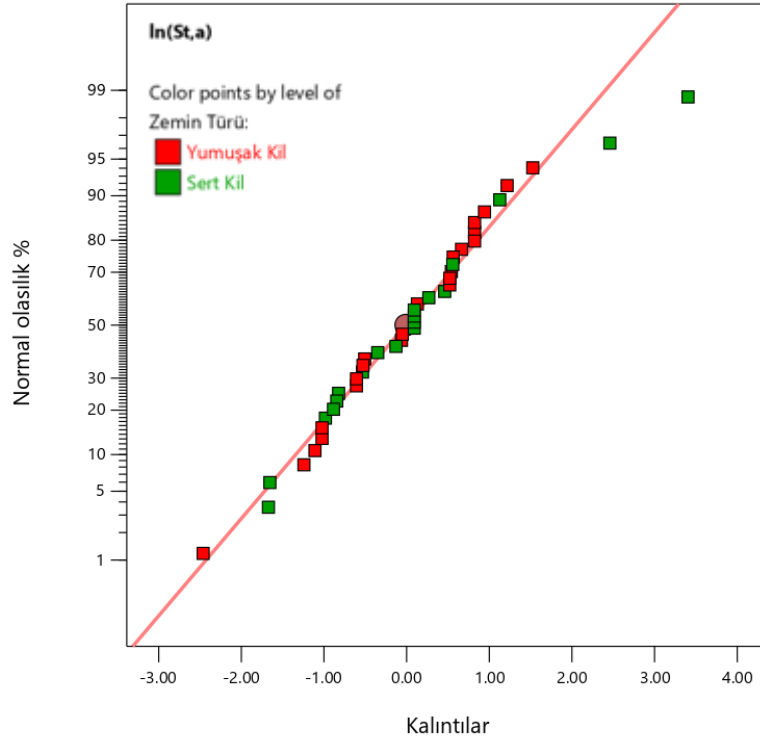
Regresyon modelinin oluşturulmasında, Design-Expert'te "Değiştirilmiş" işlem sırası seçilerek,  $\alpha_{in} = 0.05$  ve  $\alpha_{out} = 0.05$  p-değeri eşikleri kullanılarak istatistiksel olarak anlamlı terimlerin aşamalı olarak dahil edilmesine izin verilmiştir.

Artıkların normal olasılık grafiği Şekil 4.29'da sunulmuştur) yapısal yükleme koşulları altında log-dönüştürülmüş oturma verilerine ( $\ln(S_{t,a})$ ) uygulanan regresyon modeli için normallik varsayımını değerlendirmektedir. Harici olarak studentize edilmiş artıklar çoğunlukla diyagonal çizgi boyunca hizalanmıştır, bu da artıkların yaklaşık olarak normal dağıldığını göstermektedir. Kuyruklarda gözlemlenen küçük sapmalar kabul edilebilir sınırlar dahilindedir ve gerçek dünya veri setlerinde tipiktir. Noktaların zemin türüne (Yumuşak Kil ve Sert Kil) göre renk kodlaması, belirgin bir kümelenme veya heteroskedastik model göstermez ve artıkların tutarlılığını daha da doğrular. Genel olarak,

kalıntı dağılımı normallik varsayımını desteklemekte ve modelin varsayımlarının analizini bu aşamasında da geçerli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.28. Yapısal yükleme aşamasındaki oturma modeli için Box-Cox güç dönüşüm grafiği



Şekil 4.29. Yapısal yükleme aşamasındaki oturma modeli için kalıntıların normal olasılık grafiği

ANOVA sonuçlarına göre (Çizelge 4.8), geliştirilen regresyon modeli 85.24 Model F-değeri ile oldukça anlamlıdır (Model  $p < 0.0001$ ). Her bir faktörün açıklanan varyansa yüzde katkısı hesaplanmış ve birincil girdi parametrelerinin yapısal-aşama oturma davranışı üzerindeki etkisi doğrulanmıştır.

Analiz edilen değişkenler arasında, yapısal gerilme ( $q_0$ ), 476.50 gibi oldukça yüksek bir F-değeri ile toplam varyansa %38.97 oranında katkıda bulunarak yapısal aşama oturma davranışında en etkili faktör olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum, uygulanan yükün büyüklüğünün oturmaların büyüklüğünü kontrol etmede baskın bir rol oynadığını açıkça göstermektedir. Bunu takiben, Temel Derinliği ( $D_f$ ) varyansın %22.66'sını oluşturmuş ve temel gömülmesinin yükün alttaki kil katmanlarına nasıl dağıtıldığı ve yayıldığı üzerindeki etkisinin altını çizmiştir. Zemin Türünün etkisi de %27.47'lik bir katkı sağlayarak önemli olmuş ve yapısal yükleme altında yumuşak ve sert killer arasındaki farklı oturma tepkilerini yansıtmıştır.

**Çizelge 4.8.** Toplam oturma değerleri için anova sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Katkı yüzdesi (%)	Ortalama	F-değeri	p-değeri
Model	68.39	10		6.84	85.24	< 0.0001
A- $q_0$	38.23	1	38.97	38.23	476.5	< 0.0001
B- $D_{su}$	1.91	1	1.95	1.91	23.84	< 0.0001
C-B	4.09	1	4.17	4.09	51.02	< 0.0001
D-L/B	0.0154	1	0.02	0.0154	0.1925	0.6639
E- $D_f$	22.23	1	22.66	22.23	277.04	< 0.0001
F-Zemin Türü	26.95	1	27.47	26.95	335.8	< 0.0001
DE	0.5657	1	0.58	0.5657	7.05	0.0124
DF	1.38	1	1.41	1.38	17.15	0.0002
A <sup>2</sup>	1.95	1	1.99	1.95	24.31	< 0.0001
D <sup>2</sup>	0.7765	1	0.79	0.7765	9.68	0.004
Artık	2.49	31		0.0802		
Uyum	2.49	24		0.1036		
Hata	0	7		0		
Toplam	70.88	41				

Daha az baskın olmasına rağmen, Yeraltı Suyu Seviyesi ( $D_{su}$ ) %1.95'lik bir katkı ile istatistiksel önem sergilemiş ve temelin yük aktarım mekanizmasında drenajsız mukavemet koşullarının önemini vurgulamıştır. Temel genişliği (B) %4.17'lik bir katkı sağlayarak oturmaların dağılımı üzerinde orta düzeyde bir etki göstermiştir.  $D_f \times$  Zemin Türü ve  $q_0^2$  gibi etkileşim terimleri de istatistiksel uygunlukları ( $p < 0.05$ ) nedeniyle modelde tutulmuş ve çok değişkenli regresyon yapısına derinlik katmıştır. Öte yandan, Şekil Oranı (L/B) sadece %0.0157'lik ihmal edilebilir bir katkı sergilemiş ve istatistiksel

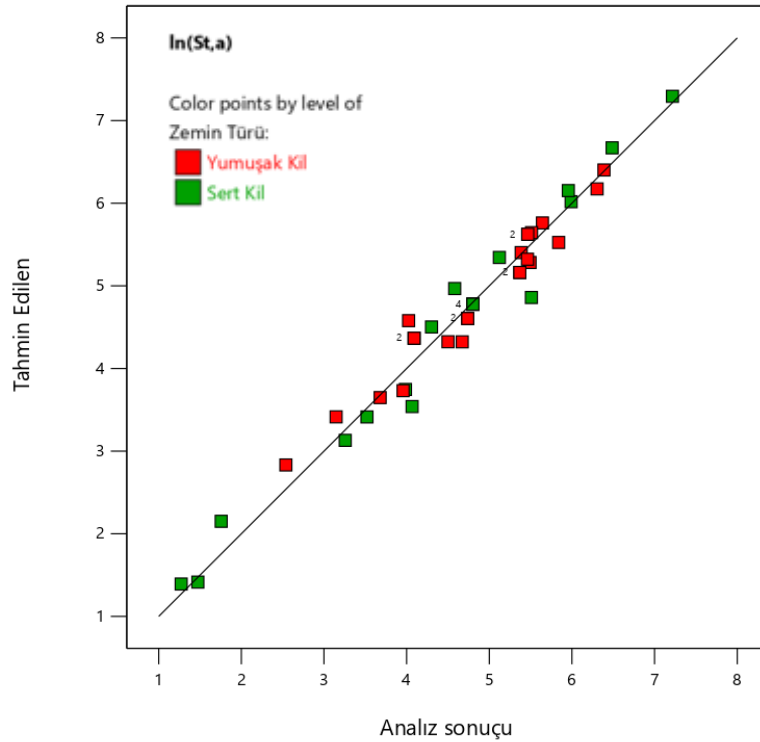
olarak önemsiz olmuştur ( $p = 0.6639$ ), bu da test edilen aralıkta en-boy oranının yapısal-aşama oturması üzerinde minimum etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Yumuşak kil ve sert kil zeminlerde yapısal yüklenme aşamasındaki (120 gün sürede) oturmayı tahmin etmek için geliştirilen regresyon denklemleri sırasıyla Denklem 4.5 ve Denklem 4.6'da verilmiştir.

$$\ln (St_{,a}) = 5.48 + 0.01*q_o - 0.02*D_{su} + 0.08*B - 0.66*(L/B) - 0.43*D_f + 0.03*(L/B*D_f) - 0.00001*q_o^2 + 0.08*(L/B)^2 \quad (4.5)$$

$$\ln (St_{,a}) = 2.74 + 0.01*q_o - 0.02*D_{su} + 0.08*B - 0.42*(L/B) - 0.43*D_f + 0.03*(L/B*D_f) - 0.00001*q_o^2 + 0.08*(L/B)^2 \quad (4.6)$$

Şekil 4.30, yapısal yüklenme aşaması için logaritmik olarak dönüştürülmüş regresyon modeline ( $\ln[S_{t,a}]$ ) dayalı olarak öngörülen ve gerçek oturma değerlerini sunmaktadır. Her bir kare işaret, faktöriyel deneysel tasarımdan farklı bir durumu temsil etmektedir. Noktaların  $45^\circ$  referans çizgisine yakınlığı, öngörülen ve gerçek oturma değerleri arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. Bu görsel uyum, modelin 0.9012'lik yüksek  $R^2$  değerini ve 0.8429'luk kabul edilebilir tahmini  $R^2$  değerini destekleyerek iyi tahmin gücünü teyit etmektedir.



Şekil 4.30. Yapısal yüklenme aşamasındaki sayısal analiz sonuçları ve istatistiksel model sonuçlarının karşılaştırılması

Modelin performansı hem yumuşak hem de sert kil durumlarında tutarlıdır ve kayda değer aykırı değerler olmaksızın oturma eğilimini doğru bir şekilde yakalamaktadır. Üst ve alt aralıklarda -özellikle sert kil vakalarında- bir miktar dağılım görülse de sapmalar kabul edilebilir sınırlar dahilindedir ve genel regresyon eğilimini bozmamaktadır. Bu sonuçlar, doğal logaritmik dönüşümün ( $\lambda = 0$ ) verileri normalleştirme ve yapısal-aşamalı oturma tahmini için model güvenilirliğini artırma konusundaki sağlamlığını güçlendirmektedir.

Çizelge 4.9, PLAXIS 3D'den elde edilen yapısal aşama oturmaları ile hem Yumuşak Kil hem de Sert Kil durumları için Design-Expert yazılımı kullanılarak oluşturulan ilgili regresyon tabanlı tahminler arasında yan yana bir karşılaştırma sunmaktadır. Bu karşılaştırma, doğrusal regresyon modelinin uygulamada karşılaşılan çeşitli zemin türleri ve temel konfigürasyonları arasında son derece uyumlu ve duyarlı tahminler üretebildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle Yumuşak Kil vakaları için regresyon modeli, çok çeşitli yükleme ve geometrik koşullarda oturma davranışını etkili bir şekilde yakalamaktadır. Örneğin, 120 kPa yapısal gerilme, 16.5 m yeraltı suyu seviyesi ve 12.7 m temel genişliği içeren Vaka-42'de PLAXIS tarafından hesaplanan oturma 594.8 mm iken öngörülen değer 600.45 mm'dir ve sadece %0.94'lük bir sapma söz konusudur. Bu sonuç, doğrusal olmayan deformasyon davranışı altında bile modelin güçlü performansını göstermektedir.

Diğer vakalarda, bazı farklılıklar olsa da, genel eğilimler ve büyüklükler genellikle iyi bir uyum içindedir. Örneğin, Vaka-22'de, 500 kPa'lık yüksek bir yapısal gerilme ve orta derinlikte bir temel altında, PLAXIS sonucu 656.4 mm iken, regresyon modeli 724.83 mm'yi tahmin etmiştir, bu da %10'un biraz üzerinde bir fark göstermektedir, bu da hala makul bir mühendislik aralığındadır. Sert kil koşulları için, modelin tahmin doğruluğu orta yükleme seviyeleri ve daha derin temeller altında daha da artmakta ve genellikle %5 hata payı içinde sonuçlar üretmektedir.

Genel olarak bu karşılaştırma, yapısal yükleme aşaması için geliştirilen regresyon modelinin farklı zemin türleri, temel geometrileri ve yükleme senaryoları dahil olmak üzere çeşitli koşullarda oturmayı güvenilir bir şekilde tahmin edebileceğini doğrulamaktadır. Analitik tahminler ile sayısal PLAXIS sonuçları arasındaki tutarlılık, modelin mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir bir doğruluk düzeyi sağladığını göstermektedir.

**Çizelge 4.9.** Yapısal yükleme aşamasında sayısal analiz ve regresyon tabanlı tahminlerden elde edilen oturma sonuçları

Analiz numarası	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	B (m)	L/B	$D_f$ (m)	Zemin türü	Yapı yükünde oturma (mm)	Tahmini Oturma (mm)
1	50	10.4	5	5	6	Yumuşak Kil	23.27	30.39
2	50	36	5	5	0.8	Yumuşak Kil	107.00	75.30
3	120	20.6	10.2	1	6	Yumuşak Kil	55.91	96.91
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	59.75	78.63
5	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	114.40	99.64
6	110	36	5	5	6	Yumuşak Kil	52.33	41.58
7	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	114.40	99.64
8	250	6	9.9	4.8	6	Sert Kil	73.78	88.40
9	50	6	5	3.1	3.1	Sert Kil	5.79	8.59
10	50	36	15	3	0	Sert Kil	33.80	30.35
11	50	36	5	1.5	6	Yumuşak Kil	12.66	16.97
12	275	36	15	1	6	Sert Kil	53.83	41.33
13	50	6	10	1	6	Sert Kil	4.37	4.11
14	120	36	15	2.9	2.9	Yumuşak Kil	218.30	220.80
15	60	20.3	15	5	0	Yumuşak Kil	282.50	317.29
16	80	36	10.1	1	0	Yumuşak Kil	547.10	478.77
17	50	36	5	5	6	Sert Kil	3.57	4.02
18	275	21	10	3	3	Sert Kil	121.80	115.87
19	120	20.4	5	2.9	1	Yumuşak Kil	343.60	249.88
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	59.75	78.63
21	500	6	5	3	6	Sert Kil	247.10	118.62
22	500	36	10	5	1.5	Sert Kil	656.40	724.84
23	275	21	10	3	3	Sert Kil	121.80	115.87
24	50	6	15	5	3	Sert Kil	58.34	34.42
25	275	6	5	5	0	Sert Kil	399.70	400.55
26	500	36	5	1	3	Sert Kil	167.70	192.41
27	130	6	15	1.3	0.5	Sert Kil	97.71	142.80
28	50	20.9	15	1	2.9	Yumuşak Kil	243.20	196.69
29	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	236.30	276.75
30	500	6	15	1	1.5	Sert Kil	1361.00	1352.38
31	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	214.70	174.10
32	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	236.30	276.75
33	275	21	10	3	3	Sert Kil	121.80	115.87
34	50	36	13.8	5	6	Yumuşak Kil	39.65	38.37
35	120	6	10.2	5	2.9	Yumuşak Kil	247.50	281.20
36	50	21	5	1	0	Sert Kil	25.98	22.86
37	50	20.9	15	1	2.8	Yumuşak Kil	235.60	204.68
38	120	21	10	4.1	6	Yumuşak Kil	90.04	75.06
39	275	21	10	3	3	Sert Kil	121.80	115.87
40	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	214.70	174.10
41	500	21	15	5	6	Sert Kil	386.20	432.36
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	594.80	600.45

Benzer şekilde, Sert Kil için regresyon modeli, özellikle düşük ve orta gerilme koşullarında tutarlı bir performans göstermiştir. Örneğin, Vaka-13'te, 50 kPa uygulanan gerilme, 10 m temel genişliği ve 6 m gömme derinliği ile PLAXIS tarafından hesaplanan oturma 4.366 mm'dir ve 4.11 mm'lik öngörülen değerle yakından eşleşerek modelin düşük deformasyon aralığındaki güvenilirliğini doğrulamaktadır. Benzer şekilde, 275 kPa

basınç uygulanan Vaka-18'de PLAXIS çıktısı 121.8 mm iken regresyon modeli 115.87 mm öngörmektedir ve bu da yaklaşık %5'lik küçük bir sapmayı temsil etmektedir.

Vaka-30 ( $q_0 = 500$  kPa,  $B = 15$  m,  $D_f = 1.5$  m) gibi aşırı yükleme koşulları altında bile regresyon modeli 1352.38 mm'lik bir oturma tahmin etmiştir ve bu değer PLAXIS'ten elde edilen 1361 mm'lik sonuçla neredeyse aynıdır. Bu tutarlılık, modelin esnekliğini ve geniş bir gerilme spektrumunda genelleme yeteneğini vurgulamaktadır. Sert Kil için geliştirilen denklem zemine özgü davranışı doğru bir şekilde yansıtmakta ve güvenilir sonuçlar sağlamaktadır. Sonuç olarak, temel genişliği, yapısal gerilme, derinlik ve yeraltı suyu seviyesi gibi girdi parametreleri bilindiğinde, regresyon modeli, özellikle geoteknik mühendisliğinde ön tasarım değerlendirmeleri için yararlı olan oturmayı tahmin etmek için pratik ve zaman açısından verimli bir araç sunmaktadır.

#### 4.3.3. %90 konsolidasyon oturması

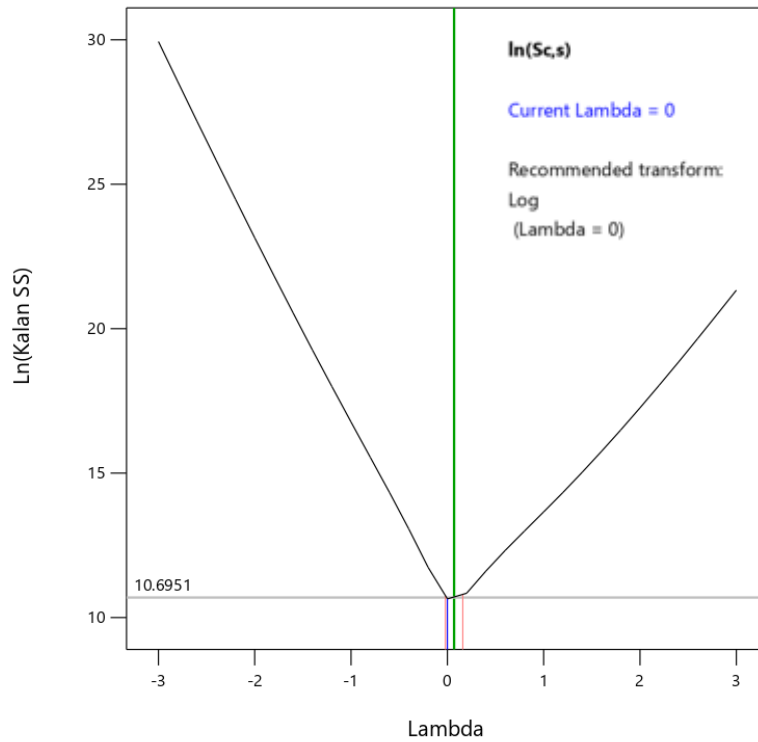
PLAXIS 3D simülasyonlarından elde edilen %90 konsolidasyon altındaki son aşama oturmasını ( $S_{c,s}$ ) tahmin etmek için Design-Expert yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen regresyon modelleme süreci sunulmaktadır. Veri dağılımını normalleştirmek ve yanıt değişkeninin (oturma) varyansını dengelemek için, nihai regresyon modeli geliştirilmeden önce doğal logaritmik dönüşüm ( $\lambda = 0$ ) uygulanmıştır.

Şekil 4.31'de gösterildiği gibi, model doğruluğunu artırmak ve artıkların homoscedasticity'sini sağlamak için en uygun dönüşümü belirlemek üzere Box-Cox grafiği kullanılmıştır. Bu çizim, artık kareler toplamının ( $\ln(\text{Artık SS})$ ) doğal logaritmasını farklı lambda ( $\lambda$ ) değerlerine karşı grafiklendirerek bir dizi güç dönüşümünü değerlendirmektedir. Eğri üzerindeki en düşük nokta, artık hata varyansını en aza indiren optimum  $\lambda$  değerini temsil etmektedir. Bu durumda, grafikteki yeşil dikey çizgi seçilen log dönüşümünü ( $\lambda = 0$ ) göstermekte ve bu veri seti için uygunluğunu teyit etmektedir. Bu nedenle, özellikle konsolidasyon oturması yanıtlarında gözlemlendiği gibi, geoteknik davranışın doğrusal olmayan doğasını daha iyi yakalamak için regresyondan önce dönüşüm uygulanmıştır.

Analiz, istatistiksel anlamlılık eşiklerine ( $\alpha_{in} = 0.05$ ,  $\alpha_{out} = 0.05$ ) dayalı kademeli bir regresyon tekniği kullanılarak "Değiştirilmiş" işlem sırası ile gerçekleştirilmiştir. Nihai regresyon modeli bu rafine yaklaşım kullanılarak geliştirilmiştir.

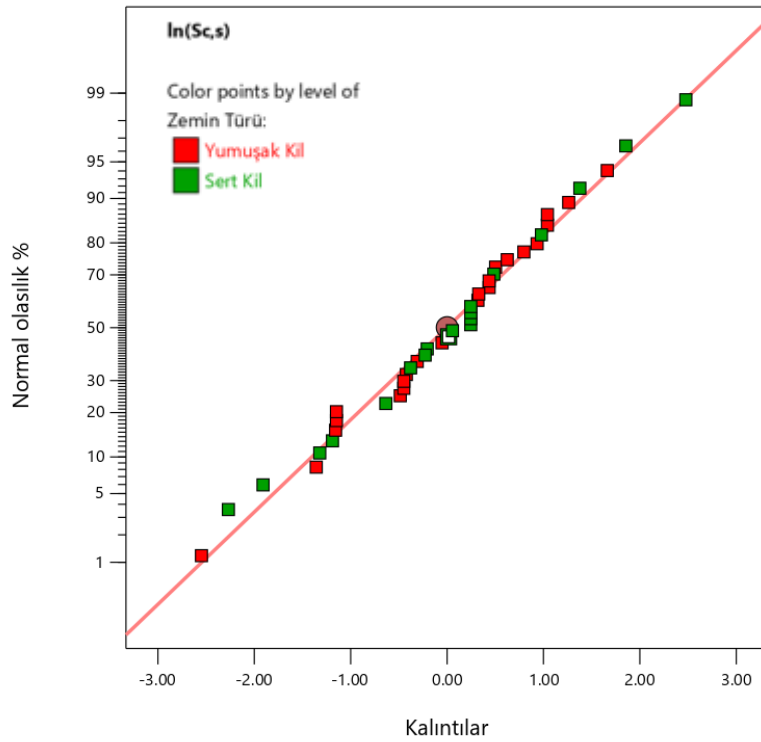
Geliştirilen modelin istatistiksel performansı  $0.9705 R^2$  değerine ulaşarak dönüştürülmüş verilere mükemmel uyum göstermiştir. Düzeltilmiş  $R^2$  ve Tahmin Edilen

$R^2$  değerleri sırasıyla 0.9610 ve 0.9356'dır ve aralarındaki fark kabul edilebilir sınır olan 0.2'nin altında kalarak güçlü tahmin kabiliyetine işaret etmektedir. Ayrıca, Yeterli Hassasiyet oranı 41.75'tir ve arzu edilen minimum eşik olan 4'ün çok üzerindedir; bu da modelin iyi bir sinyal-gürültü oranına sahip olduğunu ve tasarım uzayında gezinmek için güvenilir olduğunu göstermektedir. PLAXIS 3D tabanlı konsolidasyon oturmaları ( $S_{c,s}$ ) için kurulan regresyon modeli, yüksek derecede istatistiksel güvenilirlik ve pratik fayda göstermektedir. Değişken yük, geometri ve yeraltı suyu koşulları altında uzun vadeli oturma davranışının etkili bir şekilde tahmin edilmesini sağlar ve kohezyonlu zeminlerde ön tasarım değerlendirmeleri için güçlü bir araç haline getirir.



**Şekil 4.31.** %90 konsolidasyon aşamasındaki oturma sonuçları için geliştirilen modele ait Box-Cox güç dönüşüm grafiği

Artıkların normal olasılık grafiğinde (Şekil 4.32), harici olarak öğrencileştirilmiş artıklar kırmızı referans diyagonal çizgiyle yakın hizadadır ve bu da artıkların yaklaşık olarak normal dağıldığını gösterir. Büyük sapmalar veya eğrilikler gözlemlenmemiştir, bu da modelin şiddetli çarpıklık veya etkili aykırı değerlerden muzdarip olmadığını göstermektedir. Bu sonuç, daha önce uygulanan logaritmik dönüşümün ( $\lambda = 0$ ) uygunluğunu doğrulamakta, sabit varyans ve normal dağılımlı hata varsayımlarının makul ölçüde karşılandığını teyit etmektedir.



**Şekil 4.32.** %90 konsolidasyon aşamasındaki oturma sonuçları için geliştirilen modele ait normal olasılık grafiği

PLAXIS 3D'de modellenen konsolidasyon aşaması sırasında gözlemlenen zamana bağlı oturma davranışını daha fazla değerlendirmek için, dönüştürülmüş veriler kullanılarak Design-Expert yazılımında bir ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Bu, modelin güçlü bir sinyal-gürültü oranını koruduğunu ve geoteknik oturma analizinde tasarım uzayında gezinmek için uygun olduğunu doğrulamaktadır.

Bu istatistiksel teşhisler birlikte, regresyon modelinin konsolidasyon aşamasındaki uzun vadeli oturmaları tahmin etmedeki sağlamlığını güçlendirmekte ve öngörücü tasarım uygulamalarında kullanımını desteklemektedir.

Modelin istatistiksel performansı ANOVA analizi ile doğrulanmış (Çizelge 4.10) ve modelin çok düşük bir p-değeri ( $p < 0.0001$ ) ile oldukça anlamlı olduğunu göstererek konsolidasyon oturma davranışında gözlemlenen değişkenliği açıklamada modelin güvenilirliğini teyit etmiştir.

Parametre katkılarının değerlendirilmesi, en etkili değişkenin toplam varyasyonun %40.53'ünü oluşturan uygulanan gerilme (A) olduğunu, bunu %32.38 ile zemin kıvamının (F), %11.77 ile temel derinliğinin (E) ve %6.43 ile temel genişliğinin (C) izlediğini ortaya koymuştur. Yeraltı suyu seviyesi (B) de ölçülebilir ancak daha küçük bir etkiye sahip olup modele %1.67 oranında katkıda bulunmuştur. Öte yandan, L/B oranı (D), p-değeri

0.05'i aştığı ve katkısı sadece %0.18 olduğu için istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Ana faktörlere ek olarak, AE, DF, A<sup>2</sup> ve D<sup>2</sup> gibi çeşitli ikinci dereceden ve etkileşim terimleri de istatistiksel olarak anlamlıydı ve uzun vadeli konsolidasyon altındaki oturma davranışının doğrusal olmayan ve birbirine bağlı doğasını vurguluyordu. Bu aşamada uygulanan gerilimin ve zemin türünün baskınlığı, gerilme seviyesinin ve kil sıkıştırılabilirlik özelliklerinin gözenek basıncı dağılımının ve dikey yer değiştirmenin hızını ve büyüklüğünü belirlemede kritik bir rol oynadığı kohezyonlu zeminlerde beklenen davranışla tutarlıdır. Özellikle, temel derinliği bu zamana bağlı aşamada özellikle kritik bir parametre olarak ortaya çıkmıştır, çünkü daha derin temeller hem gerilme dağılımını hem de konsolidasyon gradyanlarını kısa süreli yükleme aşamalarına göre daha güçlü bir şekilde etkilemektedir.

**Çizelge 4.10.** %90 konsolidasyon aşaması için geliştirilen modelin anova sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Katkı yüzdesi (%)	Ortalama	F-değeri	p-değeri
Model	80.14	10		8.01	102.05	< 0.0001
A-gerilme	34.75	1	40.53	34.75	442.51	< 0.0001
B-YASS	1.43	1	1.67	1.43	18.27	0.0002
C-B	5.51	1	6.43	5.51	70.23	< 0.0001
D-L/B	0.1599	1	0.19	0.1599	2.04	0.1636
E-Df	10.09	1	11.77	10.09	128.44	< 0.0001
F-Zemin Türü	27.76	1	32.38	27.76	353.58	< 0.0001
AE	1.32	1	1.54	1.32	16.81	0.0003
DF	1.07	1	1.25	1.07	13.57	0.0009
A <sup>2</sup>	2.85	1	3.32	2.85	36.35	< 0.0001
D <sup>2</sup>	0.8014	1	0.93	0.8014	10.21	0.0032
Artık	2.43	31		0.0785		
Uyum	2.43	24		0.1014		
Hata	0	7		0		
Toplam	82.57	41				

Genel olarak, regresyon modeli konsolidasyon altındaki oturma davranışını başarılı bir şekilde yakalamakta ve PLAXIS sonuçları ile güçlü bir uyum göstermektedir. Modelin etkileşim etkileriyle birlikte hem doğrusal hem de doğrusal olmayan terimleri içeren yapısı, yumuşak ve sert killerde uzun vadeli oturmayı tahmin etmek için istatistiksel olarak sağlam ve mühendislik açısından pratik bir yaklaşım sağlar. Bu da konsolidasyon aşaması regresyon modelini değerlendirilen aşamalar arasında en güvenilir ve geoteknik projelerde optimizasyon çalışmaları ve tasarım aşaması oturma tahmini için son derece uygun hale getirmektedir.

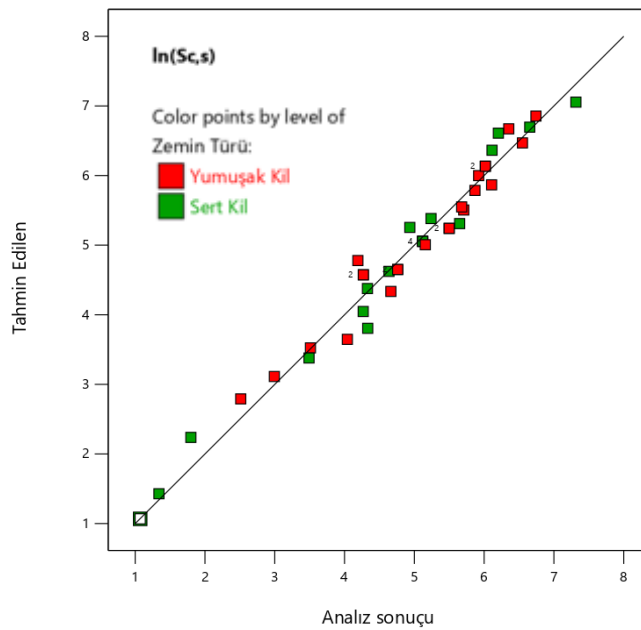
Yumuşak kil ve sert kil zeminlerde toplam oturmayı tahmin etmek için geliştirilen regresyon denklemleri sırasıyla Denklem 4.7 ve Denklem 4.8'de verilmiştir.

$$\ln(St_{,s}) = 5.49 + 0.01*q_o - 0.02*D_{su} + 0.09*B - 0.54*(L/B) - 0.47*D_f + 0.0006*(q_o*D_f) - 0.00002*q_o^2 + 0.08*(L/B)^2 \quad (4.7)$$

$$\ln(St_{,s}) = 2.81 + 0.01*q_o - 0.01*D_{su} + 0.09*B - 0.33*(L/B) - 0.47*D_f + 0.0006*(q_o*D_f) - 0.00002*(q_o)^2 + 0.08*(L/B)^2 \quad (4.8)$$

Regresyon denklemlerinde, yumuşak kil (+5.49) ve sert kil (+2.81) için ayrı kesişim değerleri elde edilmiş ve bu da iki zemin türü arasındaki konsolidasyon davranışında temel bir fark olduğunu vurgulamıştır. İkinci dereceden model, stres  $\times$  derinlik ( $q_o-D_f$ ) ve  $D_f \times$  zemin türü gibi temel etkileşim terimlerinin yanı sıra uzun vadeli yüklemeye altında oturmanın karmaşık, zamana bağlı doğasını yakalamaya yardımcı olan  $D_f^2$  ve  $(L/B)^2$  gibi doğrusal olmayan kare terimleri de içermektedir.

Şekil 4.33, tahmin edilen ve gerçek oturma değerleri arasında güçlü bir uyum olduğunu ve çoğu veri noktasının diyagonal referans çizgisi boyunca yakın bir şekilde hizalandığını göstermektedir. Düşük ve orta aralıktaki değerlerde hafif sapmalar görülse de, genel eğilim modelin güçlü tahmin kabiliyetini teyit etmekte ve daha önce bildirilen yüksek  $R^2$  ve Yeterli Hassasiyet değerleriyle de desteklenmektedir. Yumuşak ve sert kil noktalarının aynı eğilim boyunca hizalanması da geliştirilen modelin farklı kohezyonlu zemin türleri arasında etkili bir şekilde genelleme yaptığını göstermektedir.



**Şekil 4.33.** %90 konsolidasyon aşamasındaki sayısal analiz sonuçları ve istatistiksel model sonuçlarının karşılaştırılması

Konsolidasyon aşaması için regresyon tabanlı oturma tahminleri hem yumuşak hem de sert killer için Çizelge 4.11'de özetlenmiştir. Yumuşak kil veri seti için öngörülen oturma değerleri, özellikle orta düzeyde yükleme ve standart geometrik konfigürasyonların olduğu durumlarda sayısal PLAXIS 3D çıktılarıyla yakından eşleşmektedir. Nihai ikinci dereceden regresyon modeli, önemli etkileşim terimleri (örn.  $q_0-D_f$ ) ve karesel terimler (örn.  $D_{su}^2$ ,  $B^2$ ,  $L/B^2$ ) aracılığıyla hem doğrusal hem de doğrusal olmayan davranışları başarılı bir şekilde yakalayarak yumuşak killerin değişen stres ve geometri koşulları altındaki karmaşık konsolidasyon tepkisini yansıtmaktadır. Dikkate değer bir örnek, tahmin edilen oturmanın (646.40 mm) PLAXIS sonucuna (699.00 mm) neredeyse eşit olduğu ve kullanılan dönüşümün sağlamlığını ve modelin güvenilirliğini gösteren Vaka 16'dır ( $q_0 = 80$  kPa,  $D_f = 0$ ).

Sert kil için model, tahmin edilen ve simüle edilen oturmaların genellikle tutarlı bir eğilim izlemesiyle eşit derecede güçlü bir uyum göstermektedir. Vaka 22 ( $q_0 = 500$  kPa,  $D_f = 1.5$  m) ve Vaka 41 ( $q_0 = 500$  kPa,  $D_f = 6$  m) gibi yüksek stresli ve derin temel senaryolarında, regresyon tahminleri (sırasıyla 879.04 mm ve 806.54 mm) PLAXIS çıktılarına (775.7 mm ve 494.7 mm) yakın kalmakta ve sadece marjinal sapma göstermektedir. Beklendiği gibi, sert kil için regresyon denklemi, daha düşük sıkıştırılabilirliği ve daha doğrusal oturma davranışını yansıtan daha az doğrusal olmayan ayarlama içermektedir. Bununla birlikte,  $D_{su}-B$  ve  $D_f^2$  gibi terimler, temel konfigürasyonlarındaki değişiklikleri karşılamak için gerekli esnekliği sağlamaktadır.

Hem sayısal hem de istatistiksel sonuçlar, geliştirilen ikinci dereceden regresyon modellerinin tahmin gücünü ve mühendislik açısından yorumlanabilirliğini doğrulamaktadır. Model, oturmayı gerçek girdi faktörleri cinsinden ifade ederek, erken tasarım değerlendirmeleri için pratik ve sezgisel bir araç sunmaktadır. Karekök dönüşümü ( $\sqrt{\text{oturma}}$ ) ve etkileşim terimlerinin dahil edilmesi, sığ temel yüklemesi altında killi zeminlerdeki konsolidasyon davranışının zamana bağlı, doğrusal olmayan doğasını etkili bir şekilde yakalar. Şekil 4.29'da gösterildiği gibi, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki güçlü uyum, çoğu veri noktasının  $45^\circ$  referans çizgisini yakından kucaklaması ve uçlarda yalnızca küçük sapmalar olmasıyla modelin hassasiyetini daha da doğrulamaktadır.

**Çizelge 4.11.** %90 konsolidasyon aşamasında sayısal analiz ve regresyon tabanlı tahminlerden elde edilen oturma sonuçları

Analiz numarası	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	B (m)	L/B	$D_f$ (m)	Zemin türü	%90 konsolidasyon oturma (mm)	Tahmini Oturma (mm)
1	50	10.4	5	5	6	Yumuşak Kil	19.97	22.52
2	50	36	5	5	0.8	Yumuşak Kil	173.60	149.51
3	120	20.6	10.2	1	6	Yumuşak Kil	66.11	119.52
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	71.46	97.07
5	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	116.90	104.95
6	110	36	5	5	6	Yumuşak Kil	56.85	38.50
7	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	116.90	104.95
8	250	6	9.9	4.8	6	Sert Kil	103.20	103.97
9	50	6	5	3.1	3.1	Sert Kil	6.04	9.38
10	50	36	15	3	0	Sert Kil	71.37	57.28
11	50	36	5	1.5	6	Yumuşak Kil	12.34	16.31
12	275	36	15	1	6	Sert Kil	75.79	81.62
13	50	6	10	1	6	Sert Kil	3.82	4.18
14	120	36	15	2.9	2.9	Yumuşak Kil	353.90	327.43
15	60	20.3	15	5	0	Yumuşak Kil	574.10	790.04
16	80	36	10.1	1	0	Yumuşak Kil	699.00	646.40
17	50	36	5	5	6	Sert Kil	2.92	2.91
18	275	21	10	3	3	Sert Kil	167.20	160.72
19	120	20.4	5	2.9	1	Yumuşak Kil	449.20	354.70
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	71.46	97.07
21	500	6	5	3	6	Sert Kil	284.00	219.92
22	500	36	10	5	1.5	Sert Kil	775.70	879.04
23	275	21	10	3	3	Sert Kil	167.20	160.72
24	50	6	15	5	3	Sert Kil	76.11	45.00
25	275	6	5	5	0	Sert Kil	451.60	595.17
26	500	36	5	1	3	Sert Kil	188.60	236.43
27	130	6	15	1.3	0.5	Sert Kil	139.10	192.44
28	50	20.9	15	1	2.9	Yumuşak Kil	301.20	246.11
29	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	410.50	461.34
30	500	6	15	1	1.5	Sert Kil	1503.00	1259.71
31	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	244.50	189.30
32	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	410.50	461.34
33	275	21	10	3	3	Sert Kil	167.20	160.72
34	50	36	13.8	5	6	Yumuşak Kil	33.50	33.96
35	120	6	10.2	5	2.9	Yumuşak Kil	373.00	404.86
36	50	21	5	1	0	Sert Kil	32.83	29.37
37	50	20.9	15	1	2.8	Yumuşak Kil	292.40	257.25
38	120	21	10	4.1	6	Yumuşak Kil	106.00	76.68
39	275	21	10	3	3	Sert Kil	167.20	160.72
40	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	244.50	189.30
41	500	21	15	5	6	Sert Kil	494.70	806.54
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	847.80	952.96

#### 4.4. Analitik ve Sayısal Sonuçların Kıyaslanması

Bu bölümde, kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temeller için PLAXIS 3D kullanılarak analitik yöntemler ve sayısal modelleme yoluyla elde edilen oturma sonuçlarının karşılaştırmalı bir değerlendirmesi sunulmaktadır. Amaç, analitik tahminlerin tutarlılığını ve doğruluğunu, aşamalı inşaat, yapısal yükleme ve

konsolidasyon altında sayısal olarak simüle edilen oturmalarla karşılaştırarak değerlendirmektedir. Karşılaştırma hem yumuşak hem de sert kil vakalarını içermekte ve toplam oturmalara ( $S_{t,a}$  vs.  $S_{t,s}$ ) odaklanmakta, çubuk grafikler, analitik ve sayısal oturma sonuçları arasındaki nicel karşılaştırmanın yüzde hata hesaplamaları, elastik oturmaya ( $S_e$ ), birincil konsolidasyon oturmasına ( $S_c$ ) ve toplam oturmaya ( $S_T$ ) ve seçilen vaka çalışmalarına odaklanarak farklılıkları vurgulamaktadır. Hata değerleri, PLAXIS 3D sonuçları ile elle yapılan hesaplamalar arasındaki yüzde farkları olarak hesaplanmıştır. Amaç, tahminlerdeki sapma derecesini anlamak ve tutarlı kalıpları veya aykırı değerleri belirlemektir. Bu alt bölümün sonunda kazı kaynaklı kabarmalarla ilgili ayrı bir yorum da yer almaktadır. Bu analiz sadece elle hesaplama yaklaşımının doğrulanmasına yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda gerilme yeniden dağılımını, drenaj davranışını ve zamana bağlı konsolidasyon etkilerini simüle etme yetenekleri nedeniyle sayısal yöntemlerin daha gerçekçi tahminler sunduğu senaryolar hakkında da fikir verir.

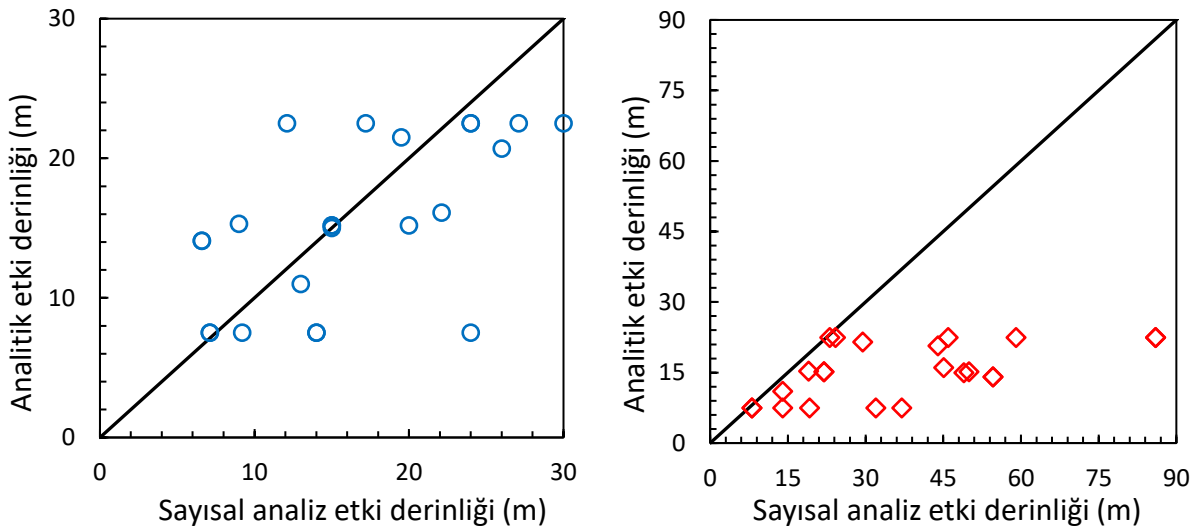
#### 4.4.1. Etki derinliği

Analitik olarak etki derinliği, temel altından 1.5B derinlik ve  $\Delta q_{net}/\sigma' = \%10$  olduğu derinliten büyük olanı seçilerek hesaplanmıştır. Sayısal etki derinliği ise, Plaxis 3D analizlerinde inşaat aşamalarındaki efektif gerilme değişimlerinin başlangıç gerilmelere ulaştığı derinlik olarak seçilmiştir. Sert kilde analitik ve sayısal etki derinlikleri birbirine daha yakın olurken, yumuşak kildeki farklılık daha fazladır (Şekil 4.34 ve Şekil 4.35). Sonlu elemanlar yönteminde zeminin gerilme ve deformasyon davranışı dikkate alınırken, analitik yöntemlerde zemin özellikleri dikkate alınmamaktadır. Elde edilen sonuçlar, zeminin dayanım ve deformasyon özelliklerinin gerilme dağılımında önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35, TBDY 2018'deki %10 düşey gerilme kriterine göre analitik olarak belirlenen sıkıştırılabilir tabaka kalınlığı (H) ile PLAXIS 3D simülasyonlarından elde edilen karşılık gelen gerilme etki derinliklerini karşılaştırmaktadır. Yumuşak killi zeminlerde (Şekil 4.34), çoğu nokta 1:1 referans çizgisinin altında kalmaktadır, bu da analitik H değerlerinin genellikle PLAXIS tarafından öngörülen değerlerden daha muhafazakar olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, yumuşak, yüksek sıkıştırılabilir zeminlerde oturmaların az tahmin edilmesini önlemek için çalışmada 3B veya kodlanmış H değerlerinden büyük olanı kullanıldığından, çoğu durumda kasıtlıdır. Bununla birlikte, Vaka-1 veya Vaka-14 gibi bazı durumlarda PLAXIS

daha derin gerilme dağılımı göstermiştir, bu da analitik varsayımların belirli koşullarda gerçek etki derinliklerini yetersiz temsil edebileceğini düşündürmektedir.

Yumuşak kil durumlarında, analitik olarak seçilen sıkıştırılabilir tabaka kalınlıkları (H) ile sayısal olarak elde edilen oturma etki derinlikleri arasındaki karşılaştırma, önemli bir tutarsızlık ortaya koymaktadır (Şekil 4.34). Neredeyse tüm veri noktaları 1:1 referans çizgisinin altına düşmektedir, bu da PLAXIS 3D tarafından tahmin edilen etki derinliğinin analitik olarak varsayılan kalınlıktan tutarlı bir şekilde daha büyük olduğunu göstermektedir. Örneğin, Vaka 5 ve Vaka 7'de analitik H 22.5 m iken, PLAXIS 86 m'ye kadar uzanan oturma etkileri tespit etmiştir, bu da geleneksel yaklaşımların konsolidasyonun düşey boyutunu ciddi şekilde hafife aldığını göstermektedir. Bu fark, büyük ölçüde, gerilme yayılımının katmanlı yapısını, kazı kaynaklı kabarma ve aşırı gözenek basıncının kademeli olarak dağılmasını göz ardı eden basitleştirilmiş gerilme dağılım kurallarının (ör. 1.5B kuralı veya  $\Delta\sigma = 0.1\sigma'_{vo}$  kriteri) sınırlamalarından kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, PLAXIS, yumuşak suya doymun zeminlerde gecikmeli ancak yaygın oturma yayılımını yakalayan ayrıntılı ve zamana duyarlı bir deformasyon profili sağlar. Bu gözlem, kohezyonlu tortullar üzerinde geoteknik tasarımda etki derinliğini doğru bir şekilde değerlendirmek için gelişmiş sayısal modellemenin kritik önemini vurgulamaktadır.



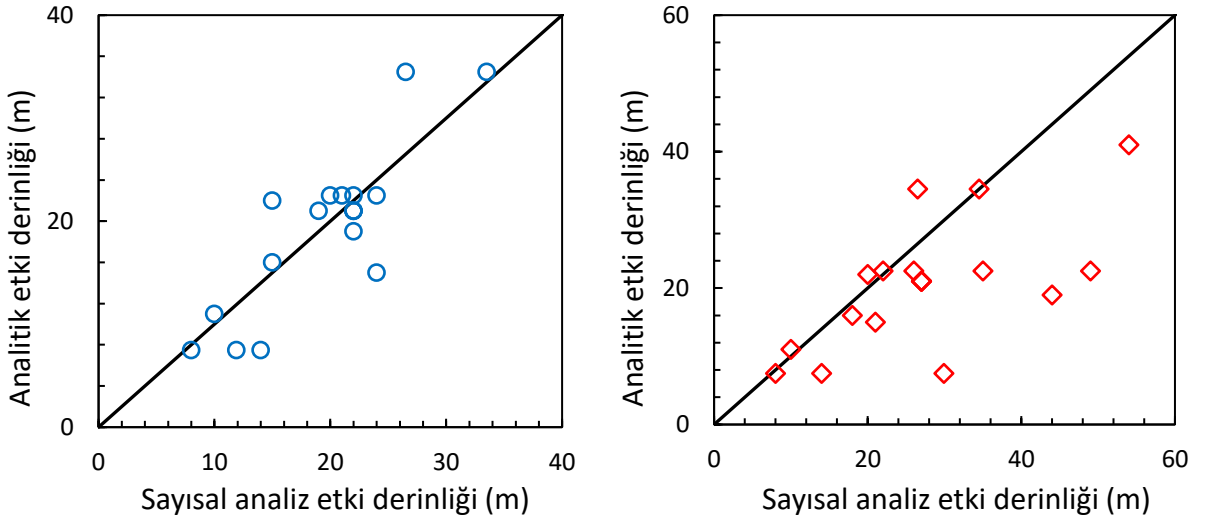
Şekil 4.34. Yumuşak kil için yapısal gerilme (solda) ve oturma (sağda) etki derinliklerinin karşılaştırılması

Buna karşılık, sert kil karşılaştırması (Şekil 4.35) 1:1 çizgisi etrafında daha dengeli bir nokta dağılımı göstermektedir. Bu, sıkıştırılabilirliğin daha düşük olması nedeniyle gerilme iletiminin daha öngörülebilir olduğu sert topraklarda analitik ve sayısal

değerler arasında daha güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. Çoğu sert kil durumunda, analitik tahminler sayısal gerilme derinlikleriyle eşleşir veya bunları biraz fazla tahmin eder, bu da yeterli tasarım kapsamı sağlar. Ancak, izole durumlarda (örneğin, Vaka-13, Vaka-17) tahminlerin yetersiz olduğu görülür ve bu da gerilme yolunun karmaşıklığını dikkate almadan yalnızca basitleştirilmiş kurallara güvenmenin riskini vurgular.

Şekil 4.35, klasik gerilme dağılım yöntemleri (örneğin, 1.5B kuralı veya  $\Delta\sigma = 0,1\sigma'_{vo}$ ) kullanılarak belirlenen analitik olarak seçilen etki derinliklerini (H) ile PLAXIS 3D simülasyonlarından elde edilen sert kil vakaları için oturma etki derinlikleri ile karşılaştırmaktadır. Çoğu veri noktası 1:1 çizgisinin altında yer almaktadır, bu da sayısal analizin analitik olarak tahmin edilenden daha derin etki bölgeleri öngördüğünü göstermektedir. Bu tutarsızlık, sert kil gibi daha az sıkıştırılabilir topraklarda bile gerilme yayılımı ve deformasyon etkilerinin el hesaplamalarının basitleştirilmiş varsayımlarının ötesine uzayabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, yüksek yükler ve daha derin temeller içeren vakalar (örneğin Vaka 8, 9 ve 41), PLAXIS modelinde analitik tahminlere kıyasla önemli ölçüde daha derin deformasyon bölgeleri göstermektedir. Genel dağılım yumuşak kile göre daha büyük olmakla birlikte, bu durum sert killerin toprak sertliği, uygulanan basınç ve drenaj davranışına bağlı olarak hem aşırı tahmin hem de yetersiz tahmin eğilimleri sergilediğini göstermektedir. Bu bulgular, daha sert topraklar için bile analitik varsayımların deformasyonun tam boyutunu yakalamada yetersiz kalabileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, PLAXIS gibi sonlu eleman modelleri, karmaşık yükleme koşulları altında kohezyonlu toprakların gerilme dağılımını ve zamana bağlı tepkisini daha doğru bir şekilde simüle edebildiğinden, sayısal doğrulama çok önemli hale gelmektedir.

Bu karşılaştırmalar, deneysel kriterlere dayalı analitik yöntemlerin özellikle sert killi zeminlerde etkili olabileceğini, ancak yumuşak zeminlerde gerilme etki bölgelerini doğru bir şekilde yakalayamayabileceğini vurgulamaktadır. Gerilme konturlarını ve zemin-yapı etkileşimini daha hassas bir şekilde simüle eden PLAXIS gibi sayısal araçlar, yerleşme tahminlerini iyileştirmek ve seçilen H'nin gerçek zemin davranışını yansıtmasını sağlamak için değerli çapraz kontroller sunar.



Şekil 4.35. Sert kil için yapısal gerilme (solda) ve oturma (sağda) etki derinliklerinin karşılaştırılması

#### 4.4.2. Elastik oturmalar

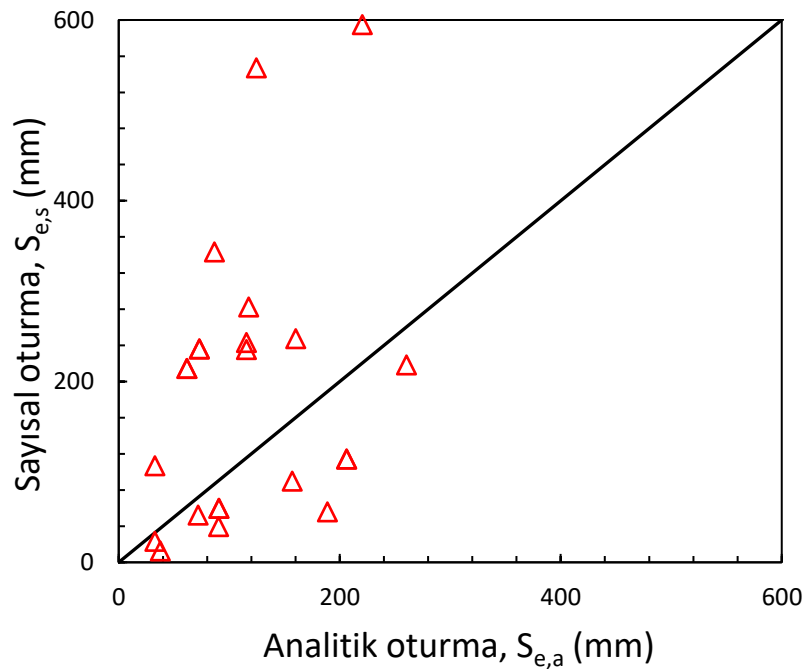
Yumuşak ve sert kil durumları için analitik hesaplamalar ile PLAXIS 3D simülasyon sonuçları arasındaki elastik oturma tahminindeki yüzde hatayı göstermektedir. Hata, formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\%Hata S_e = \frac{S_{e_s} - S_{e_a}}{S_{e_s}} \times 100 \quad (4.9)$$

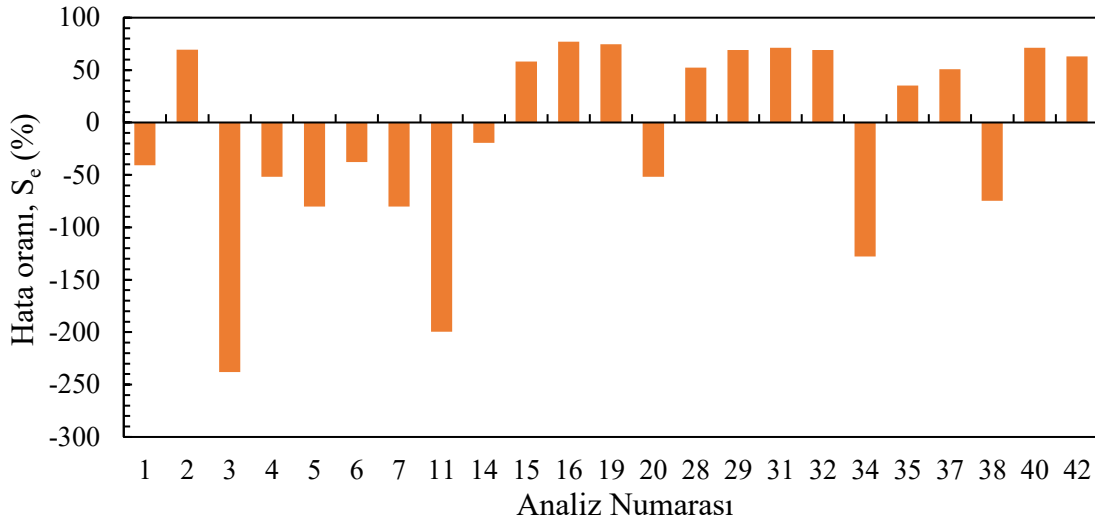
Hata, PLAXIS değeri kullanılarak normalize edilmiş ve çeşitli temel ve zemin konfigürasyonları arasında doğrudan bir karşılaştırma yapılmasına olanak sağlamıştır. Her iki kil türünde de sonuçlar, analitik yöntemin tutarsız doğruluğunu gösteren, önemli ölçüde düşük tahmin ile aşırı tahmin arasında değişen hatalarla birlikte önemli değişkenlik göstermektedir.

Şekil 4.36, yumuşak kil için analitik olarak hesaplanan elastik oturmaları ( $S_{e,a}$ ) ile PLAXIS 3D simülasyonlarından elde edilen yapısal yükleme ( $S_{e,s}$ ) altında elde edilen oturmaları karşılaştırmaktadır. Çoğu veri noktası 1:1 çizgisinin üzerinde yer almaktadır, bu da PLAXIS'in genel olarak analitik yöntemlerden daha yüksek oturmalar öngördüğünü göstermektedir. Analitik değerler 32.7 mm ile 260.6 mm (ortalama 116.5 mm) arasında değişirken, sayısal sonuçlar 12.7 mm ile 594.8 mm (ortalama 188.9 mm) arasında değişmektedir. Özellikle, orta derecede analitik oturmaların olduğu durumlarda (örneğin,  $S_{e,a} \approx 120$  mm), sayısal sonuçlar 500 mm'nin üzerindedir ve bu da yumuşak killerde gerilme dağılımının ve doğrusal olmama etkisinin olduğunu göstermektedir. Bu durum,

yüksek sıkıştırılabilir zeminlerde deformasyonların hafife alınmaması için sayısal modellemenin gerekliliğini vurgulamaktadır. Yumuşak kil vakalarında, elastik oturma tahminlerindeki hata yüzdesi (%hata Se)  $-238.1\%$  (Vaka 3) ile  $+77.2\%$  (Vaka 16) arasında geniş bir varyasyon göstermiş ve analitik ve sayısal sonuçlar arasında önemli bir tutarsızlık olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 4.37). Vakaların yaklaşık yarısında, PLAXIS 3D'nin analitik yöntemden daha yüksek oturmalar tahmin ettiği negatif hatalar ortaya çıkmıştır. Bu durum, esas olarak kazı kaynaklı kabarma ve klasik elastik formüllerin yumuşak, sıkıştırılabilir zeminlerdeki karmaşık gerilme dağılımını hesaba katamamasından kaynaklanmaktadır. Tersine, diğer yarısı pozitif hatalar gösterdi; burada analitik tahminler PLAXIS çıktılarına aştı ve etki derinliği ve sertlik davranışına ilişkin analitik varsayımlardaki tutarsızlıkları vurguladı. Son derece muhafazakar olmayan tahminlerden aşırı muhafazakar tahminlere kadar uzanan bu geniş hata spektrumu, yumuşak zemin koşullarında oturma doğruluğunu artırmak ve riskleri azaltmak için tasarımda sayısal yöntemlerin kritik ihtiyacını pekiştiriyor.



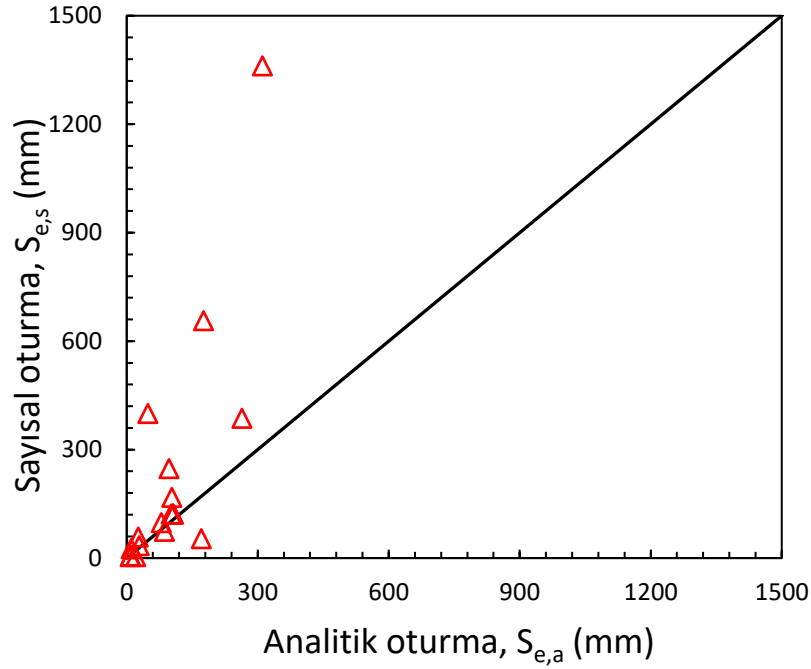
Şekil 4.36. Yumuşak kilde analitik ve sayısal oturmaların kıyaslanması (elastik oturma)



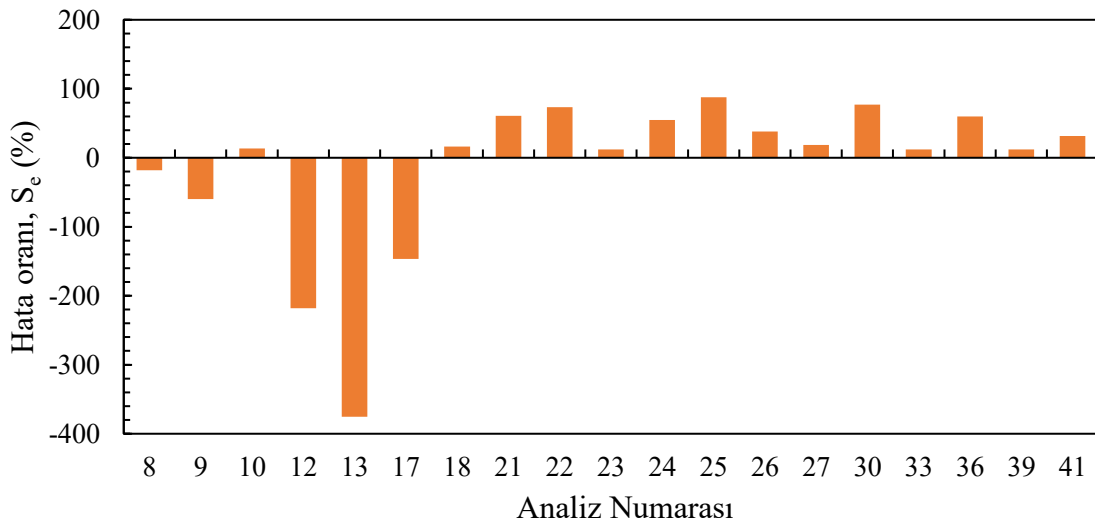
Şekil 4.37. Yumuşak kilde analitik ve sayısal oturmalar için hata oranları (elastik oturma)

Sert kilde, analitik olarak tahmin edilen elastik oturmalar ( $S_{e,a}$ ) 8.8 mm ile 311.3 mm (ortalama 98.2 mm) arasında değişirken, PLAXIS 3D'den elde edilen sayısal sonuçlar ( $S_{e,s}$ ) 3.6 mm ile 1361.0 mm (ortalama 213.8 mm) arasında değişmiştir (Şekil 4.38). Grafik, çoğu veri noktasının 1:1 referans çizgisinin önemli ölçüde üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu, PLAXIS'in genel olarak analitik yöntemlerden daha yüksek oturmaları tahmin ettiğini göstermektedir. Bu sapma, yüksek yük veya daha derin temel durumlarında özellikle belirgindir. Bu durum, analitik yaklaşımın, gerilme dağılımını, 3D zemin davranışını ve sertlik bozulmasını göz ardı eden basitleştirilmiş varsayımları nedeniyle elastik deformasyonları hafife alabileceğini göstermektedir.

Sert killi zeminlerde, analitik ve sayısal elastik oturma değerleri arasındaki karşılaştırma,  $-375.3\%$  (Vaka 13) ile  $+87.9\%$  (Vaka 25) arasında değişen geniş bir hata yüzdesine sahiptir (Şekil 4.39). Vaka 12 ve 17'deki gibi büyük negatif sapmalar, analitik yöntemlerin önemli ölçüde hafife aldığını gösterir ve bu, girdi sertlik değerlerindeki farklılıklardan veya sayısal modellerde sığ gerilme dağılımını yakalayamama durumundan kaynaklanabilir. Tersine, bazı vakalarda (örneğin 25 ve 30), analitik yöntemlerin oturmayı fazla tahmin ettiği pozitif hatalar görülür, özellikle sığ temeller veya dar temel genişlikleri için. Genel olarak, bu hata dağılımı, klasik formüllerden elde edilen elastik oturma tahminlerinin zemin özelliklerine, kazı etkilerine ve yükleme geometrisine karşı oldukça duyarlı olduğunu vurgulamaktadır. Bu nedenle, PLAXIS 3D gibi sayısal modelleme araçlarını tasarım uygulamalarına entegre etmek, daha gerçekçi oturma tahminleri elde etmek ve güvenli ve kullanışlı temel performansı sağlamak için çok önemlidir.



Şekil 4.38. Sert kilde analitik ve sayısal oturmaların kıyaslanması (elastik oturma)

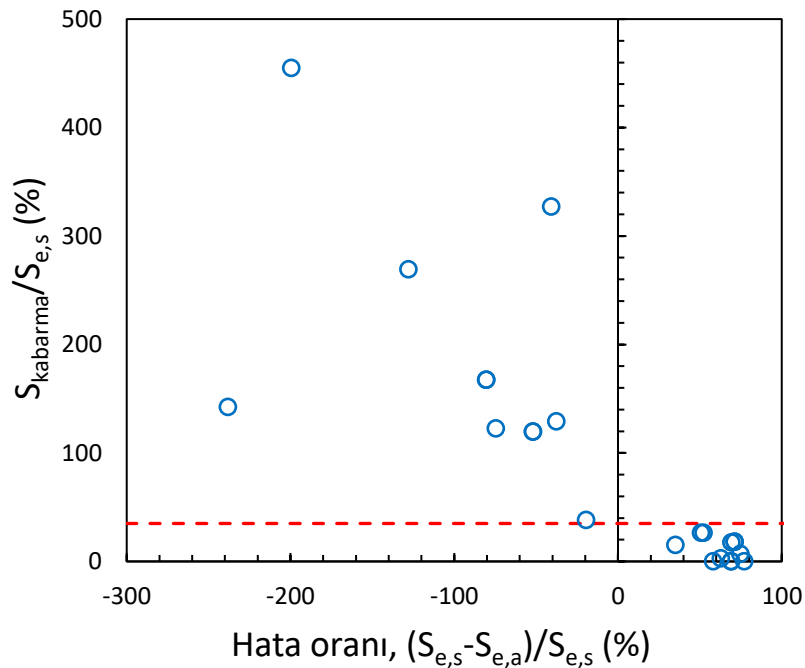


Şekil 4.39. Sert kilde analitik ve sayısal oturmalar için hata oranları (elastik oturma)

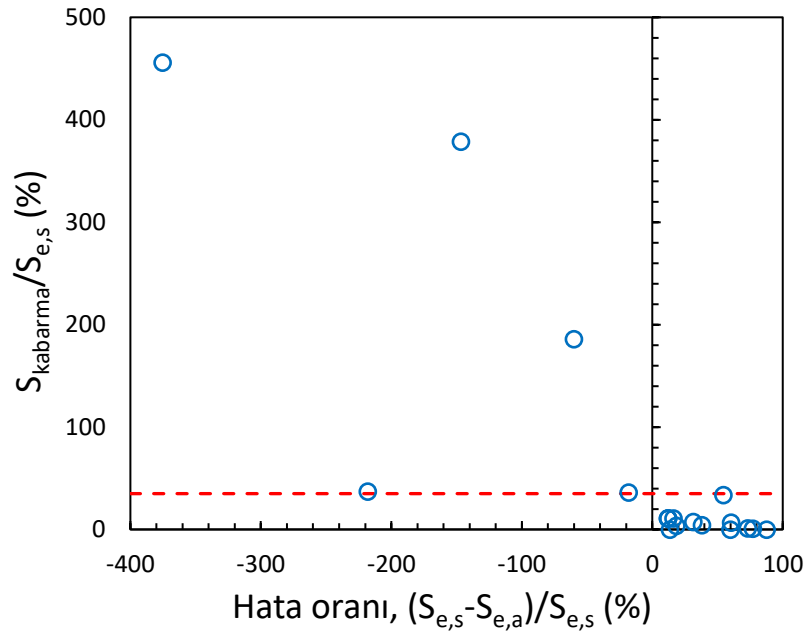
Hem yumuşak hem de sert kilde analitik ve sayısal elastik oturmalar arasında oldukça büyük farklar olabilmektedir. Analitik yaklaşımda, yapısal gerilme, temel genişliği ve zeminin elastisite modülü en etkili parametre iken, bu parametrelerin oturma sonucuna lineer bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Fakat, sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar, bu parametrelerin oturma sonuçları üzerinde daha karmaşık bir etkisi olduğunu göstermektedir. Sayısal yöntemler, yapısal gerilme sonucunda oluşan elastik oturmaları belirlerken etki derinliğini de dikkate almaktadır. Ayrıca, temel kazısı sırasındaki yük boşaltması (kabarma) ve yeniden yüklemenin elastik oturma üzerinde

önemli bir etkisinin olduğu düşünülmektedir. Sayısal analizlerin yapılmadığı durumlarda, elastik oturmaların analitik olarak büyük hesaplanması güvenli bir yaklaşım olarak kabul edilebilir. Fakat gerçekte daha büyük elastik oturmanın olması durumunda mühendislik problemleriyle karşılaşılabilir.

Analitik ve sayısal elastik oturmaların değerlendirilmesi sonucu, temel kazı derinliğinin önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Temel derinliği  $D_f < 3m$  iken, sayısal elastik oturma analitik oturmadan daha büyük olmaktadır. Bu durumda, sonlu elemanlar yöntemi, yapısal gerilmenin zemin otamındaki dağılımına göre (etki derinliği) oturmaları hesaplamaktadır.  $D_f > 3m$  olduğunda, hem yumuşak kil hem de sert kil vakalarında zemindeki kabarmanın elastik oturmaya oranı ( $S_{kabarma}/S_{e,s}$ ) %35'den büyük olmaktadır (Şekil 4.40 ve Şekil 4.41). Aynı zamanda, zeminin kabarma indisi ( $C_s$ ) ile sıkışma indisinin ( $C_c$ ) birbirine oranı yumuşak kilde  $C_s/C_c = \%25$ , sert kilde  $C_s/C_c = \%29$  olmaktadır. Bu durumda sonlu elemanlar yöntemi elastik oturmayı analitik yöntemden daha az hesaplamaktadır.  $D_f > 3m$  olduğu durumlarda, zemindeki kabarma (şişme) ve yeniden yükleme (oturma) olaylarının zeminin gerilme-deformasyon davranışını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle, sayısal çözümün olmadığı durumda, sadece analitik hesapla elastik oturmalar belirlenecek olursa,  $D_f > 3m$  iken güvenli tarafta kalınırken,  $D_f < 3m$  olması halinde elastik oturmanın gerçekten daha az hesaplanacağı ve güvensizlik oluşturacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.40. Yumuşak kilde hata oranlarının elastik deformasyonlarla kıyaslanması



Şekil 4.41. Sert kilde hata oranlarının elastik deformasyonlarla kıyaslanması

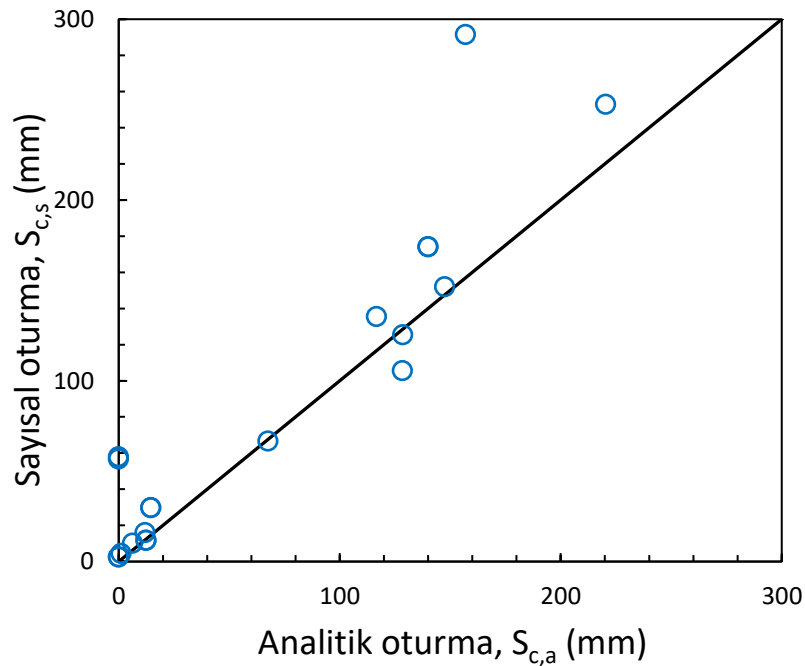
#### 4.4.3. Konsolidasyon oturmaları

Analitik tahminler ile PLAXIS 3D simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak yumuşak ve sert kil durumları için birincil konsolidasyon oturmasındaki yüzde hatayı göstermektedir. Hata aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

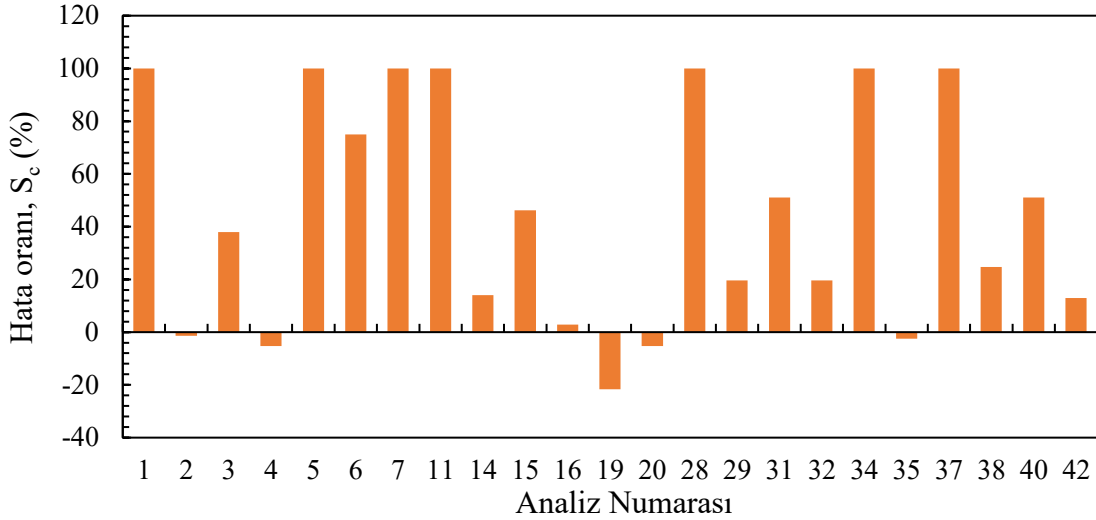
$$\%Hata S_c = \frac{S_{c_s} - S_{e_a}}{S_{c_s}} \times 100 \quad (4.10)$$

Yumuşak kilde, analitik olarak tahmin edilen konsolidasyon oturmaları 0 ile 220.3 mm arasında değişirken, ortalama 57.4 mm olmuştur. PLAXIS 3D'den elde edilen sayısal sonuçlar ise 2.5 ile 291.6 mm arasında değişmiş ve ortalama 74.0 mm olmuştur (Şekil 4.42). Grafikte gözlemlenen dağılım, çoğu vakanın 1:1 çizgisi boyunca genel bir eğilim izlemesine rağmen, birkaç vakanın önemli ölçüde sapma gösterdiğini belirtmektedir. Bu sapmalar, özellikle sıg yük uygulamalarında veya analitik yöntemin aşırı gözenek basıncı dağılımını ve 3D akış yollarını tam olarak temsil edemediği durumlarda belirgindir. Analitik oturma sıfır ancak sayısal oturma önemli olan vakalar (örneğin, Vakalar 28, 34, 37), analitik olarak önemli bir gerilme artışı varsayılmadığında ancak sayısal simülasyonda yakalandığında basitleştirilmiş konsolidasyon formülünün sınırlarını yansıtmaktadır. Bu karşılaştırma, analitik konsolidasyon tahminlerinin yumuşak

killerdeki gerçek saha davranışını hafife alabileceğini vurgulamakta ve daha gerçekçi oturma değerlendirmeleri için bu tür tahminlerin sayısal modelleme ile tamamlanmasının önemini vurgulamaktadır. Şekil 4.43'teki çubuk grafik, yumuşak kil vakaları için konsolidasyon oturmanındaki yüzde hatasını, analitik ve PLAXIS 3D sonuçlarını karşılaştırarak göstermektedir. Analitik yöntem, birçok durumda, özellikle 1, 5, 7, 11, 28, 34 ve 37 numaralı durumlarda, sıfır oturma öngörerek negatif net basınç,  $q_{net} < 0$  nedeniyle oturmanı önemli ölçüde hafife almıştır, oysa sayısal yöntem önemli konsolidasyon davranışını yakalamıştır. Bu durumlar %100 hata göstererek, düşük veya kaldırma yükü altında yumuşak doymuş killerde analitik yöntemin sınırlarını ortaya koymaktadır. Öte yandan, 2, 4, 20 ve 35 gibi vakalarda yöntemler arasında  $\pm\%5$ 'in altında hata marjları ile yakın bir uyum görülmüştür. Tüm vakalarda ortalama hata  $\%+39.8$  olup, karmaşık gözenek basıncı dağılımını ve gecikmeli deformasyon etkilerini yansıtamama nedeniyle analitik tahminlerde genel bir az tahmin eğilimi olduğunu göstermektedir. Bu durum, yumuşak kil ortamlarında doğru oturma değerlendirmesi için gelişmiş sayısal araçların kullanılmasının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.42. Yumuşak kilde analitik ve sayısal oturmaların kıyaslanması (konsolidasyon oturması)

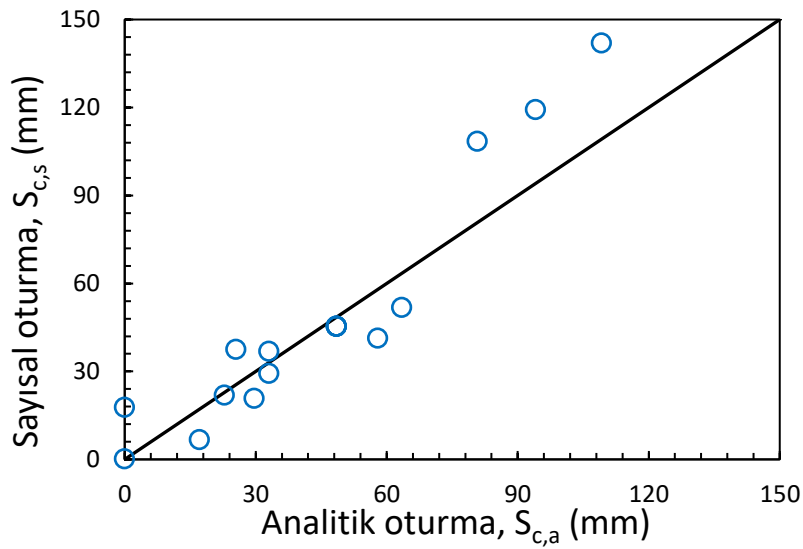


Şekil 4.43. Yumuşak kilde analitik ve sayısal oturmalar için hata oranları (konsolidasyon oturması)

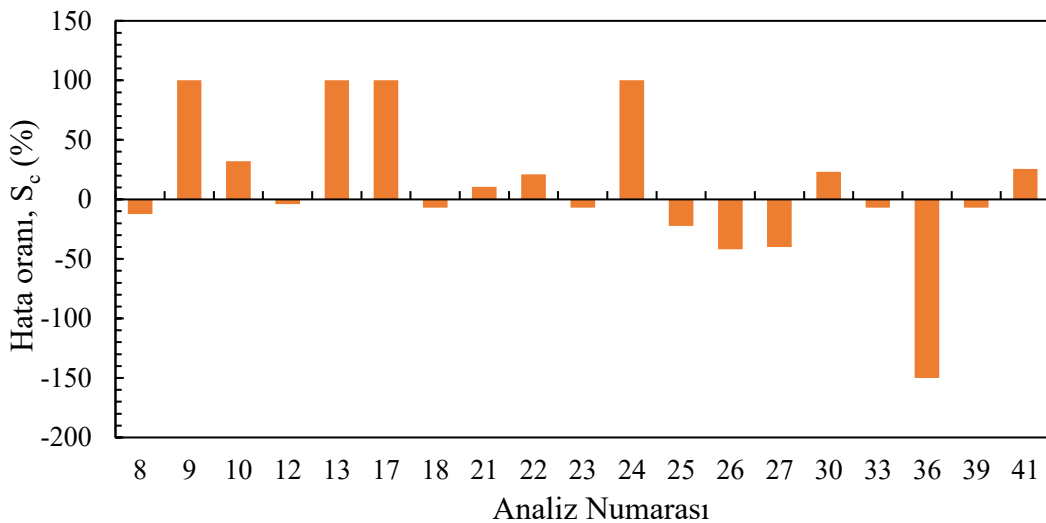
Şekil 4.44, sert kil için analitik olarak hesaplanan konsolidasyon oturmaları ( $S_{c,a}$ ) ile PLAXIS 3D sonuçlarını ( $S_{c,s}$ ) karşılaştırmaktadır. Veriler genel olarak 1:1 referans çizgisi boyunca hizalanarak kabul edilebilir bir uyum gösterirken, bazı durumlarda belirgin sapmalar gözlemlenmektedir. Analitik oturmalar 0.0 mm ile 109.2 mm arasında değişirken (ortalama: 40.0 mm), sayısal tahminler 0.2 mm ile 142.0 mm arasında değişmektedir (ortalama: 42.9 mm). Birkaç durumda, PLAXIS oturma biraz düşük tahmin etmekte (örneğin Vaka 8, 12, 18, 25), daha derin veya ağır yüklü durumlarda ise (örneğin Vaka 22 ve 30) yüksek tahmin görülmektedir. Buna karşılık, sayısal sonuçlar sıfır olmamasına rağmen bazı analitik değerler sıfırdır (örneğin, Vaka 9, 13, 24), bu da düşük net basınç veya doğrusal olmayan sertlik davranışı koşullarında el hesaplamalarının sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu, analitik yöntemlerin hızlı tahminler sağlayabileceğini, ancak PLAXIS 3D gibi sayısal araçların sert kohezyonlu zeminlerdeki karmaşık konsolidasyon tepkilerini yakalamak için daha uygun olduğunu doğrulamaktadır.

Sert kilde, analitik olarak hesaplanan konsolidasyon oturmaları 0.0 mm ile 109.2 mm arasında değişirken (ortalama 40.0 mm), PLAXIS sayısal sonuçları 0.2 mm ile 142.0 mm arasında değişmiştir (ortalama 42.9 mm), Şekil 4.44'te gösterildiği gibi. Dağılım grafiği genel olarak analitik ve sayısal değerler arasında yakın bir uyum olduğunu göstermektedir, ancak sayısal oturmalar genellikle analitik tahminleri aşmaktadır. Hata oranları (Şekil 4.45)  $-150.1\%$  (Vaka 36) ile  $+100\%$  (Vaka 9, 13, 17, 24) arasında önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. En yüksek pozitif hatalar, analitik yöntemin sıfır oturma öngördüğü ( $S_{c,a} = 0$ ) vakalara karşılık gelir, ancak PLAXIS, zamana bağlı

modelleme yetenekleri sayesinde önemli bir konsolidasyon tespit etmiştir. Tersine, Vakalar 25, 26 ve 27'deki gibi dikkate değer negatif hatalar, analitik yaklaşımın oturmanı fazla tahmin ettiği durumları gösterir; bu durum, muhtemelen zemin drenajı veya sertliği hakkında yanlış varsayımlardan kaynaklanmaktadır. Ortalama olarak, sert kil, yumuşak kile kıyasla daha küçük bir hata aralığı ve daha düşük ortalama hata (+10.9%) sergilemiştir, bu da el ve sayısal yöntemler arasında daha iyi tutarlılık olduğunu göstermektedir. Bu gözlemler, özellikle gecikmiş oturma davranışını yakalamada klasik yöntemlerin sınırlarını ortaya koymaktadır. PLAXIS'in gerçekçi drenaj koşullarını, inşaat aşamalarını ve zemin parametrelerini simüle etme yeteneği, onu kohezyonlu zeminlerde uzun vadeli deformasyonu değerlendirmek için daha güvenilir bir araç haline getirmektedir.



Şekil 4.44. Sert kilde analitik ve sayısal oturmaların kıyaslanması (konsolidasyon oturması)



Şekil 4.45. Sert kilde analitik ve sayısal oturmalar için hata oranları (konsolidasyon oturması)

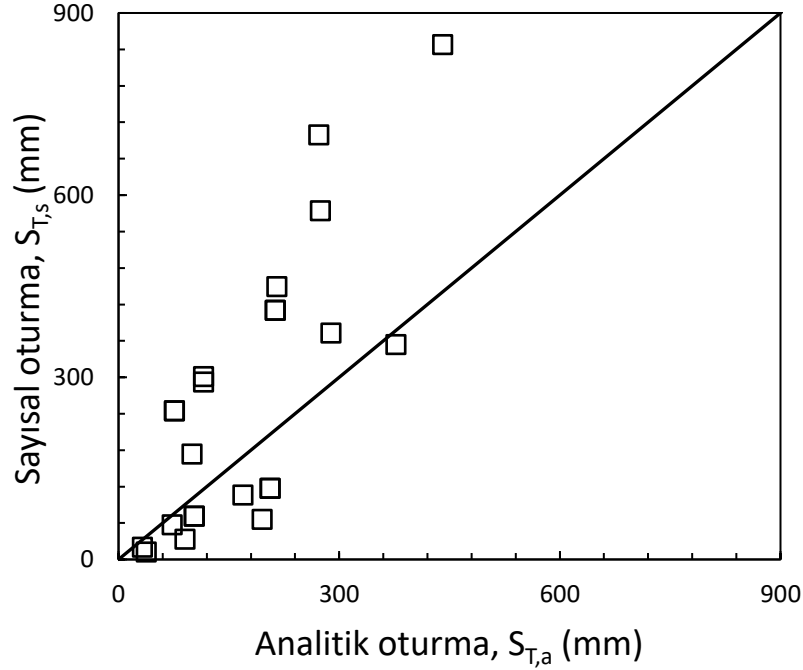
#### 4.4.4. Toplam oturmalar

Analitik tahminler ile PLAXIS 3D simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak yumuşak ve sert kil durumları için toplam oturmadaki ( $S_T$ ) yüzde hatayı göstermektedir. Hata aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

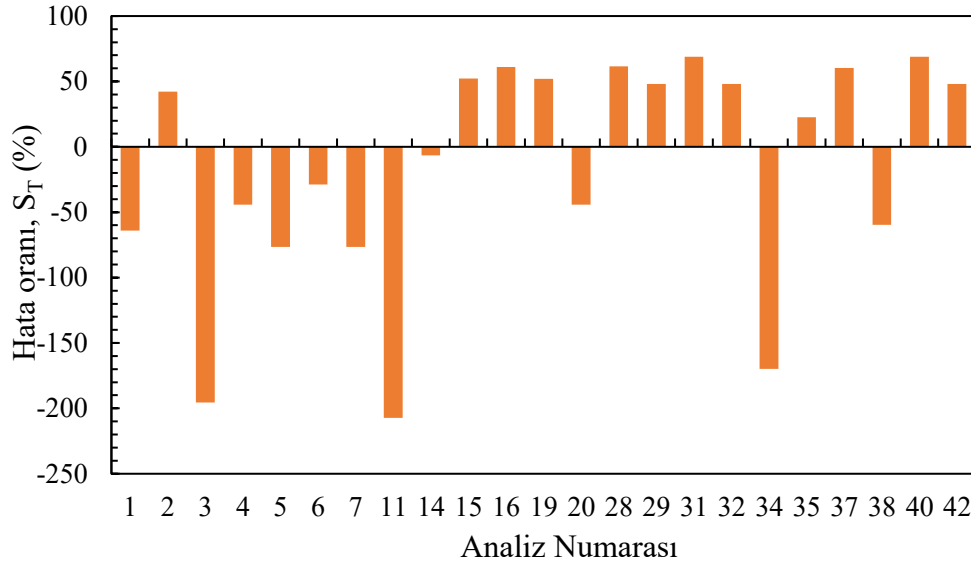
$$\%Hata S_T = \frac{S_{T_s} - S_{T_a}}{S_{T_s}} \times 100 \quad (4.11)$$

Şekil 4.46, yumuşak kilde %90 konsolidasyondaki ( $S_{T,s}$ ) toplam oturmanın PLAXIS 3D tahminlerinin genellikle analitik olarak hesaplanan değerlerden ( $S_{T,a}$ ) daha yüksek olduğunu ve birçok veri noktasının 1:1 çizgisinin oldukça üzerinde yer aldığını ortaya koymaktadır. Analitik oturmalar 32.7 mm ila 440.9 mm (ortalama: 173.8 mm) arasında değişirken, sayısal sonuçlar 12.3 mm ila 847.8 mm (ortalama: 262.9 mm) arasında daha geniş bir aralığa yayılmaktadır. Bazı durumlarda, özellikle  $S_{T,a}$  150 mm'nin altında olduğunda, PLAXIS tahminleri analitik tahminlerin iki katından fazladır. Bu tutarsızlık, yumuşak kohezyonlu zeminlerde karmaşık zamana bağlı davranışı yakalamada basitleştirilmiş yöntemlerin sınırlarını vurgulamakta ve daha gerçekçi ve daha güvenli oturma tahminleri elde etmede sayısal modellemenin değerini vurgulamaktadır.

Yumuşak kilde, toplam oturma hataları geniş bir aralıkta (Şekil 4.47) değişmektedir; Vaka-14 gibi bazı vakalar iyi bir uyum gösterirken (-%6.6), Vaka-11 (-%207.3), Vaka-3 (-%195.5) ve Vaka-34 (-%169.8) gibi diğerleri analitik yöntem tarafından büyük ölçüde düşük tahminler göstermektedir. Pozitif hatalar, el yöntemlerinin oturma %60'ın üzerinde eksik tahmin ettiği Vaka-31 ve Vaka-40 gibi vakalarda da ortaya çıkmaktadır. Bu tutarsızlıklar, doymuş yumuşak killerde karmaşık, zamana bağlı davranış ve konsolidasyonu yakalayamayan analitik modellerdeki basitleştirilmiş varsayımlardan kaynaklanmaktadır.



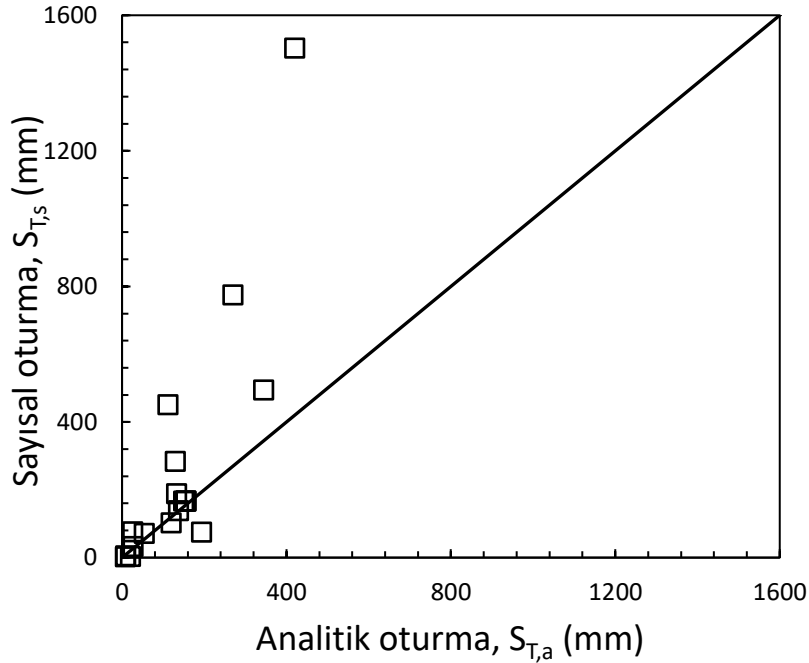
Şekil 4.46. Yumuşak kilde analitik ve sayısal oturmaların kıyaslanması (Toplam oturma)



Şekil 4.47. Yumuşak kilde analitik ve sayısal oturmaların kıyaslanması (Toplam oturma)

Benzer şekilde (Şekil 4.48), sert kilde analitik olarak ( $S_{T,a}$ ) ve PLAXIS 3D simülasyonlarından %90 konsolidasyonda ( $S_{T,s}$ ) elde edilen toplam oturma değerlerini karşılaştırmaktadır. Yumuşak kilden farklı olarak, veri noktaları 1:1 referans çizgisi etrafında daha dağınıktır ve bazı durumlarda her iki yöntemle de düşük, bazılarında ise yüksek tahminler yapılmıştır. İstatistiksel olarak, analitik oturmalar 8.8 mm ile 420.4 mm arasında değişmekte olup ortalaması 138.3 mm'dir; PLAXIS tarafından tahmin edilen oturmalar ise 2.9 mm ile 1503.0 mm arasında değişmekte olup ortalaması 256.7 mm'dir. Bazı durumlarda değerler yakın olsa da (örneğin  $S_{T,a} \approx S_{T,s}$ ), özellikle  $S_{T,a}$ 'nın 130-160 mm

arasında olduğu durumlarda,  $S_{T,a} = 420.4$  mm ve  $S_{T,s} = 1503.0$  mm gibi bazı aykırı değerler önemli farklılıklara işaret etmektedir. Bu farklılıklar, analitik yöntemlerin tipik yükleme altındaki sert killer için kabul edilebilir tahminler sağlayabildiğini, ancak daha karmaşık senaryolarda doğrusal olmayan deformasyonu veya derin stres transferini yakalamakta başarısız olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, sayısal analiz, daha az sıkıştırılabilir zeminler için bile oturma tahminlerini doğrulamak için kritik bir araç olmaya devam etmektedir.

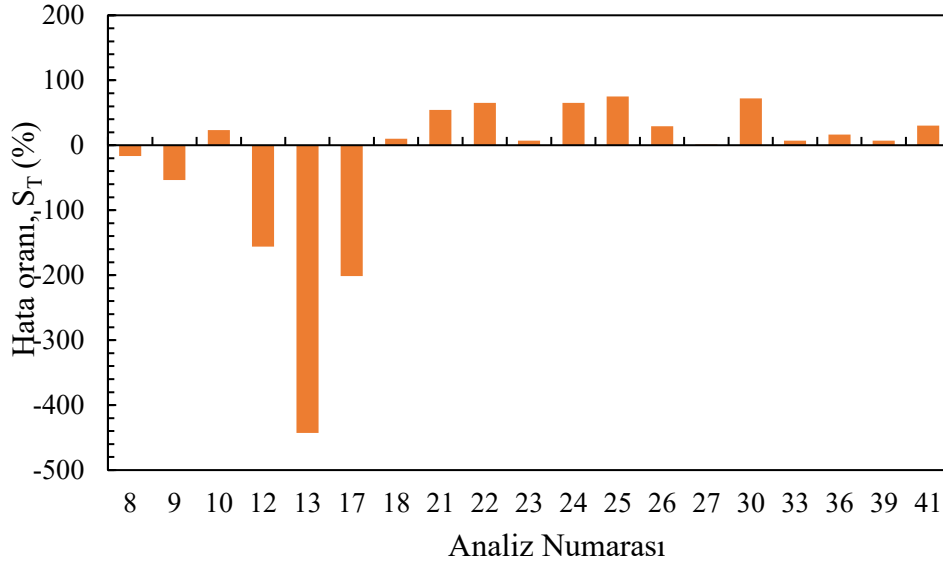


Şekil 4.48. Sert kilde analitik ve sayısal oturmaların kıyaslanması (Toplam oturma)

Sert killerde (Şekil 4.49), Vaka-13'te  $-%442.7$ 'ye, Vaka-17'de  $-%201.2$ 'ye ve Vaka-12'de  $-%156.0$ 'ya ulaşan aşırı düşük tahminlerle daha da geniş bir hata dağılımı ortaya çıkmaktadır. Bu yüksek negatif hatalar, analitik yöntemlerin bazı konfigürasyonlarda uzun vadeli oturmaya büyük ölçüde düşük tahmin ettiğini göstermektedir. Diğer uçta, Vaka-25 gibi vakalar  $75.2$ 'lik pozitif bir hata sergileyerek analitik modelin deformasyonu olduğundan fazla tahmin ettiğini göstermektedir. Yaklaşık  $10$ 'luk ortalama hataya rağmen, dağılım bu büyük aykırı değerlerle büyük ölçüde çarpıktır ve analitik tahminlerin tutarsızlığını vurgulamaktadır.

Genel olarak, her iki veri seti de analitik yöntemlerin, özellikle daha derin temelerde veya karmaşık zemin profillerinde gerilme yeniden dağılımını, rijitlik kontrastlarını ve konsolidasyon aşamalarını güvenilir bir şekilde hesaba katma kapasitesinden yoksun olduğunu doğrulamaktadır. PLAXIS 3D, aşamalı inşaatı modelleyerek ve gerçekçi zemin-yapı etkileşimini yakalayıp daha doğru ve

muhafazakar oturma tahminleri sunar. Bu sonuçlar, özellikle kohezyonlu zeminleri içeren kritik geoteknik tasarımlarda analitik tahminleri doğrulamak veya değiştirmek için sayısal simülasyonların kullanılmasının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.49. Sert kilde analitik ve sayısal oturmalar için hata oranları (konsolidasyon oturması)

Çizelge 4.12, analitik ve PLAXIS 3D sonuçları karşılaştırılırken en yüksek toplam oturma hatalarını sergileyen yumuşak ve Sert kil koşullarından seçilen örnek vakaları içermektedir. Bu vakalar genellikle derin temeller ( $D_f = 6.0$  m) içermekle birlikte uygulanan gerilmeler, temel boyutları ve kil kalınlığı bakımından çeşitlilik göstermektedir. Tutarlı bir model, analitik tahminlere ( $S_{T,a}$ ) kıyasla PLAXIS toplam oturmalarının ( $S_{T,s}$ ) önemli ölçüde daha düşük olması ve bir vakada  $-207.3$  gibi büyük negatif hatalarla sonuçlanmasıdır. Bu tutarsızlık büyük ölçüde kazı sırasındaki belirgin kabarmadan kaynaklanmaktadır ve bazı örneklerdeki yükselme değerleri karşılık gelen elastik oturmaları aşmaktadır. Yükselme/elastik oturma oranlarının ( $S_{kabarma}/S_{e,a}$ )  $\%300$ 'ün üzerine çıkması, analitik yöntemin hesaba katamadığı güçlü geri tepme etkilerine işaret etmektedir. Ayrıca, PLAXIS'in hesapladığı etki derinlikleri genellikle çok daha derindir (örneğin, 40 m'nin üzerinde), bu da gerilme dağılımı modelinin basitleştirilmiş analitik varsayımdan daha kapsamlı olduğunu göstermektedir. Birkaç örnekte, PLAXIS ayrıca analitik beklentideki önemli birincil oturmalarla çelişen sıfıra yakın veya hatta negatif konsolidasyon oturmaları ( $S_{c,s}$ ) öngörmüştür. Bu uyumsuzluk - özellikle  $\%100$   $S_c$  hatası olan durumlarda - yumuşak killeri modellerken kabarma

etkilerini, gerçekçi rijitlik değişimlerini ve daha derin etki bölgelerini dahil etme ihtiyacını vurgulamaktadır.

**Çizelge 4.12.** Yumuşak ve sert kil için analitik ve sayısal oturma sonuçlarının özeti

Analiz numarası	$q_0$ (kPa)	$D_{su}$ (m)	B (m)	L/B	$D_f$ (m)	Zemin türü	% Hata $S_e$	% Hata $S_c$	% Hata $S_T$
1	50	10.4	5	5	6	Yumuşak Kil	-40.7	100.0	-64.0
2	50	36	5	5	0.8	Yumuşak Kil	69.4	-1.4	42.3
3	120	20.6	10.2	1	6	Yumuşak Kil	-238.1	38.0	-195.5
4	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	-51.8	-5.3	-44.2
5	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	-80.3	100.0	-76.5
6	110	36	5	5	6	Yumuşak Kil	-37.7	75.0	-28.7
7	95	6	15	2.9	6	Yumuşak Kil	-80.3	100.0	-76.5
8	250	6	9.9	4.8	6	Sert Kil	-18.1	-12.3	-16.4
9	50	6	5	3.1	3.1	Sert Kil	-59.9	100.0	-53.5
10	50	36	15	3	0	Sert Kil	13.7	32.1	23.4
11	50	36	5	1.5	6	Yumuşak Kil	-199.5	100.0	-207.3
12	275	36	15	1	6	Sert Kil	-218.0	-4.1	-156.0
13	50	6	10	1	6	Sert Kil	-375.3	100.0	-442.7
14	120	36	15	2.9	2.9	Yumuşak Kil	-19.4	14.0	-6.6
15	60	20.3	15	5	0	Yumuşak Kil	58.3	46.2	52.1
16	80	36	10.1	1	0	Yumuşak Kil	77.2	2.9	61.0
17	50	36	5	5	6	Sert Kil	-146.5	100.0	-201.2
18	275	21	10	3	3	Sert Kil	16.3	-6.8	10.0
19	120	20.4	5	2.9	1	Yumuşak Kil	74.7	-21.6	52.1
20	70	22.8	9.4	3.2	3.4	Yumuşak Kil	-51.8	-5.3	-44.2
21	500	6	5	3	6	Sert Kil	60.6	10.5	54.1
22	500	36	10	5	1.5	Sert Kil	73.2	21.1	65.2
23	275	21	10	3	3	Sert Kil	12.2	-6.8	7.0
24	50	6	15	5	3	Sert Kil	54.7	100.0	65.3
25	275	6	5	5	0	Sert Kil	87.9	-22.2	75.2
26	500	36	5	1	3	Sert Kil	38.1	-41.8	29.3
27	130	6	15	1.3	0.5	Sert Kil	18.7	-39.9	1.2
28	50	20.9	15	1	2.9	Yumuşak Kil	52.4	100.0	61.5
29	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	69.1	19.6	48.1
30	500	6	15	1	1.5	Sert Kil	77.1	23.1	72.0
31	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	71.2	51.0	68.8
32	50	6	10.1	2.9	0	Yumuşak Kil	69.1	19.6	48.1
33	275	21	10	3	3	Sert Kil	12.2	-6.8	7.0
34	50	36	13.8	5	6	Yumuşak Kil	-127.9	100.0	-169.8
35	120	6	10.2	5	2.9	Yumuşak Kil	35.2	-2.5	22.5
36	50	21	5	1	0	Sert Kil	60.1	-150.1	16.2
37	50	20.9	15	1	2.8	Yumuşak Kil	50.8	100.0	60.4
38	120	21	10	4.1	6	Yumuşak Kil	-74.6	24.7	-59.6
39	275	21	10	3	3	Sert Kil	12.2	-6.8	7.0
40	80	6	5	1	2.9	Yumuşak Kil	71.2	51.0	68.8
41	500	21	15	5	6	Sert Kil	31.6	25.6	30.3
42	120	16.5	12.7	2.8	0.5	Yumuşak Kil	62.9	12.9	48.0

Sert kil için, Vaka 9, Vaka 21 ve Vaka 23 gibi seçilmiş örnek vakalar, analitik ve sayısal tahminler arasındaki değişim hakkında fikir vermektedir. Düşük gerilimli, sığ temellerde (örneğin Vaka 9), analitik yöntem, analitik olarak yakalanamayan yüksek kazı geri tepmesi ( $S_{kabarma}/S_e \approx \%186$ ) nedeniyle oturmayı önemli ölçüde fazla tahmin etmiştir. Buna karşılık, yüksek yük ( $q_0 = 500$  kPa) ve derin temel ( $D_f = 6.0$  m) içeren Vaka 21, analitik yaklaşıma tam olarak yansıtılmayan daha büyük yapısal sıkıştırma ve konsolidasyon etkileri nedeniyle PLAXIS'in çok daha büyük oturmalar öngörmesiyle  $+\%54.1$ 'lik bir hata göstermiştir. Vaka 23, sınırlı kabarma ve dengeli gerilme koşullarıyla desteklenen analitik ve PLAXIS tahminlerinin yakından eşleştiği (hata  $\approx +\%7.0$ ) ılımlı ve iyi hizalanmış bir senaryoyu temsil etmektedir.

Bu karşılaştırmalar, el hesaplamalarının kabarmanın hakim olduğu koşullarda oturmaları olduğundan fazla tahmin ederken ağır yüklü temellerde olduğundan az tahmin edebileceğini göstermektedir. Farklılıklar, PLAXIS 3D'nin gerilme yeniden dağılımını, geri tepmeyi ve zamana bağlı konsolidasyonu nasıl daha iyi yakaladığını ve özellikle karmaşık yükleme ve zemin koşulları altında geoteknik değerlendirme için daha güvenilir bir çerçevesi sunduğunu vurgulamaktadır.

Elastik oturmanın toplam oturmaya katkısının karşılaştırmalı analizi analitik sonuçlar için Şekil 4.3'te ( $S_{e,a}/S_{T,a}$ ) ve PLAXIS 3D simülasyonları için Şekil 4.12'de ( $S_{e,s}/S_{T,s}$ ) gösterilmiştir, her ikisi de sırasıyla Bölüm 4.1 ve Bölüm 4.2.2'de ele alınmıştır. Her iki grafikteki genel eğilim, elastik oturmanın neredeyse tüm durumlarda toplam oturmanın önemli bir bölümünü oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle, analitik oran ( $S_{e,a}/S_{T,a}$ ) ortalama  $\%74.4$  ile  $\%32.7$  ve  $\%100$  arasında değişirken, sayısal oran ( $S_{e,s}/S_{T,s}$ )  $\%80.0$  ile biraz daha yüksek bir ortalama ile  $\%47.4$  ve  $\%100$  arasında değişmektedir.

Çubuk grafik gözlemlerinden, analitik yöntemin, muhtemelen basitleştirilmiş formüllerde yakalanan sınırlı gerilme yeniden dağılımı nedeniyle, elastik katkıyı bazen olduğundan fazla tahmin ettiği görülmektedir (örneğin, Vaka 2, Vaka 29). Buna karşılık, sayısal sonuçları (PLAXIS), kazı kaynaklı kabarma, aşamalı yükleme ve 3D gerilme yollarını hesaba katarak daha gerçekçi zemin davranışını yansıtmaya eğilimindedir; bu da duruma bağlı olarak elastik oturma tahminlerinde artışa veya azalmaya yol açabilir.

Özellikle, her iki yöntem de bazı durumlarda (örneğin,  $S_e/S_T = \%100$  olan Vaka 1 ve Vaka 11) birbirine yakinken, diğerlerinde daha büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Vaka 2'de analitik yöntem elastik katkıyı sadece  $\%32.7$  olarak verirken PLAXIS bunu  $\%61.6$  olarak tahmin etmektedir. Benzer şekilde, Vaka 36'da analitik değer  $\%37.7$  kadar düşükken, sayısal sonuç  $\%79.1$ 'dir. Bu farklılıklar, elastik oturma oranlarının zemin

rijitliğine, temel geometrisine ve sayısal simülasyonlar tarafından daha kapsamlı bir şekilde yakalanan yükselme etkilerine olan duyarlılığını vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, analitik yöntemler basitleştirilmiş bir genel bakış sağlarken, PLAXIS 3D oturma davranışına ilişkin daha incelikli bir anlayış sunmaktadır. Gözlemlenen farklılıklar, özellikle geri tepme ve konsolidasyon etkilerinin önemli olduğu yumuşak ve sert kohezyonlu zeminlerde analitik tahminlerin sayısal modelleme ile doğrulanması ihtiyacını güçlendirmektedir.

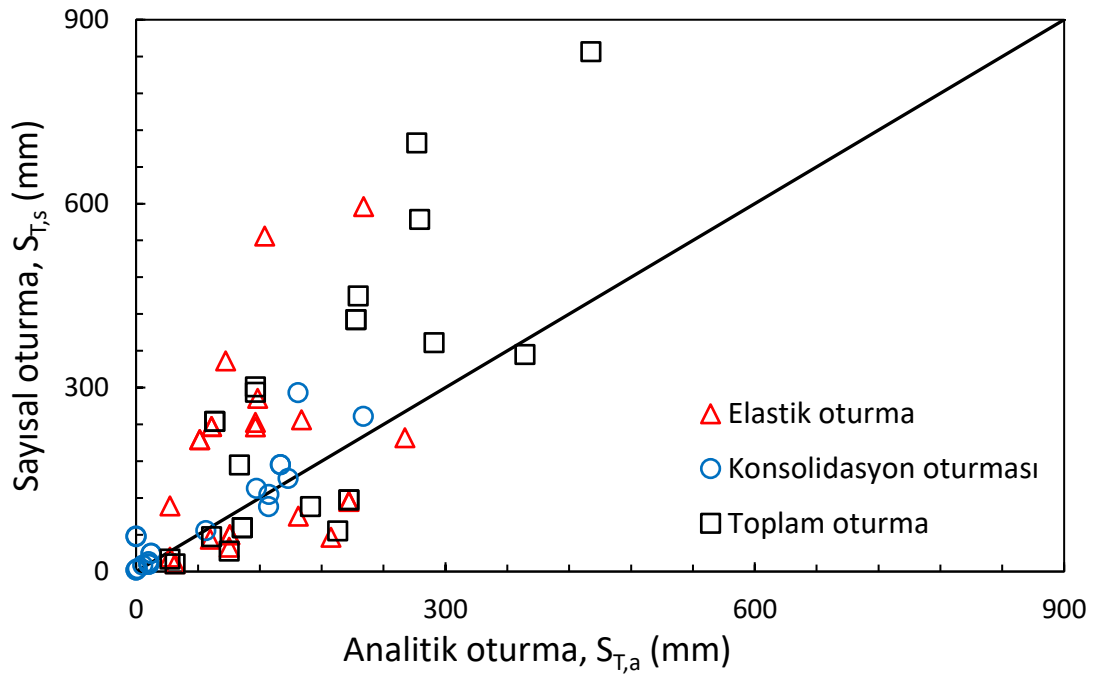
#### 4.4.5. Analitik ve sayısal oturma sonuçlarının özeti

Bu bölümde, analitik yöntemler ve PLAXIS 3D simülasyonları kullanılarak hem yumuşak hem de sert killer üzerindeki sığ temellerin oturma davranışı değerlendirilmiştir. Her iki zemin türü için de analizler elastik oturma ( $S_e$ ), birincil konsolidasyon ( $S_c$ ) ve toplam oturmaya ( $S_t$ ) odaklanmış ve yöntemler arasında yüzde hataları hesaplanmıştır. Yumuşak kilde PLAXIS, zamana bağlı konsolidasyon ve kabarma etkilerini yakalama kabiliyeti nedeniyle sürekli olarak daha yüksek toplam oturmalar tahmin ederken, sert kilde sonuçlar, kabarma etkisine ve temel derinliğine bağlı olarak yakın hizalamadan önemli tutarsızlıklara kadar daha çeşitlidir.

Yumuşak kilde, kazı sırasındaki yükselmenin elastik oturma tahminlerini güçlü bir şekilde etkilediği ve analitik yöntemlerde hesaba katılmadığında büyük negatif hatalara (genellikle  $>100\%$ ) yol açtığı bulunmuştur. Konsolidasyon oturmaları da birçok durumda  $S_c = 0$  varsayımları nedeniyle analitik olarak eksik tahmin edilirken, PLAXIS konsolidasyon davranışını dinamik olarak modelleyerek daha gerçekçi sonuçlar sağlamıştır. Sert killerde, bazı durumlarda (örneğin, Vaka 13, 17) kabarmanın neden olduğu  $S_e$  değerinin düşük tahmin edildiği görülmüştür, ancak kabarmanın minimum olduğu durumlarda, analitik ve sayısal sonuçlar iyi bir uyum içinde olmuştur. Hata analizi, analitik  $S_e$ 'nin kazı geri tepmesi ve gerilme yeniden dağılımının ihmal edilmesi nedeniyle sığ temellerde sıklıkla olduğundan fazla, derin temellerde ise olduğundan az tahmin edildiğini göstermiştir. Seçilen vakalar (örneğin, Vaka 9, 21, 23) yeraltı suyu seviyesinin, temel geometrisinin ve etki derinliğinin oturma doğruluğunu nasıl önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Sırasıyla yumuşak ve sert killer için analitik ve sayısal oturma sonuçlarını karşılaştıran dağılım grafikleri (Şekil 4.50) sunulmakta olup 1:1 referans çizgisi mükemmel uyumu göstermektedir. Yumuşak kil için çoğu veri noktası çizginin üzerine

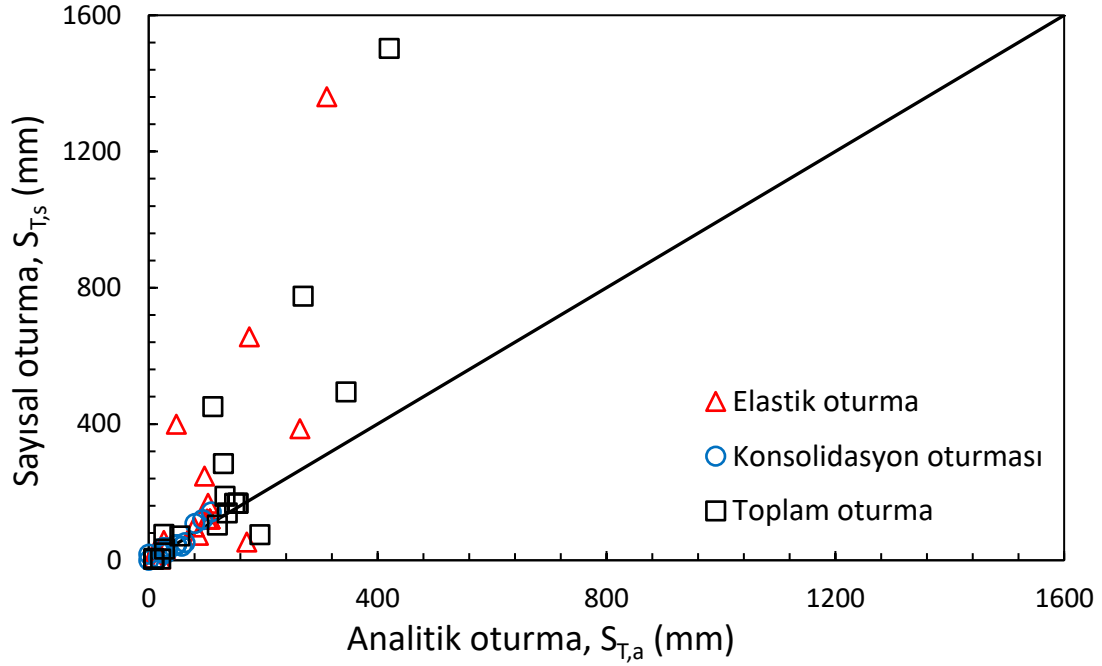
düşmektedir, bu da PLAXIS 3D tarafından tahmin edilen sayısal toplam oturmaların ( $S_{t,s}$ ) genellikle analitik karşılıklarından ( $S_{t,a}$ ) daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum özellikle zamana bağlı konsolidasyon etkilerinin baskın olduğu daha derin veya daha ağır yüklü temellerde belirgindir. Elastik oturmalar ( $S_e$ ) yöntemler arasında daha iyi bir uyum göstermektedir, bu da kısa vadeli davranışın daha tutarlı bir şekilde yakalandığını, uzun vadeli oturma ise analitik yaklaşımlarda hafife alındığını göstermektedir.



Şekil 4.50. Yumuşak kil için analitik ve sayısal oturma sonuçlarının karşılaştırılması

Sert killerde de aynı eğilim devam etmektedir (Şekil 4.51). Toplam oturma noktalarının çoğu köşegenin üzerinde yer almaktadır, bu da PLAXIS'in daha az sıkıştırılabilir zeminlerde bile daha büyük deformasyon öngördüğünü göstermektedir. Bu durum, özellikle sayısal toplam oturmaların önemli ölçüde daha yüksek olduğu 30 ve 41 numaralı vakalar gibi yüksek yüklerin ve derin temellerin olduğu durumlarda geçerlidir. Sayısal elastik oturmalar ( $S_{e,s}$ ), PLAXIS'te modellenen ancak el hesaplamalarında bulunmayan kazı kaynaklı kabarma ve karmaşık gerilme yeniden dağılımı nedeniyle analitik değerleri de sıklıkla aşmaktadır. Bu farklılıklar, basitleştirilmiş analitik formüllerin tam zemin-yapı etkileşimini ve zamana bağlı davranışını yakalamadaki sınırlamalarını vurgulamaktadır.

Bu rakamlar birlikte, analitik yöntemler özellikle elastik oturma için hızlı ön tahminler sunabilirken, PLAXIS gibi sayısal modellerin gerçekçi saha koşulları altında toplam oturmayı doğru bir şekilde tahmin etmek için gerekli olduğunu göstermektedir. Bu, özellikle gecikmiş konsolidasyon ve aşamalı inşaat etkilerinin oturma davranışını önemli ölçüde etkilediği yumuşak veya sert kohezyonlu zeminleri içeren projeler için kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.51. Sert kil için analitik ve sayısal oturma sonuçlarının karşılaştırılması

Genel olarak bulgular, analitik yöntemlerin -ön değerlendirmeler için yararlı olmakla birlikte- özellikle yumuşak killerde ve derin sert killerde oturma davranışını genellikle aşırı basitleştirdiğini vurgulamaktadır. PLAXIS 3D, kazı kabarması, aşamalı yükleme ve zamana bağlı konsolidasyon gibi faktörleri entegre ederek zemin tepkisinin daha doğru bir temsilini sunmaktadır. Çalışma, özellikle karmaşık yükleme koşulları, yüksek yeraltı suyu tabloları veya derin temeller altında, kohezyonlu zeminlerde güvenilir oturma tahmini için sayısal doğrulamanın gerekli olduğu sonucuna varmaktadır. Tasarım doğruluğu ve güvenliği için, sahaya özgü ayrıntılı davranışın yakalanması gerektiğinde sayısal modellemeye öncelik verilmelidir.

#### 4.5. Optimizasyon Sonuçları

Bu bölümün amacı, toplam oturmayı en aza indiren en uygun tasarım ve zemin parametreleri kombinasyonlarını belirlemektir. Önceki analizlerden elde edilen sayısal ve analitik veriler kullanılarak, iki ana model için bir optimizasyon çalışması yapmak üzere Design-Expert yazılımı kullanılmıştır:

- Analitik Hesaplama Sonuçları
- PLAXIS 3D - %90 Konsolidasyon Aşaması

Her iki durumda da amaç, öngörülen toplam oturmayı (mm) en aza indirmektir. Optimizasyon süreci, daha önce tartışılan özel 42 aşamalı faktöriyel tasarımda kullanılan faktör aralıklarının aynısını dikkate almıştır. Bunlar arasında, hem yumuşak hem de sert kil senaryolarında uygulanan gerilme seviyeleri ( $q_0$ ), temel genişliği (B), en-boy oranı (L/B), gömme derinliği ( $D_f$ ), yeraltı su seviyesi ( $D_{su}$ ) ve zemin türü yer almıştır.

Her model bağımsız olarak optimize edilmiş ve en düşük tahmini oturmaları veren en iyi girdi kombinasyonları, her bir çözümün optimizasyon hedefini ne kadar iyi karşıladığını gösteren arzu edilebilirlik puanlarıyla birlikte kaydedilmiştir (1.0'a yakın puanlar mükemmel sonuçları temsil etmektedir).

##### 4.5.1. Analitik toplam oturma

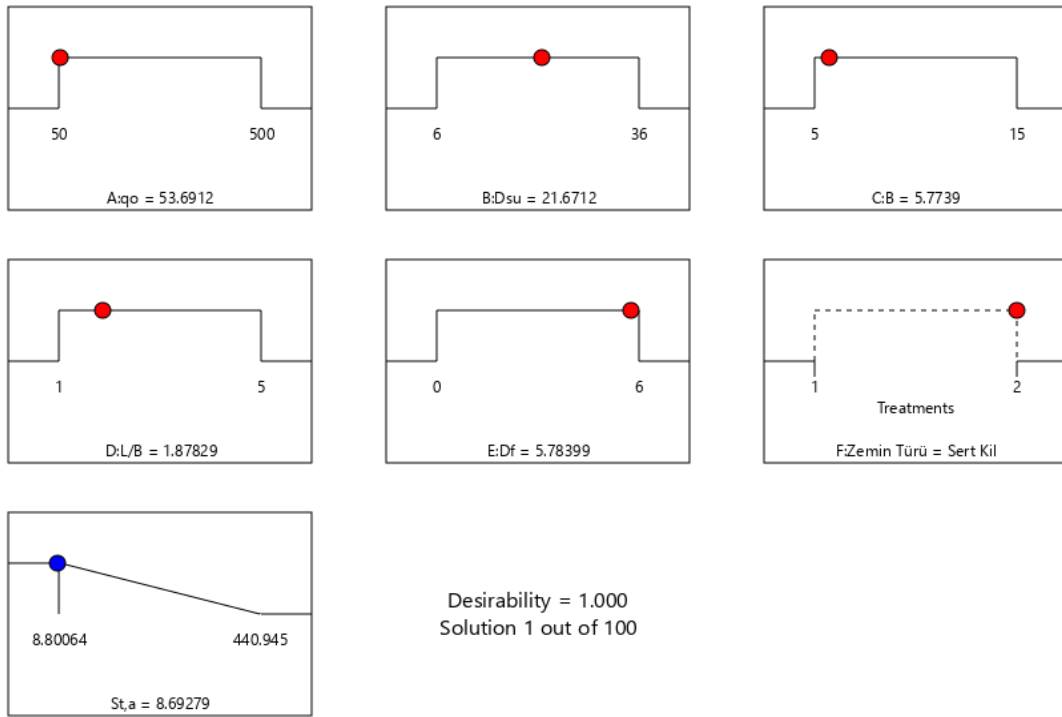
Bu alt bölümde, analitik hesaplama sonuçlarından elde edilen regresyon modeline dayalı olarak minimum toplam oturmaya neden olacak girdi parametrelerinin optimum kombinasyonunu belirlemek için Design-Expert yazılımı kullanılmıştır. Amaç açıkça tanımlanmıştır: yapısal gerilme, temel boyutu (B ve L/B), gömme derinliği ( $D_f$ ), yeraltı suyu seviyesi ( $D_{su}$ ) ve zemin kıvamı gibi temel tasarım parametrelerini faktöriyel tasarım kurulumunda kullanılan önceden tanımlanmış sınırlar dahilinde ayarlayarak oturmayı (mm) en aza indirmek.

Optimizasyon süreci, tasarım uzayındaki tüm olası kombinasyonları değerlendirmiş ve her biri öngörülen bir oturma değerine ve 0 (en az istenen) ile 1 (en çok istenen) arasında değişen bir istenirlik puanına sahip 100 aday çözüm üretmiştir. En çok arzu edilen çözüm olan Çözüm 1, sert kil senaryosu için elde edilmiş ve 8.693 mm'lik en düşük tahmini toplam oturmayı üreterek 1.000 arzu edilebilirlik puanına ulaşmış ve optimizasyon hedefiyle mükemmel bir eşleşme göstermiştir (Çizelge 4.13).

**Çizelge 4.13.** Optimum tasarım parametreleri

Parametre	Optimum Değer
Gerilme (kPa)	53.69
YASS (m)	21.67
Temel Genişliği (m)	5.77
L/B Oranı	1.87
Derinlik ( $D_f$ , m)	5.78
Zemin türü	Sert Kil
Öngörülen Oturma	8.69 mm
Arzu Edilirlik Puanı	1.000

Optimum durum Şekil 4.52'de görsel olarak temsil edilmektedir; burada her bir faktörün ayarı, seçilen değerlerin istenen hedefe ne kadar yakın olduğunu gösteren bir rampa diyagramında gösterilmektedir.

**Şekil 4.52.** Faktör ayarlarını ve öngörülen oturmayı gösteren rampa çizimi (elle hesaplama)

Yumuşak kil ve sert kil olmak üzere iki farklı zemin koşulu için uygulanan gerilme ( $A: q_0$ ) ve yeraltı suyu tablası derinliği ( $B: D_{su}$ ) arasındaki etkileşimin hem oturma tepkisi hem de arzu edilebilirlik puanları üzerindeki etkilerini gösteren kontur grafiklerini (Şekil 4.53) sunmaktadır. Yumuşak kil durumunda (Şekil 4.53), Yumuşak Kil olarak etiketlenmiştir, oturma değerleri artan stres ve daha sık yeraltı suyu koşulları ile büyük ölçüde artmaktadır.  $q_0$  400 kPa'yı aştığında ve  $D_{su}$  12 m'nin altına düştüğünde, öngörülen oturmalar 1000 mm'yi aşmaktadır bu da yumuşak kilin yüksek oranda

sıkıştırılabilir doğasını vurgulamaktadır. Buna göre, bu bölgede arzu edilebilirlik puanı keskin bir şekilde düşmekte ve bu tür kombinasyonların optimize edilmiş tasarım için uygun olmadığını göstermektedir.

Buna karşılık, sert kil için yanıt (Şekil 4.54), Sert Kil olarak etiketlenmiştir) önemli ölçüde daha kararlı bir davranış sergilemektedir. Yüksek stres seviyeleri altında bile, öngörülen oturma düşük kalmaktadır tipik olarak 150 mm'nin altındadır. Ayrıca, arzu edilebilirlik konturları daha geniş bir elverişli bölge göstermekte ve çok çeşitli stres ve yeraltı suyu derinliği koşullarında nispeten yüksek puanları korumaktadır. Bu keskin zıtlık, sert killerin üstün yük taşıma kapasitesinin ve daha düşük sıkıştırılabilirliğinin altını çizmekte ve zemin sertliğinin oturmayı en aza indirmede ve sıkı temel tasarımında optimizasyon potansiyelini artırmada kritik bir rol oynadığını teyit etmektedir.

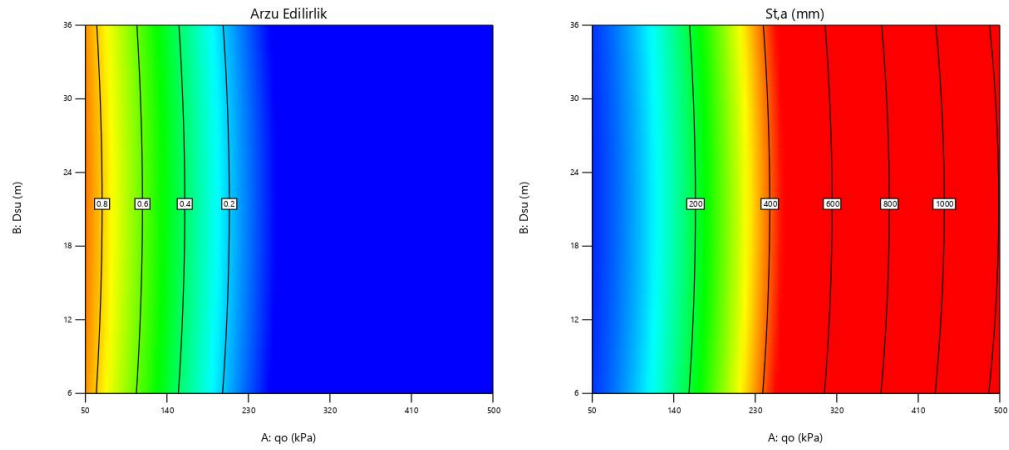
Factor Coding: Actual

All Responses

0 1  
X1 = A  
X2 = B

Actual Factors

C = 5.7739  
D = 1.87829  
E = 5.78399  
F = Yumuşak Kil



Şekil 4.53. Kontur çizimi: yumuşak kil için temel derinliğine karşı gerilme (elle hesaplama)

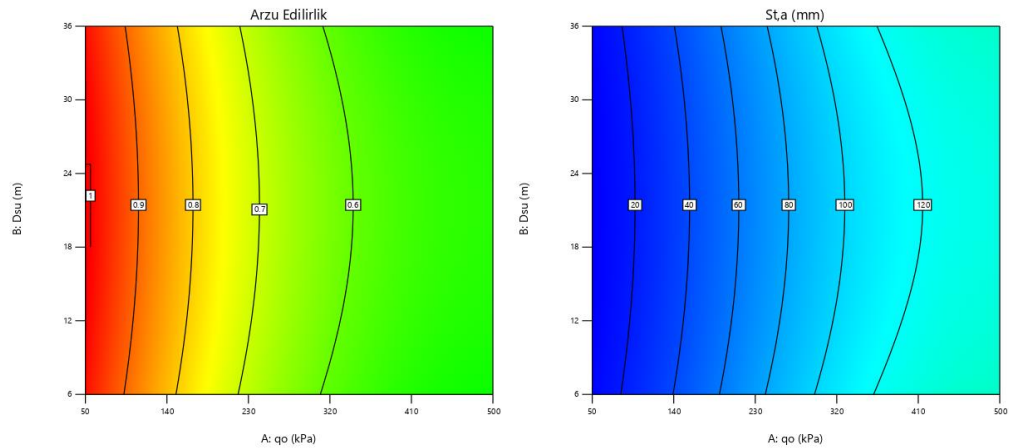
Factor Coding: Actual

All Responses

0 1  
X1 = A  
X2 = B

Actual Factors

C = 5.7739  
D = 1.87829  
E = 5.78399  
F = Sert Kil



Şekil 4.54. Kontur çizimi: sert kil için temel derinliğine karşı gerilme (elle hesaplama)

Bu bulgular, Elle Hesaplama veri setinden türetilen regresyon modelinin, özellikle orta düzeyde uygulanan gerilime sahip sert kil koşulları ve uygun şekilde boyutlandırılmış ve gömülü temeller altında, oturma minimizasyonuna rehberlik etmede hem güvenilir hem de etkili olduğunu doğrulamaktadır. Yüksek arzu edilebilirlik puanı, tanımlanan tasarım kısıtlamaları dahilinde çözümün kalitesini daha da doğrulamakta ve modelin optimum sığ temel tasarım kararlarını desteklemek için uygunluğunu göstermektedir.

#### 4.5.2. Sayısal analiz toplam oturma

PLAXIS 3D modelinin konsolidasyon aşaması için optimizasyon süreci Design-Expert'te geliştirilen ikinci dereceden bir regresyon modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Amaç, yapısal gerilme (A:  $q_0 = 50-500$  kPa), yeraltı suyu seviyesi (B: 6-36 cm), temel genişliği (C: B = 5-15 m), en-boy oranı (D:  $L/B = 1-5$ ), temel derinliği (E:  $D_f = 0-6$  m) ve zemin kıvamı (F: Yumuşak Kil veya Sert Kil) dahil olmak üzere tüm girdi kısıtlamalarını dikkate alırken toplam oturmayı ( $S_{c,s}$ ) en aza indirmektir. Tüm faktör sınırlarının deneysel aralıkları içinde serbestçe değişmesine izin verilmiş ve her iki zemin koşulu da değerlendirilmiştir.

Design-Expert çözüm özetine göre (Şekil 4.55), öngörülen konsolidasyon oturmasını en aza indiren en iyi çözüm, 3.028 mm'lik öngörülen değerle 100 aday arasında birinci sırada yer almıştır. İlgili girdi kombinasyonu aşağıdaki gibidir (Çizelge 4.14):

**Çizelge 4.14.** Optimum tasarım parametreleri

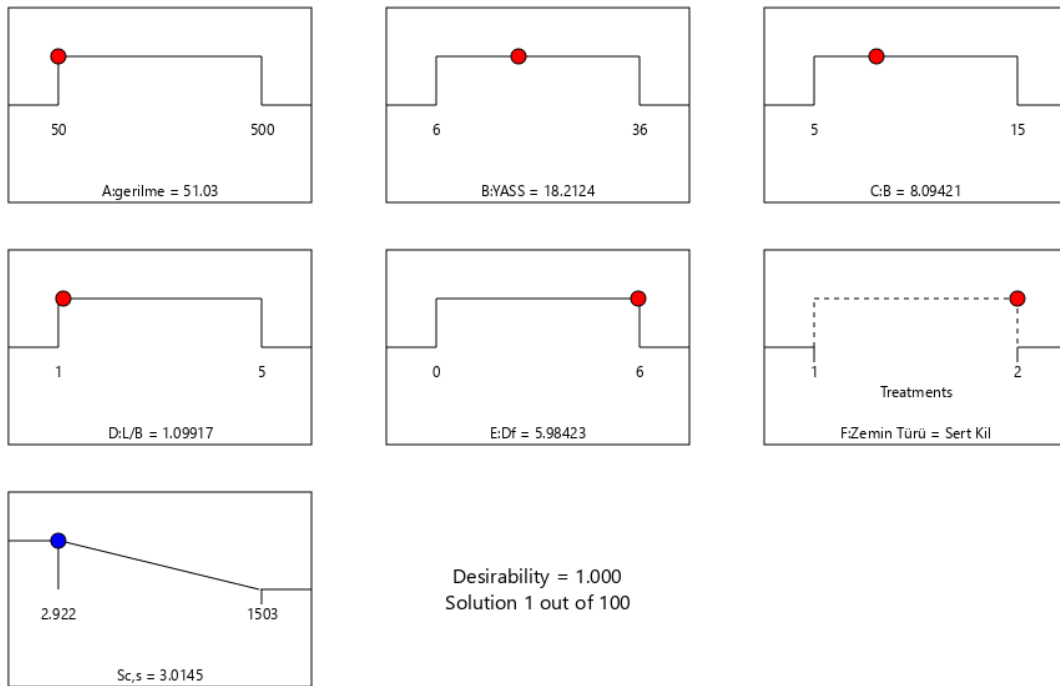
Parametre	Optimum Değer
Gerilme (kPa)	51.03
YASS (m)	18.21
Temel Genişliği (m)	8.09
L/B Oranı	1.09
Derinlik ( $D_f$ , m)	5.98
Zemin türü	Sert Kil
Öngörülen Oturma	3.01 mm
Arzu Edilirlik Puanı	1.000

Optimizasyon rampa grafikleri Şekil 4.55'de sunulmakta ve her bir girdi faktörünün optimum seviyede nasıl davrandığını göstermektedir. Özellikle en düşük uygulanan yük ve sert kil üzerinde en derin temel koşulları altında minimum oturma elde

edilmektedir. Arzu edilebilirlik grafiği, bu konfigürasyonun verilen faktör aralıkları dahilinde istatistiksel olarak ideal olduğunu doğrulamaktadır.

Bununla birlikte, öngörülen optimum oturma 3.028 mm iken, çözüm havuzundan gözlemlenen gerçek minimum değerin 2.922 mm ile biraz daha düşük olduğu unutulmamalıdır. Bu küçük tutarsızlık, optimizasyon motorundaki regresyon yüzeyi uydurma ve yuvarlamadaki yerel varyasyonlardan kaynaklanabilir ve çözümün geçerliliğini tehlikeye atmaz. Genel sonuç, daha yüksek L/B oranlarının, daha derin temellerin ve daha sert zeminlerin konsolidasyona bağlı uzun vadeli oturmaların azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunduğunu doğrulamaktadır.

Bu bulgu, PLAXIS'ten türetilen regresyon modelinin, özellikle zamana bağlı oturma değlendirmeleri altında, kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temeller için verimli konfigürasyonların belirlenmesinde pratik uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.55. Faktör ayarlarını ve öngörülen oturmayı gösteren rampa çizimi (sayısal analiz)

Yumuşak kil durumu için optimizasyon istenebilirliği (solda) ve öngörülen oturma  $S_{c,s}$  (sağda) kontur grafikleri Şekil 4.56'da gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, daha sığ temel derinlikleri daha yüksek uygulanan gerilmelerle birleştğinde oturmaların önemli ölçüde artmasına ve arzu edilebilirlik puanlarının düşmesine neden olmaktadır. Özellikle gerilme 400 kPa'yı aştığında ve gömme derinliği 1 m'den az olduğunda,

öngörülen oturma 1500 mm'yi aşmaktadır, bu da yumuşak kilin yüksek oranda sıkıştırılabilir doğasını göstermektedir. Sonuç olarak, bu kombinasyonlar altında arzu edilebilirlik değerleri hızla düşmekte ve bu tür koşulların yumuşak kil zeminler üzerinde optimize edilmiş sığ temel tasarımı için elverişsiz olduğunu doğrulamaktadır.

Sert kil için karşılık gelen kontur grafikleri Şekil 4.57'de sunulmaktadır. Oturma değerleri, aynı gerilme ve derinlik aralıkları altında yumuşak kilde gözlemlenenlerden önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca, yüksek yükleme ve sığ derinlik koşulları altında bile arzu edilebilirlik çok daha geniş bir aralıkta yüksek (1.0'a yakın) kalmaktadır. Bu durum, sert kilin yapısal yükler altında daha az sıkıştırılabilirlik ve daha iyi taşıma tepkisi ile üstün performans sağladığını göstermektedir. Derinlik arttıkça oturma daha da azalmakta, bu da malzemenin sığ temeller için uygun davranışını göstermektedir.

Factor Coding: Actual

All Responses

● Design Points

0.000 1.000

X1 = A

X2 = B

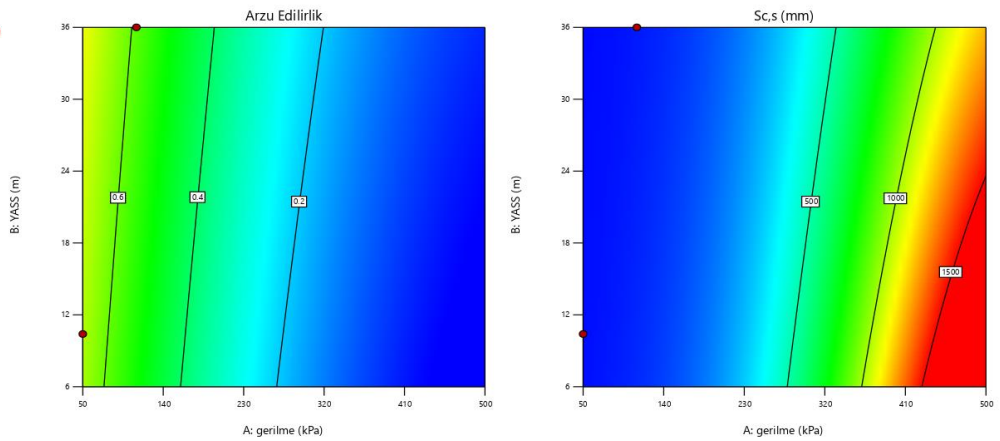
Actual Factors

C = 5

D = 5

E = 6

F = Yumuşak Kil



Şekil 4.56. Yumuşak kil için arzu edilebilirlik ve oturma kontur çizimleri (plaxis 3d konsolidasyon aşaması)

Factor Coding: Actual

All Responses

● Design Points

0.000 1.000

X1 = A

X2 = B

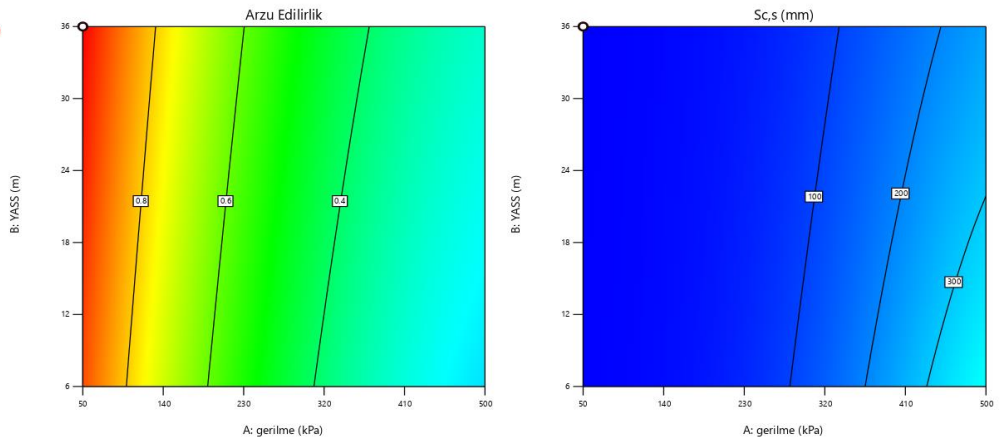
Actual Factors

C = 5

D = 5

E = 6

F = Sert Kil



Şekil 4.57. Sert kil için istenebilirlik ve oturma kontur çizimleri (plaxis 3d konsolidasyon aşaması)

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te elde edilen regresyon tabanlı optimum tasarım parametrelerinin sağlamlığını doğrulamak için, ilgili optimum değerler kullanılarak hem analitik hesaplamalar hem de PLAXIS 3D simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Amaç, regresyon modelinin öngördüğü oturmaları bağımsız analiz sonuçlarıyla karşılaştırarak doğruluğunu değerlendirmektir.

Her bir vaka için, öngörülen oturma hem elle hesaplanan analitik oturma hem de PLAXIS 3D sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yüzde hatalar aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\%Hata S_{T,a} = \frac{Tahmin-Analitik}{Analitik} \times 100 \quad (4.12)$$

$$\%Hata S_{T,s} = \frac{Tahmini-Sayısal}{Sayısal} \times 100 \quad (4.13)$$

Çizelge 4.15'te gösterildiği gibi, Vaka 1 (Çizelge 4.13) için öngörülen oturma 8.69 mm'dir. Ancak analitik hesaplama, %29.35'lik bir eksik tahmine karşılık gelen 12.3 mm'lik önemli ölçüde daha yüksek bir oturma ile sonuçlanmıştır.

Vaka 2 için (Çizelge 4.14), öngörülen oturma 3.01 mm olmuştur. PLAXIS sonucu 2.81 mm'lik oturma ile sadece %7.12'lik hata ile tahmin vermiştir.

**Çizelge 4.15.** Optimum koşullarda regresyon tahminlerinin karşılaştırması

Analiz No	q <sub>0</sub> (kPa)	D <sub>su</sub> (m)	B (m)	L/B	D <sub>f</sub> (m)	Zemin türü	Tahmini Oturma (mm)	St,a (mm)	St,s (mm)	Hata St,a (%)	Hata St,s (%)
1	53.69	21.8	5.8	1.9	6	Sert Kil	8.69	12.3	-	29.35	-
2	51.03	18.2	8.1	1.1	6	Sert Kil	3.01	-	2.81	-	7.12

Bu sonuçlar, regresyon modelinin, özellikle optimum sert kil koşulları altında, basitleştirilmiş analitik yöntemlerden ziyade sayısal PLAXIS simülasyonlarına daha yakın olma eğiliminde olduğu tutarlı bir modeli vurgulamaktadır. Bu durum, uzun vadeli oturma davranışını yakalamadaki sınırlarının kabul edilmesi koşuluyla, istatistiksel modellerin gerçek dünya tahmini için uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Analitik ve sayısal yaklaşımlar arasındaki farkları ve benzerlikleri daha iyi anlamak için, el hesaplamalarından elde edilen regresyon çıktıları ile üç farklı PLAXIS 3D simülasyon aşamasından elde edilenler arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır: yapısal yükleme, konsolidasyon ve kabarma (kazı kaynaklı yükselme). Çizelge 4.16'te özetlendiği üzere, dört veri kaynağının tümü 0.9536 ile 0.9762 arasında

değişen tutarlı bir şekilde yüksek düzeltilmiş  $R^2$  değerleri vermiştir; bu da geliştirilen modellerin kohezyonlu zeminler üzerindeki sığ temellerin oturma davranışını yakalamadaki sağlamlığını teyit etmektedir.

Modeller arasında, elle hesaplama veri seti en yüksek düzeltilmiş  $R^2$  (0.9762) ve tahmin edilen  $R^2$  (0.9608) değerlerini göstererek ampirik regresyon modelinin istatistiksel doğruluğunu ve basitliğini vurgulamıştır. Yeterli hassasiyet değeri (42.37) ayrıca güçlü bir sinyal-gürültü oranını teyit etmektedir. PLAXIS'teki kabarma aşaması modeli de 0.9742'lik düzeltilmiş  $R^2$  ve 0.9574'lük öngörülen  $R^2$  ile oldukça iyi bir performans sergilemiştir. El modeli gibi, bir karekök dönüşümü ( $\sqrt{y + k}$ ) kullanmış ve 41.33'lük yeterli bir hassasiyeti korumuştur, bu da kazı kaynaklı yükselme davranışını yakalamada güvenilir bir performansa işaret etmektedir.

Ani yüklemeye altında elastik oturmayı simüle eden PLAXIS yapısal aşama modeli, logaritmik bir dönüşüm kullanılarak modellenmiştir. düzeltilmiş  $R^2$  değeri 0.9536 ve öngörülen  $R^2$  değeri 0.9276 olarak elde edilmiş ve 40.71'lik yeterli bir hassasiyetle desteklenmiştir. Bu arada, gözenek basıncı dağılımından kaynaklanan zamana bağlı oturmayı temsil eden konsolidasyon aşaması modeli de logaritmik bir dönüşüm uygulamış ve güçlü regresyon ölçümleri (Düzeltilmiş  $R^2 = 0.961$ , Tahmin Edilen  $R^2 = 0.9356$  ve Yeterli Hassasiyet = 41.75) üreterek önceki beklentileri aşmıştır.

Daha da önemlisi, oturmanın en aza indirilmesine dayalı optimizasyon, dört modelde de aynı maksimum 1.000 arzu edilebilirlik puanını vererek her bir regresyon denkleminin kendi senaryosunda ideal tasarım koşullarına ulaşabildiğini göstermiştir.

Bu karşılaştırma önemli bir kavrayışı ortaya koymaktadır: el hesaplamaları anında tepki varsayarak sorunu basitleştirse de, başlangıç tasarımı için hala güvenilir yaklaşımlar sağlamaktadır. Ancak PLAXIS modelleri, zemin-yapı etkileşiminin farklı aşamalarını (elastik deformasyon, uzun vadeli konsolidasyon ve kazı sırasında geri tepme) simüle ederek daha zengin bir fiziksel yorumlama sunmaktadır. Bu modeller birlikte birbirlerini tamamlayarak tasarımcının güvenli ve optimize edilmiş temel çözümleri elde etme becerisini artırır.

Sonuç olarak, hem el hesaplamalarının hem de sayısal modelleme yaklaşımlarının birlikte kullanılması, sığ temel davranışının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır. Elle hesaplama modeli, ampirik basitliği sayesinde, 0.9762'lik düzeltilmiş  $R^2$  ve 0.9608'lik tahmini  $R^2$  değerine ulaşarak en yüksek istatistiksel güvenilirliği göstermiştir. Ayrıca 42.37'lik yüksek bir yeterli hassasiyet değeriyle desteklenen güçlü bir sinyal-gürültü oranı sergilemiştir.

**Çizelge 4.16.** Veri kaynakları arasında regresyon modeli performans ölçütlerinin özeti (analitik ve sayısal)

Metrik	Analitik Hesaplama	PLAXIS Ağırlığı	PLAXIS Yapısal	PLAXIS Konsolidasyon
R <sup>2</sup> (Düzeltilmiş)	0.9762	0.9742	0.9536	0.9610
R <sup>2</sup> (Tahmin Edilen)	0.9608	0.9574	0.9276	0.9356
Yeterli Hassasiyet	42.37	41.33	40.71	41.75
Kullanılan Dönüşüm	$\sqrt{(y + k)}$	$\sqrt{(y + k)}$	ln	ln
Arzulananabilirlik (Optimizasyon)	1	1	1	1

Kazı sonrası zemin yükselme davranışını temsil eden PLAXIS kabarma aşaması da 0.9742'lik düzeltilmiş R<sup>2</sup> ve 0.9574'lük tahmini R<sup>2</sup> ile olağanüstü iyi performans göstermiştir. Bu durum, karmaşık boşaltma koşullarında bile modelin yükselme tepkisini yüksek doğruluk ve güvenilirlikle yakaladığını göstermektedir (Yeterli Kesinlik = 41.33).

Yükleme altındaki ani elastik deformasyonu yansıtan yapısal aşama modeli logaritmik bir dönüşüm kullanılarak geliştirilmiştir. Düzeltilmiş R<sup>2</sup> değeri 0.9536, öngörülen R<sup>2</sup> değeri 0.9276 ve yeterli hassasiyet değeri 40.71 olan model, anlık oturmayı yakalamak için iyi bir uyum göstererek sağlam bir regresyon performansı ortaya koymuştur.

Bu arada, aşırı gözenek basıncı dağılımından kaynaklanan uzun vadeli oturmayı tanımlayan konsolidasyon aşaması modeli de logaritmik bir dönüşüm kullanmıştır. Düzeltilmiş R<sup>2</sup> değeri 0.961, öngörülen R<sup>2</sup> değeri 0.9356 ve yeterli hassasiyet değeri 41.75 olarak elde edilmiştir; bu da zamana bağlı kil davranışının modellenmesinde bile güvenilir bir performans sergilediğini göstermektedir.

Optimizasyon açısından, Elle Hesaplama, PLAXIS Ağırlığı, PLAXIS Yapısal ve PLAXIS Konsolidasyon dahil olmak üzere dört model de kendi optimum tasarım koşulları altında maksimum 1.000 arzu edilebilirlik puanına ulaşmıştır. Bu, tüm regresyon modellerinin uygun şekilde kullanıldığında optimum temel tasarım senaryoları sunma konusunda eşit derecede yetenekli olduğunu doğrulamaktadır.

Bu bulgular önemli bir eğilimi doğrulamaktadır: El hesaplamaları, özellikle uzun vadeli konsolidasyon bağlamlarında toplam oturmayı biraz düşük tahmin etse de, istatistiksel olarak sağlam kalmaktadır. Aynı zamanda, PLAXIS simülasyon aşamaları, her biri temel davranışını anlamaya benzersiz bir şekilde katkıda bulunan farklı fiziksel mekanizmalar (kazı, elastik deformasyon ve konsolidasyon nedeniyle kaldırma) hakkında önemli bilgiler sağlar. Tüm bu perspektiflerin tasarım sürecine dahil edilmesi, geoteknik temel mühendisliğinde hem güvenilirliği hem de optimizasyonu artırır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında, kohezyonlu zeminler üzerindeki sıg temellerin oturma davranışı sayısal ve analitik yaklaşımlar kullanılarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmada, yapısal gerilme ( $q_0$ ), temel genişliği (B), temel uzunluğunun genişliğine oranı (L/B), temel derinliği ( $D_f$ ), yeraltı su seviyesi ( $D_{su}$ ) ve zemin türü (yumuşak kil ve sert kil) gibi kritik parametreler dikkate alınmıştır ve Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak toplam 42 farklı durum senaryosu geliştirilmiştir. Analitik hesaplamalar elastik ve konsolidasyon oturma formülleri kullanılarak yapılmış ve temel zeminindeki ani, konsolidasyon ve toplam oturma değerleri hesaplanmıştır. Detaylı sonlu eleman modellemesi PLAXIS 3D'de gerçekleştirilmiştir. Kil tepkisini simüle etmek için Drenajsız A davranışına sahip Pertleşen Zemin modeli kullanılmıştır. Sayısal analizlerde, temel kazısı sırasındaki kabarma, yapısal yükleme ve %90 konsolidasyon aşamalarındaki oturmalar, boşluk suyu basıncı değişimleri, yapısal gerilme ile oturma etki derinlikleri ve radye temelde oluşan moment etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, girdi değişkenlerinin önemini değerlendirmek ve farklı oturma aşamaları için regresyon tabanlı tahmin modelleri geliştirmek için Design-Expert yazılımı kullanılarak istatistiksel modelleme yapılmıştır.

Analitik hesaplama sonuçlarında, elastik oturmaların ( $S_{e,a}$ ) 8.8-311.3mm, konsolidasyon oturmalarının ( $S_{c,a}$ ) 0-220.3mm ve toplam oturmaların ( $S_{T,a}$ ) 8.8-440.2mm arasında değiştiği görülmektedir.  $\gamma_n D_f > q_0$  koşuluna uyan tasarımlarda (1, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 24, 28, 34 ve 37 numaralı analizlerde), temel tabanına aktarılan net gerilme  $q_{net} < 0$  olmakta ve analitik olarak konsolidasyon oturması 0 elde edilmiştir. Hem yumuşak hem de sert kilde oturmaların büyük bölümünü elastik oturmanın oluşturduğu görülmüştür. Elastik oturmanın toplam oturmaya oranı ( $S_{e,a}/S_{T,a}$ ) %32.7-100 arasında (ortalama %74.4) değişmektedir. Toplam oturma sonuç parametresi için istatistiksel değerlendirmeler yapılmış ve oturma tahmini için yüksek regresyon katsayılarına sahip ( $R^2$  değeri %98.43, Düzeltilmiş  $R^2$  değeri %97.62 ve Tahmini  $R^2$  değeri ise %96.08) 2. derecede denklem üretilmiştir. Varyans (ANOVA) analizlerinden, toplam oturmayı en fazla etkileyen parametreler temel genişliği (%26.58), yapısal gerilme (%22.12) ve zemin türü (%16.01) olmuştur. Değişkenlerin ikili etkileşimlerinin toplam oturmaya etkisi %18.2 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, analitik hesaplamalarda temel zemininin doğrusal olmayan oturma davranışını göstermektedir.

Sayısal analizler ile temel zeminindeki düşey deformasyonlar ile zemindeki boşluksuyu basıncı ve gerilme değişimleri incelenmiştir. Sığ temel inşaatında kazı aşamasında genellikle yük basıncının kaldırılması nedeniyle düşey zemin hareketini tetiklemiştir. PLAXIS 3D simülasyonlarında bu olgu, zemin türüne, temel boyutlarına ve yeraltı suyu seviyesine bağlı olarak önemli ölçüde değişen değerlerle yukarı doğru kabarma olarak açıkça gözlemlenmiştir. Yumuşak killerde 191.5mm'ye kadar (ortalama 61.20mm), sert killerde ise 28.10mm'ye kadar (ortalama 12.30mm) kabarma gözlenmiştir. Yumuşak killer düşük dayanım ve yüksek sıkışabilirlik özelliklerinden dolayı gerilme azalması sonucunda (boşaltma gerçekleştiğinde) daha fazla elastik geri tepme göstermektedir. Yumuşak kil vakalarının %17'sinden fazlasında 100 mm'yi aşan kabarma değerleri görülmüştür ve bu da inşaat aşamalarında ve izlemede bu etkinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Sert killer ise elastik deformasyona karşı daha yüksek dirençli olduğundan gerilme azaltılmasından sonra genişleme eğilimleri azalmaktadır. Kabarma sonuçları için geliştirilen istatistiksel modellerde (karakök dönüşümlü quadratik model,  $R^2 = 0.9830$  ve Düzeltilmiş  $R^2 = 0.9742$ ) kabarma sonuçları üzerinde en yüksek etkiye sahip parametrelerin başında kazı derinliği (%49.3) ve zemin türü (%27.8) gelmektedir. Etkileşim terimleri arasında, en yüksek etki temel genişliği-kazı derinliği (%2.4) olmuştur.

Sayısal analizlerden elde edilen önemli bir bulgu temel zeminindeki kabarmanın yapısal gerilmenin uygulanmasından sonra da devam edebileceğini göstermiştir. Yumuşak kil (1-11-34 numaralı vakalar) ve sert kil (13 ve 17 numaralı vakalar) zemindeki bazı vakalarda yapı yükü aşamasından sonra konsolidasyon oturması gözlenmemiş, aksine zeminde küçük miktar da olsa kabarma meydana gelmiştir. Bu tasarımlarda kazı derinliği yüksek (6m) ve yapısal gerilme düşüktür (50kPa) yani temel kazısı sırasında zeminden kaldırılan gerilme yapısal gerilmeden fazladır. Yapısal gerilme uygulanınca zeminde bir miktar oturma olmuş, daha sonra oturma davranışı kabarmaya dönmüştür. Zemin, geçmişte maruz kaldığı gerilmeden daha az bir yükü yüklediği için zamanla yapısal yükün etkisi ortadan kalkmış ve zemin eski gerilme geçmişine doğru bir hareket yapmıştır. Bahsedilen vakalarda oturmalar elastik bölgede kalmış, yapısal yükün az olması nedeniyle de zemin yukarı yönlü deformasyon yapmıştır. Bu sonuç derin kazının yapıldığı fakat yapı yüklerinin nispeten az olduğu durumlarda ( $\gamma_n D_f / q_0 > 1.5-2$ ) yapıdaki kabarma kaynaklı düşey deformasyonların takip edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Yumuşak kil üzerine yerleştirilen sığ temeller hem yapısal yükleme hem de konsolidasyon aşamalarında sert kile kıyasla önemli ölçüde daha büyük oturma

büyüklikleri sergilemektedirler. Yumuşak kil zeminde %90 konsolidasyon ve yapısal yükleme aşamaları arasındaki oturma farkı sert kile göre daha fazladır. Yumuşak kil sert kile göre daha yüksek sıkışma indisine sahip olduğundan, bu durum beklenen bir sonuçtur. Buna rağmen her iki zemin türünde de oturmaların büyük bölümü yapısal yükleme aşamasında tamamlanmaktadır. Genel olarak toplam oturmanın %47.4-97.9'ü (ortalama %77.9) yapısal yükleme aşamasında tamamlanmaktadır. Geoteknik mühendisliği açısından killi zeminlerde zamana bağlı olarak oturmaların arttığı bilirse de oturmaların büyük bölümünün yapısal yükleme aşamasında tamamlandığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuç, analitik hesap sonuçlarıyla uyumludur. Sayısal analizlerde, oturmaların büyük bölümü 120günde gerçekleşmesine rağmen, konsolidasyon oturmaları yapı-temel-zemin özelliklerine bağlı olarak 20yıla kadar devam etmektedir. 120 günden sonra, zaman ilerledikçe, oturma oranı önemli ölçüde azalmakta ve oturma-zaman eğrileri düzleşmeye başlamaktadır. Bu da fazla boşluk suyu basıncının zamanla kademeli olarak dağıldığını göstermektedir.

Yapısal yükleme ve %90 konsolidasyon aşamalarındaki oturma sonuçları için istatistiksel analizler gerçekleştirilmiş ve yüksek regresyon katsayılarına sahip denklemler üretilmiştir. Nihai regresyon modelleri, değişen gerilme ve geometri koşulları altında killi zeminlerin karmaşık konsolidasyon tepkisini yansıtan önemli kuadratik ve etkileşim terimleri (örneğin,  $q_0 \times B$ ,  $q_0 \times D_f$ ,  $B^2$ ,  $(L/B)^2$ ) ile hem doğrusal hem de doğrusal olmayan davranışları temsil etmektedir. Yapısal yüklemeye bağlı oturma üzerinde en etkili parametreler; yapısal gerilme ( $q_0$ ) %38.97, kazı derinliği ( $D_f$ ) %22.66 ve zemin türü %27.47 oranında katkı sağlamaktadır. %90 konsolidasyon oturması üzerinde en etkili parametreler sırasıyla yapısal gerilme (%40.52), zemin türü (%32.38), kazı derinliği (%11.77) ve temel genişliği (%6.43) olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, %90 konsolidasyon oturmaları için yapısal gerilmenin önemi azalmış, kazı derinliğinin önemi artmıştır. İstatistiksel sonuçlar konsolidasyon oturmaları üzerinde net efektif gerilme kavramının önemini desteklemektedir.

Sayısal analizler ile zemin ortamındaki boşluksuyu basıncındaki değişimler farklı inşaat aşamalarında değerlendirilmiştir. Kazı aşamasında, aşırı yükün kaldırılması kazı çukuruna yakın yerlerde, özellikle de boşaltmanın hızla gerçekleştiği sığ derinliklerde pozitif aşırı boşluk suyu basınçlarına neden olmuştur. Bu davranış, efektif gerilmenin azaldığı ve gözenek basıncının geçici olarak arttığı drenajsız koşulları göstermektedir. Yapısal yük uygulandıktan sonra gözenek basıncı profili büyük ölçüde değişmiştir. Özellikle yüklenen bölgeye yakın derinliklerde, ilave gözenek basıncında keskin bir

düşüş olmaktadır. Bu aşamadaki negatif gözenek basıncı (emme), drenajsız yükleme altında kilin daha sert tepkisini ve uygulanan gerilmeye göre gözenek sıvısı basıncının gecikmeli olarak ayarlanmasını yansıtmaktadır. Zaman içinde su basınçları dengelenmektedir. %90'lık konsolidasyon aşamasında gözenek basınçları derinlik boyunca kademeli olarak normalleşmektedir. Negatif gözenek basınçları devam etse de özellikle maksimum etki bölgesinin yakınında büyüklükleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu, aşamalı inşaatın uzun vadeli gözenek basıncı dağılımını simüle etmedeki etkinliğini doğrulamakta ve killi zeminler için zamana bağlı oturma davranışında konsolidasyonun rolünü vurgulamaktadır.

Sayısal analiz sonuçlarından gerilme ve deformasyonların derinlikle değişimlerine göre yapı gerilmesi ve oturma etki derinlikleri tespit edilmiştir. Kazı aşamasında efektif gerilme başlangıç durumuna göre azalmaktadır. Yapısal yükleme ise efektif gerilmede artış meydana gelmede, bunun sonucunda da oturma olmaktadır. %90 konsolidasyon aşamasında, boşluk suyu basıncının azalması nedeniyle efektif gerilme daha fazla azalmakta ve oturma artışı devam etmektedir. Genellikle oturma etki derinliği, yapı gerilmesi etki derinliğinden daha büyük (ortalama %40) belirlenmiştir. Bu durum, kil katmanındaki efektif gerilmeler değişirse bile zamana bağlı oturmaların devam ettiğini göstermektedir.

Hem analitik hem de sayısal analizlerde, toplam oturmanın büyük bölümünü (ortalama %75) elastik oturmanın oluşturduğu görülmüştür. Yani toplam oturmanın büyük bir bölümü yapısal gerilmenin uygulanması sonucunda oluşmaktadır. Analitik hesaplamalarda ani oturma büyük ölçüde yapısal gerilme ( $q_0$ ), temel genişliği ( $B$ ) ve zemin türüne (dolayısıyla zeminin elastisite modülü) bağlı olmakta ve parametreler arasında lineer bir ilişki varsayılmaktadır. Halbuki, sayısal analizler elastik oturma üzerinde etki derinliği, temel kazısı sırasındaki kabarma ve yapısal gerilme sonucu zeminin yeniden yüklenmesinin elastik oturmaları etkilediğini göstermektedir. Temel kazı derinliği,  $D_f < 3m$  iken sayısal analizlerden elde edilen elastik oturma analitik yöntemden daha büyük ( $S_{e,s} > S_{e,a}$ ) belirlenmiştir. Bu durumda, sayısal analiz yapılmaması halinde analitik yöntemle hesaplanan oturma değerlerinin riskli olabileceği düşünülmektedir.  $D_f > 3m$  olduğu durumlarda, zemindeki kabarma miktarının elastik oturmaların %35'inden fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumda, sonuç olarak, sayısal analizlerden elde edilen elastik oturma analitik yöntemden daha küçük ( $S_{e,s} < S_{e,a}$ ) belirlenmiştir.  $D_f > 3m$  iken zemindeki kabarma ve yeniden yükleme olayının zeminin gerilme-deformasyon davranışını etkilediği düşünülmektedir.  $D_f > 3m$  olan tasarımlarda,

analitik olarak elastik oturma sayısal yöntemden büyük hesaplandığı için güvenli bir tasarım yapılsa bile ekonomik olmayan sonuçlar doğurabilir. Bu değerlendirmeler, yapı-zemin etkileşiminde zeminin oturma davranışının belirlenmesinde sayısal analizlerin tüm inşaat aşamalarını dikkate alarak daha doğru sonuçlar verdiğini ve öncelikli olarak tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çalışmanın temel bulguları, analitik hesaplamalar, sayısal simülasyonlar ve regresyon modellemesinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve yorumlanması yoluyla özetlenebilir. Analitik hesaplama sonuçları, oturmanın, özellikle yumuşak killerde, uygulanan düşey gerilmeye ve temel derinliğine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu doğrulamıştır. Öte yandan, PLAXIS 3D analizleri konsolidasyonun zamana bağlı davranışı, aşırı gözenek basıncı dağılımı ve yapısal deformasyonlar hakkında daha derin bilgiler sağlamıştır. Sert killerde, oturmaların daha düşük büyüklükte olmasına rağmen, daha düşük geçirgenlik nedeniyle daha uzun konsolidasyon süreleri boyunca devam ettiği gözlemlenmiştir. Daha büyük temel boyutlarına ve daha yüksek yüklere sahip vakalarda (örneğin, Vaka 18 ve Vaka 22), PLAXIS 150 mm'yi aşan önemli toplam oturmalar öngörmüş ve gerilme yoğunlaşması ile kil sertliğinin birleşik etkisini vurgulamıştır. Ayrıca, PLAXIS yapısal aşamalarından elde edilen moment dağılımları, M11 ve M22 değerlerinin farklı vakalar arasındaki geniş varyasyonunda görüldüğü gibi, temel geometrisinin ve çevredeki zeminin sertliğinin yük aktarım mekanizmalarını doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Design-Expert regresyon modelleri, geoteknik parametreler arasındaki hem doğrusal hem de doğrusal olmayan etkileşimleri yakalayarak bu bulguları güçlendirmiştir. Dört regresyon modeli geliştirilmiştir: biri analitik hesaplanan oturmaya, üçü ise kazı (kabarma), yapısal yükleme ve %90 konsolidasyon aşamalarındaki PLAXIS çıktılarına dayanmaktadır. Tüm faktörler arasında, yapısal gerilme, temel genişliği ve zemin türü sürekli olarak istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Örneğin, analitik hesaplama modelinde, regresyon denklemi,  $q_0 \times D_f$  ve  $D_{su} \times (L/B)$  oranı gibi ürün terimlerinden güçlü bir etki göstermiştir. Tahmin edilen ve gerçekleşen grafikler, tahmin edilen ve hesaplanan oturmalar arasında minimum sapma ile yüksek doğruluk göstermiştir. Bu modeller özellikle tasarım optimizasyonu ve hızlı tahmin görevlerinde değerlidir ve mühendislere tam simülasyonların mümkün olmadığı durumlarda pratik bir araç sunar.

Sonuç olarak, analitik hesaplamalarının, PLAXIS 3D sonlu eleman modellemesinin ve Design-Expert istatistiksel araçlarının entegrasyonu, kohezyonlu

zeminlerdeki oturma davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır. Analitik yöntemler hızlı bilgiler sunarken, sayısal simülasyonların gerilme-şekil değiştirme etkileşimlerini, zamana bağlı konsolidasyonu ve sınır etkilerini yakalayarak daha doğru tahminler sağladığı görülmüştür. İstatistiksel modelleme ise ham sayısal veriler ile tasarım uygulanabilirliği arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Gelecekteki çalışmalar için benzer analizlerin katmanlı zemin profillerini, farklı temel şekillerini (dairesele veya halka temeller gibi) ve daha gerçekçi saha koşullarını simüle etmek için değişen drenaj koşullarını içerecek şekilde genişletilmesi önerilmektedir. Ayrıca, model parametrelerinin laboratuvarında kalibre edilmesi sayısal tahminlerin doğruluğunu daha da artırabilir.

## 5.2. Çalışmanın Katkıları

- Sağlam birçok perspektifli analiz oluşturmak için analitik hesaplamalar, PLAXIS 3D simülasyonu ve istatistiksel modelleme birleştirildi ve kohezyonlu zeminlerde sığ temel oturmasını analiz etmek için entegre bir analitik-sayısal-istatistiksel iş akışı geliştirildi.
- Yumuşak ve sert killer arasında değerli referans veriler sunarak 42 temel-zemin senaryosu arasında yapılandırılmış bir karşılaştırma oluşturdu ve yükleme, geometri ve yeraltı suyu seviyesi etkileri hakkında karşılaştırmalı bilgiler sağladı.
- Gerçek dünya projelerinde optimize edilmiş tasarım kararlarını bilgilendiren ve mühendislik karar verme sürecine yardımcı olan net görselleştirmeler ve istatistiksel çıktılar (oturma konturları, gerilme alanları, iç kuvvet diyagramları) ve istatistiksel modeller (ANOVA, regresyon, arzu edilebilirlik grafikleri) sağladı.

## 5.3. Çalışmanın Sınırlamaları

- Yapılar için 50-60mm oturma değerinin güvenli olacağı unutulmamalıdır. Çalışmada, yapı oturması için bir üst limit belirlenmemiştir. Düşük yapısal yük neticesinde çok küçük oturma değerleri hesaplandığı gibi, zeminde göçme vakalarını gösteren yüksek oturma değerleri ile de karşılaşmıştır. Çalışmada zeminin oturma davranışı incelendiği için, gerekse bile zemin iyileştirme alternatifleri üzerinde durulmamıştır.

- Bazı zemin parametreleri, yerinde veya saha test verilerinden kalibre edilmek yerine referans literatüre veya laboratuvar varsayımlarına dayandırılmıştır.
- Zemin katmanlarının, tabakalaşma veya anizotropi hesaba katılmadan homojen ve izotropik olduğu varsayılmıştır.
- Dinamik etkiler (örn. depremler, döngüsel yükleme) ve yanal yükler hariç tutularak yalnızca statik dikey yüklemeye odaklanılmıştır.
- Yapısal analiz iç kuvvetlere odaklanmış ancak donatı tasarımını veya beton elemanın çatlama davranışını içermemiştir.

#### 5.4. Gelecekteki Araştırmalar için Öneriler

Bu çalışmanın bulgularına dayanarak, geoteknik mühendisliğinde gelecekteki araştırmalar ve pratik uygulamalar için çeşitli önerilerde bulunulabilir:

İlk olarak, mühendislerin kohezyonlu zeminler üzerinde, özellikle yumuşak killer için sığ temeller tasarlarken uzun vadeli konsolidasyon etkilerini dikkate almaları önerilmektedir. Sonuçlar, kısa vadeli oturmalar kabul edilebilir sınırlar içinde olsa bile, konsolidasyon nedeniyle zaman içinde önemli ek deformasyonların meydana gelebileceğini ve bunun da yapının performansını ve dayanıklılığını etkileyebileceğini göstermektedir.

İkinci olarak, PLAXIS 3D gibi gelişmiş sayısal modelleme araçlarının kullanımı, karmaşık zemin-yapı etkileşimi problemleri için teşvik edilmektedir. Bu araçlar, gerilme yayılımı, gözenek basıncı dağılımı ve yapısal kuvvet tepkileri hakkında yalnızca basit el hesaplamalarıyla yakalanamayacak değerli bilgiler sağlamaktadır. Bununla birlikte, özellikle sertlik, geçirgenlik ve mukavemet için doğru zemin parametresi girişi, gerçekçi sonuçlar elde etmek için gereklidir.

Üçüncü olarak, Design-Expert gibi yazılımlar kullanılarak yapılan istatistiksel modellemenin, oturmayı etkileyen kritik faktörleri belirlemek ve öngörücü denklemler oluşturmak için etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Hassasiyet analizi yapmak ve temel parametrelerini verimli bir şekilde optimize etmek için bu tür yöntemlerin erken tasarım aşamasına entegre edilmesi önerilmektedir.

Ayrıca, sayısal modellerin daha doğru bir şekilde kalibre edilmesi için laboratuvar ve saha araştırmalarının yapılması tavsiye edilmektedir. Özellikle sert killer için gerçekçi

permeabilite değerlerinin elde edilmesi, zamana bağlı konsolidasyon davranışının modellenmesi için çok önemlidir.

Son olarak, gelecekteki çalışmalar, bulguları genelleştirmek ve sonuçların pratikte uygulanabilirliğini artırmak için katmanlı zemin profillerini, üniform olmayan yükleme koşullarını ve farklı temel türlerini (örn. şerit veya dairesel temeller) dahil ederek mevcut çalışmayı genişletebilir. Trafik, deprem veya titreşim kaynaklı yükler gibi dinamik yükleme koşullarının araştırılması ile yapı-zemin etkileşiminin tüm etkileri araştırılabilir.

## 6. KAYNAKÇA

- Abbil, A., Kassim, A., Ullah, A., Rashid, A. S. A., ve Roshan, M. J., 2022, Numerical analysis of embankment resting on floating bottom ash columns improved soft soil, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1022(1), 012023. doi:10.1088/1755-1315/1022/1/012023.
- Abu-Farsakh, M. Y., Pant, R., Gautreau, G., Chen, Q., Yu, X., ve Zhang, Z., 2011a, Estimating embankment settlement from piezocone penetration test data, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2212(1), 120-130. doi:10.3141/2212-13.
- Abu-Farsakh, M. Y., Pant, R., Gautreau, G., Chen, Q., Yu, X., ve Zhang, Z., 2011b, Estimating embankment settlement from piezocone penetration test data, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2212(1), 120-130. doi:10.3141/2212-13.
- Ahmad, M., Ahmad, F., Wróblewski, P., Al-Mansob, R. A., Olczak, P., Kamiński, P., Safdar, M., ve Rai, P., 2021, Prediction of ultimate bearing capacity of shallow foundations on cohesionless soils: A Gaussian process regression approach, Applied Sciences, 11(21), 10317. doi:10.3390/app112110317.
- Ahmad, S., Khan, A., Majeed, N., Khan, N., ve Mandokhail, S., 2025, Effect of shallow foundation size on bearing capacity of layered soil: 3D numerical simulations, Ss. 249-254 içinde.
- Alam, M., Chaallal, O., ve Galy, B., 2021, Soil-structure interaction of flexible temporary trench box: parametric studies using 3D FE modelling, Modelling and Simulation in Engineering, 2021, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/9949976>.
- Alasadi, A. A., ve Mustafa, F. S., 2022, Numerical analysis for the response of skirt circular shallow footing resting on sandy soil under vertical loads, Kufa Journal of Engineering, 13, 16-27. <https://doi.org/10.30572/2018/KJE/130202>.
- Alhassan, M., 2015, Evaluation of load bearing capacity of foundations with different vertical cross-sectional shapes, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 4, 1-7. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0402001>.
- Ali, A. B., ve Ansary, M. A., 2021, Numerical analysis of staged construction of an embankment on soft soil, [Çevrimiçi ön baskı]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-437291/v1>.
- Al-Neami, M., Rahil, F., ve Hussain, A., 2021, Settlement of shallow foundation in dry sand under an earthquake, Engineering and Technology Journal, 39, 1206-1215. <https://doi.org/10.30684/etj.v39i8.527>.
- Alnmr, A., ve Alsirawan, R., 2024, Numerical study of the effect of the shape and area of shallow foundations on the bearing capacity of sandy soils, Acta Polytechnica Hungarica, 21, 103-120. <https://doi.org/10.12700/APH.21.1.2024.1.7>.

- Alsamia, S., ve Koch, E., 2023, Evaluation of the behavior of pullout force and displacement for a single pile: experimental validation with PLAXIS 3D, *Kufa Journal of Engineering*, 14, 105-116. <https://doi.org/10.30572/2018/KJE/140207>.
- Al-taie, E., Al-ansari, N., ve Knutsson, S., 2016, Evaluation of foundation settlement under various added loads in different locations of Iraq using finite element, *Engineering*, 8, 257-268. <https://doi.org/10.4236/eng.2016.85022>.
- Al-taie, E., Al-ansari, N., ve Knutsson, S., 2015, Estimation of settlement under shallow foundation for different regions in Iraq using SAFE software, *Engineering*, 7, 379-386. <https://doi.org/10.4236/eng.2015.77034>.
- Arab, O. A., Lim, A. J. M. S., Sim, S. Y., ve Guntor, N. A. A., 2021, Numerical modelling observations of settlement for pad footings supported on soft clay soil, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1200, 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1200/1/012032>.
- Ateş, B., ve Şadoğlu, E., 2021, Experimental and numerical investigation of load-settlement behaviour to model shallow foundation rest on sandy soil, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14, 686-703. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.862650>.
- Bednarski, Ł., Sieńko, R., Grygierek, M., ve Howiacki, T., 2021, New distributed fibre optic 3D sensor with thermal self-compensation system: design, research and field proof application inside geotechnical structure, *Sensors*, 21, 5089. <https://doi.org/10.3390/s21155089>.
- Besharatinezhad, A., Khodabandeh, M. A., ve Naderi, R., 2019, Evaluating liquefaction induced settlement of shallow foundation on layered soil deposit, *SN Applied Sciences*, 1, 1498. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1555-4>.
- Bezih, K., Chateaneuf, A., ve Demagh, R., 2020, Effect of long-term soil deformations on RC structures including soil-structure interaction, *Civil Engineering Journal*, 6, 2290-2311. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091618>.
- Bo, M. W., Choa, V., Wong, K. S., ve Arulrajah, A., 2011, Laboratory validation of ultra-soft soil deformation model, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 65-74. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9351-3>.
- Cho, S. E., ve Park, H. C., 2010, Effect of spatial variability of cross-correlated soil properties on bearing capacity of strip footing, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34, 1-26. <https://doi.org/10.1002/nag.791>.
- Clayton, C. R. I., 1995, The standard penetration test (SPT): methods and use, *Construction Industry Research and Information Association, Funder Report/CP/7*, CIRIA, London, 129 syf.

- Conti, R., Viggiani, G. M. B., ve Perugini, F., 2014, Numerical modelling of centrifuge dynamic tests of circular tunnels in dry sand, *Acta Geotechnica*, 9, 597-612. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0286-8>.
- Doherty, J. P., Gourvenec, S., ve Gaone, F. M., 2018, Insights from a shallow foundation load-settlement prediction exercise, *Computers and Geotechnics*, 93, 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.05.009>.
- Elbeih, S. F., ve Soliman, N. M. A., 2015, An approach to locate and map swelling soils around Sohag – Safaga road, Eastern Desert, Egypt using remote sensing techniques for urban development, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18, S31-S41. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.07.002>.
- Fattah, M. Y., Shlash, K. T., ve Salim, N. M., 2013, Prediction of settlement trough induced by tunneling in cohesive ground, *Acta Geotechnica*, 8, 167-179. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0169-4>.
- Fisher, B. R., ve Eberhardt, E., 2012, Assessment of parameter uncertainty associated with dip slope stability analyses as a means to improve site investigations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138, 166-173. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000515](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000515).
- Forsat, M., Taghipoor, M., ve Palassi, M., 2022, 3D FEM model on the parameters' influence of EPB-TBM on settlements of single and twin metro tunnels during construction, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 525-538. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00034-0>.
- Galvín, P., Romero, A., ve Domínguez, J., 2010, Fully three-dimensional analysis of high-speed train-track-soil-structure dynamic interaction, *Journal of Sound and Vibration*, 329, 5147-5163. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.06.016>.
- Griffiths, D. V., ve Lane, P. A., 1999, Slope stability analysis by finite elements, *Géotechnique*, 49, 387-403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>.
- Guo, N., Yang, Z., Yuan, W., ve Zhao, J., 2021, A coupled SPFEM/DEM approach for multiscale modeling of large-deformation geomechanical problems, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45, 648-667. <https://doi.org/10.1002/nag.3175>.
- Habibbeygi, F., 2017, Determination of the compression index of reconstituted clays using intrinsic concept and normalized void ratio, *International Journal of GEOMATE*, 13. <https://doi.org/10.21660/2017.39.98271>.
- Hakhamaneshi, M., Kutter, B. L., ve Moore, M., 2016, Validation of ASCE 41-13 modeling parameters and acceptance criteria for rocking shallow foundations, *Earthquake Spectra*, 32, 1121-1140. <https://doi.org/10.1193/121914eqs216m>.
- Hemeda, S., 2022, Geotechnical modelling and subsurface analysis of complex underground structures using PLAXIS 3D, *International Journal of Geo-Engineering*, 13, 9. <https://doi.org/10.1186/s40703-022-00174-7>.

- Hokmabadi, A. S., ve Fatahi, B., 2016, Influence of foundation type on seismic performance of buildings considering soil–structure interaction, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 16, 1550043. <https://doi.org/10.1142/S0219455415500431>.
- Hotala, E., ve Ignatowicz, R., 2019, Effect of settlement of foundations on the failure risk of the bottom of cylindrical steel vertical tanks for liquids, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 41, 171-176. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0017>.
- Jagan, J., ve Samui, P., 2024, AI-powered simulation models for estimating the consolidation settlement of shallow foundations, [Online]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5293845/v1>.
- Jahanandish, M., Veiskarami, M., ve Ghahramani, A., 2010, Effect of stress level on the bearing capacity factor, N, by the ZEL method, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14, 709-723. <https://doi.org/10.1007/s12205-010-0866-1>.
- Khezri, A., Moradi, M., Mir Mohammad Hosseini, S. M., Park, H., ve Lee, D., 2024, Effect of footing shape on the rocking behavior of shallow foundations, *Buildings*, 14, 573. <https://doi.org/10.3390/buildings14030573>.
- Krutov, V. I., 2008, Refinement of design rules for beds and foundations on soils prone to slump-type settlement, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 45, 148-156. <https://doi.org/10.1007/s11204-008-9015-y>.
- Kuganeswaran, N., Rahim, A., ve Ali, N., 2021, Consolidation in soft soil – case study on prefabricated vertical drains (PVDs), *The Open Civil Engineering Journal*, 15, 310-319. <https://doi.org/10.2174/1874149502115010310>.
- Laskar, A., ve Pal, S. K., 2017, Investigation of the effects of anisotropic flow of pore water and multilayered soils on three-dimensional consolidation characteristics, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2017/8568953>.
- Li, X., ve Zhao, J., 2016, Numerical simulation of dam break by a coupled CFD-DEM approach, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2, 691-696. <https://doi.org/10.3208/jgssp.TC103-03>.
- Liravi, H., Arcos, R., Clot, A., Conto, K. F., ve Romeu, J., 2022, A 2.5D coupled FEM–SBM methodology for soil–structure dynamic interaction problems, *Engineering Structures*, 250, 113371. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113371>.
- Liu, F., ve Zhao, J., 2013, Limit analysis of slope stability by rigid finite-element method and linear programming considering rotational failure, *International Journal of Geomechanics*, 13, 827-839. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000283).

- Liu, Y., Wang, C., Liu, X., Gao, R., Li, B., ve Khan, K. U. J., 2021, Determination of embedded depth of soldier piles in pile-anchor supporting system in granite residual soil area, *Geofluids*, 2021, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2021/5518233>.
- M. Abd, D., ve Obaid Abbas, H., 2022, A comparative study of two soil models of tower settlement under eccentric loading nearby slope, *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 87-96. <https://doi.org/10.24237/djes.2022.15408>.
- Marto, A., ve Amaludin, A., 2015, Response of shallow geothermal energy pile from laboratory model tests, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 26, 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/26/1/012038>.
- Mohamed, M., 2019, Behavior of bearing plates resting on different types of sandy soil, *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 14, 1357–1372. <https://doi.org/10.21608/aej.2019.64244>.
- Nafel, S. R., ve Karkush, M. O., 2024, Effect of seismic loading on porewater pressure in clayey soil under disconnected piles-raft foundation, *Journal of Engineering*, 30, 78–94. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.03.06>.
- Nguyen, Q. Van, Fatahi, B., ve Hokmabadi, A. S., 2016, The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil–foundation–structure interaction, *Structural Engineering and Mechanics*, 58, 1045–1075. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.58.6.1045>.
- Niemiec, D., Bulko, R., ve Mužík, J., 2019, The meshfree localized Petrov-Galerkin approach in slope stability analysis, *Civil and Environmental Engineering*, 15, 79–84. <https://doi.org/10.2478/cee-2019-0011>.
- Oh, W. T., ve Vanapalli, S. K., 2011, Modelling the applied vertical stress and settlement relationship of shallow foundations in saturated and unsaturated sands, *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 425–438. <https://doi.org/10.1139/T10-079>.
- Perminov, N., 2019, Simulation of a defectless lifecycle of unique underground structures of the sewage system at the stage of their construction in difficult soil conditions, *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 15, 119–130. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-1-119-130>.
- Poulos, H. G., ve Small, J. C., 2000, *Development of design charts for concrete pavements and industrial ground slabs*, London.
- Putra, P., ve Ganjar, A., 2024, Investigation of differential settlement of pagoda foundation using 3D finite element method, *International Journal of GEOMATE*, 26. <https://doi.org/10.21660/2024.113.4005>.
- Putra, P., ve Ganjar, A., 2022, Analysis of complex foundation on historical pagoda in Thailand using 3D finite element method, *International Journal of GEOMATE*, 23. <https://doi.org/10.21660/2022.98.3585>.

- Qader, Z. B., Karabash, Z., ve Cabalar, A. F., 2023, Analyzing geotechnical characteristics of soils in Erbil via GIS and ANNs, *Sustainability*, 15, 4030. <https://doi.org/10.3390/su15054030>.
- Qian, K., Wang, M., Hu, A. B., ve Liu, G. H., 2014, Improvement of the formula of foundation settlement considering three-dimensional transform, *Applied Mechanics and Materials*, 501–504, 263–268. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.263>.
- Qiu, H. S., Shi, S., ve Li, M., 2012, Analysis of large-size flexible shallow foundation settlement based on foundation–soil interaction, *Advanced Materials Research*, 446–449, 1935–1939. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.446-449.1935>.
- Quintero, J., Saldanha, S., Millen, M., Fonseca, A. V. da, Sargin, S., Oztoprak, S., ve Kelesoglu, M. K., 2018, Investigation into the settlement of a case study building on liquefiable soil in Adapazari, Turkey, in: *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 321–336. <https://doi.org/10.1061/9780784481455.032>.
- Rashiddel, A., Koopialipoor, M., Hadei, M. R., ve Rahmānejad, R., 2018, Numerical investigation of closed-form solutions for seismic design of a circular tunnel lining (by quasi-static method), *Civil Engineering Journal*, 4, 239. <https://doi.org/10.28991/cej-030983>.
- Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P., ve Camapum de Carvalho, J., 2019, Obtaining the mechanical parameters for the hardening soil model of tropical soils in the city of Brasília, *Soils and Rocks*, 42, 61–74. <https://doi.org/10.28927/SR.421061>.
- Rodríguez Rincon, E., Caicedo Hormaza, B., ve Rodríguez Rebolledo, J. F., 2021, Comparative analysis of piled raft foundation system (PRFS) settlements placed on soft soils via geotechnical centrifuge, *Soils and Rocks*, 44, 1–12. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.062321>.
- Romero, A., Galvín, P., ve Domínguez, J., 2013, 3D non-linear time domain FEM–BEM approach to soil–structure interaction problems, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 37, 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2013.01.001>.
- Rui, R., Van Tol, A. F., Xia, Y. Y., Van Eekelen, S. J. M., ve Hu, G., 2016, Investigation of soil-arching development in dense sand by 2D model tests, *Geotechnical Testing Journal*, 39, 20150130. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150130>.
- Gowthaman, S., ve Nasvi, M., 2017, 2D and 3D numerical simulation of load-settlement behaviour of axially loaded pile foundations, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5, 187–195. <https://doi.org/10.12691/ajcea-5-5-2>.
- Salih, N., Abdalla, T., ve Ahmed, F., 2023, Soil–foundation interaction and its influences on some geotechnical properties of Sulaimaniyah, northern Iraq fine-grained soils

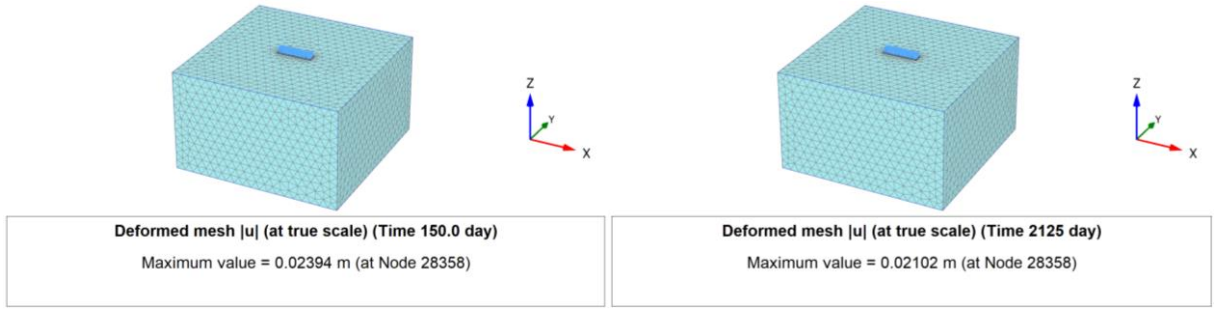
- utilizing PLAXIS 3D, *Engineering and Technology Journal*, 41, 1–10. <https://doi.org/10.30684/etj.2022.136345.1310>.
- Samui, P., ve Sitharam, T. G., 2008, Least-square support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, 2033–2043. <https://doi.org/10.1002/nag.731>.
- Sanjei, C., ve De Silva, L. I. N., 2016, Numerical modelling of the behaviour of model shallow foundations on geocell reinforced sand, in: 2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), IEEE, pp. 216–221. <https://doi.org/10.1109/MERCon.2016.7480142>.
- Shaaban, M., Abd El-Naiem, M., Seenoon, A.-A., ve Kenawi, M., 2024, Performance of pile group affected by adjacent excavations in sand below the water table, *Sohag Engineering Journal*, 0, 0–0. <https://doi.org/10.21608/sej.2024.259268.1050>.
- Shahin, M. A., Jaksa, M. B., ve Maier, H. R., 2005a, Neural network based stochastic design charts for settlement prediction, *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 110–120. <https://doi.org/10.1139/t04-096>.
- Shahin, M. A., Jaksa, M. B., ve Maier, H. R., 2005b, Neural network based stochastic design charts for settlement prediction, *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 110–120. <https://doi.org/10.1139/t04-096>.
- Shan, H., He, S., Lu, Y., ve Jiang, W., 2020, Case study and numerical simulation of excavation beneath existing buildings, *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8817339>.
- Shen, S.-L., ve Xu, Y.-S., 2011, Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai, *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 1378–1392. <https://doi.org/10.1139/t11-049>.
- Sia, V., Satyanaga, A., ve Kim, Y., 2022, Effects of heavy rainfall on shallow foundations in Bukit Timah granite in Singapore, *Applied Sciences*, 12, 9516. <https://doi.org/10.3390/app12199516>.
- Sowers, G. F., 1980, *Introductory soil mechanics and foundations: geotechnical engineering*, Taipei.
- Szepesházi, A., Mahler, A., ve Móczár, B., 2016, Three-dimensional finite element analysis of deep excavations' concave corners, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60, 371–378. <https://doi.org/10.3311/PPci.8608>.
- Zhang, T., 2024, Numerical modelling simulation technology of nonlinear multi-field coupled ground foundation, *Journal of Electrical Systems*, 20, 308–315. <https://doi.org/10.52783/jes.2643>.
- Tarenia, K., ve Patra, N. R., 2019, Behaviour of disconnected and connected piled raft foundations subjected to compressive load, <https://doi.org/10.11159/icgre19.180>.

- Terzaghi, K., ve Peck, R. B., 1967, Soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons, New York.
- Thongpong, R., 2021, The settlement behavior of isolated foundation on Khon Kaen loess, International Journal of GEOMATE, 20. <https://doi.org/10.21660/2021.81.j2045>.
- Van Genechten, B., Vandepitte, D., ve Desmet, W., 2011, A direct hybrid finite element–wave based modelling technique for efficient coupled vibro-acoustic analysis, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 200, 742–764. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.09.017>.
- Vanapalli, S. K., 2013, Bearing capacity and settlement of footings in unsaturated sand, International Journal of GEOMATE, 5, 595–604. <https://doi.org/10.21660/2013.9.3k>.
- Waheed, M., ve Asmael, N., 2023, Study of immediate and consolidation settlement of shallow foundations, Civil and Environmental Engineering, 19, 318–327. <https://doi.org/10.2478/cee-2023-0028>.
- Wahyudi, P. A., 2020, Analysis of correlation between bearing capacity of the land against land settlement and duration of decline in Semarang City, International Journal of GEOMATE, 19. <https://doi.org/10.21660/2020.73.57306>.
- Wang, K., Cao, J., Wang, X., ve Ning, Y., 2021, Soil arching of piled embankment in equal settlement pattern: A discrete element analysis, Symmetry (Basel), 13, 1627. <https://doi.org/10.3390/sym13091627>.
- Xiong, M., ve Huang, Y., 2020, Static and dynamic reliability analysis of laterally loaded pile using probability density function method, Journal of Marine Science and Engineering, 8, 994. <https://doi.org/10.3390/jmse8120994>.
- Xu, B., Liu, S., ve Wang, J., 2022, An analysis of slope stability based on finite element method and distinct element method, Journal of Physics: Conference Series, 2148, 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2148/1/012053>.
- Yang, Z. X., Gao, Y. Y., Jardine, R. J., Guo, W. B., ve Wang, D., 2020, Large deformation finite-element simulation of displacement-pile installation experiments in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002271](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002271).
- Zedan, A. J., ve Maulood, H. J., 2017, Pressure–settlement characteristics of shallow foundations using finite element method, Tikrit Journal of Engineering Sciences, 24, 25–37. <https://doi.org/10.25130/tjes.24.2017.03>.
- Zhang, H., Zhang, B., Feng, H., Wu, C., ve Chen, K., 2021, Macro and micro analysis on coal-bearing soil slopes instability based on CFD-DEM coupling method. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-154715/v1>.

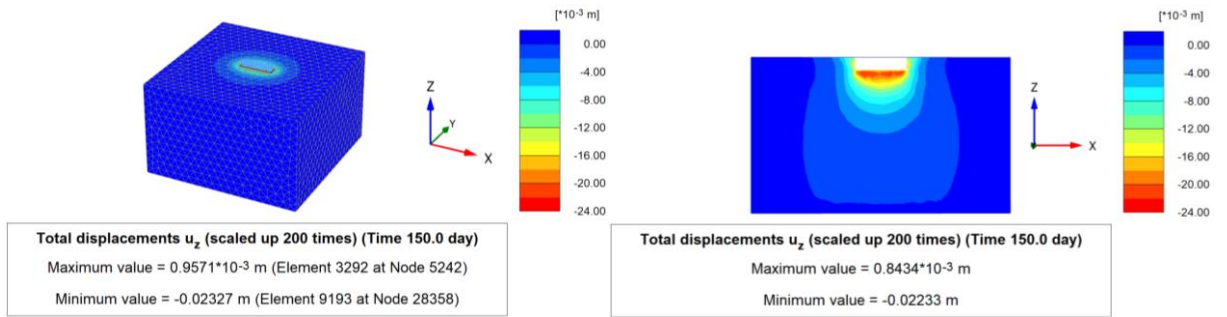
- Zhang, J., Zheng, Z., Cai, Y., Li, N., ve Zhang, D., 2019, A FORM-based approach for probabilistic analysis in geotechnics: Application to a reinforced concrete drainage culvert, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43, 2090–2105. <https://doi.org/10.1002/nag.2950>.
- Zhang, X., Far, H., 2022, Effects of dynamic soil-structure interaction on seismic behaviour of high-rise buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 20, 3443–3467. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01176-z>
- Zhang, Z., Xu, R., Wu, X., Wang, J., 2022, Ann-based dynamic prediction of daily ground settlement of foundation pit considering time-dependent influence factors. *Applied Sciences* 12, 6324. <https://doi.org/10.3390/app12136324>
- Zhang, Z.M., Zhang, Q.Q., 2010, Field test on composite foundation incorporating flexible and rigid piles. *Advanced Materials Research* 168–170, 1140–1144. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.1140>
- Zhao, J., Bao, L., Wang, G., 2017, Numerical analysis of soil settlement prediction and its application in large-scale marine reclamation artificial island project. *Polish Maritime Research* 24, 4–11. <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0097>
- Zhou, B., Zhong, H., Yang, K., Yang, X., Cai, C., Xiao, J., Liu, Y., Yuan, B., 2024, A study on the factors influencing high backfill slope reinforced with anti-slide piles under static load based on numerical simulation. *Buildings* 14, 799. <https://doi.org/10.3390/buildings14030799>
- Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., Teatini, P., 2015, Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Eng Geol* 193, 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.020>

## EK: PLAXİS 3D ANALİZ SONUÇLARI

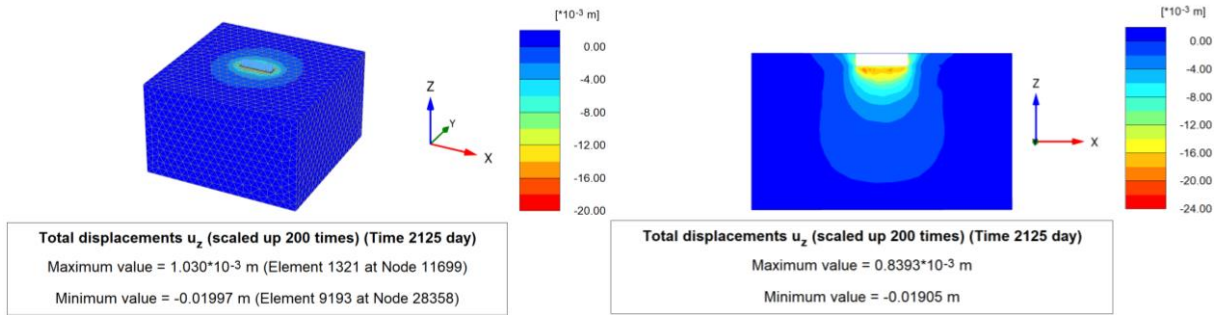
### Analiz 1



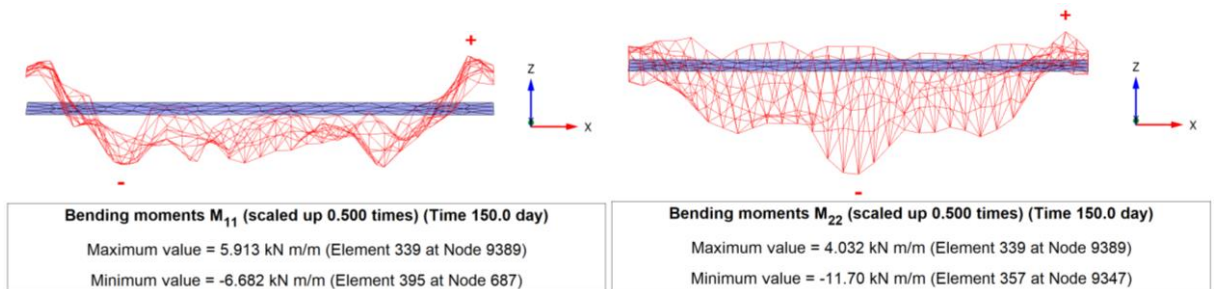
Şekil Ek-1. Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değıştirme (Analiz 1)



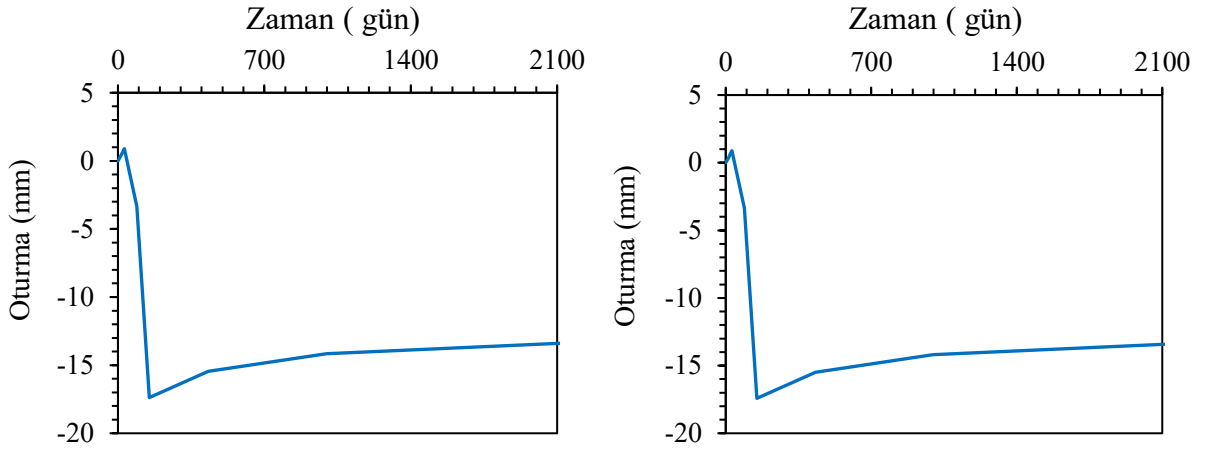
Şekil Ek-2. Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 1)



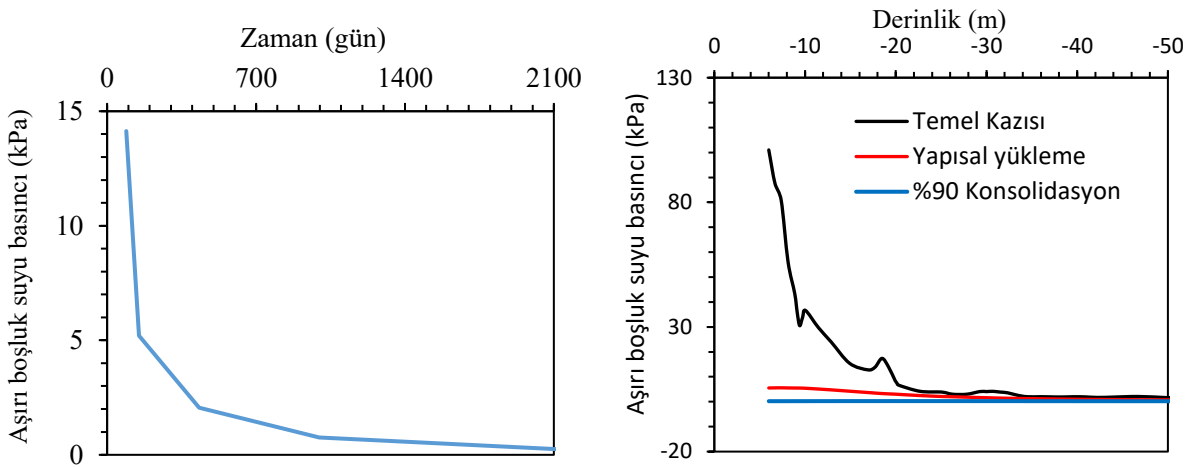
Şekil Ek-3. %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 1)



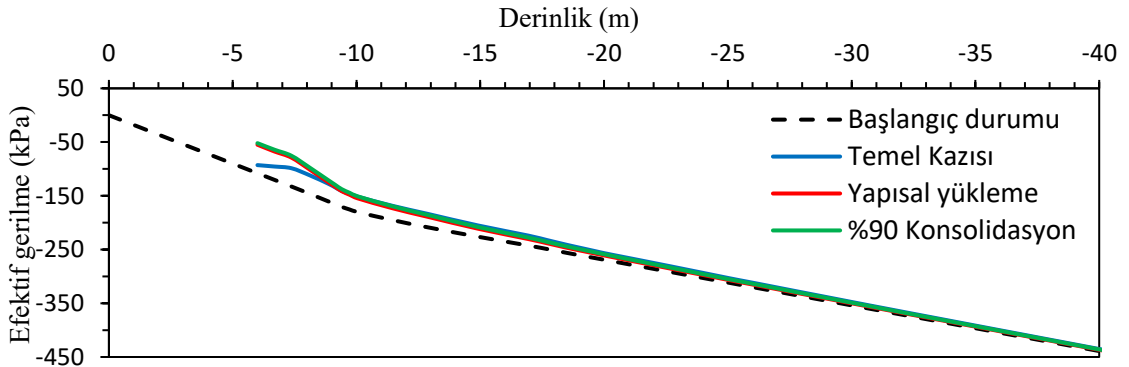
Şekil Ek-4. Radye temelın kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 1)



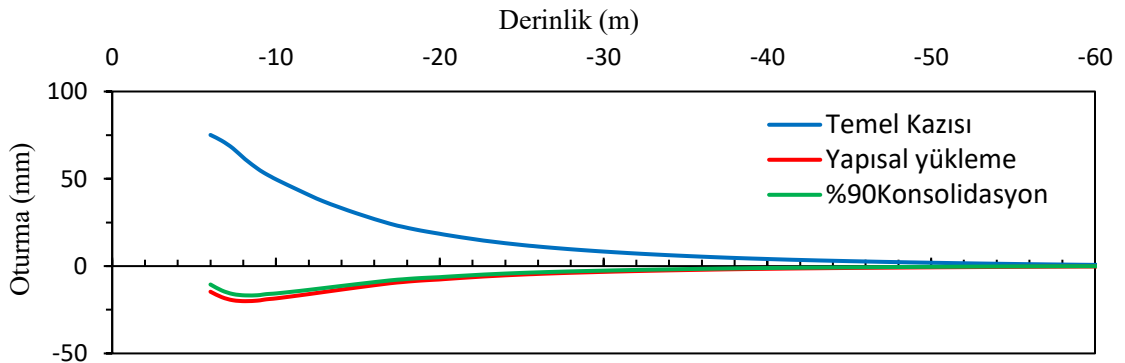
Şekil Ek-5. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 1)



Şekil Ek-6. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 1)

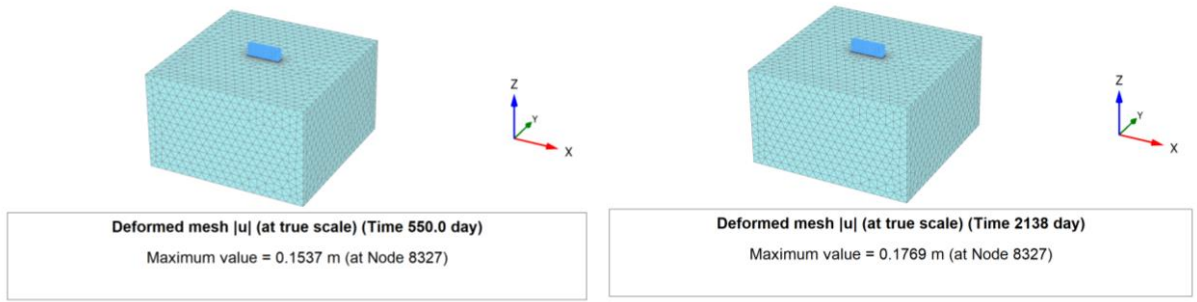


Şekil Ek-7. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 1)

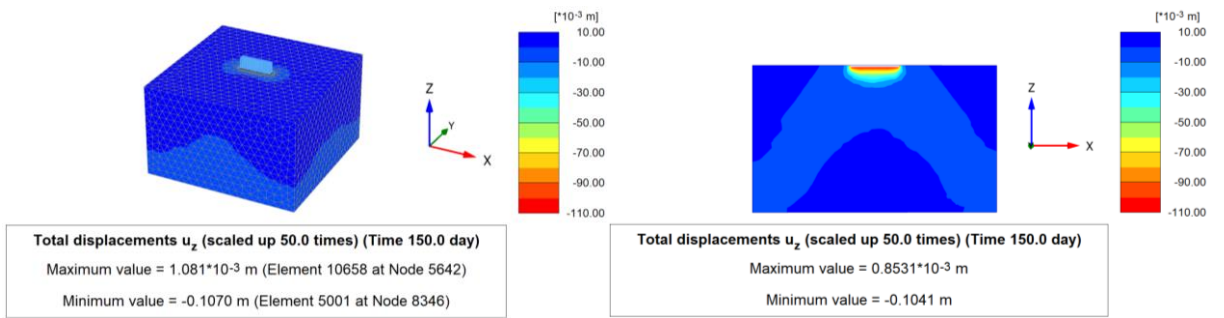


Şekil Ek-8. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 1)

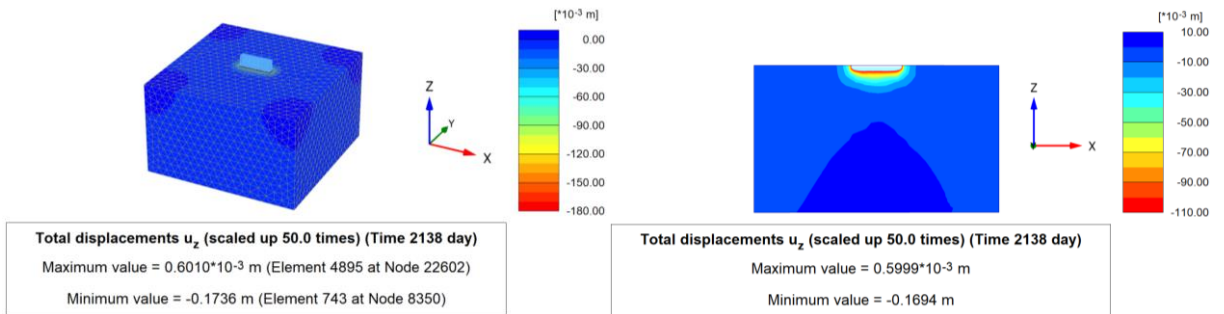
## Analiz 2



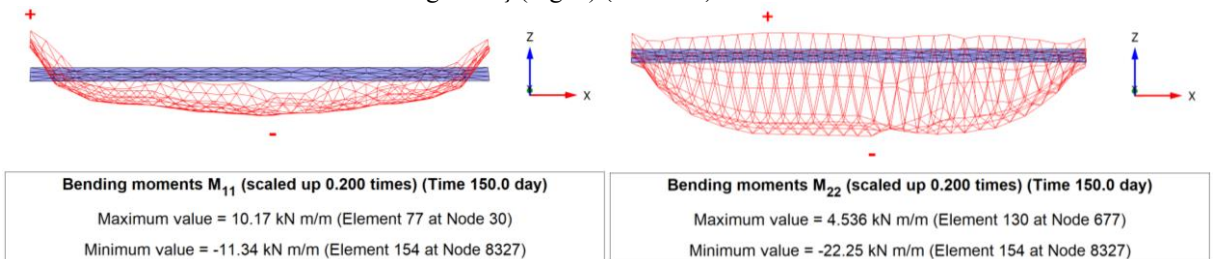
Şekil Ek-9. Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklemeye (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasında (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 2)



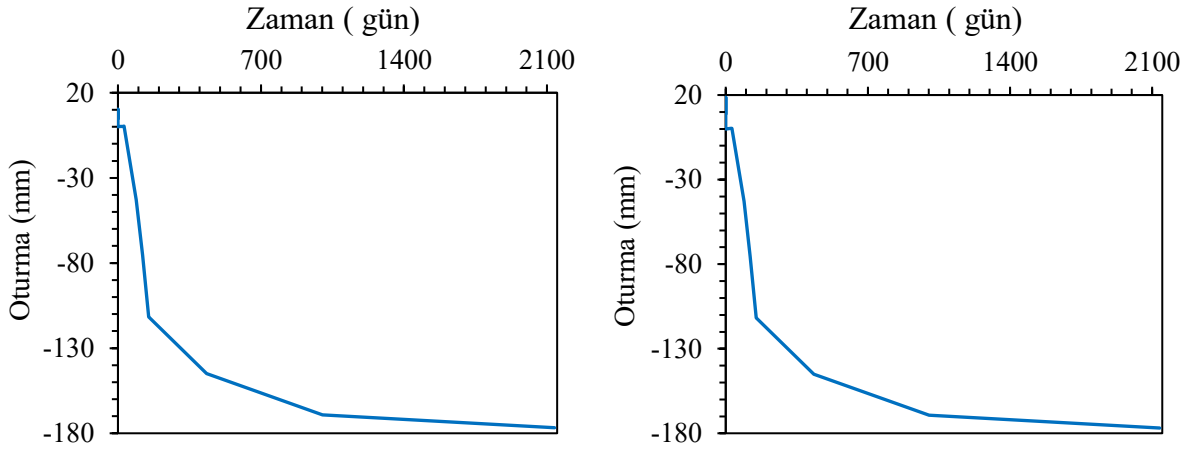
Şekil Ek-10. Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 2)



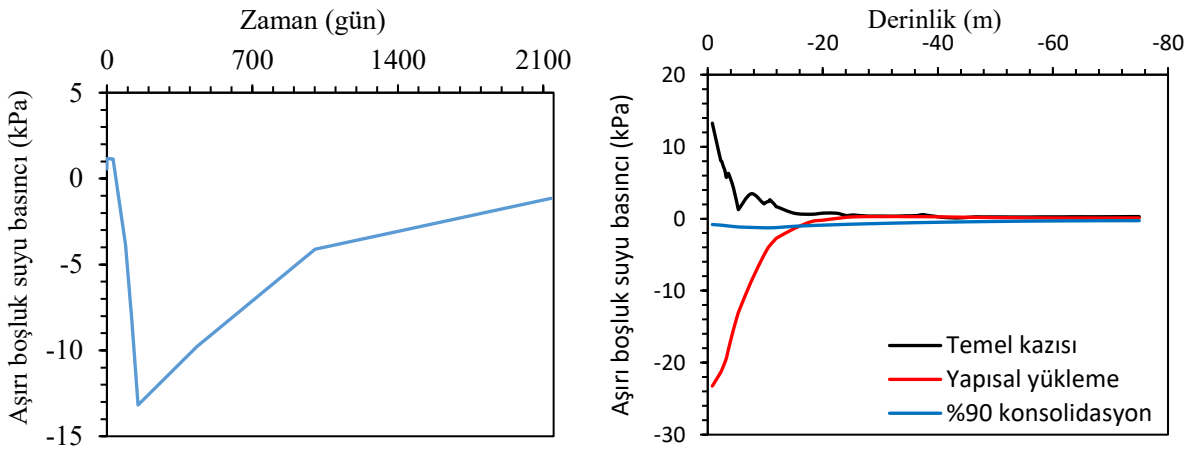
Şekil Ek-11. %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 2)



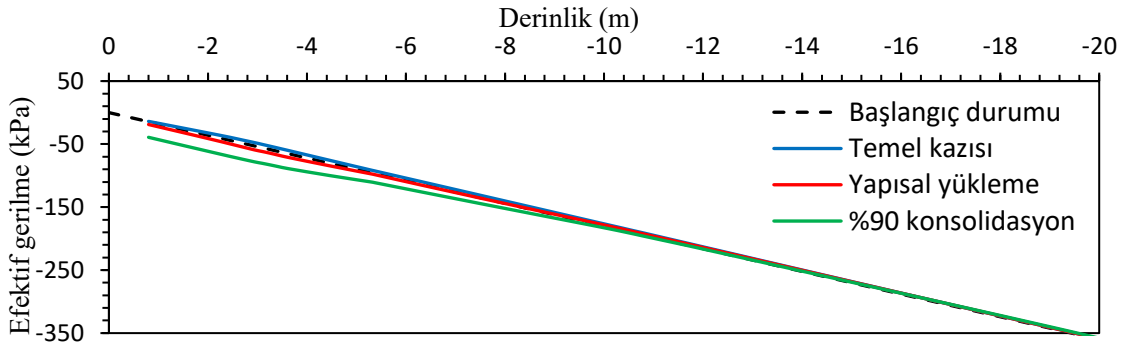
Şekil Ek-12. Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 2)



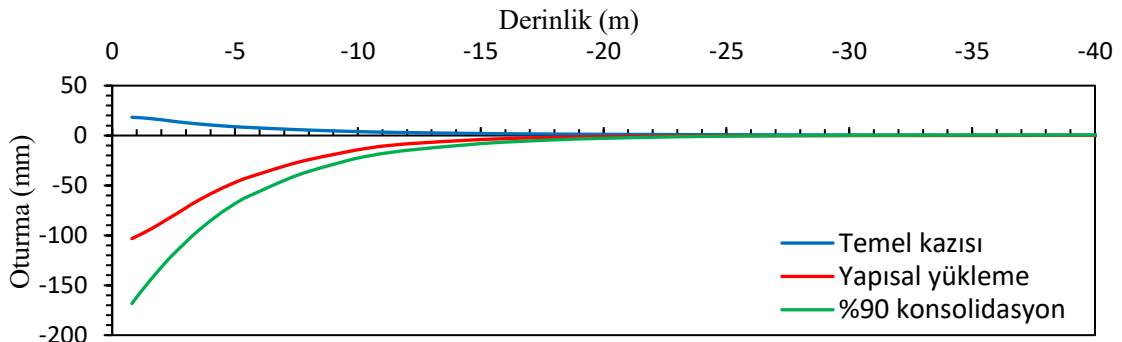
Şekil Ek-13. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 2)



Şekil Ek-14. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 2)

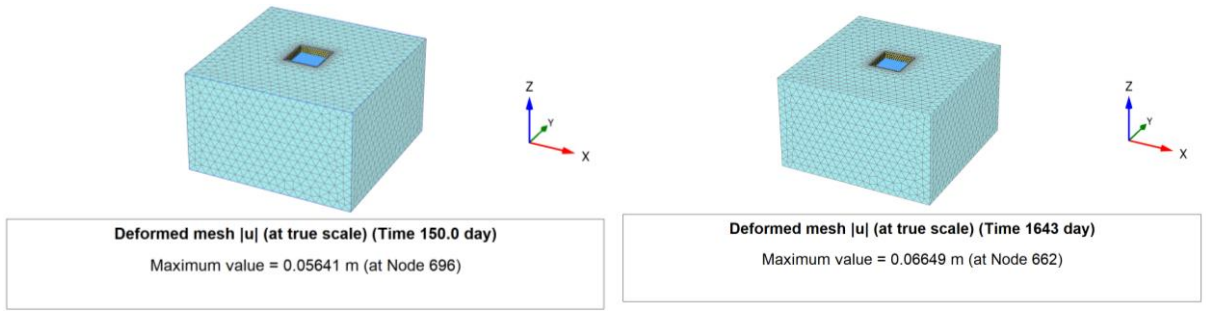


Şekil Ek-15. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 2)

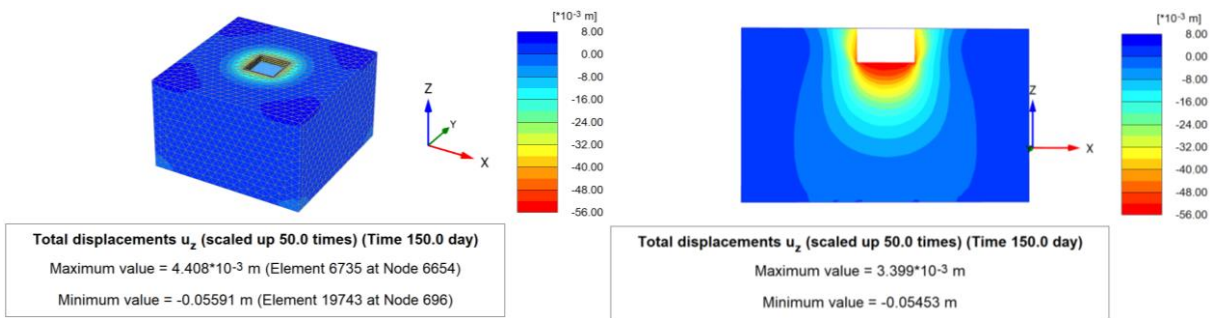


Şekil Ek-16. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 2)

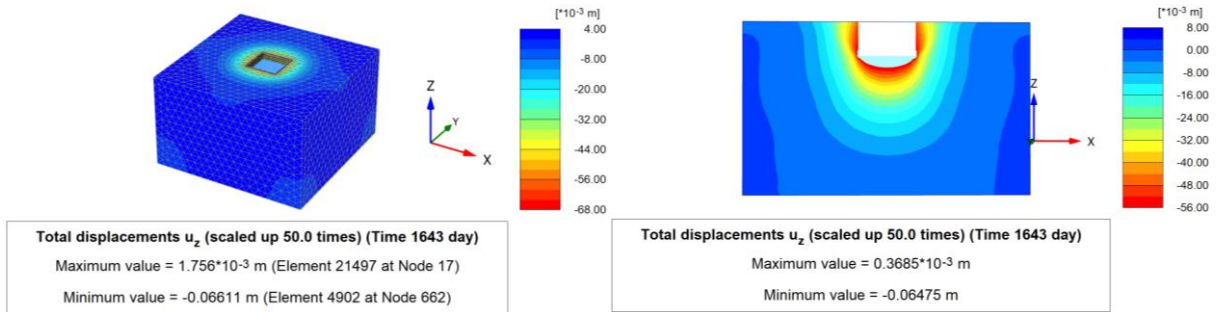
### Analiz 3



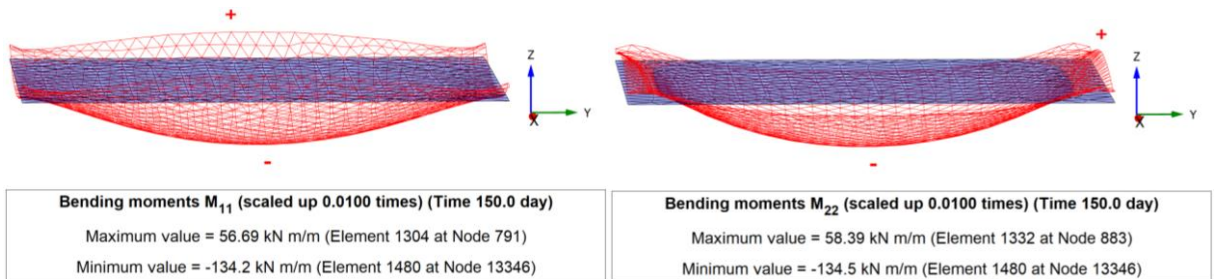
**Şekil Ek-17.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 3)



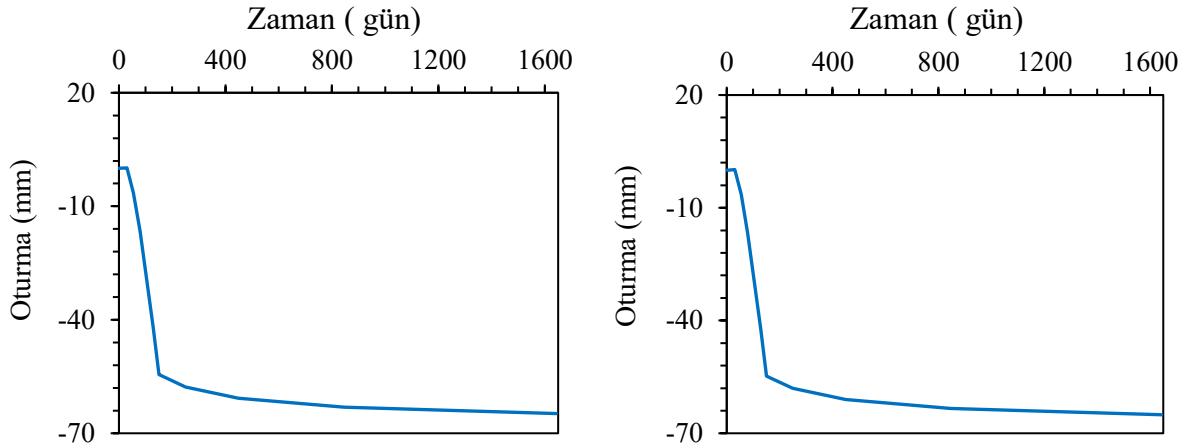
**Şekil Ek-18.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 3)



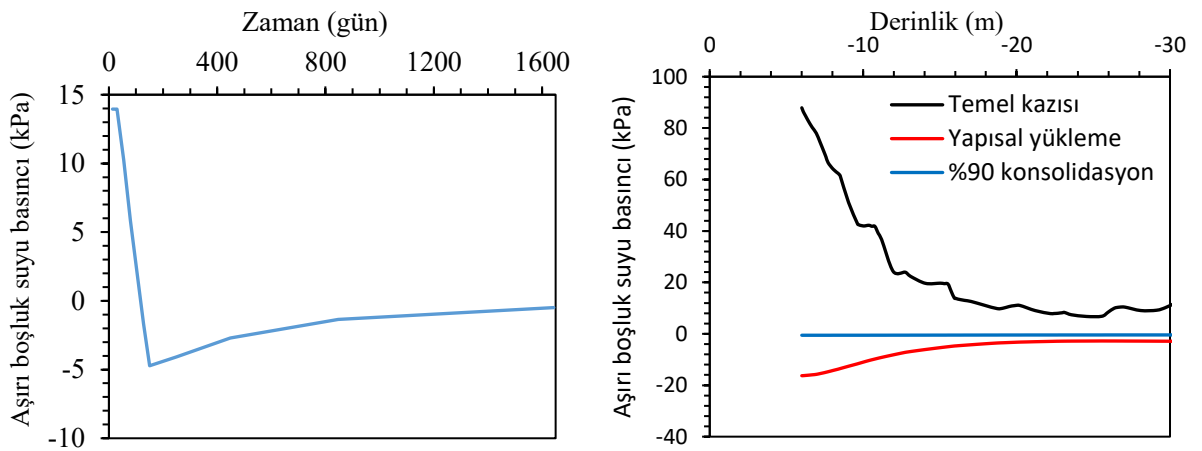
**Şekil Ek-19.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 3)



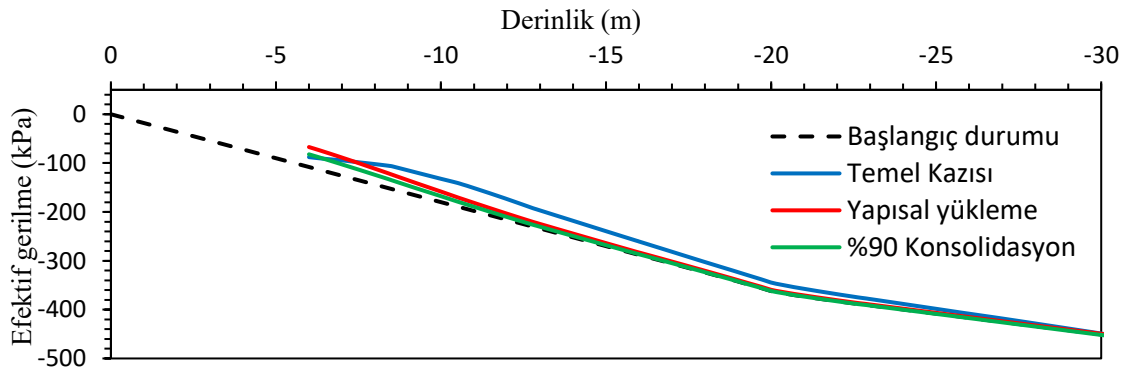
**Şekil Ek-20.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 3)



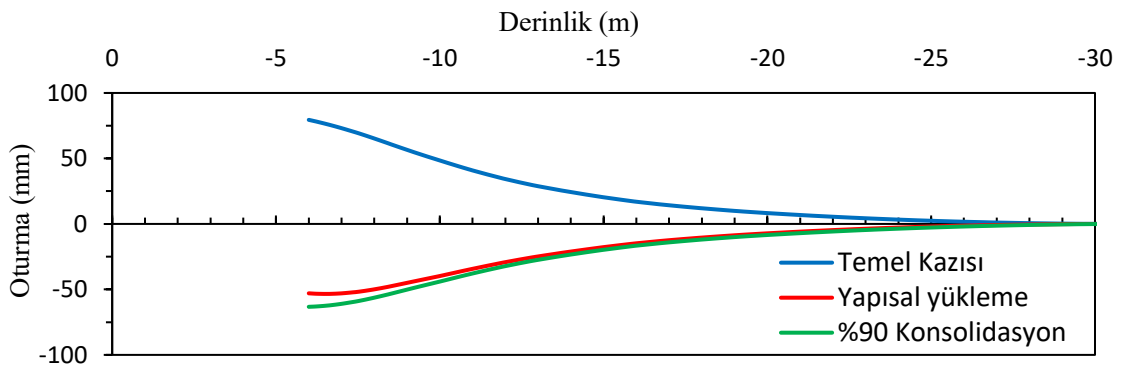
Şekil Ek-21. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 3)



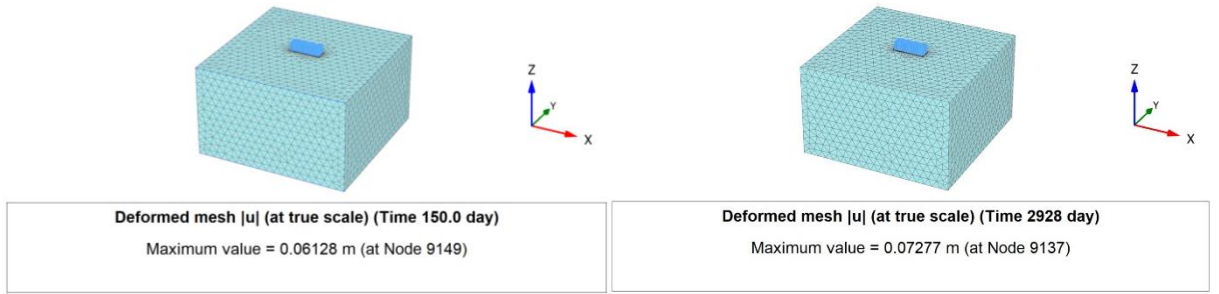
Şekil Ek-22. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 3)



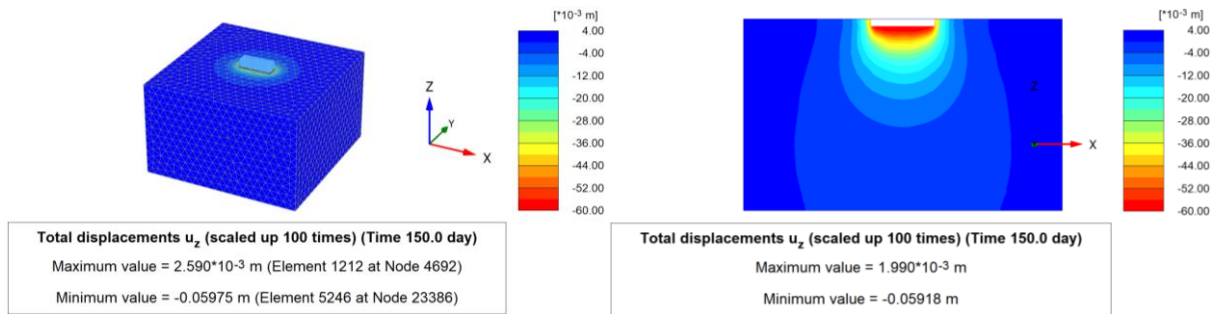
Şekil Ek-23. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 3)



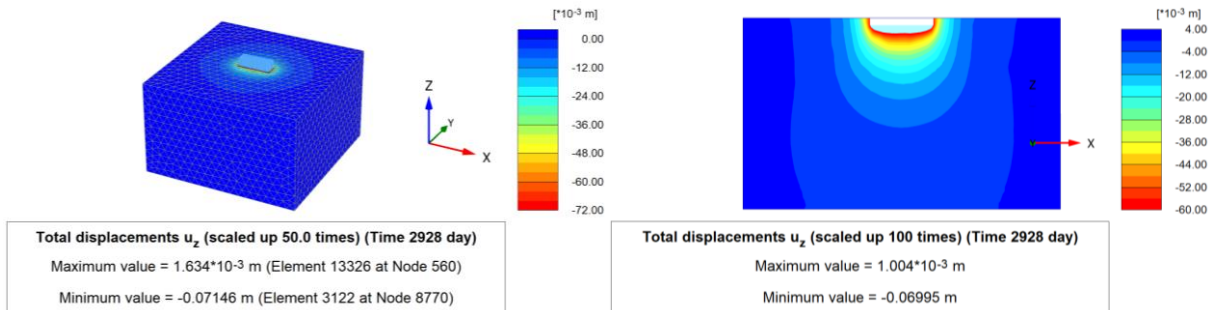
Şekil Ek-24. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 3)

**Analiz 4**

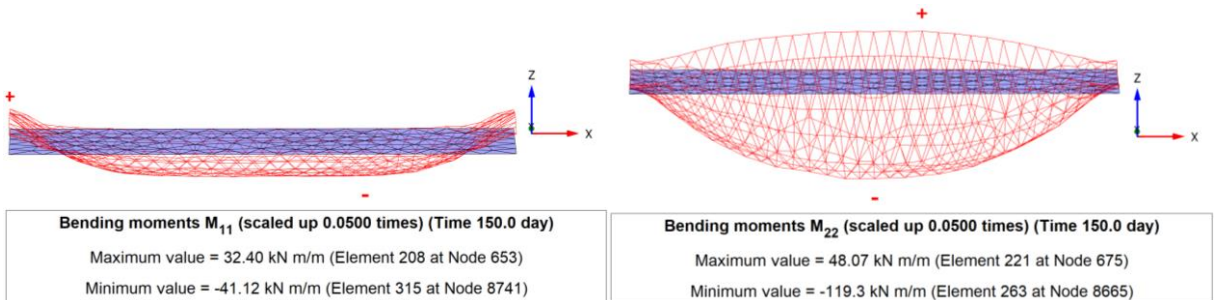
**Şekil Ek-25.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 4)



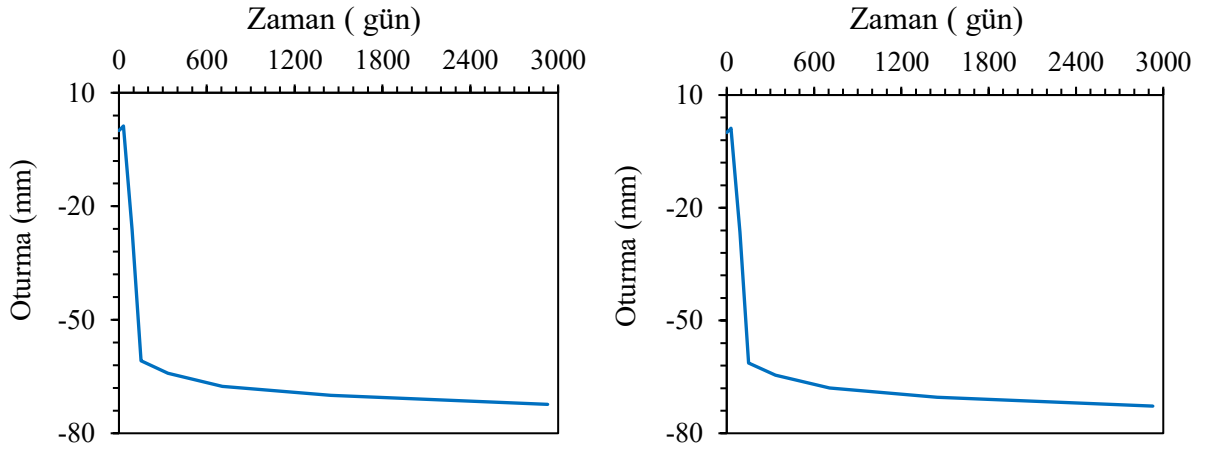
**Şekil Ek-26.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 4)



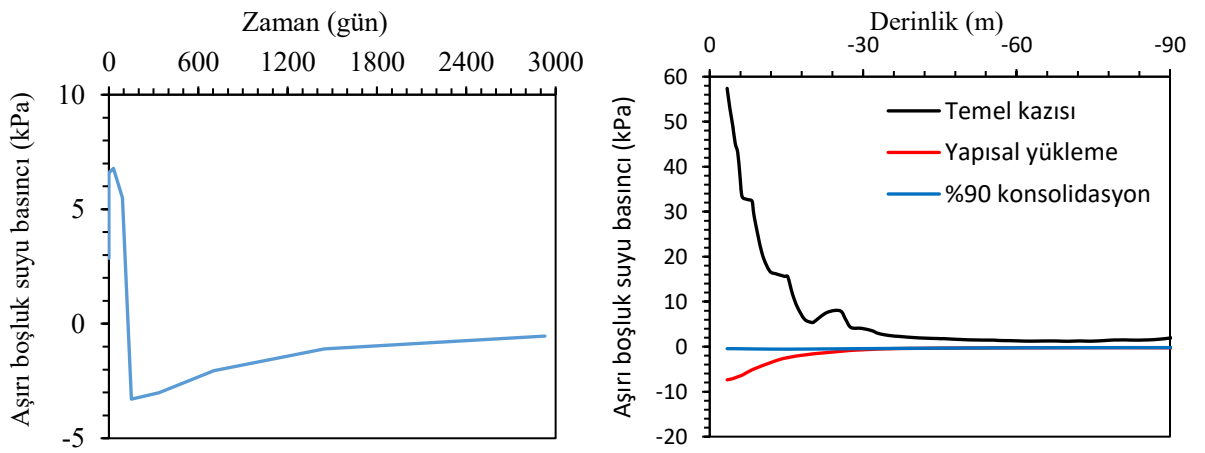
**Şekil Ek-27.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 4)



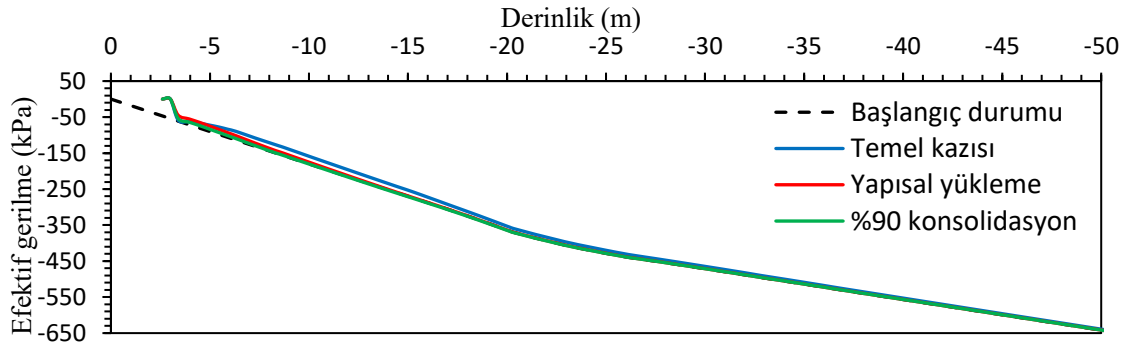
**Şekil Ek-28.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 4)



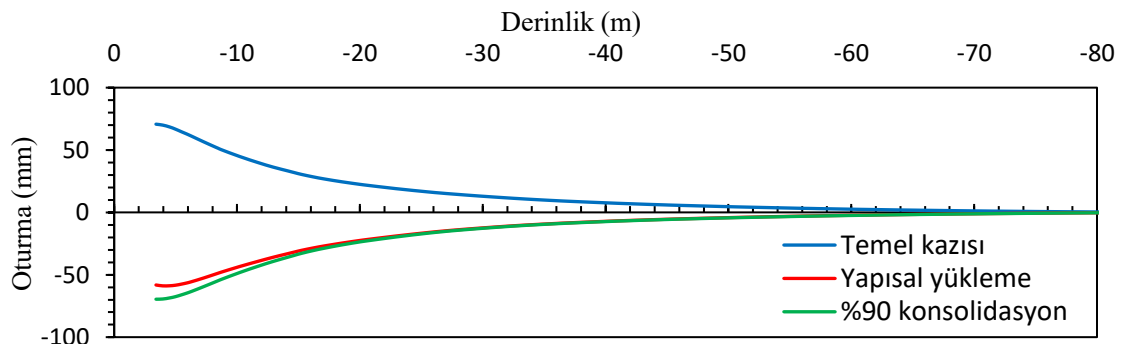
Şekil Ek-29. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 4)



Şekil Ek-30. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 4)

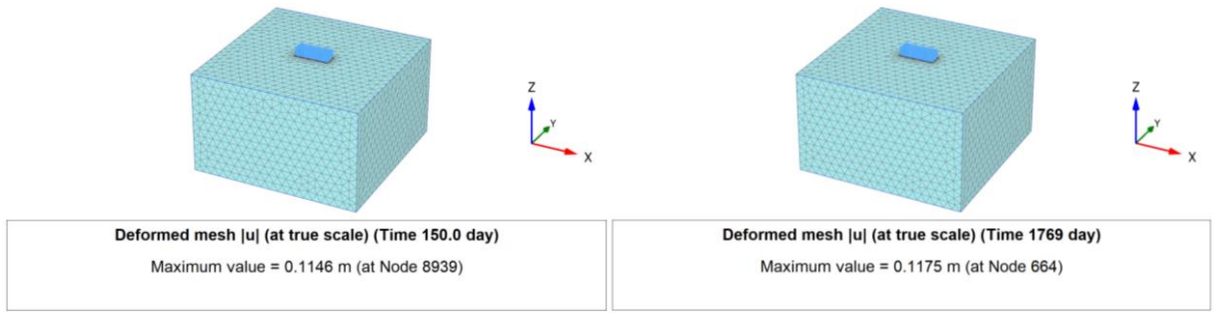


Şekil Ek-31. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 4)

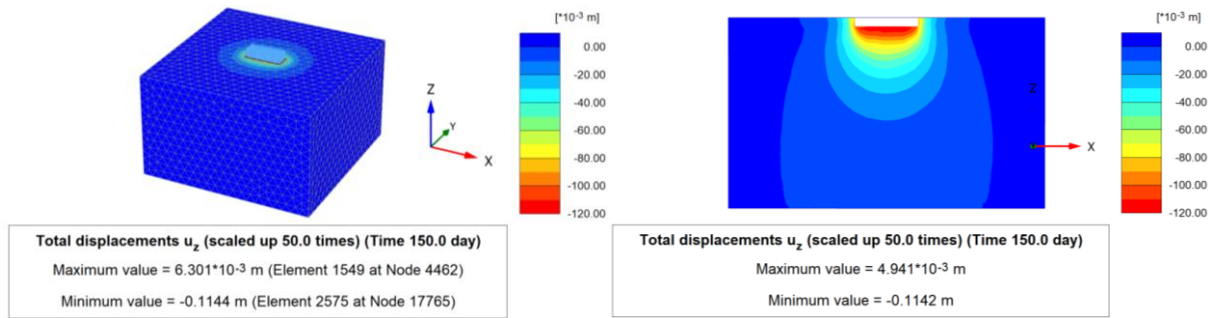


Şekil Ek-32. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 4)

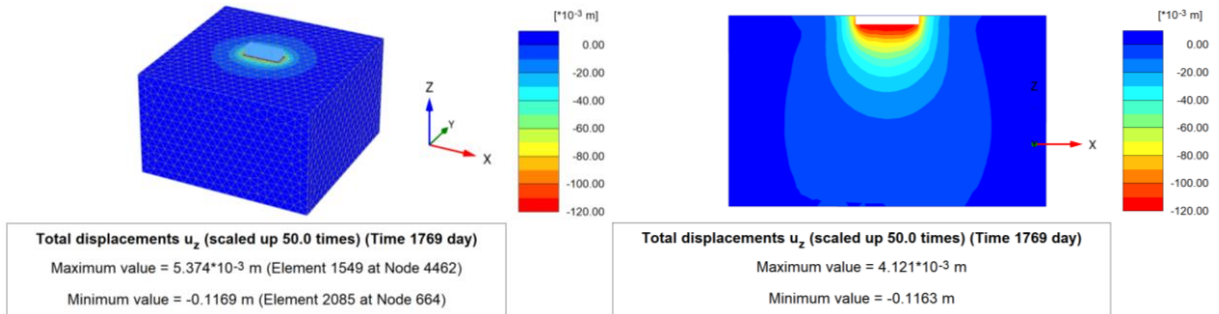
## Analiz 5



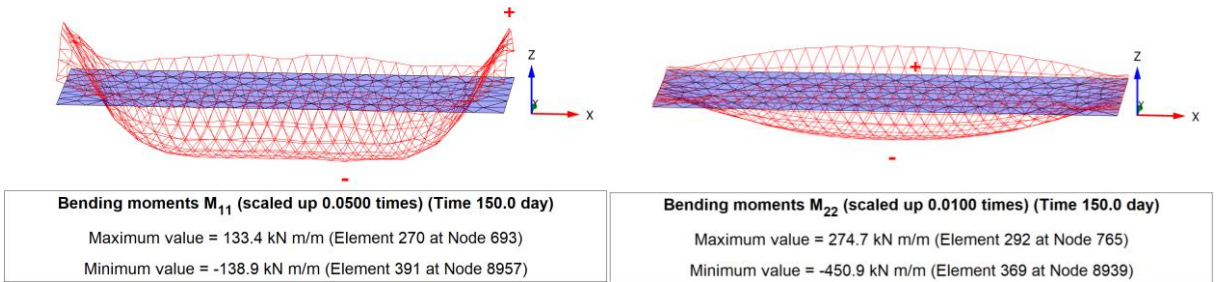
Şekil Ek-33. Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 5)



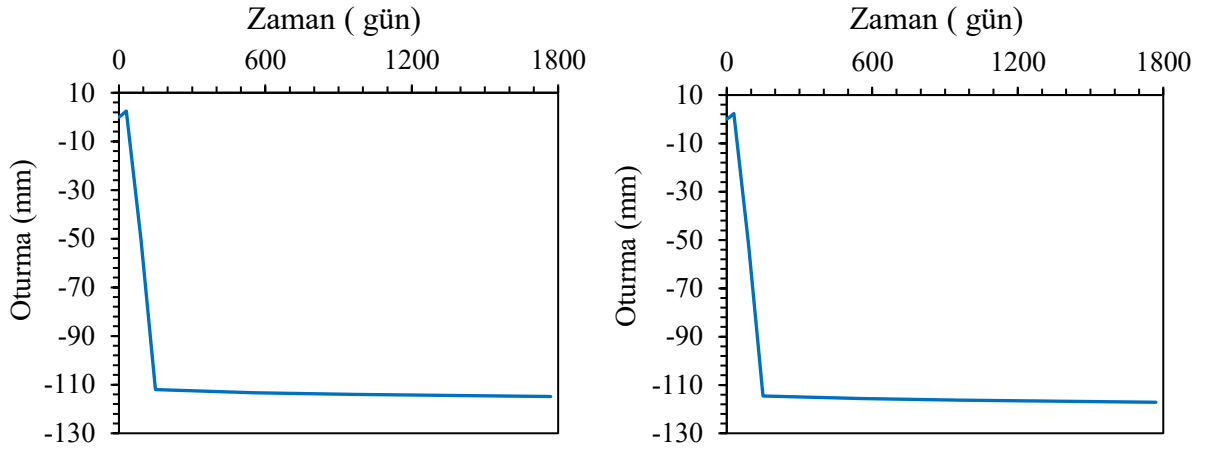
Şekil Ek-34. Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 5)



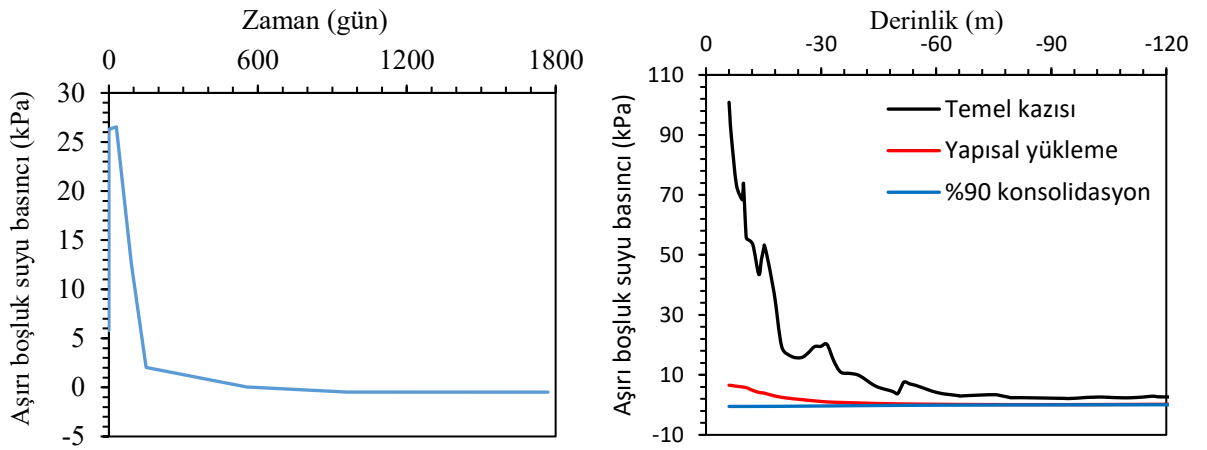
Şekil Ek-35. %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 5)



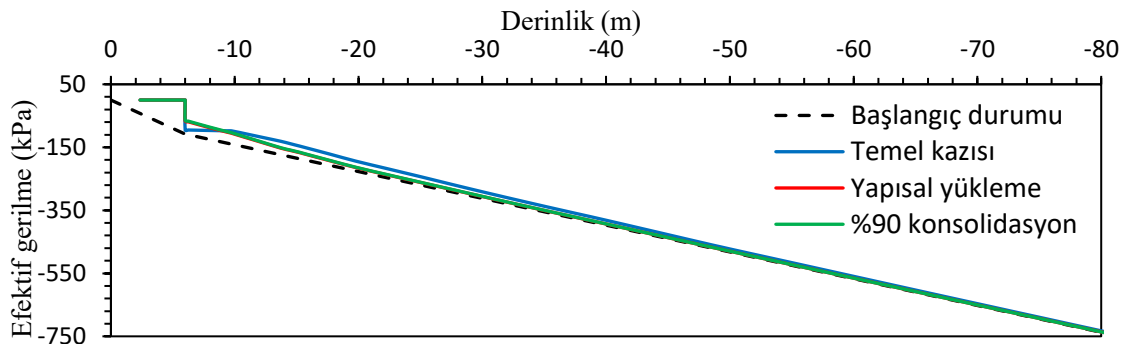
Şekil Ek-36. Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 5)



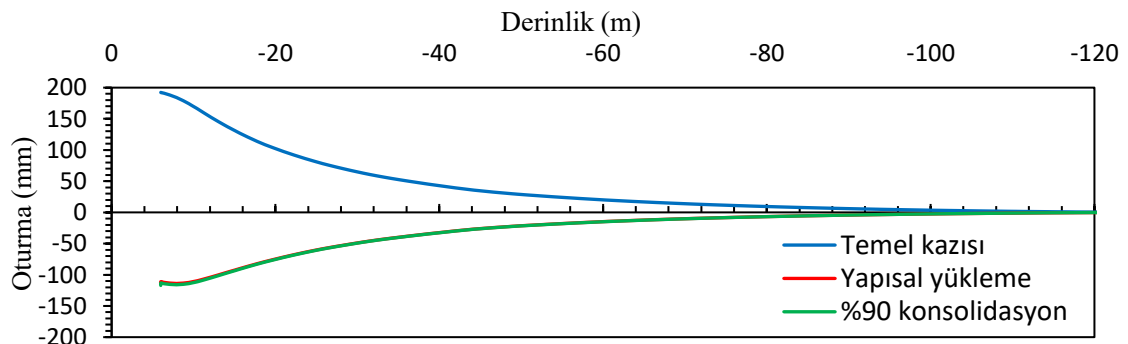
Şekil Ek-37. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 5)



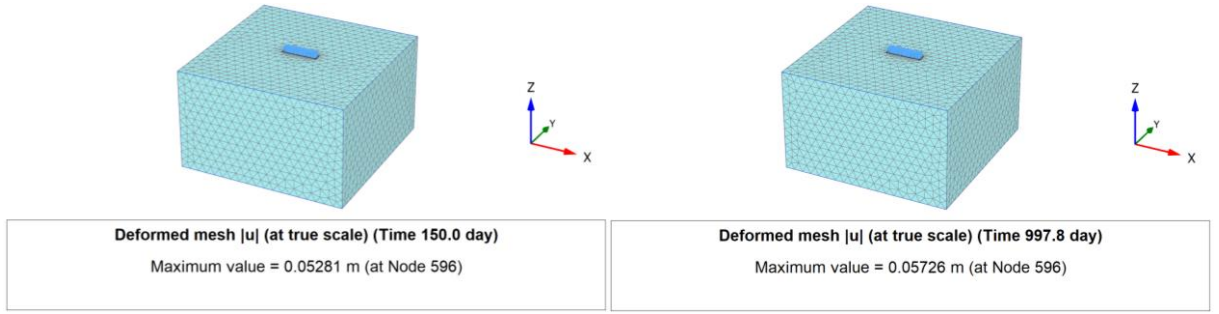
Şekil Ek-38. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 5)



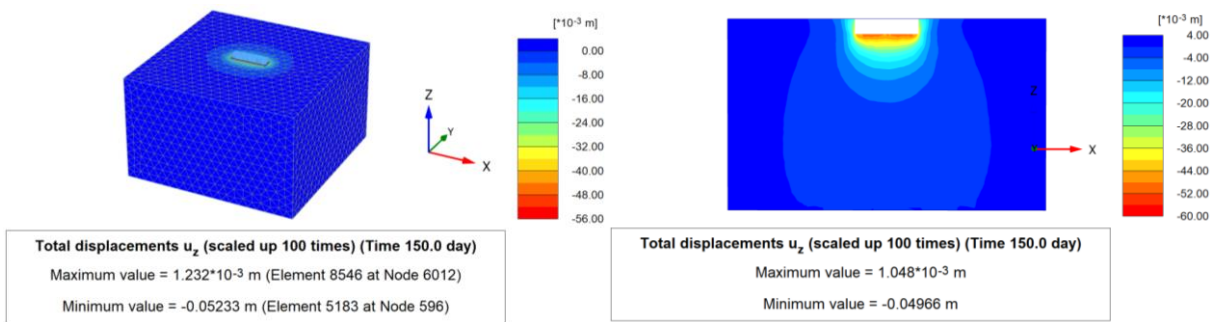
Şekil Ek-39. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 5)



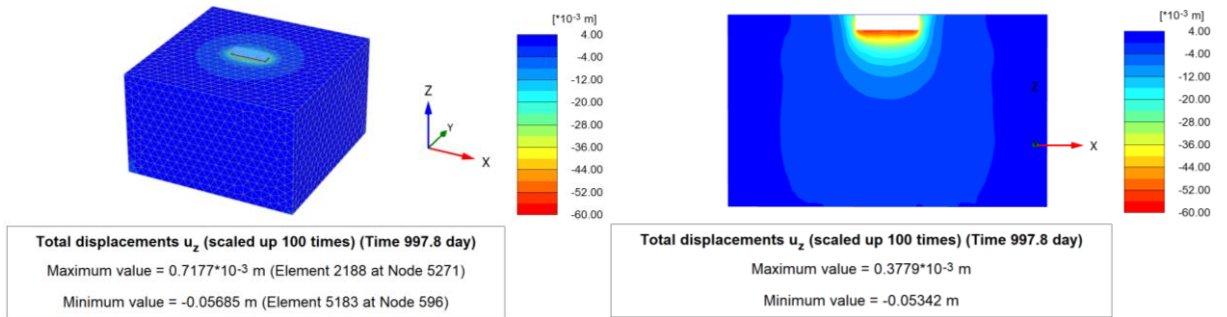
Şekil Ek-40. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 5)

**Analiz 6**

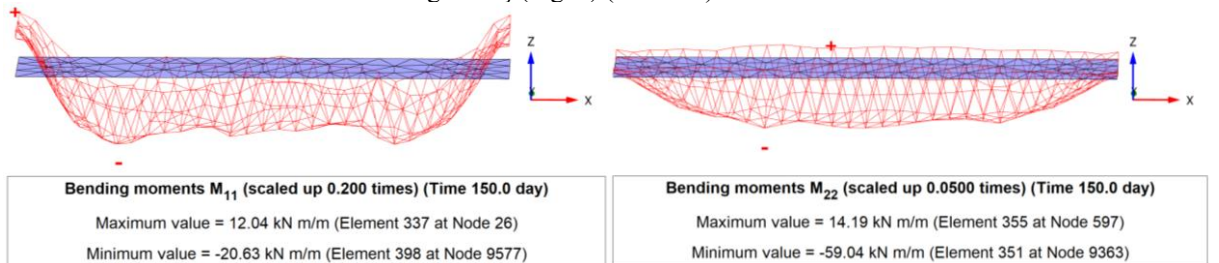
**Şekil Ek-41.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklenme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 6)



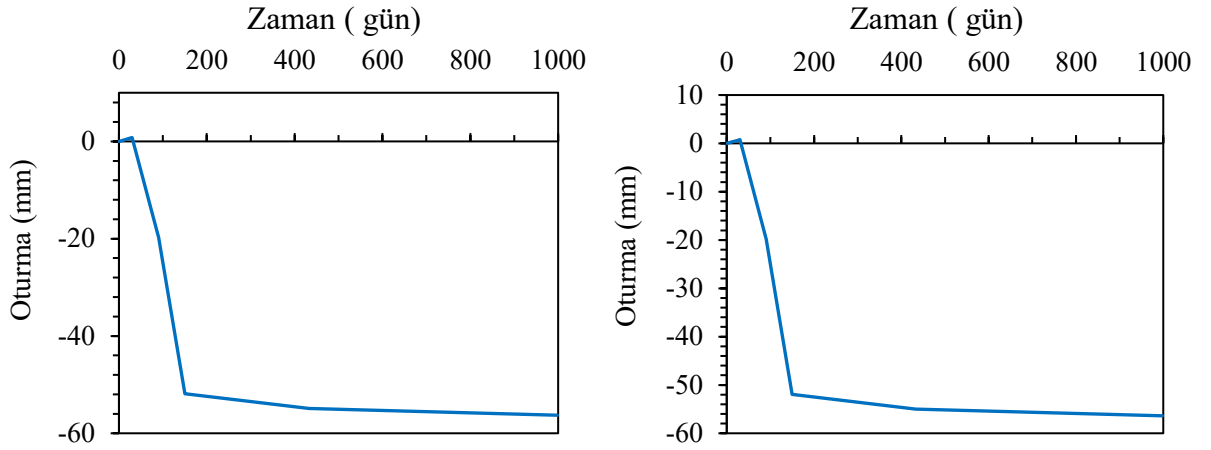
**Şekil Ek-42.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 6)



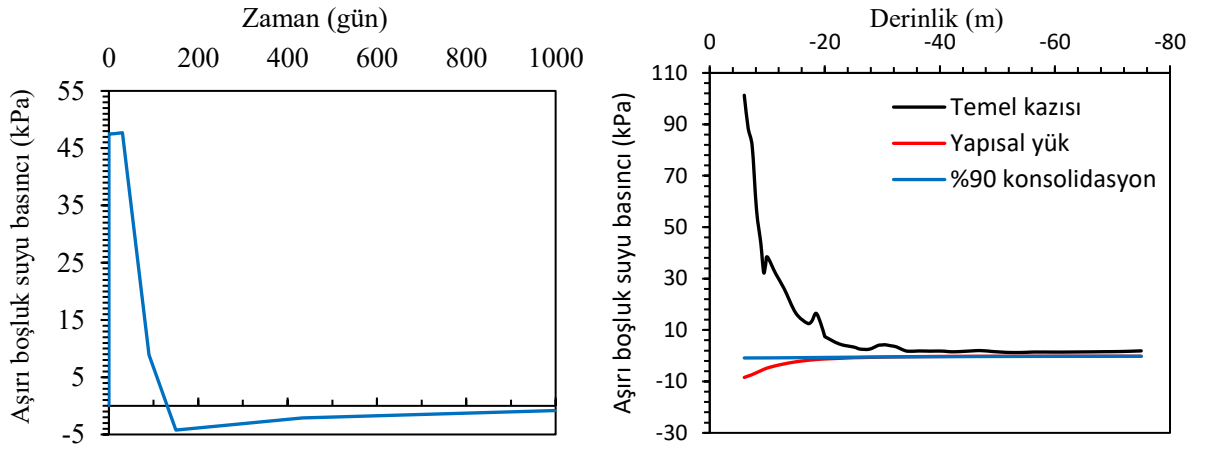
**Şekil Ek-43.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 6)



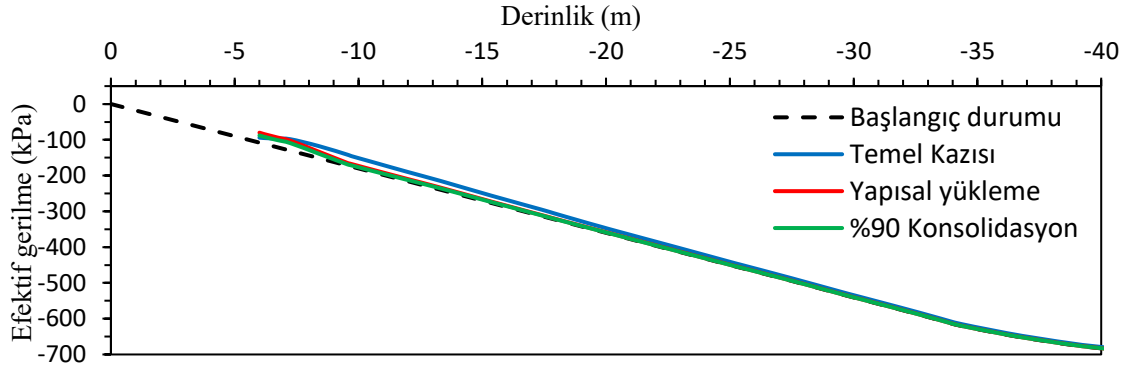
**Şekil Ek-44.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 6)



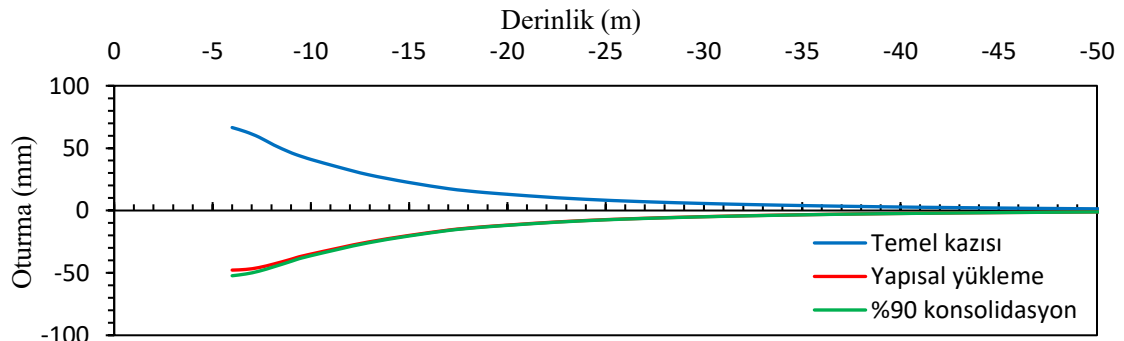
Şekil Ek-45. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 6)



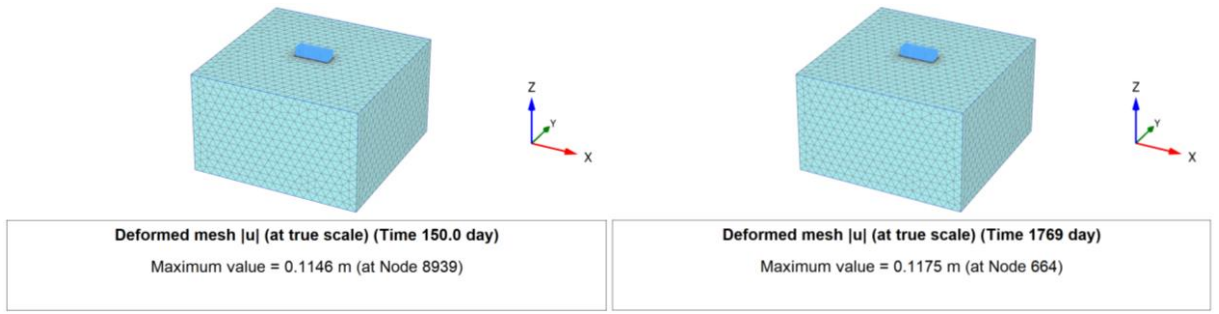
Şekil Ek-46. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 6)



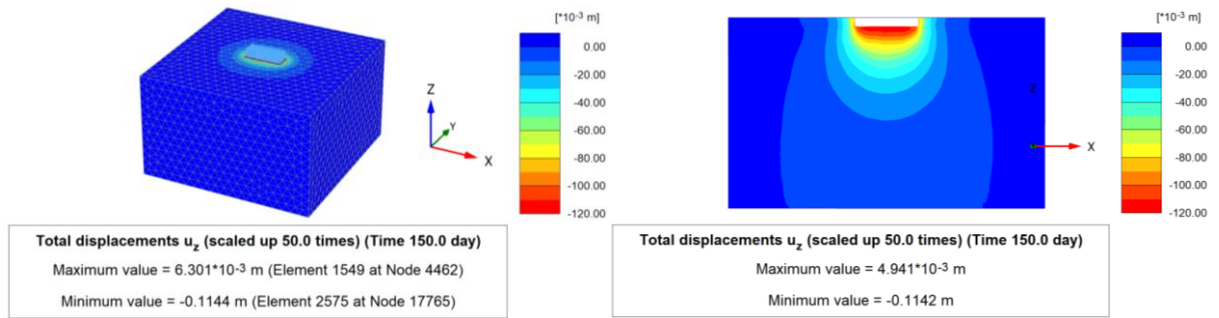
Şekil Ek-47. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 6)



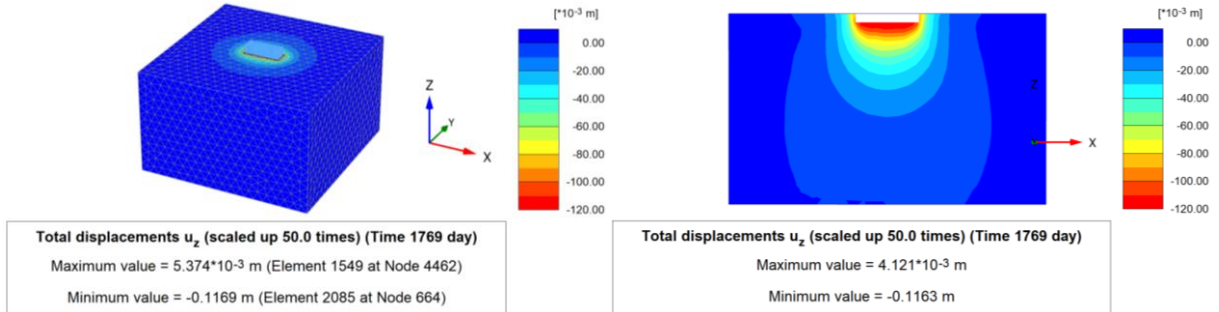
Şekil Ek-48. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 6)

**Analiz 7**

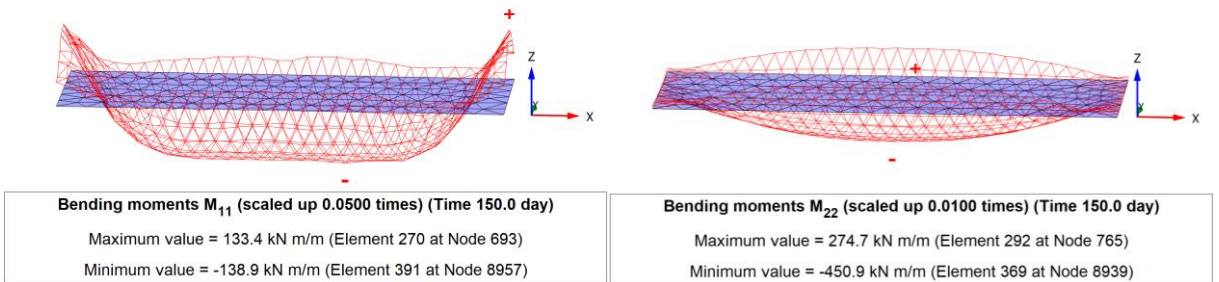
**Şekil Ek-49.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 7)



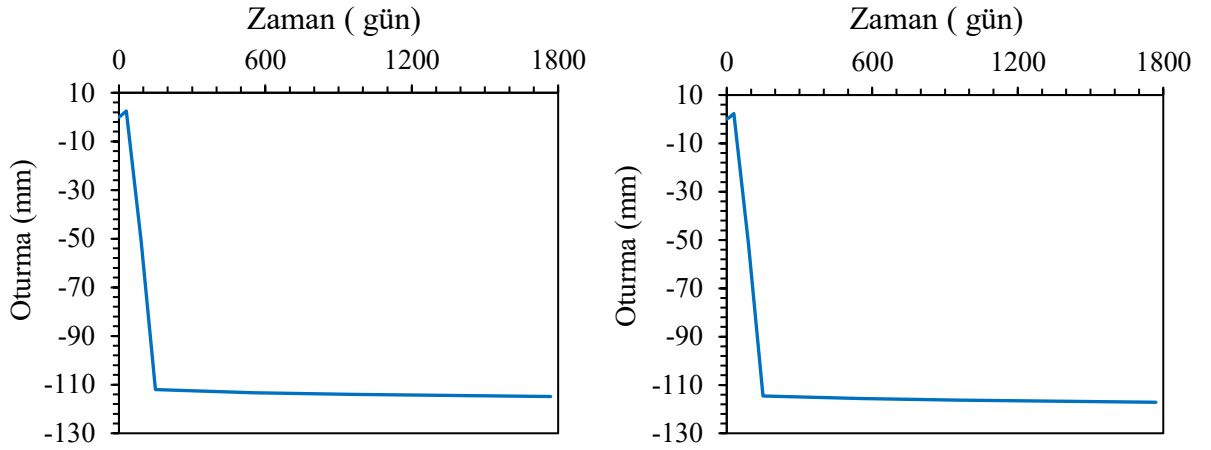
**Şekil Ek-50.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 7)



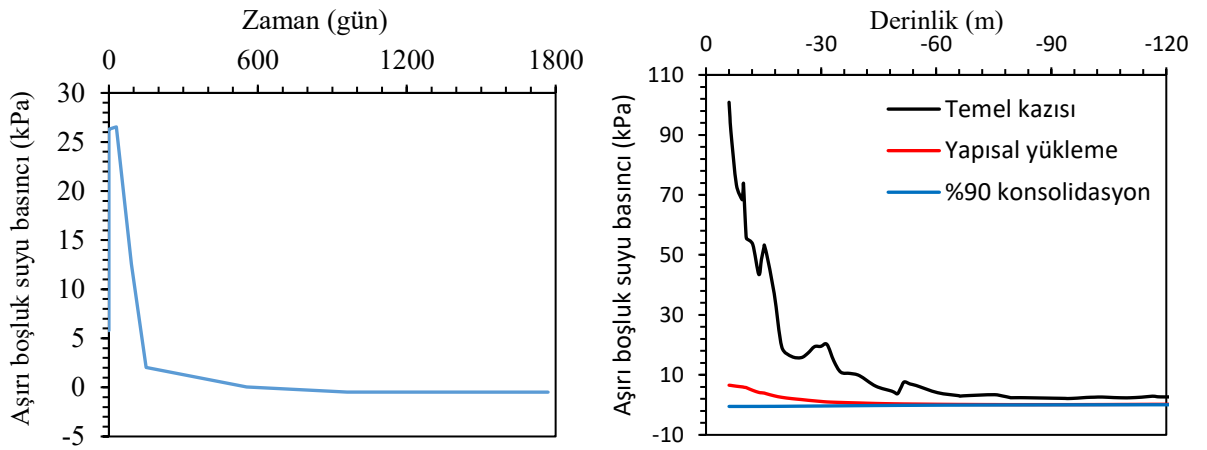
**Şekil Ek-51.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 7)



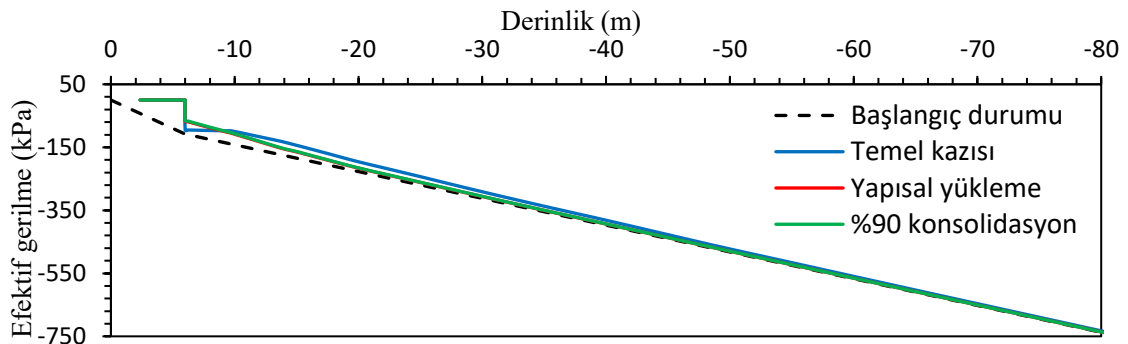
**Şekil Ek-52.** Radye temel in kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 7)



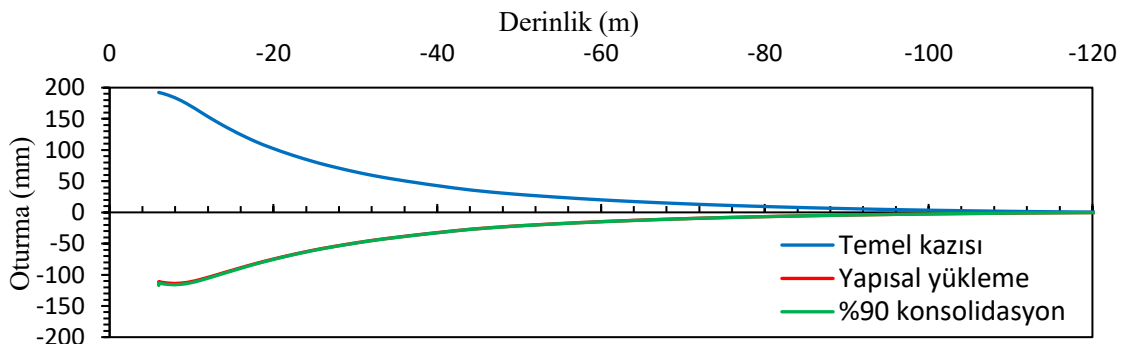
Şekil Ek-53. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 7)



Şekil Ek-54. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 7)

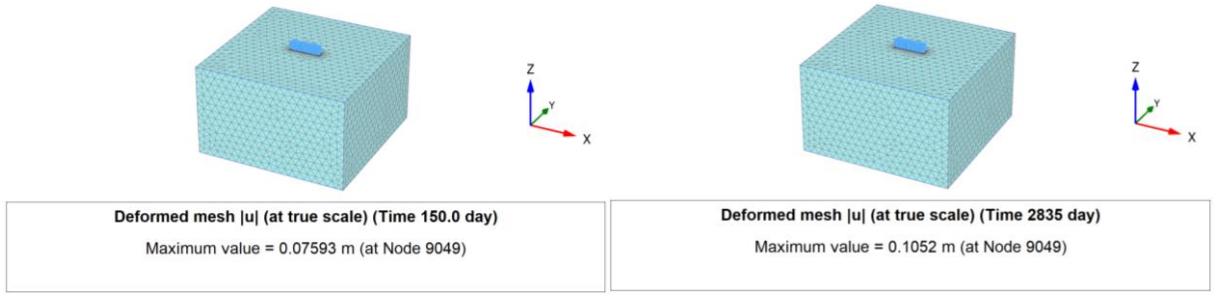


Şekil Ek-55. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 7)

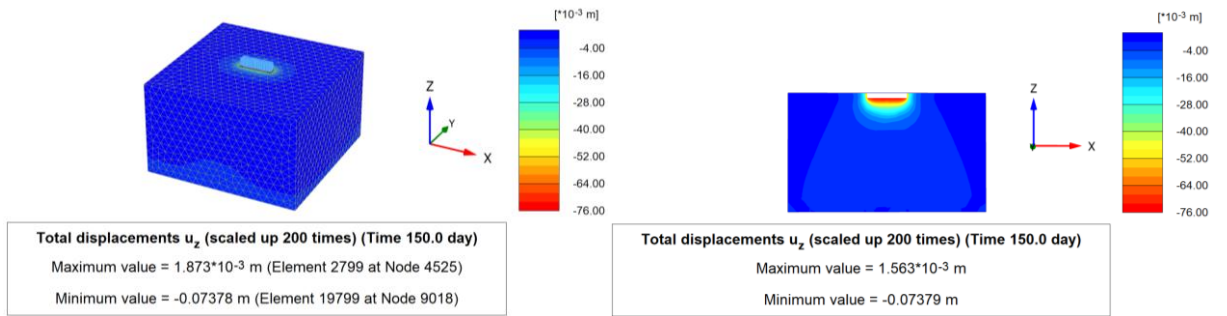


Şekil Ek-56. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 7)

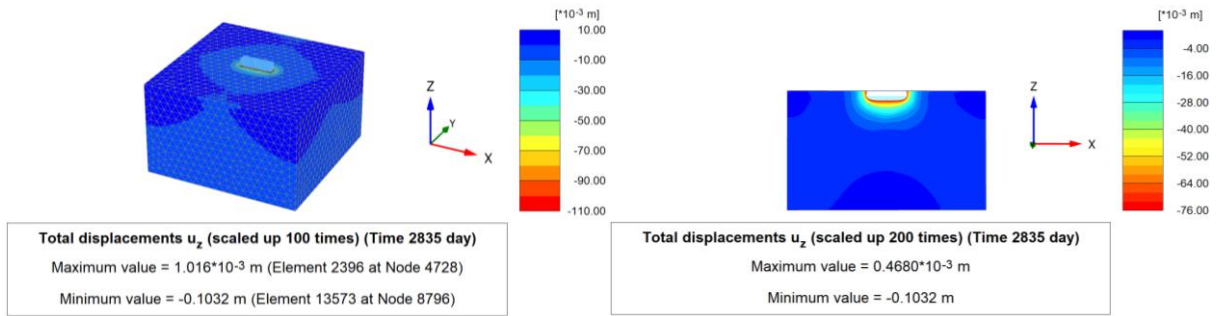
## Analiz 8



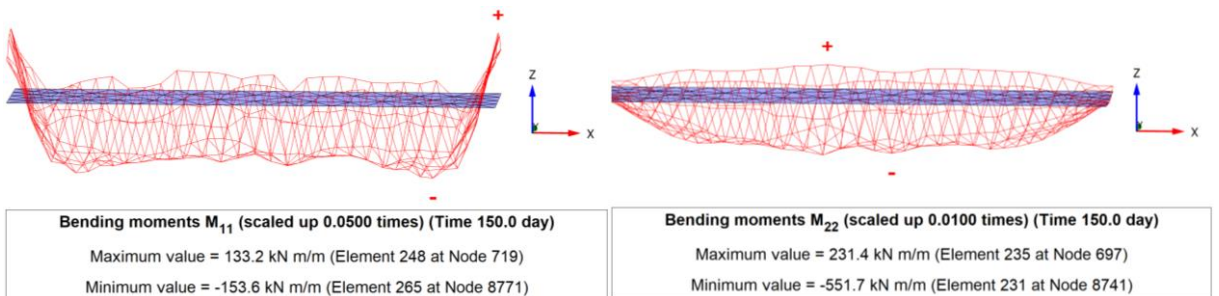
**Şekil Ek-57.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 8)



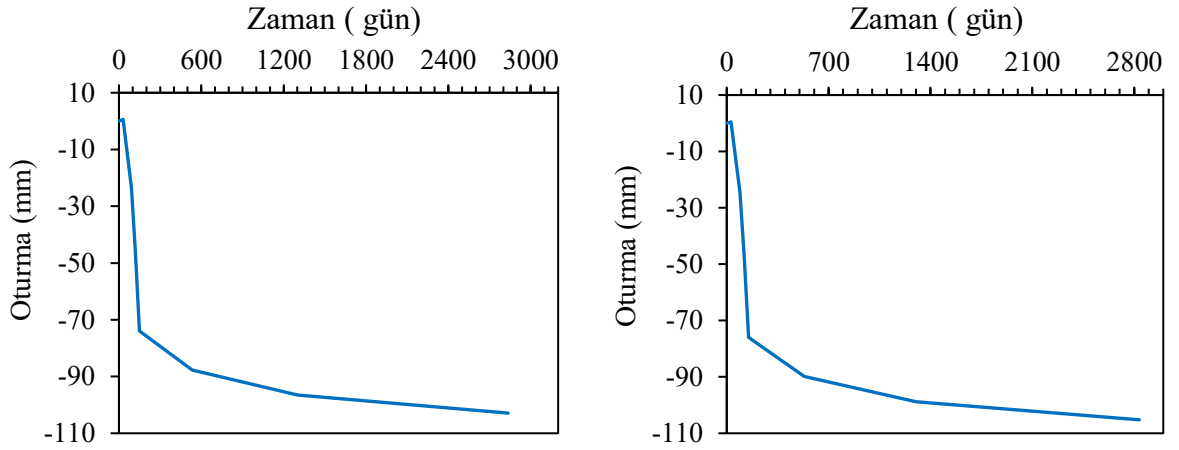
**Şekil Ek-58.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 8)



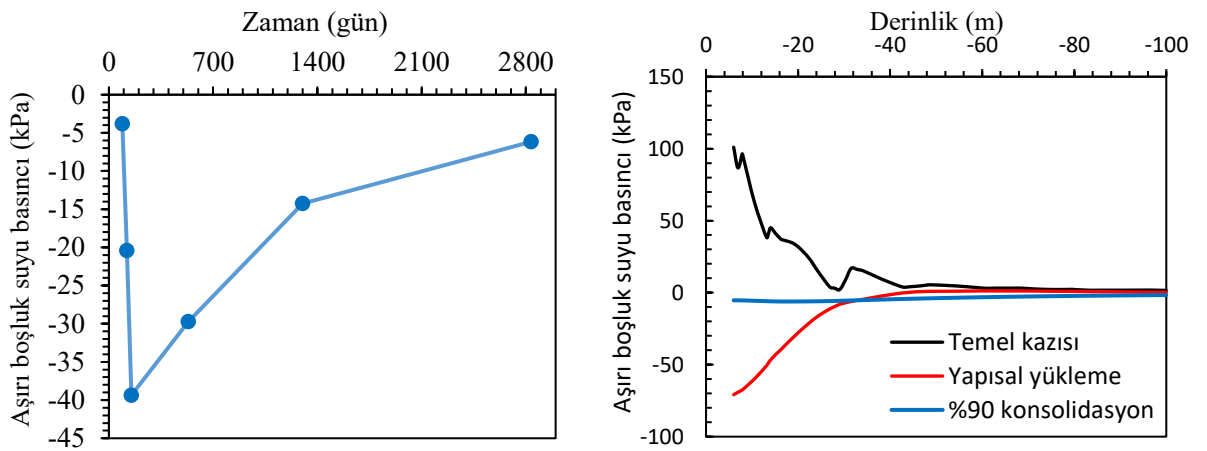
**Şekil Ek-59.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 8)



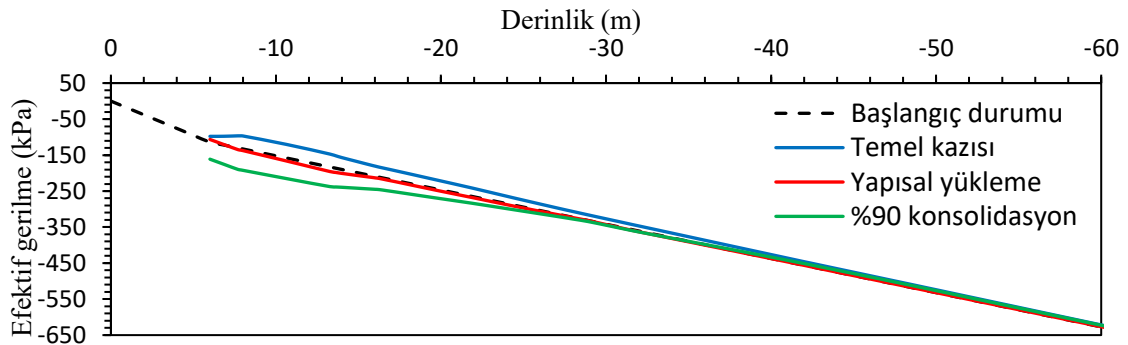
**Şekil Ek-60.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 8)



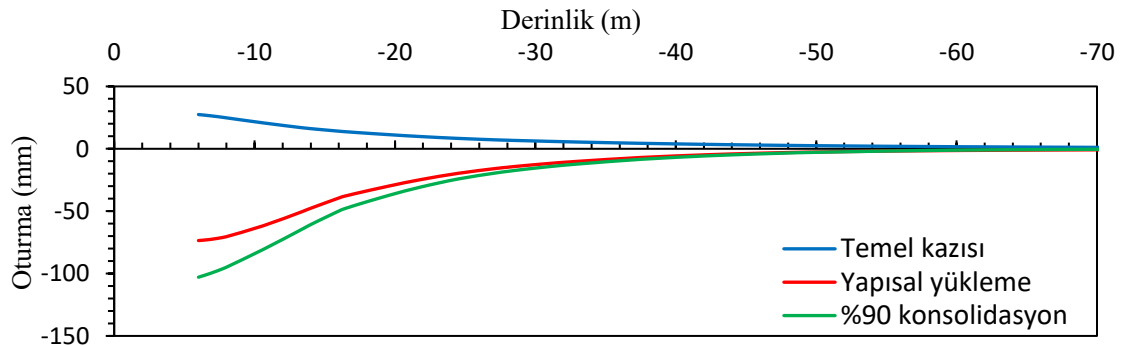
Şekil Ek-61. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda)



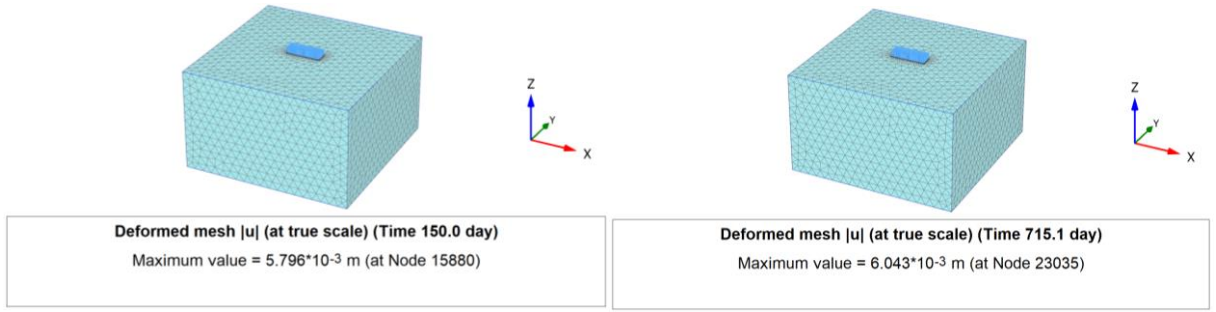
Şekil Ek-62. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 8)



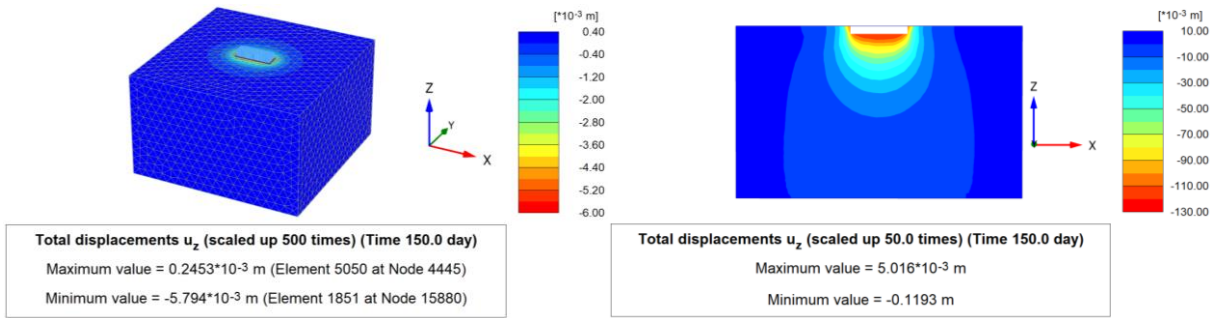
Şekil Ek-63. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 8)



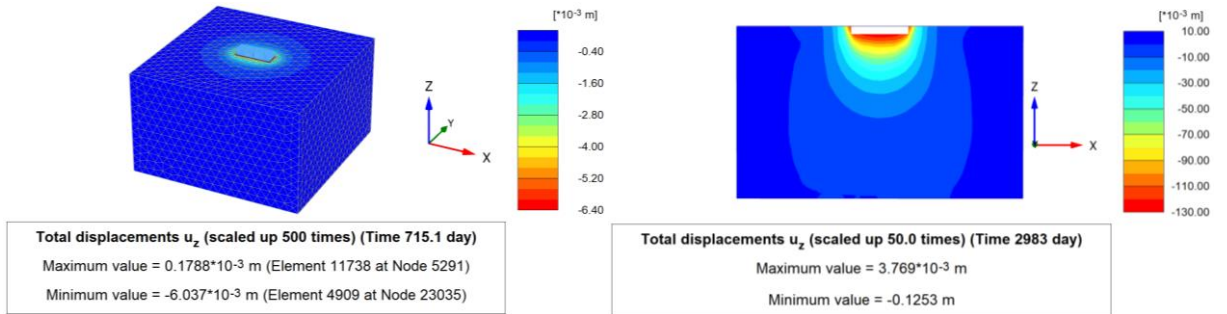
Şekil Ek-64. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 8)

**Analiz 9**

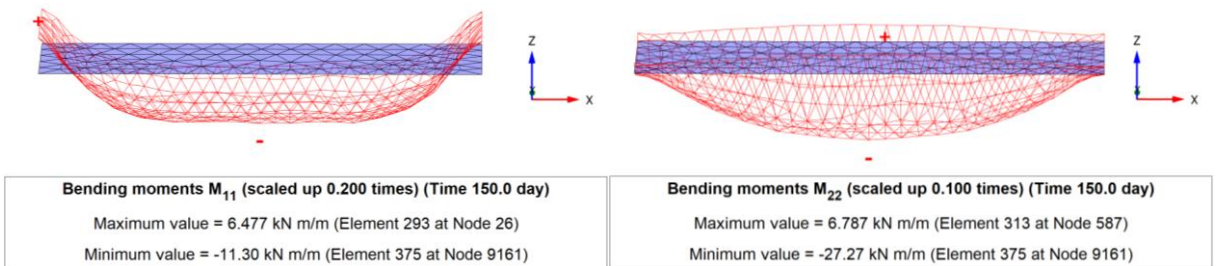
**Şekil Ek-65.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 9)



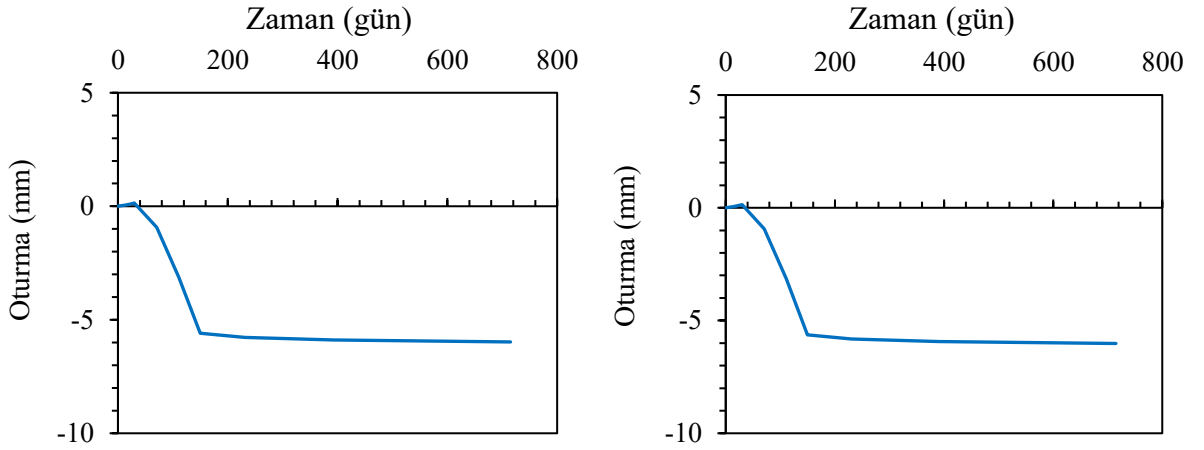
**Şekil Ek-66.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 9)



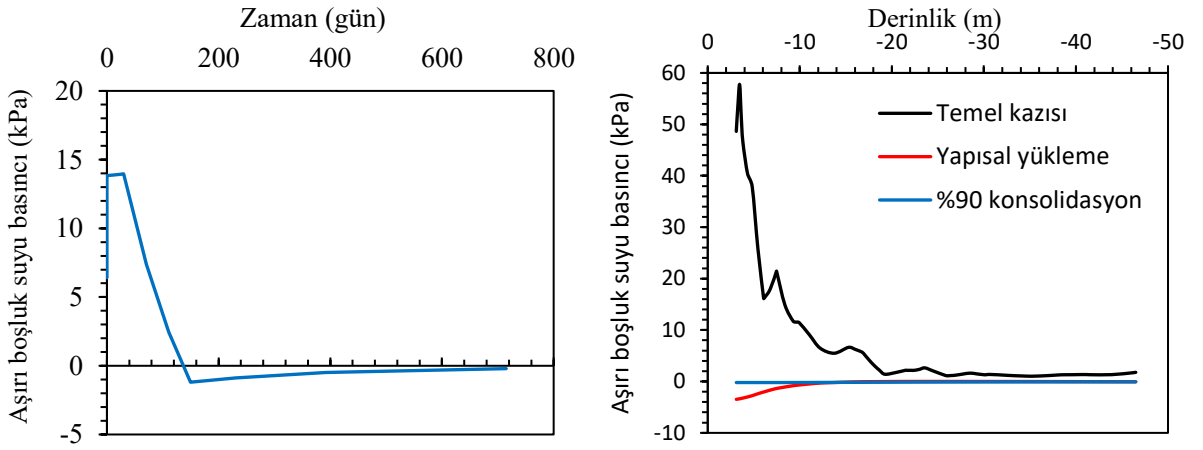
**Şekil Ek-67.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 9)



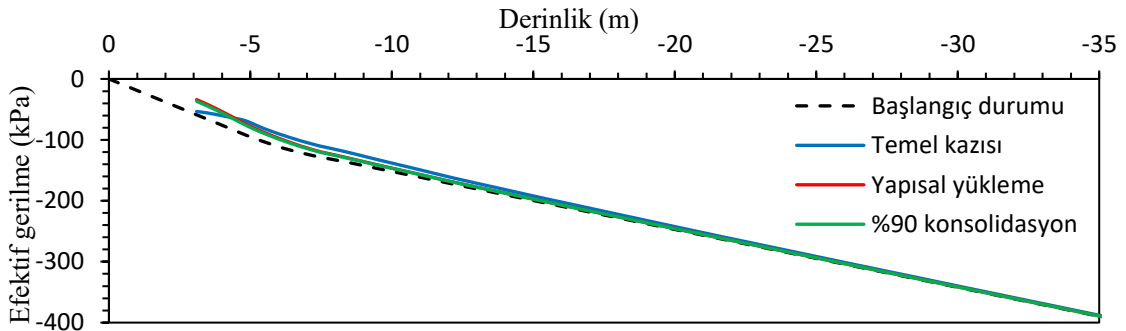
**Şekil Ek-68.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 9)



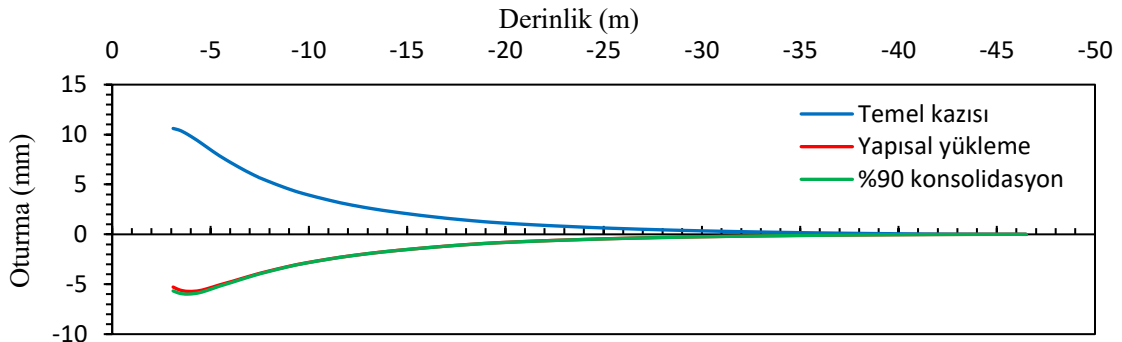
Şekil Ek-69. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 9)



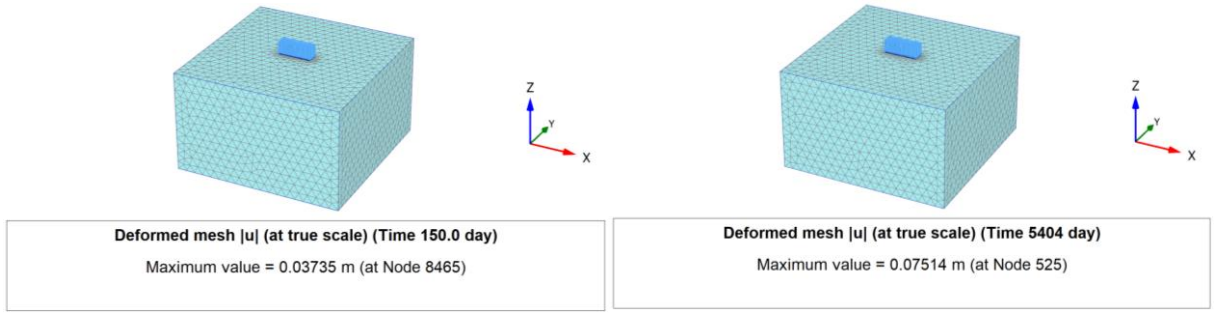
Şekil Ek-70. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 9)



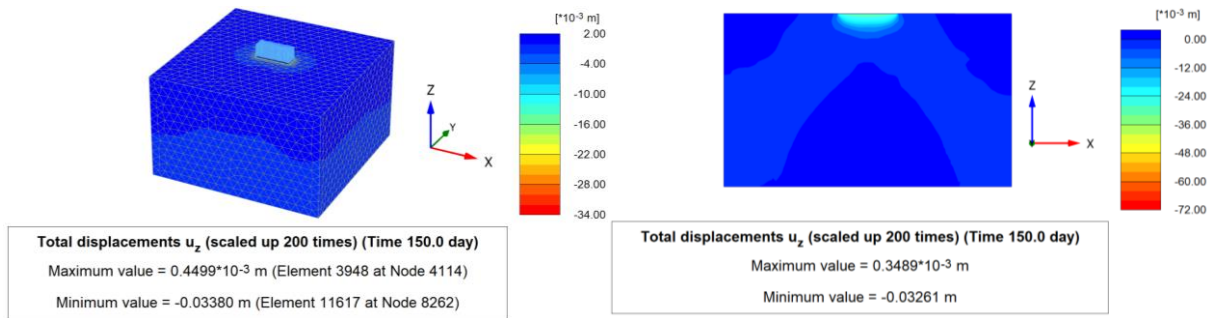
Şekil Ek-71. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 9)



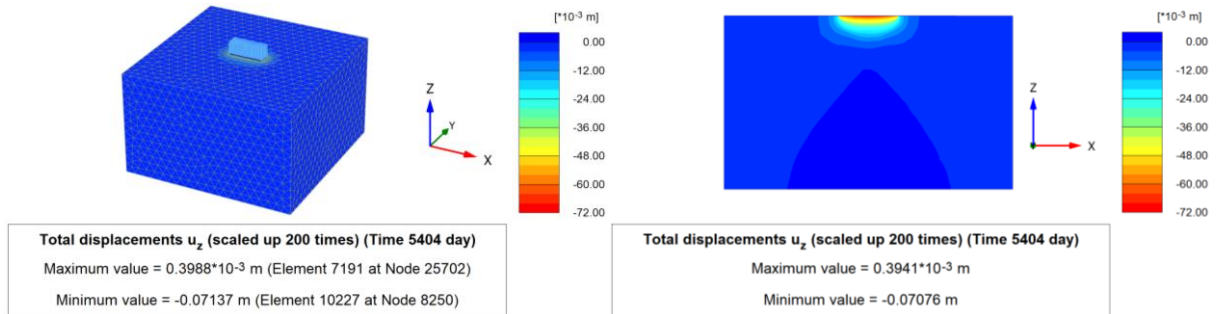
Şekil Ek-72. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 9)

**Analiz 10**

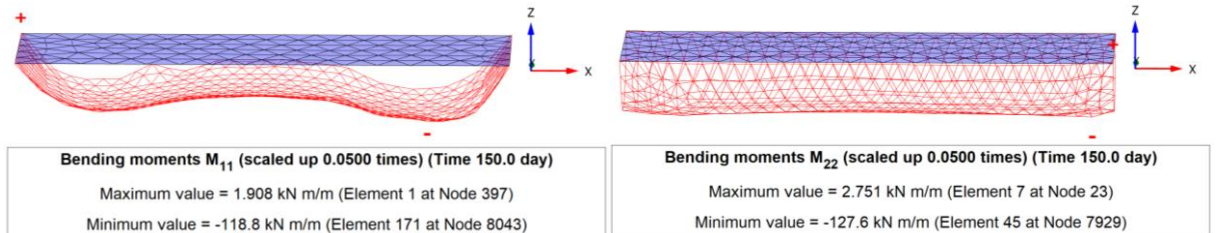
**Şekil Ek-73.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 10)



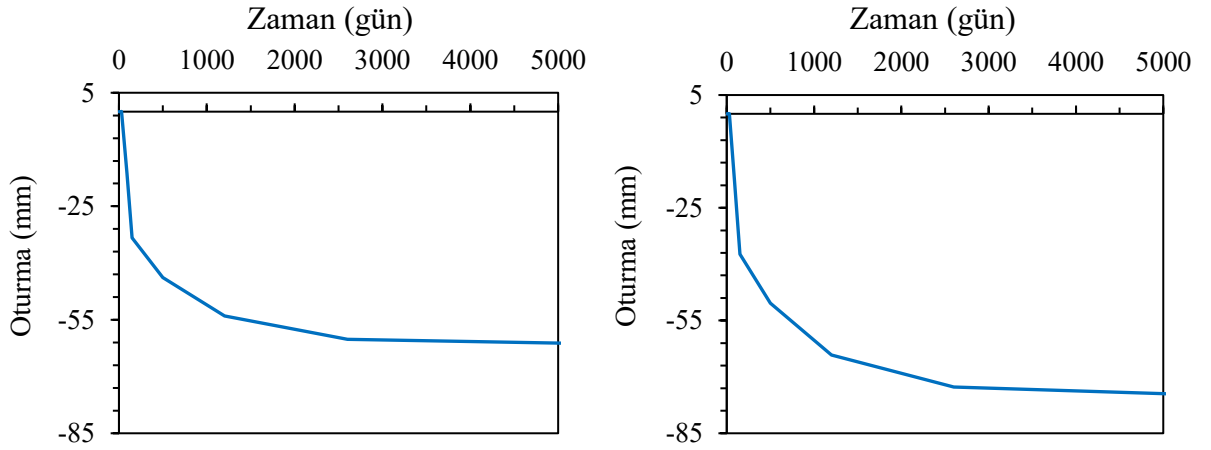
**Şekil Ek-74.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 10)



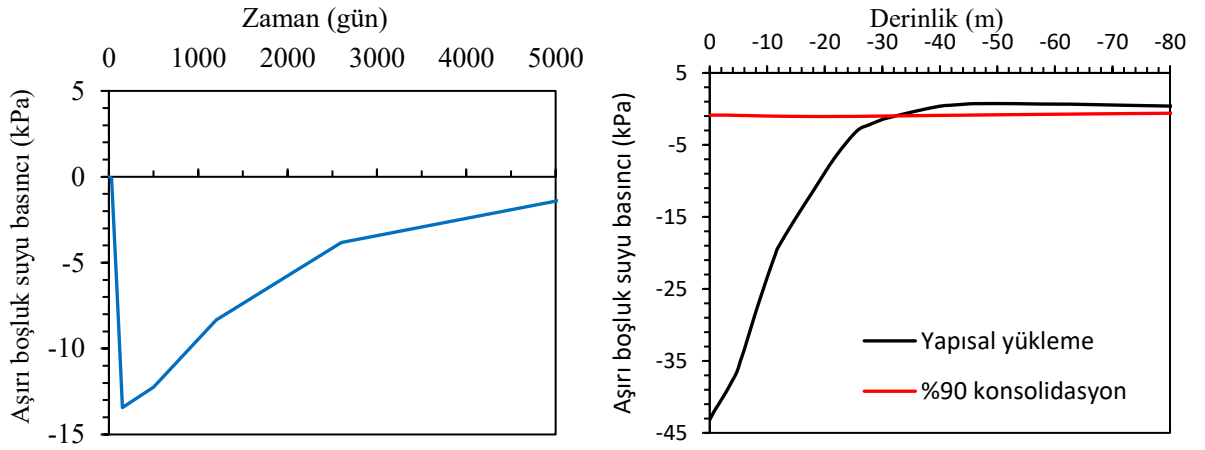
**Şekil Ek-75.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 10)



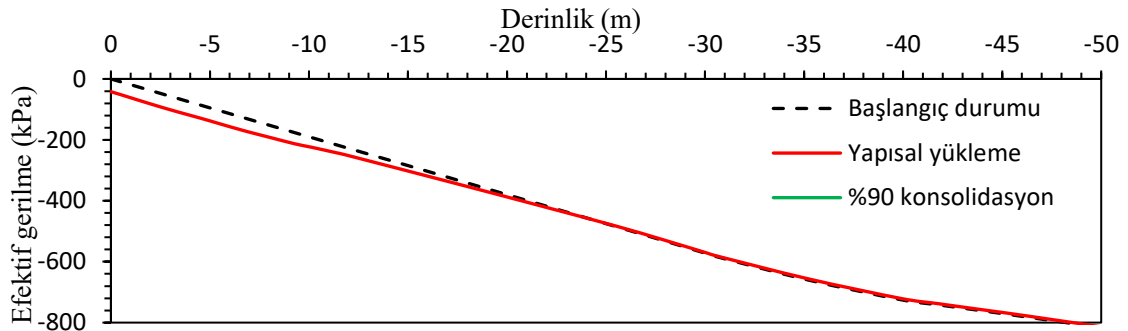
**Şekil Ek-76.** Radye temel in kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 10)



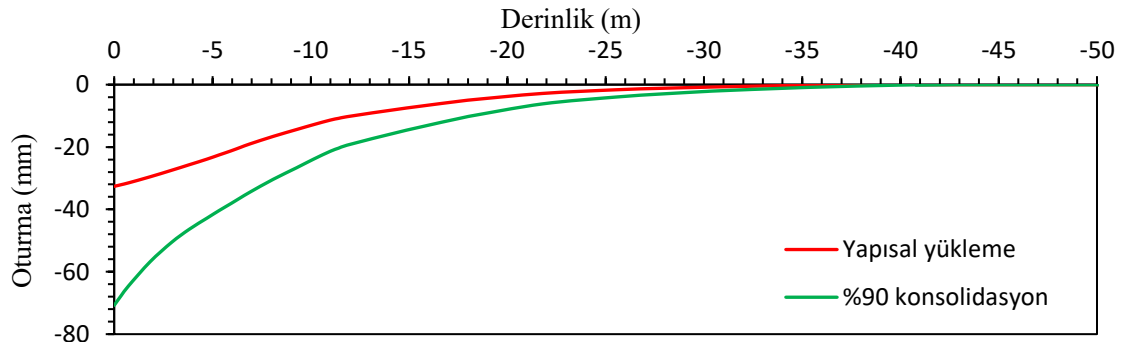
Şekil Ek-77. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 10)



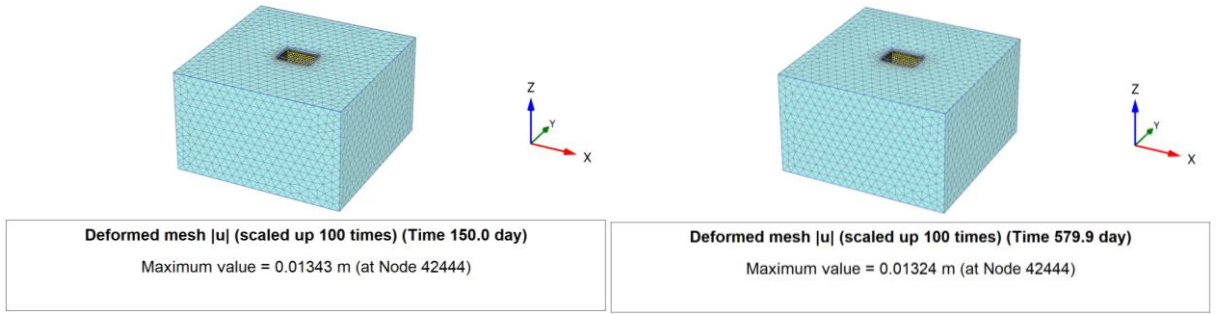
Şekil Ek-78. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 10)



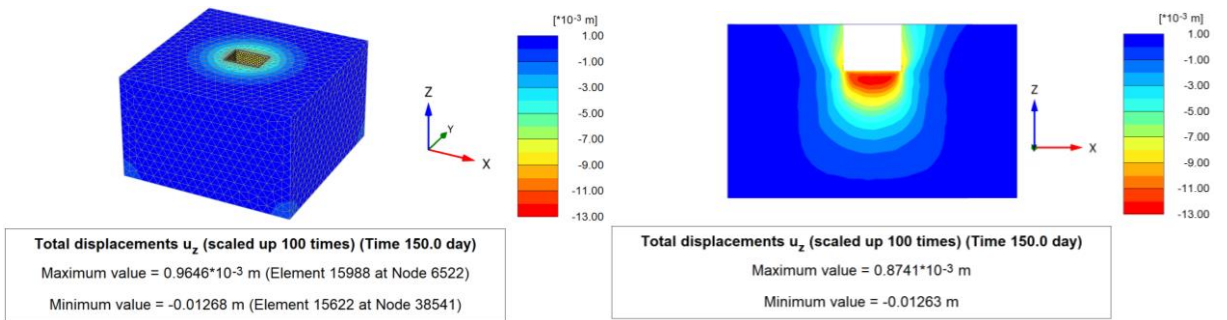
Şekil Ek-79. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 10)



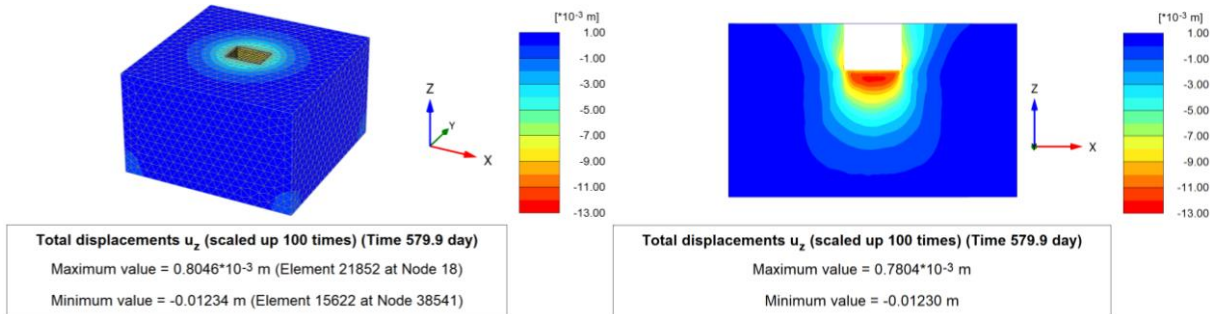
Şekil Ek-80. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 10)

**Analiz 11**

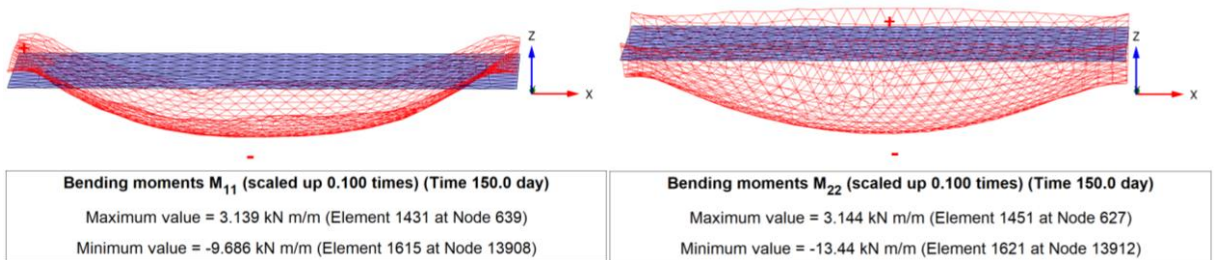
**Şekil Ek-81.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 11)



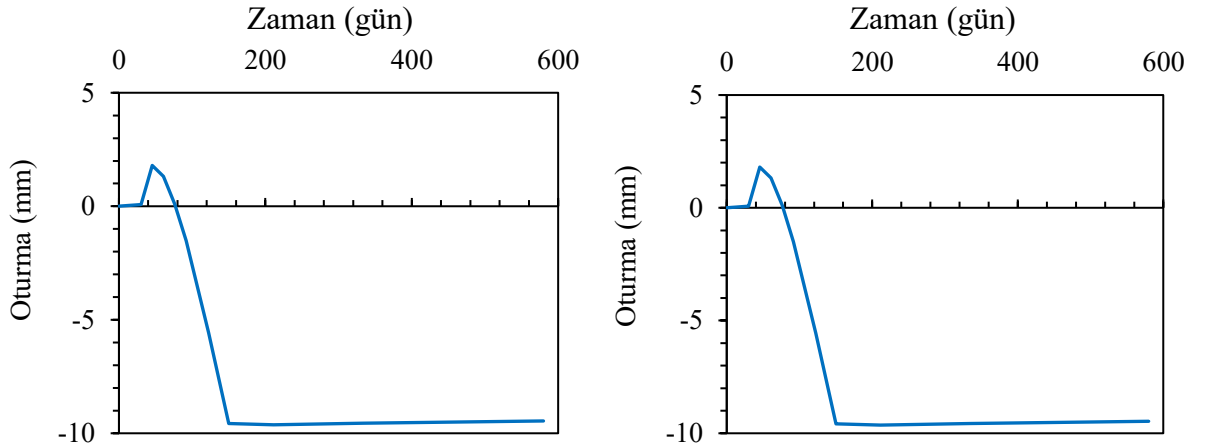
**Şekil Ek-82.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 11)



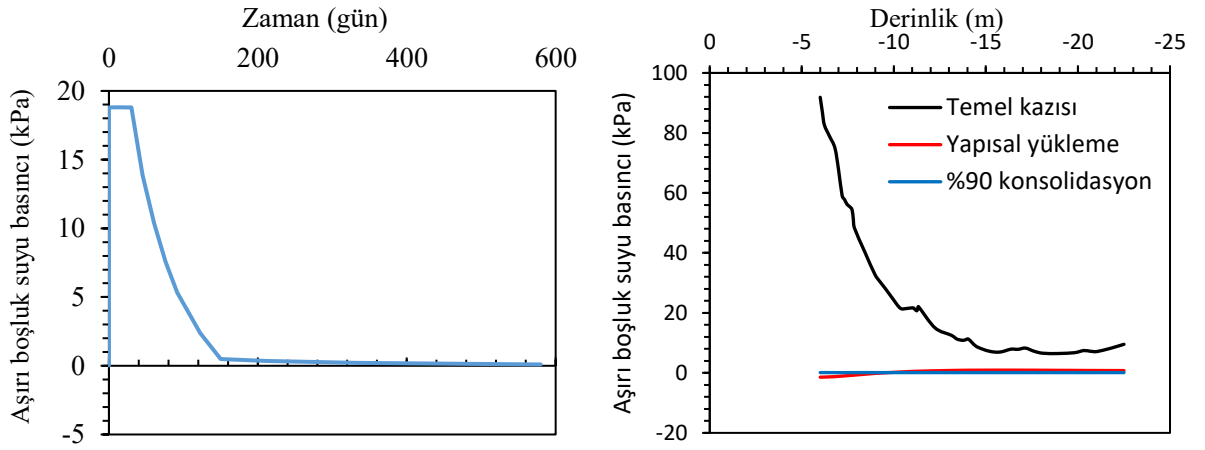
**Şekil Ek-83.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 11)



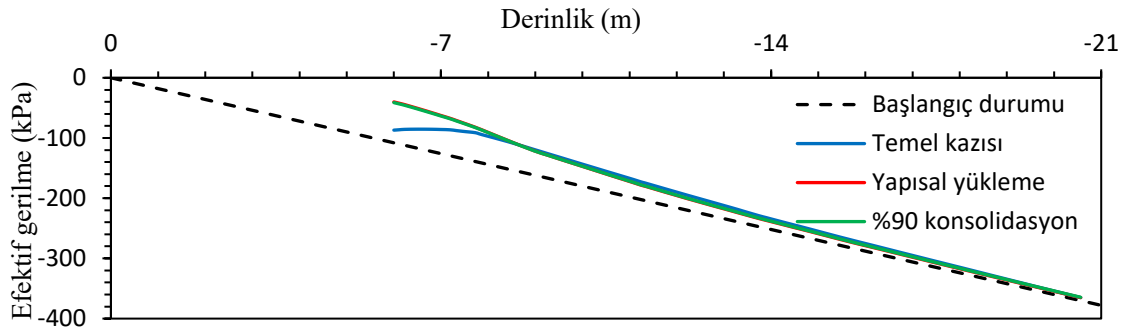
**Şekil Ek-84.** Radye temel in kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 11)



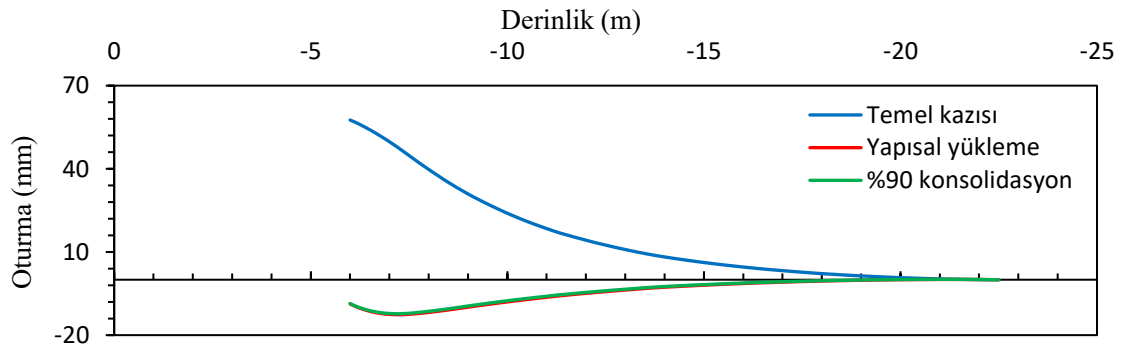
Şekil Ek-85. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 11)



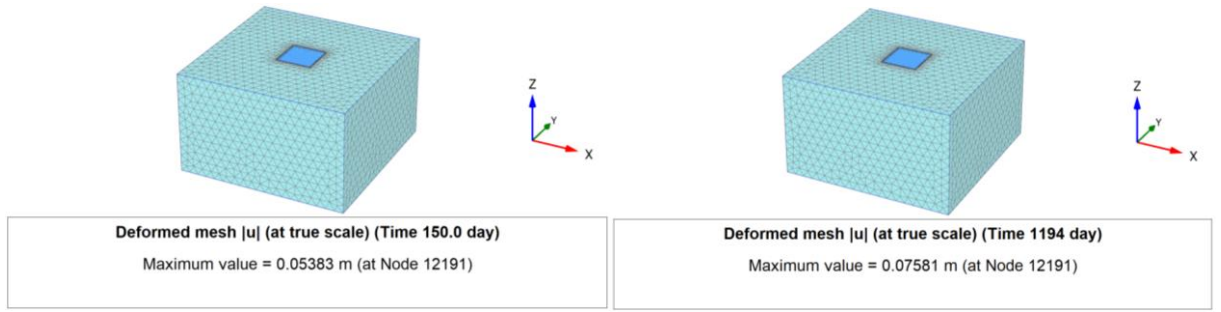
Şekil Ek-86. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 11)



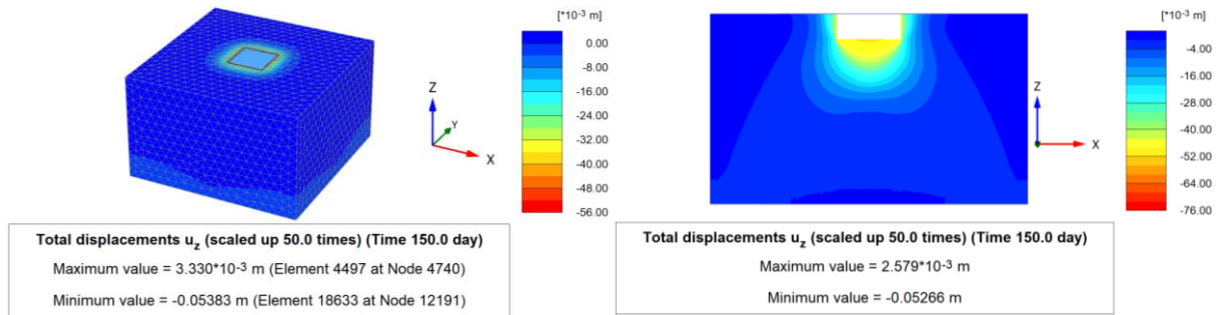
Şekil Ek-87. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 11)



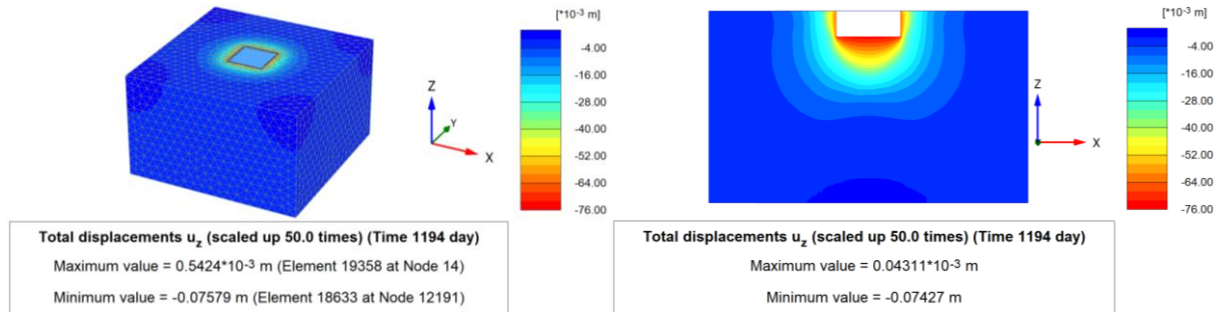
Şekil Ek-88. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 11)

**Analiz 12**

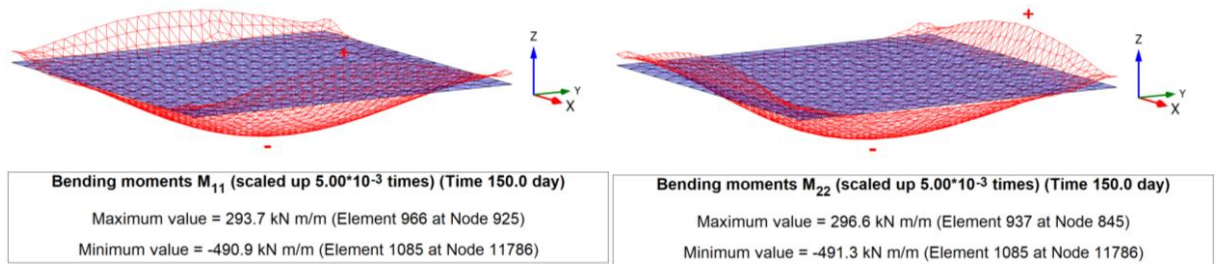
**Şekil Ek-89.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 12)



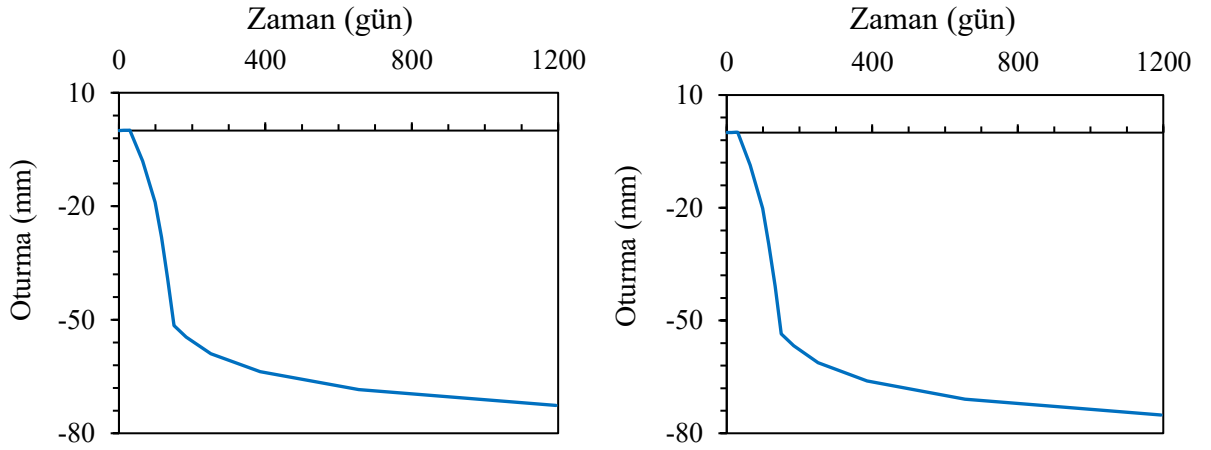
**Şekil Ek-90.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 12)



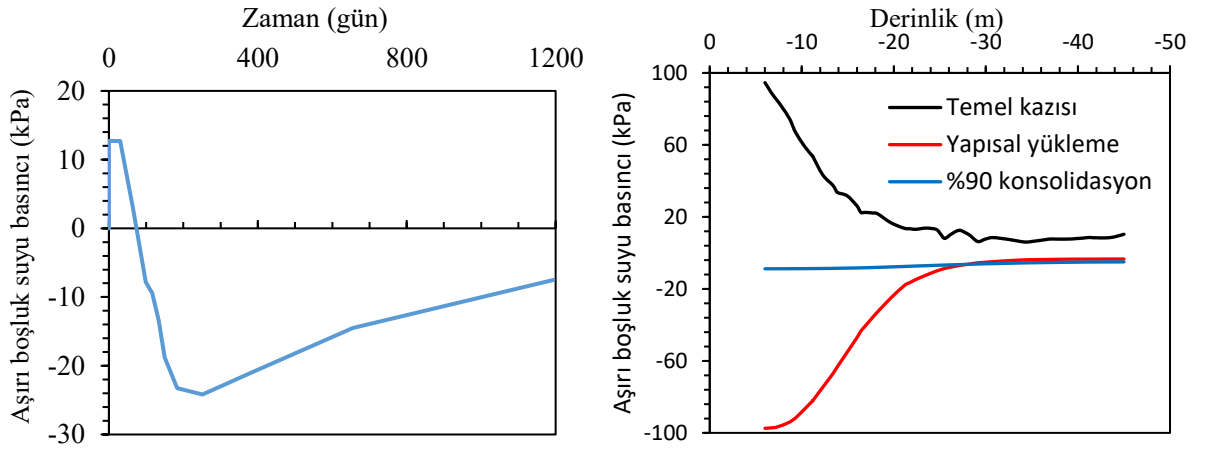
**Şekil Ek-91.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 12)



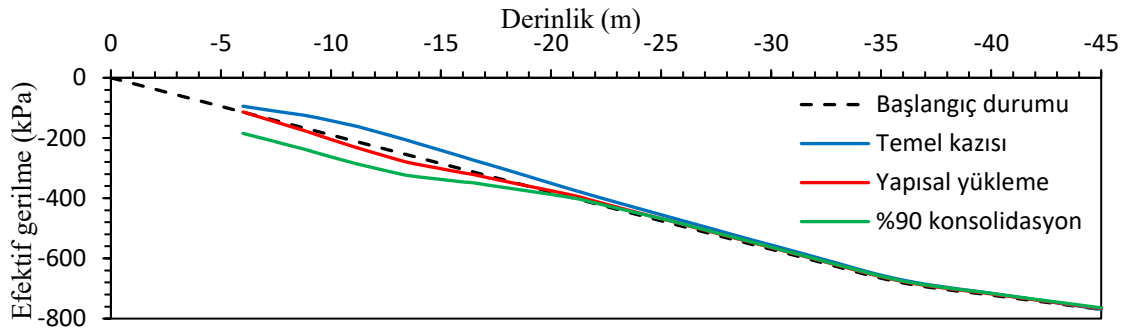
**Şekil Ek-92.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 12)



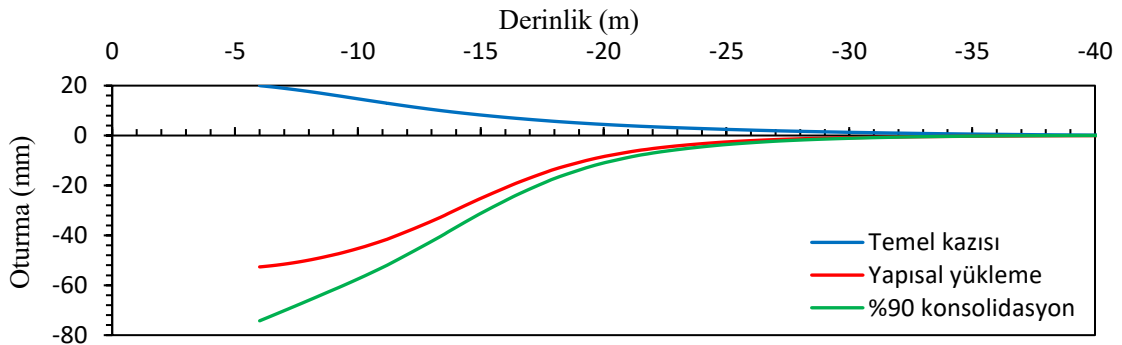
Şekil Ek-93. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 12)



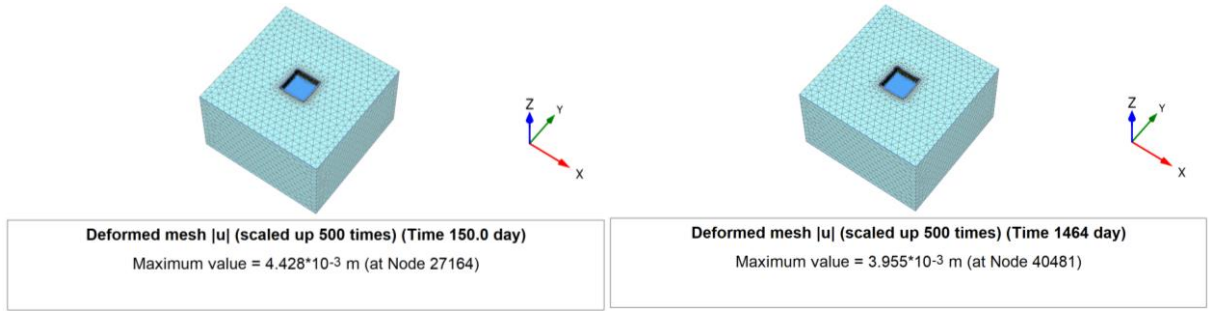
Şekil Ek-94. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 12)



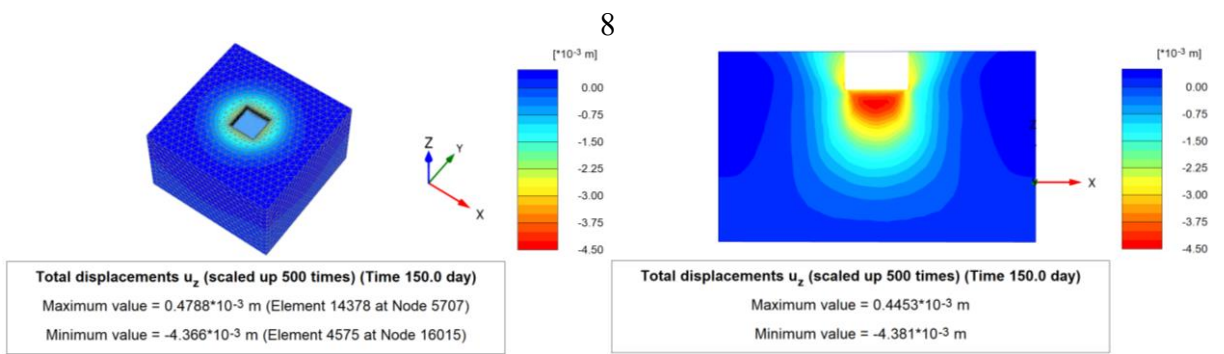
Şekil Ek-95. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 12)



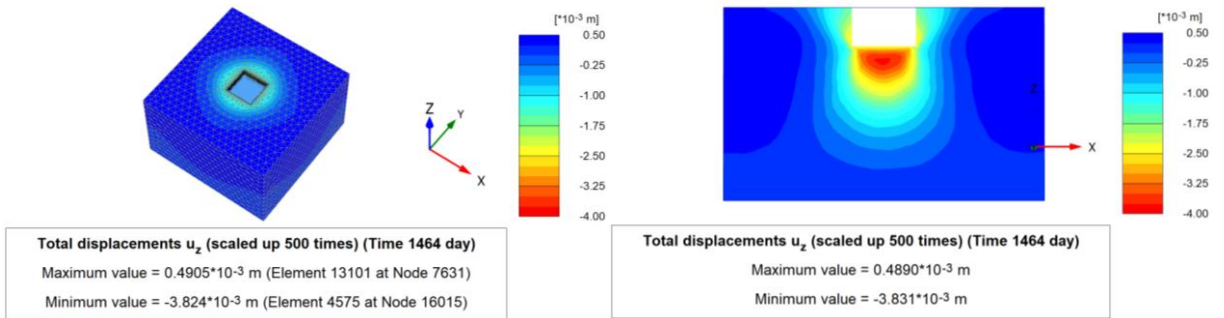
Şekil Ek-96. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 12)

**Analiz 13**

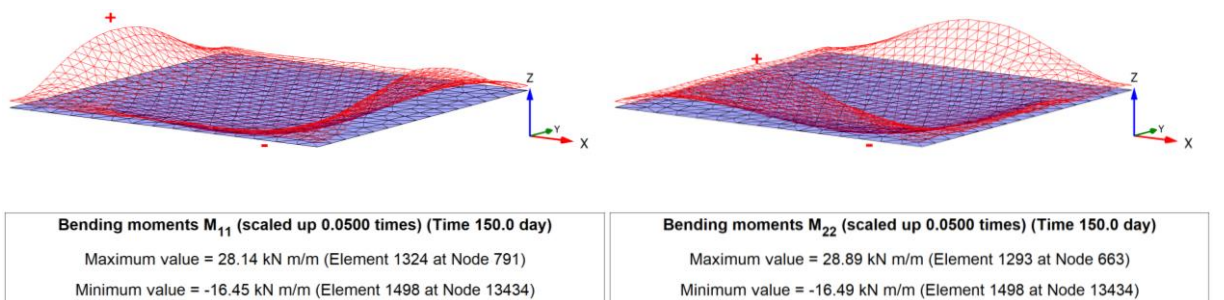
**Şekil Ek-97.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklenme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 13)



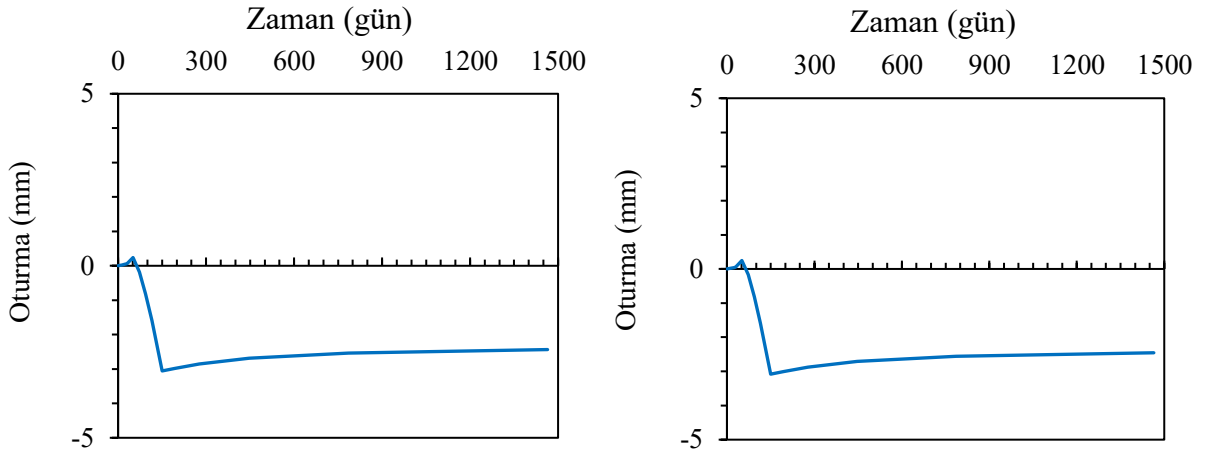
**Şekil Ek-98.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 13)



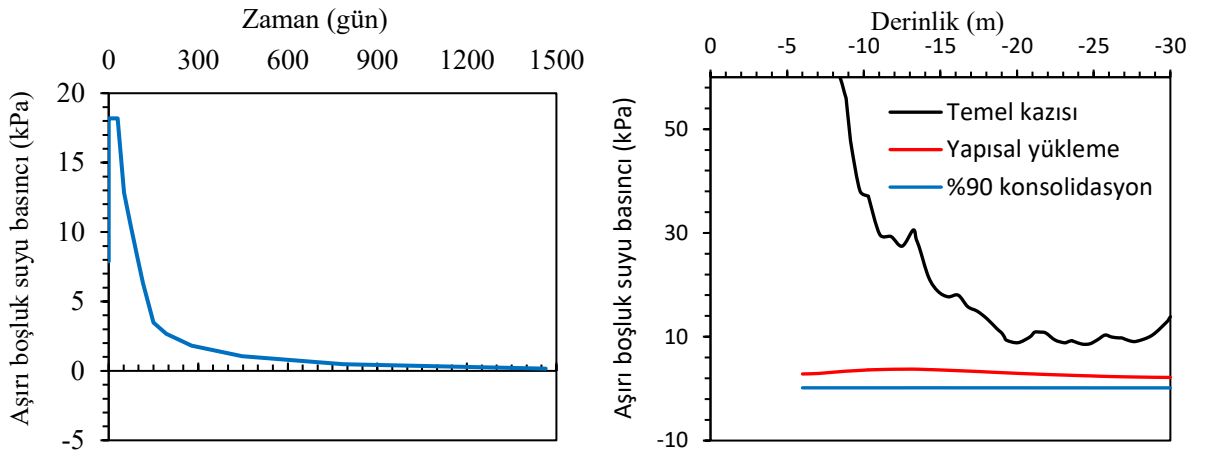
**Şekil Ek-99.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 13)



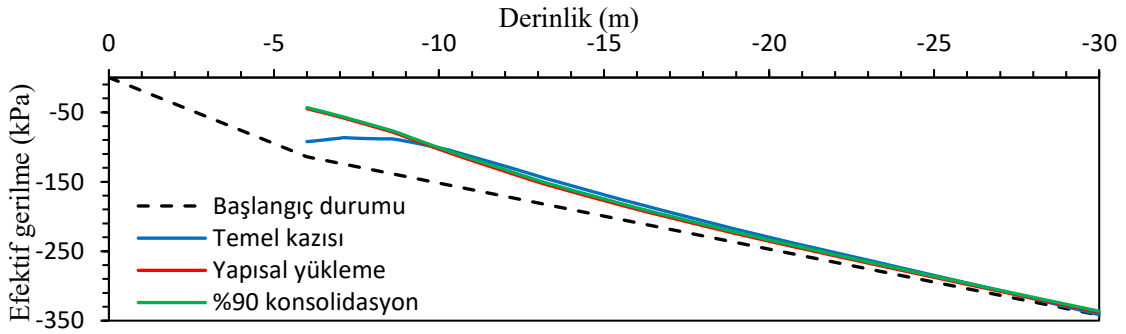
**Şekil Ek-100.** Radye temel in kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 13)



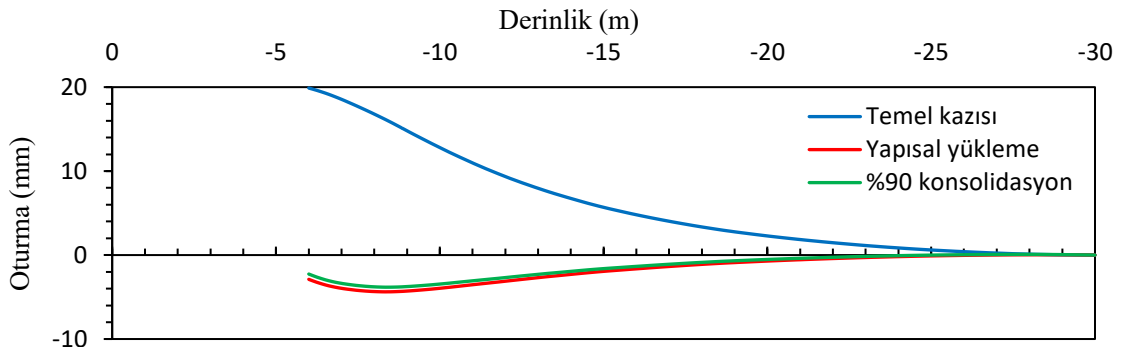
Şekil Ek-101. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 13)



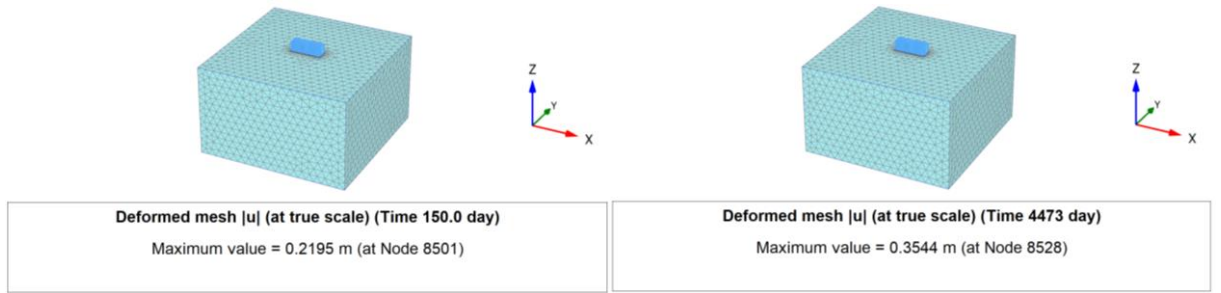
Şekil Ek-102. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 13)



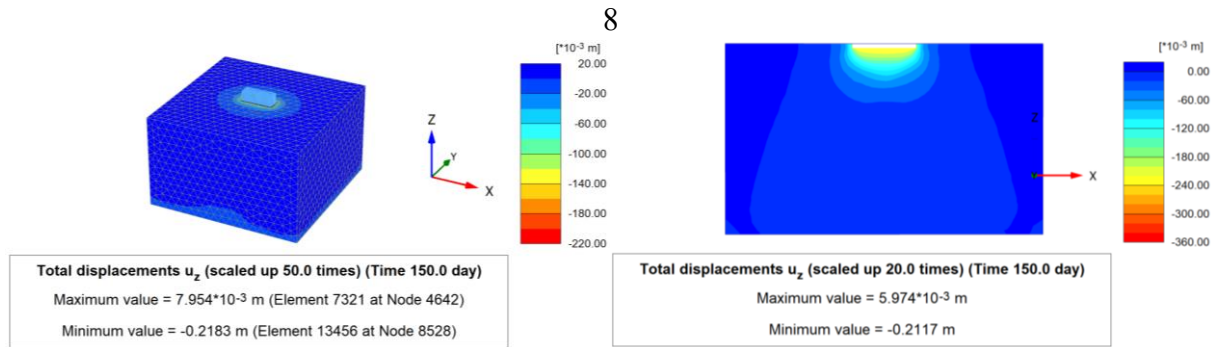
Şekil Ek-103. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 13)



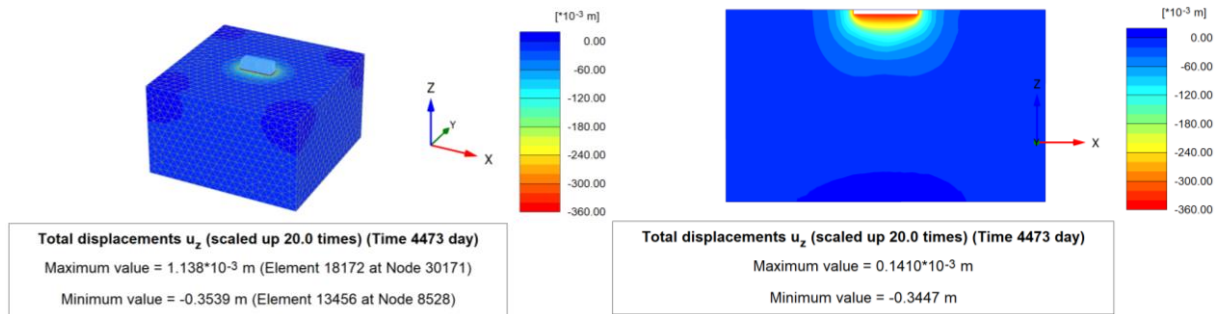
Şekil Ek-104. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 13)

**Analiz 14**

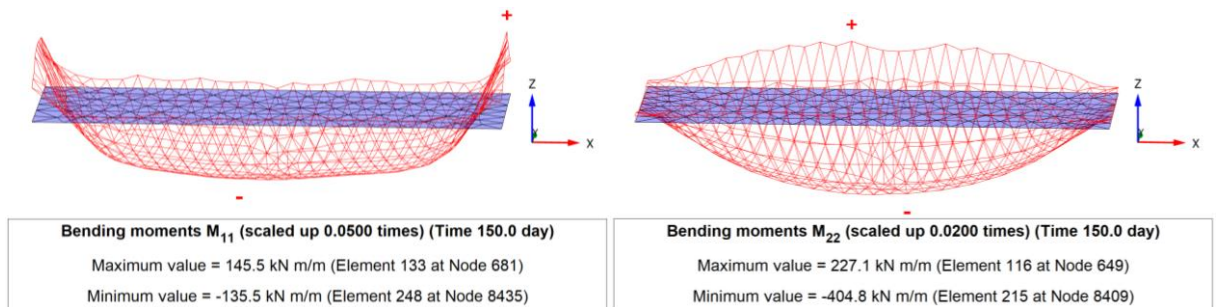
**Şekil Ek-105.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 14)



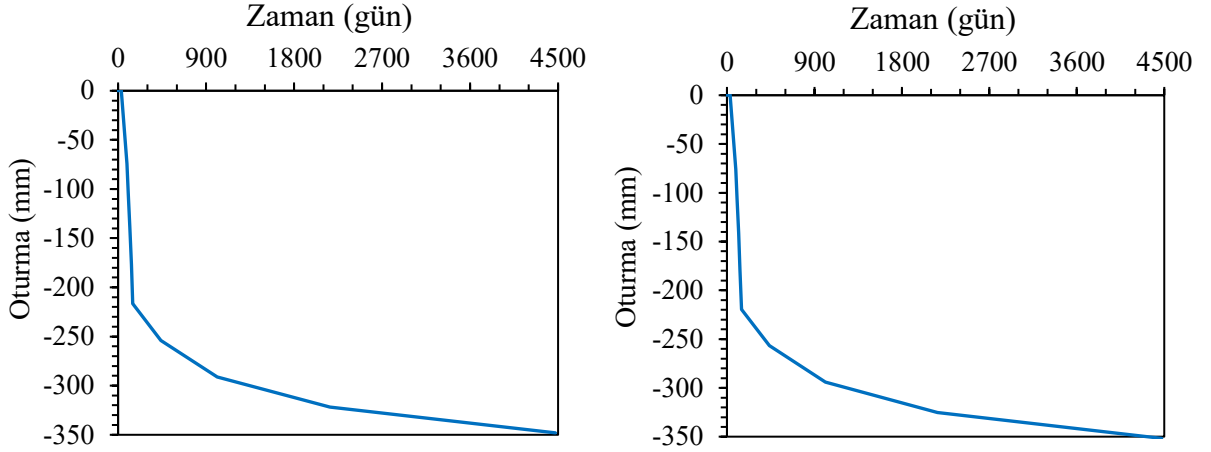
**Şekil Ek-106.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 14)



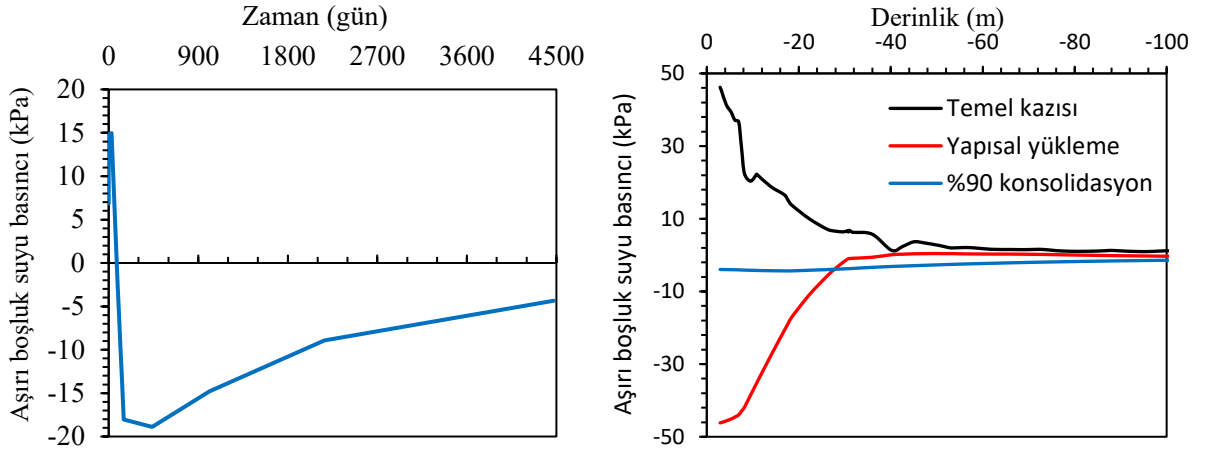
**Şekil Ek-107.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 14)



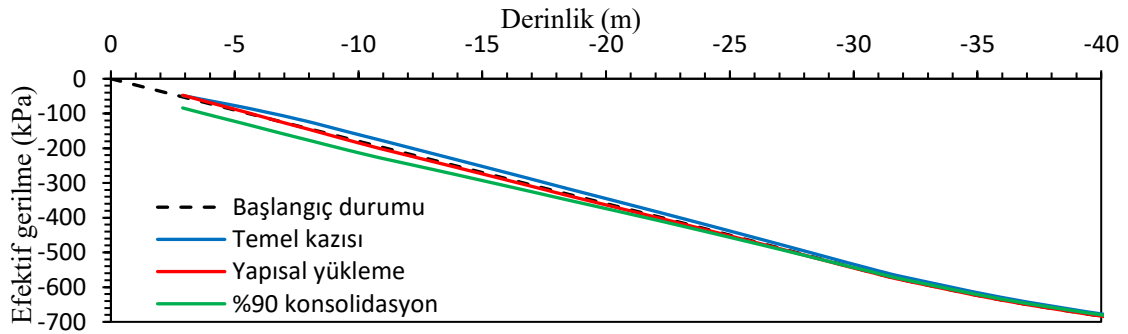
**Şekil Ek-108.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 14)



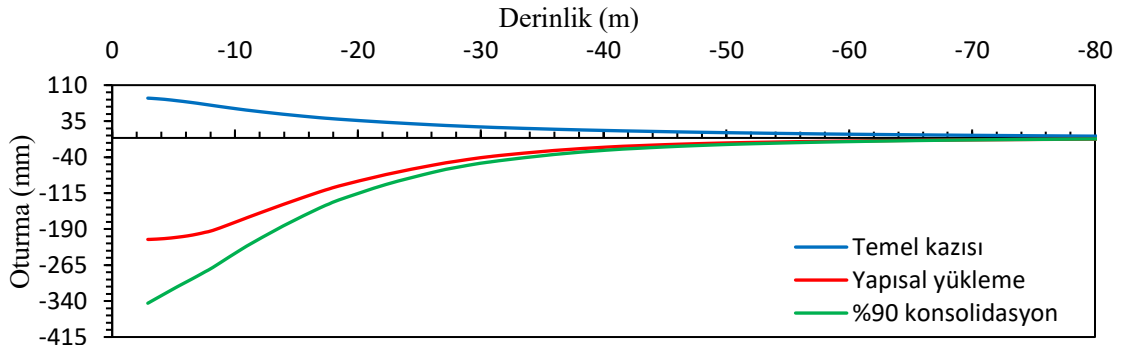
Şekil Ek-109. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 14)



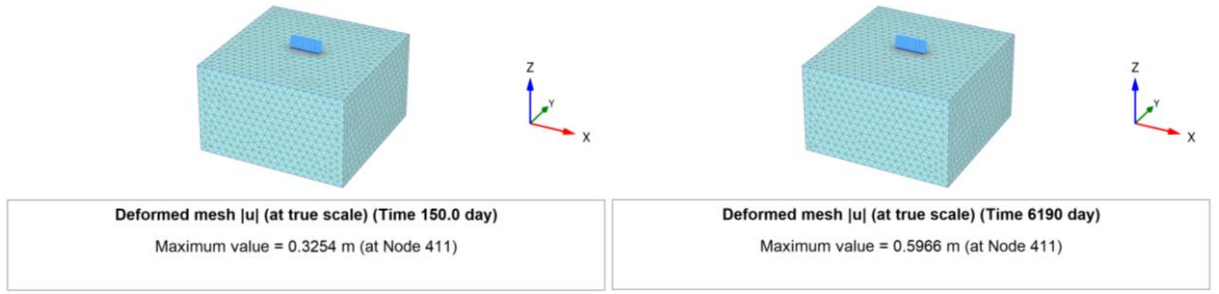
Şekil Ek-110. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 14)



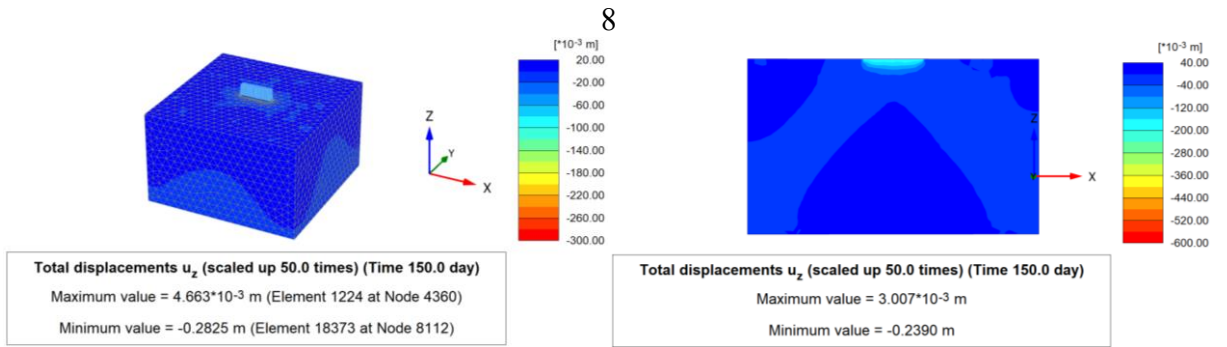
Şekil Ek-111. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 14)



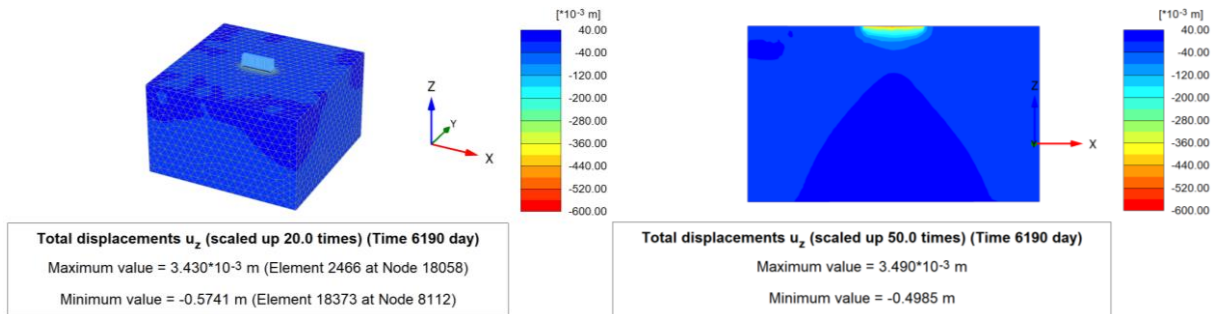
Şekil Ek-112. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 14)

**Analiz 15**

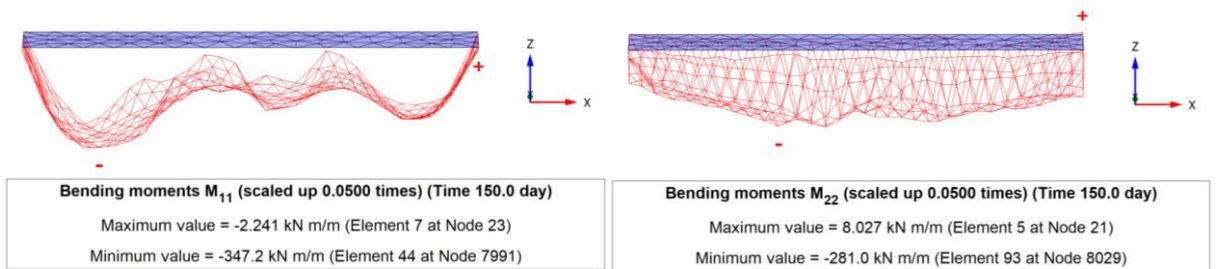
**Şekil Ek-113.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 15)



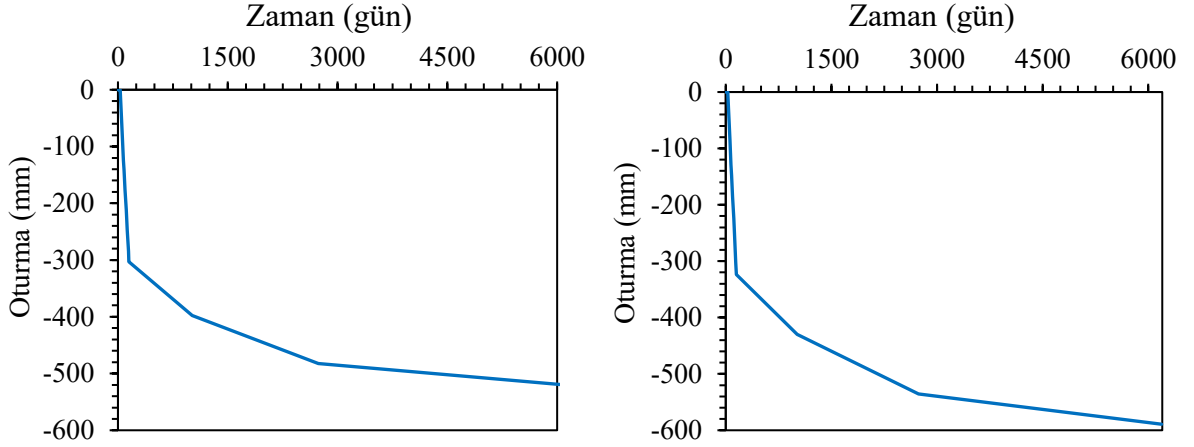
**Şekil Ek-114.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 15)



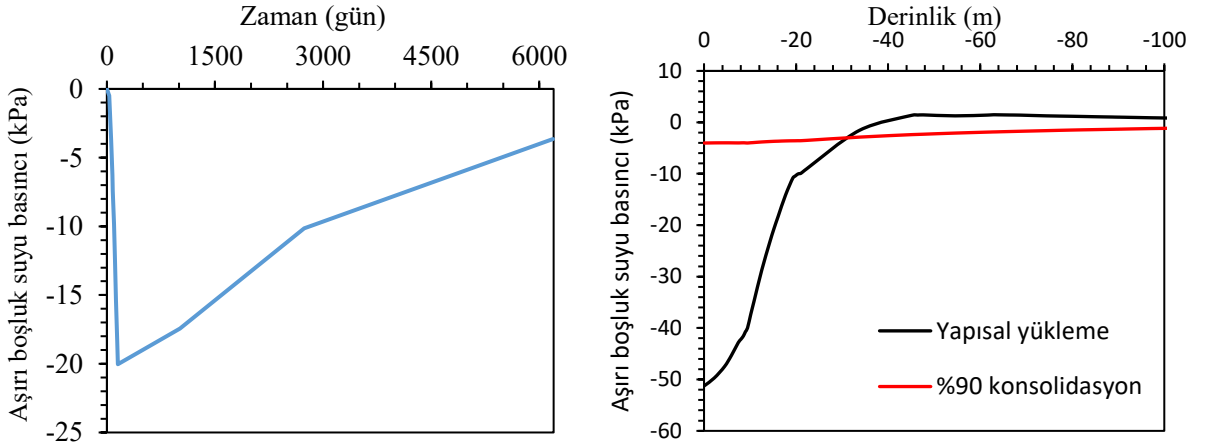
**Şekil Ek-115.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 15)



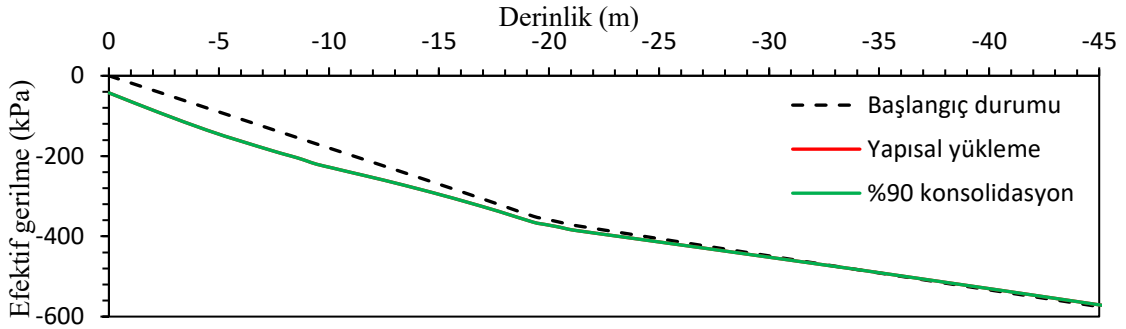
**Şekil Ek-116.** Radye temel in kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 15)



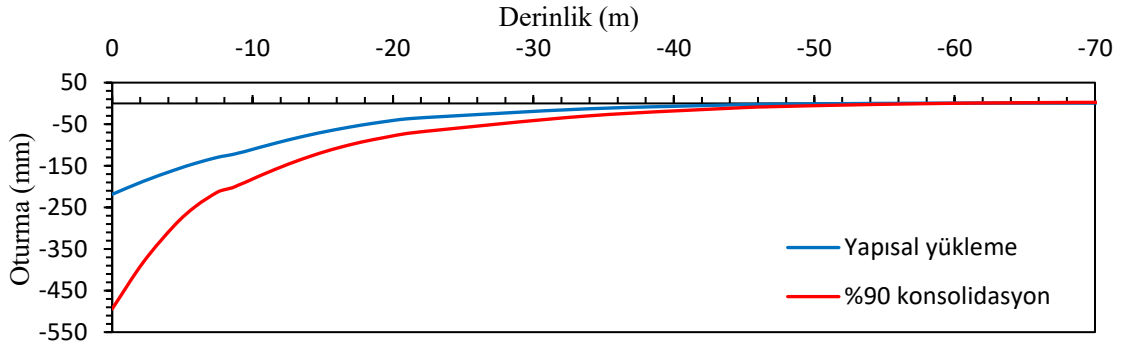
Şekil Ek-117. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 15)



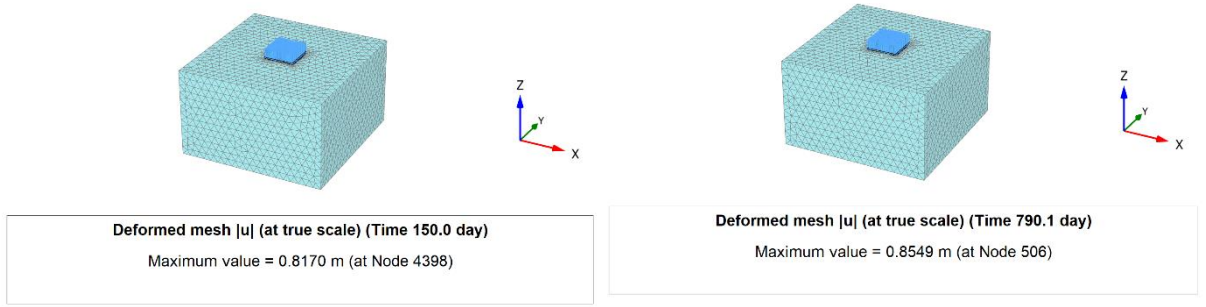
Şekil Ek-118. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 15)



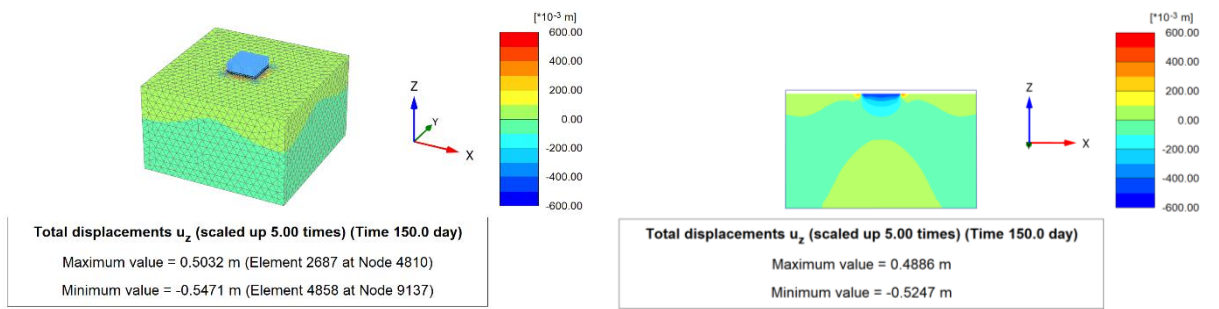
Şekil Ek-119. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 15)



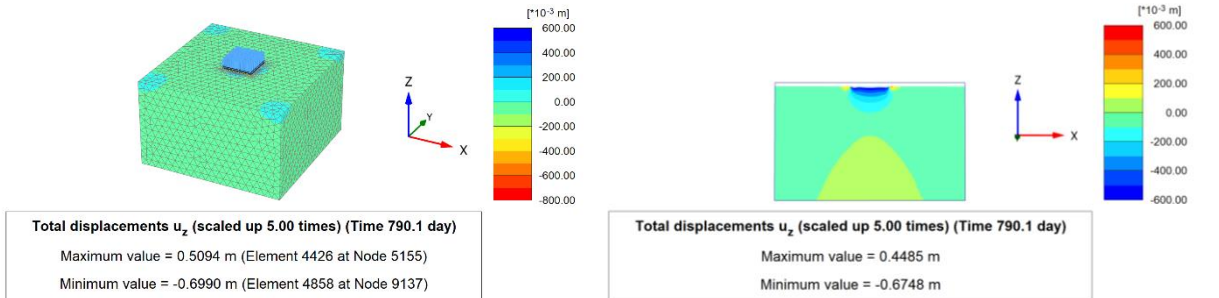
Şekil Ek-120. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 15)

**Analiz 16**

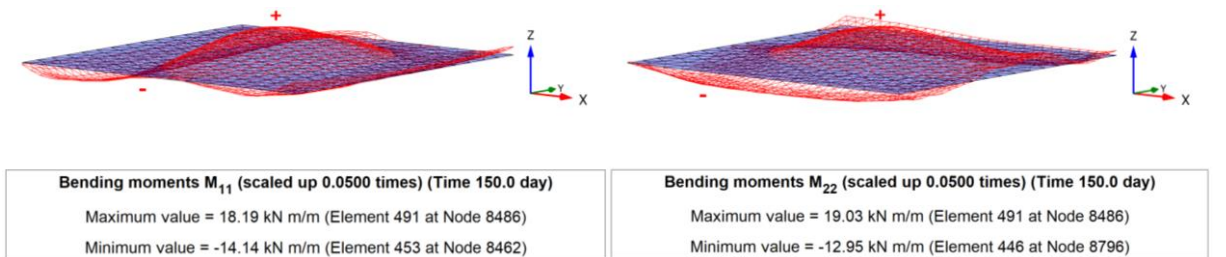
**Şekil Ek-121.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 16)



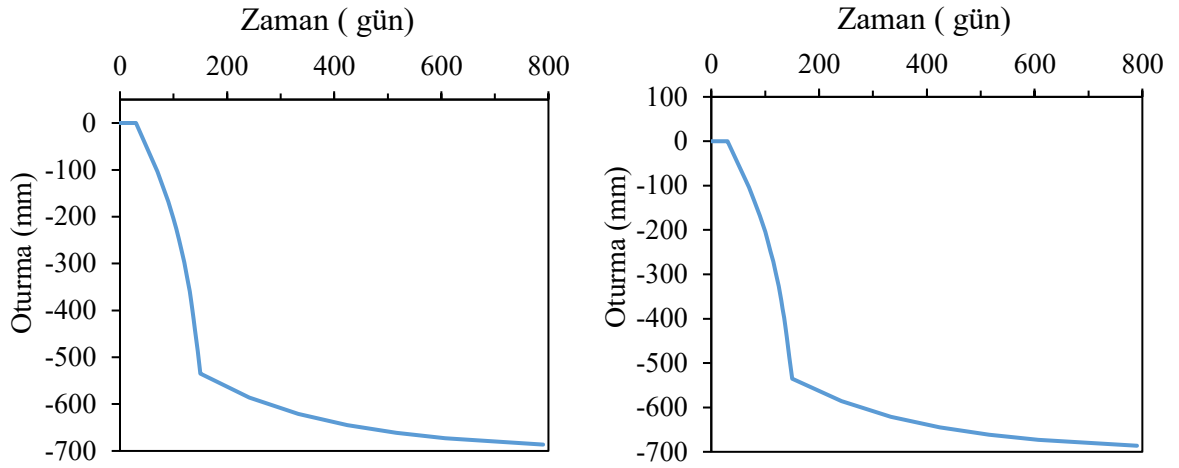
**Şekil Ek-122.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 16)



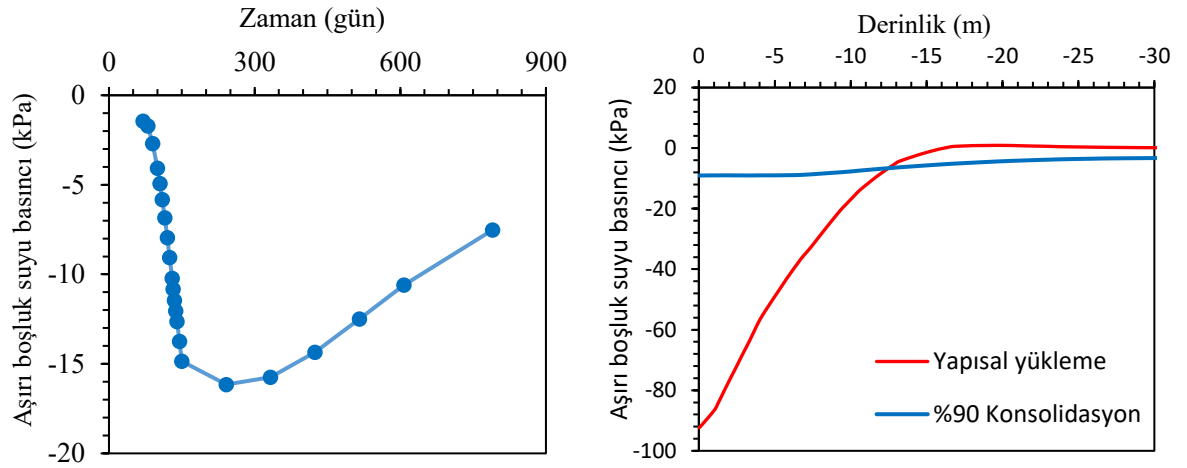
**Şekil Ek-123.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 16)



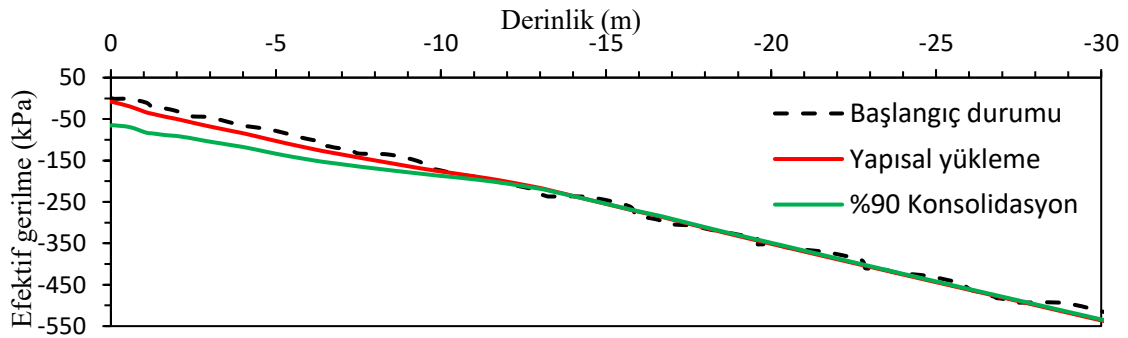
**Şekil Ek-124.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 16)



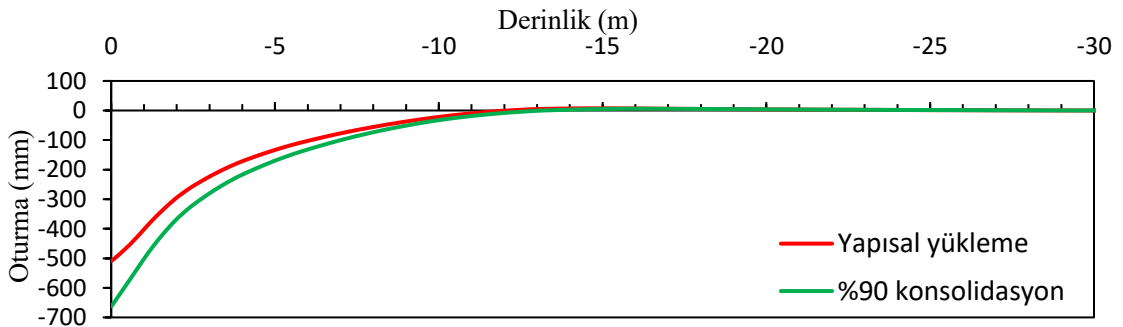
Şekil Ek-125. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 16)



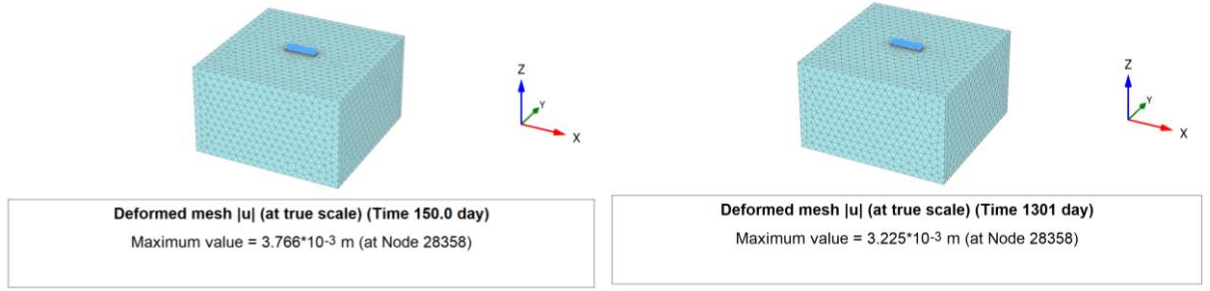
Şekil Ek-126. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 16)



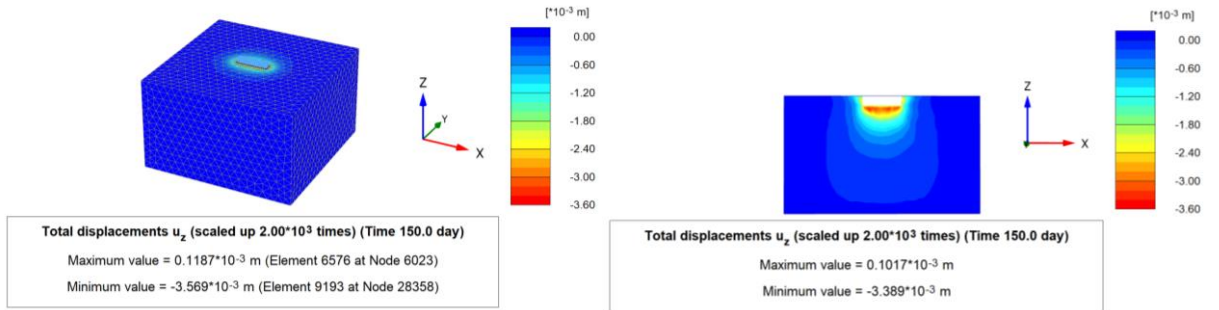
Şekil Ek-127. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 16)



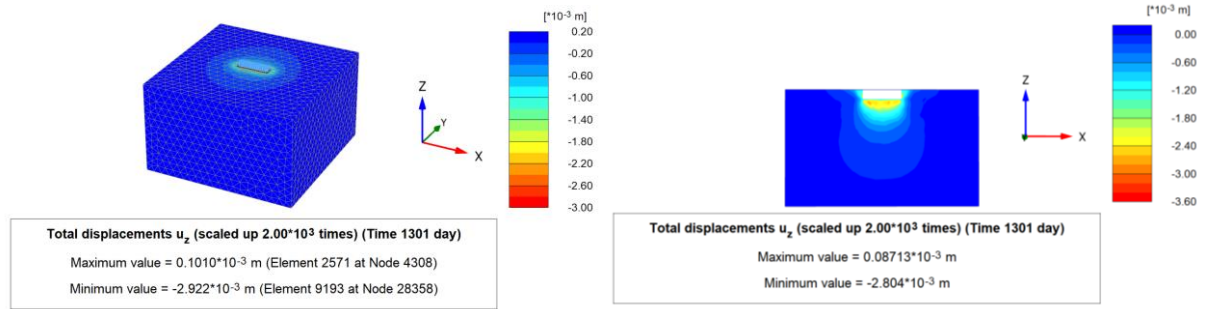
Şekil Ek-128. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 16)

**Analiz 17**

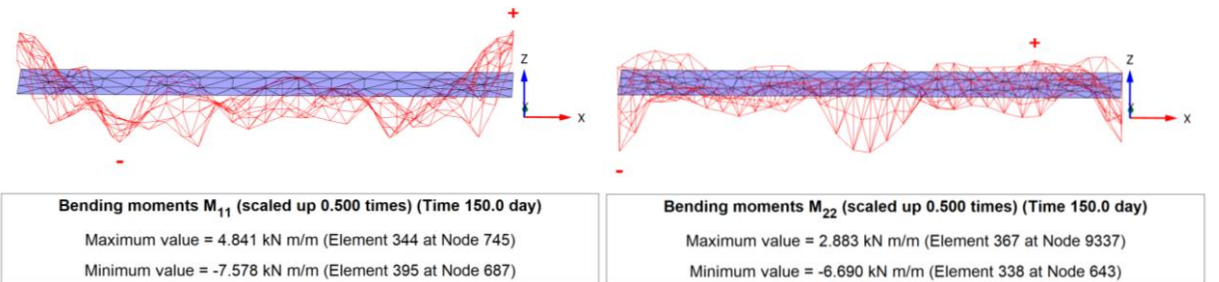
**Şekil Ek-129.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 17)



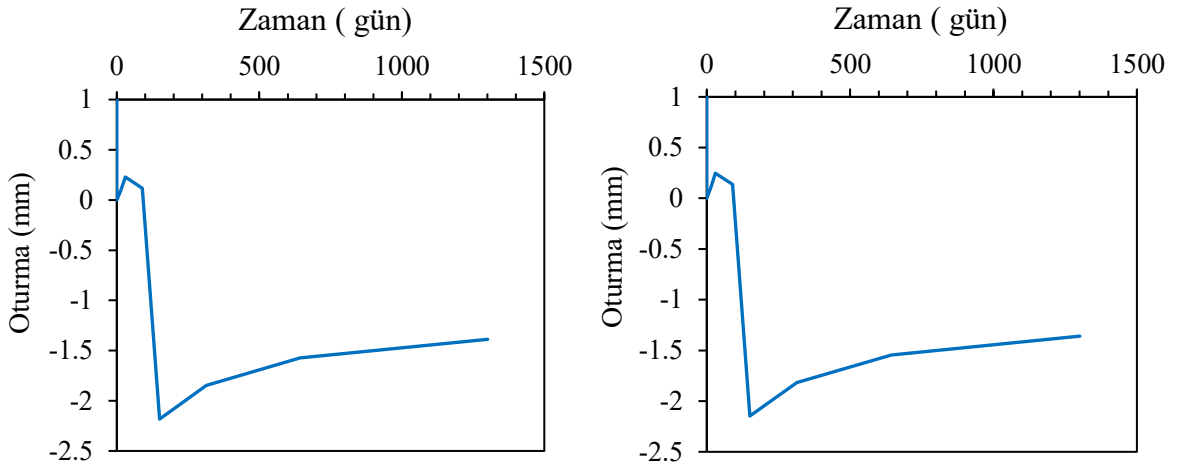
**Şekil Ek-130.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 17)



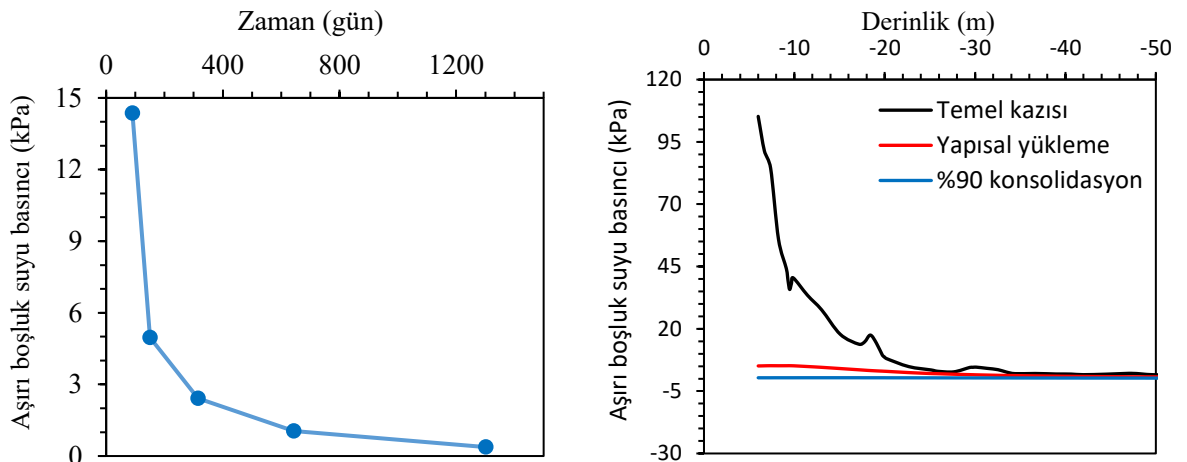
**Şekil Ek-131.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 17)



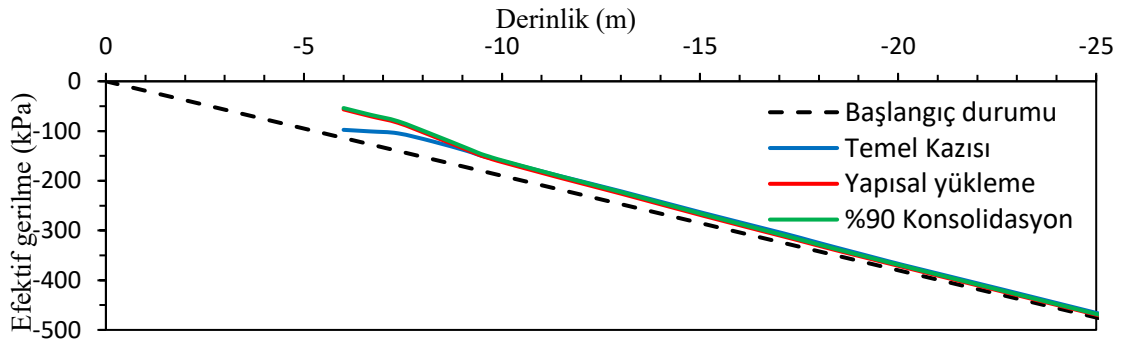
**Şekil Ek-132.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 17)



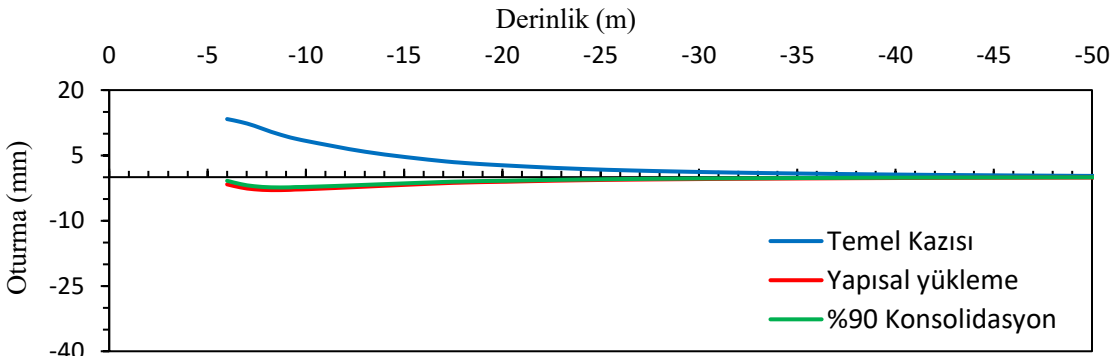
Şekil Ek-133. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 17)



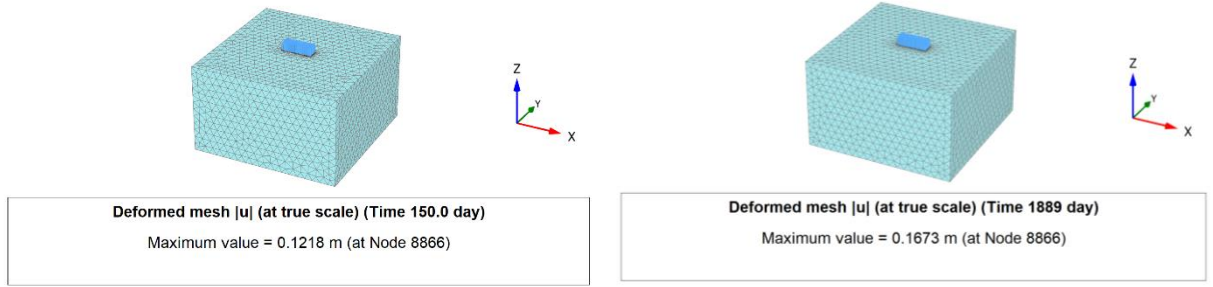
Şekil Ek-134. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 17)



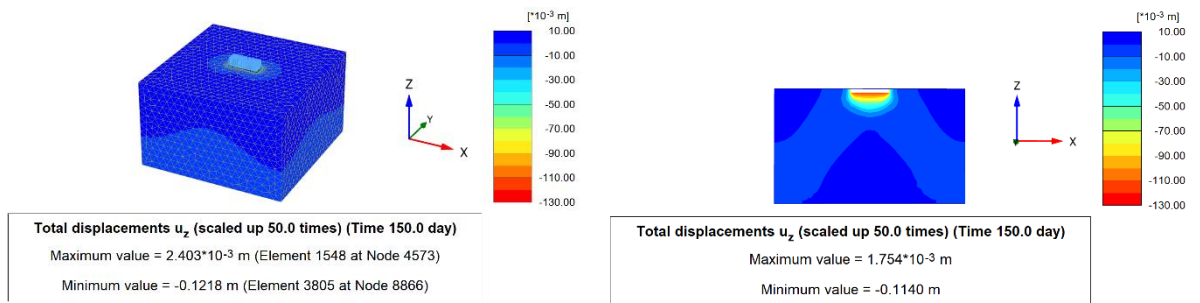
Şekil Ek-135. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 17)



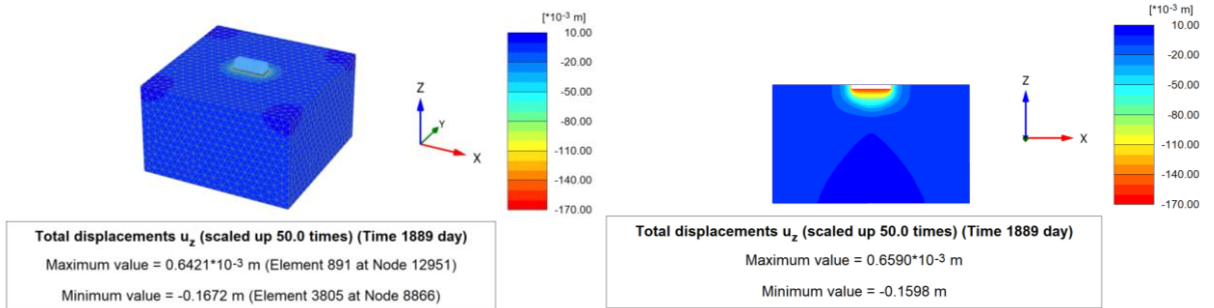
Şekil Ek-136. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 17)

**Analiz 18**

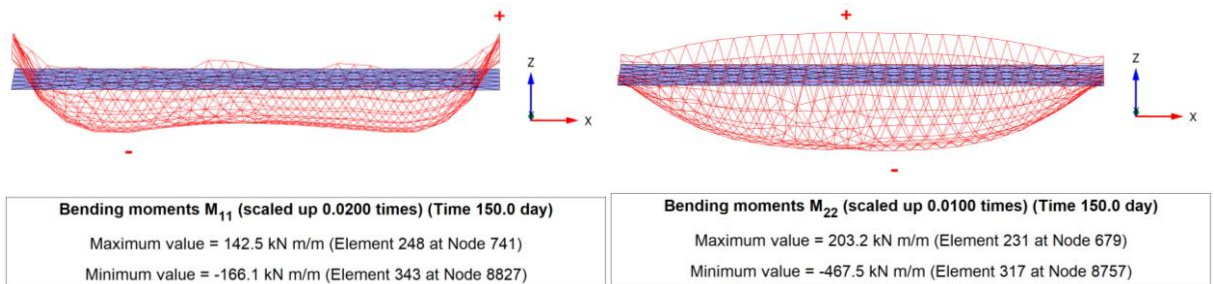
**Şekil Ek-137.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 18)



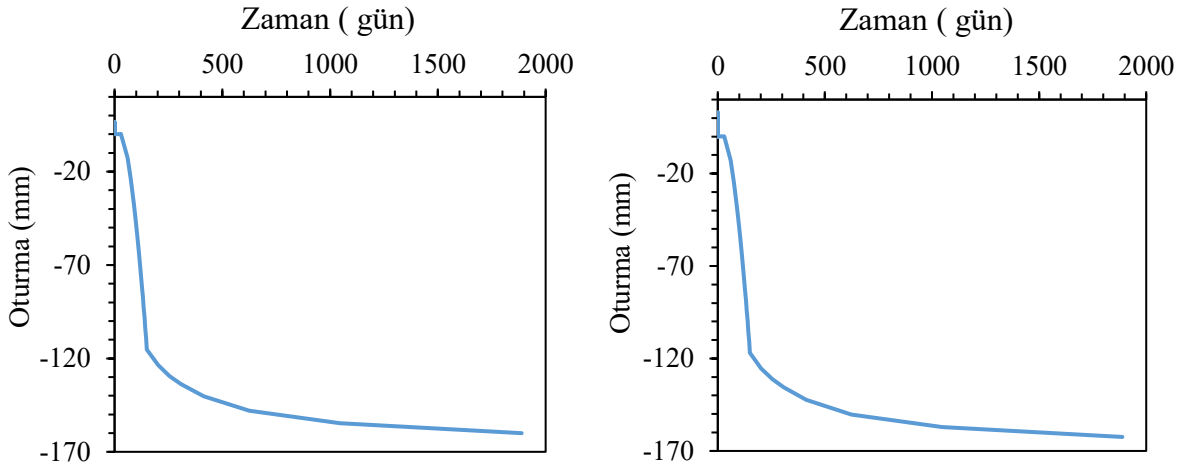
**Şekil Ek-138.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 18)



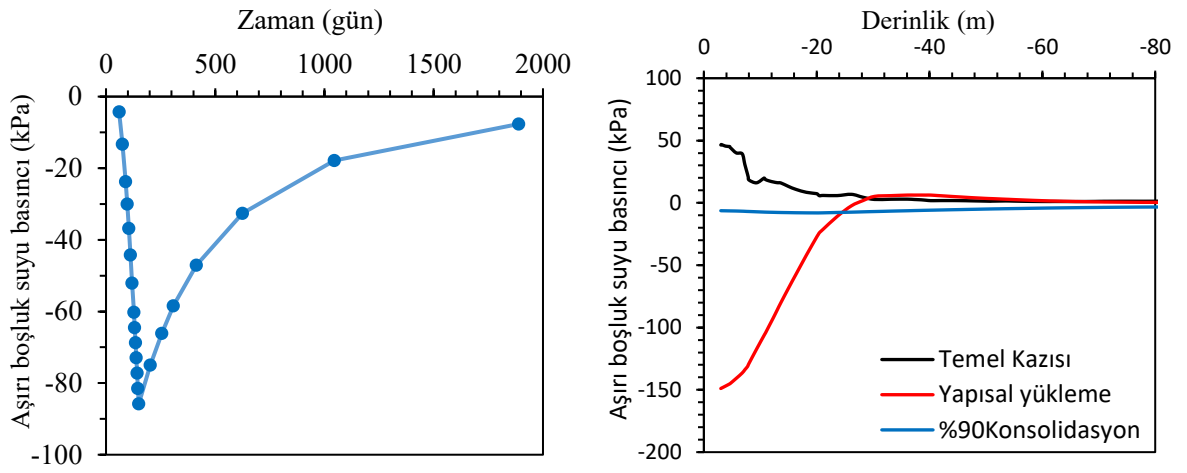
**Şekil Ek-139.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 18)



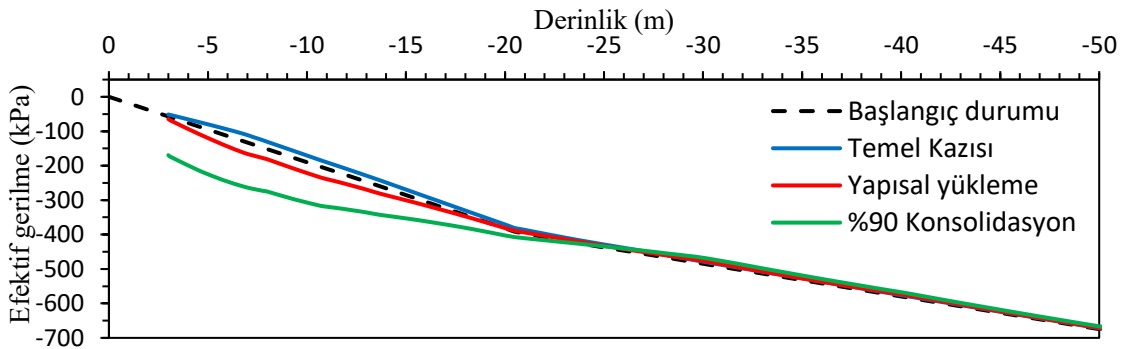
**Şekil Ek-140.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 18)



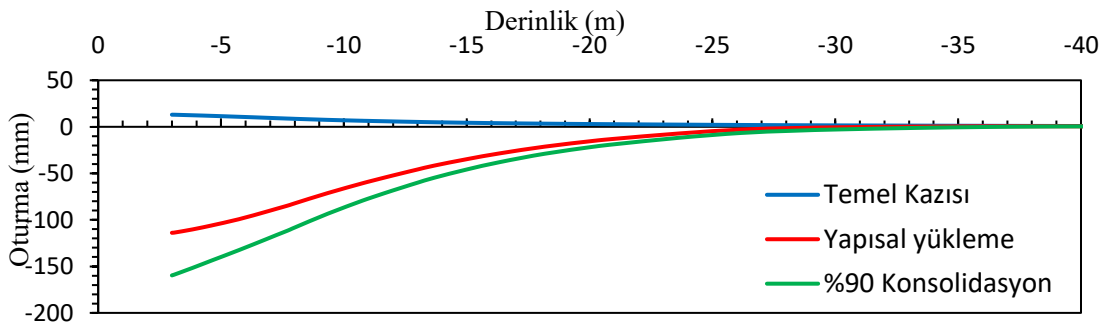
Şekil Ek-141. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 18)



Şekil Ek-142. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 18)

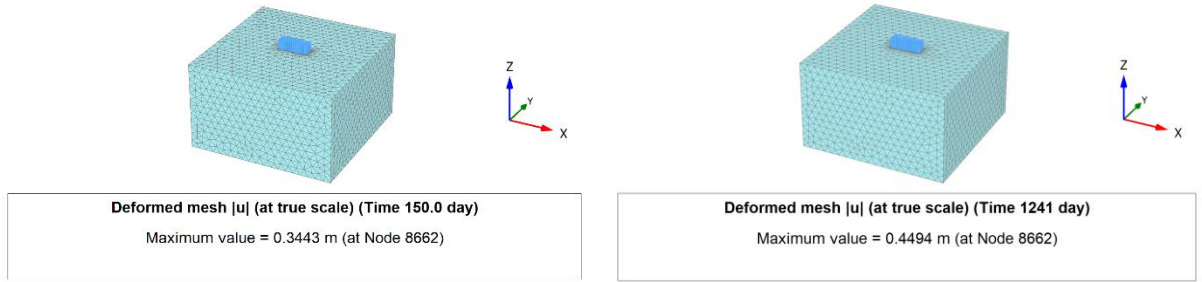


Şekil Ek-143. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 18)

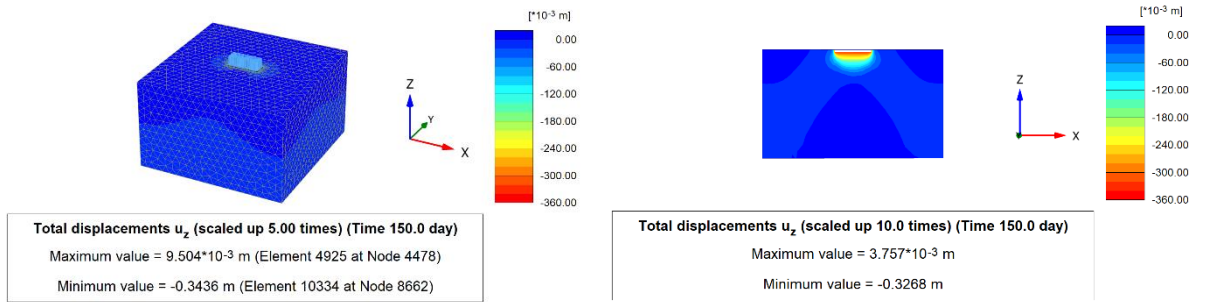


Şekil Ek-144. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 18)

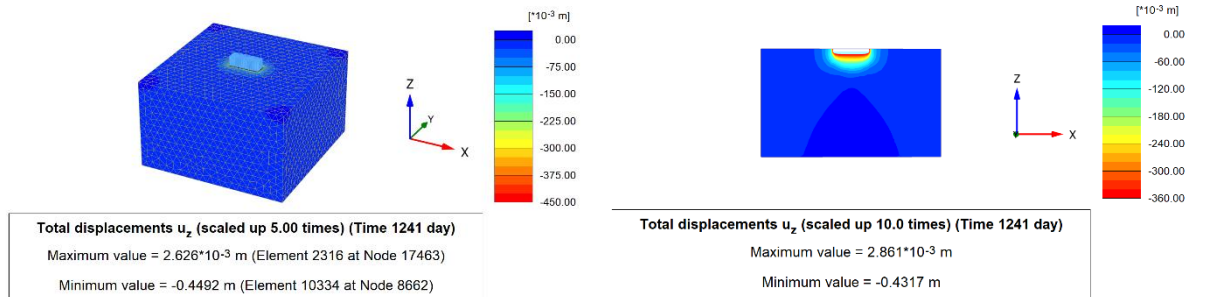
## Analiz 19



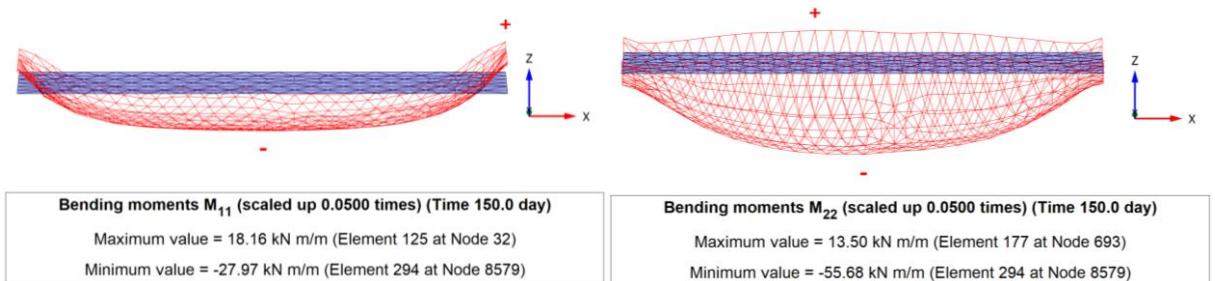
**Şekil Ek-145.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 19)



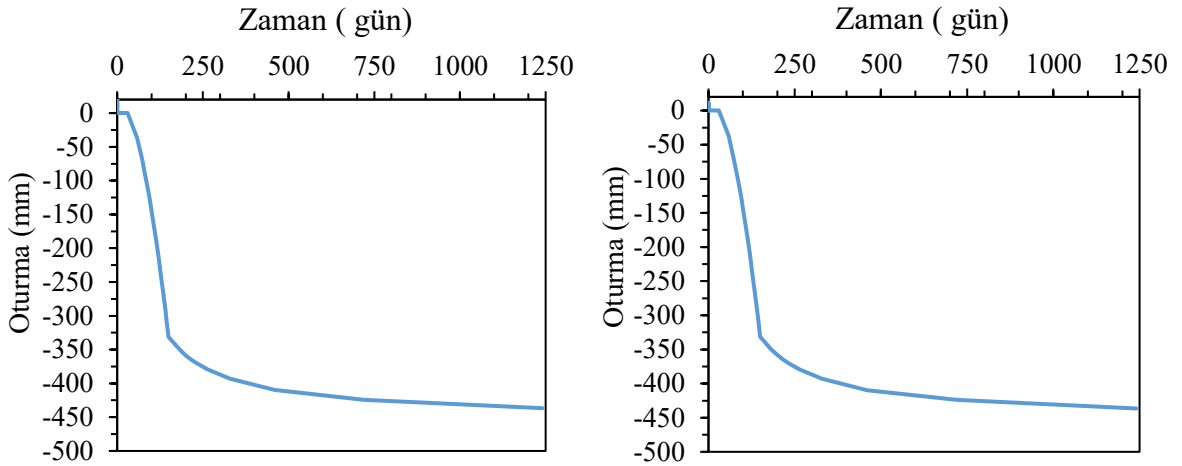
**Şekil Ek-146.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 19)



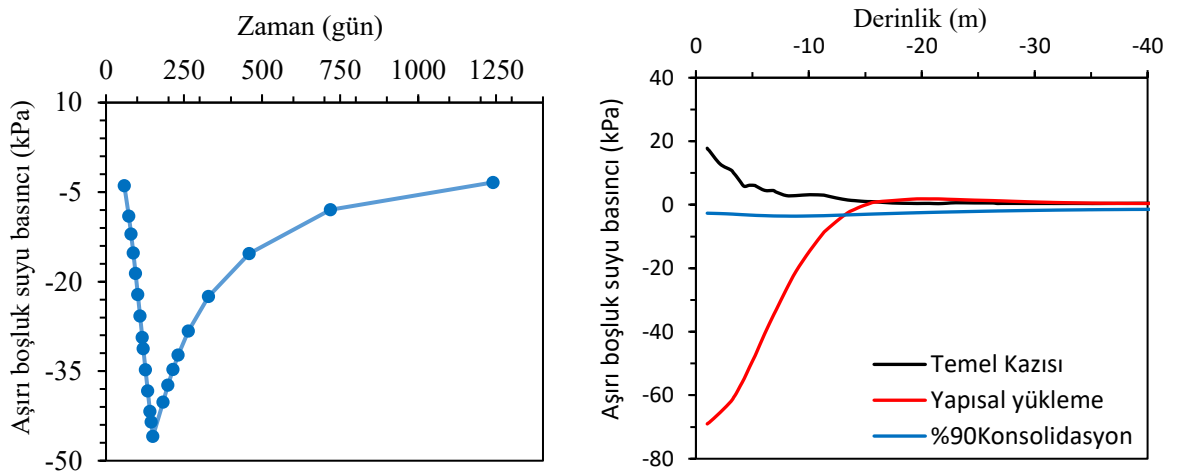
**Şekil Ek-147.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 19)



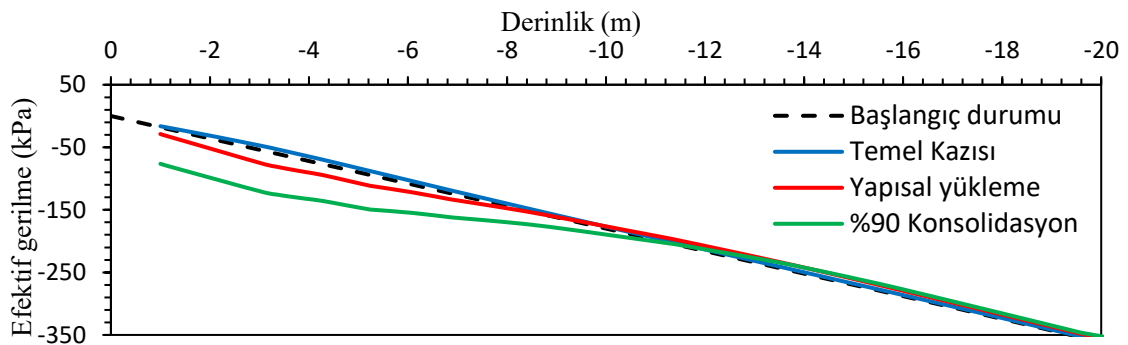
**Şekil Ek-148.** Radye temel in kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 19)



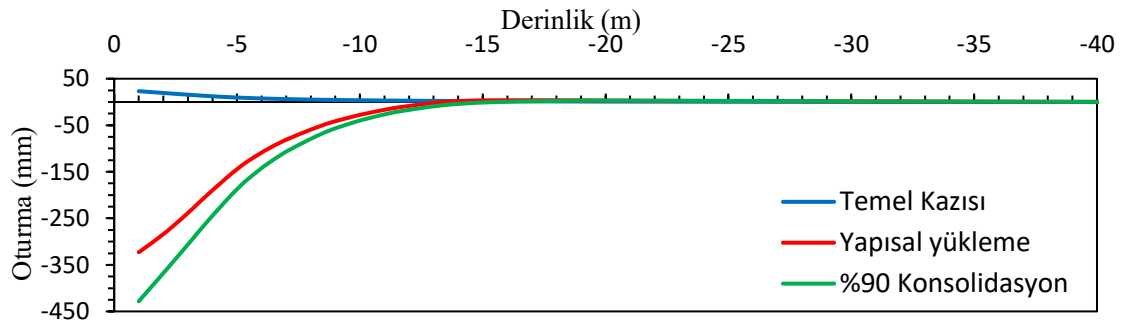
Şekil Ek-149. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 19)



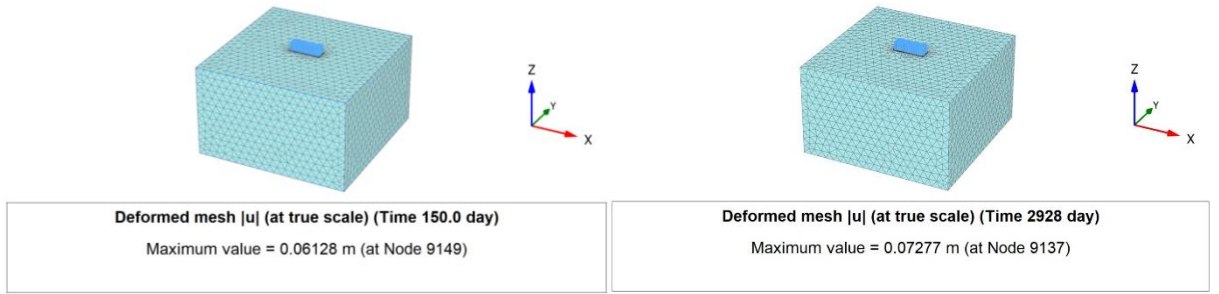
Şekil Ek-150. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 19)



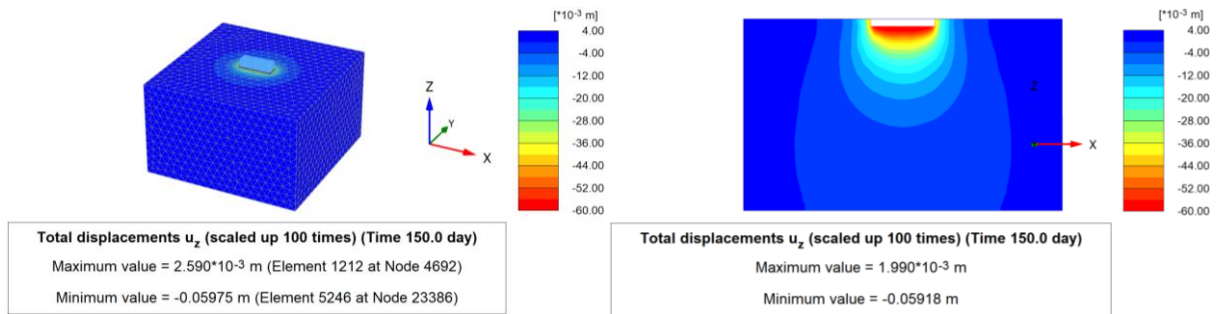
Şekil Ek-151. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 19)



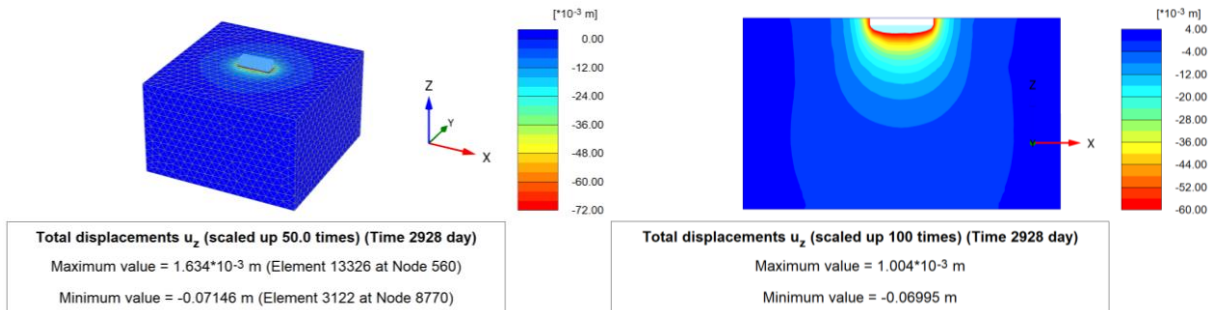
Şekil Ek-152. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 19)

**Analiz 20**

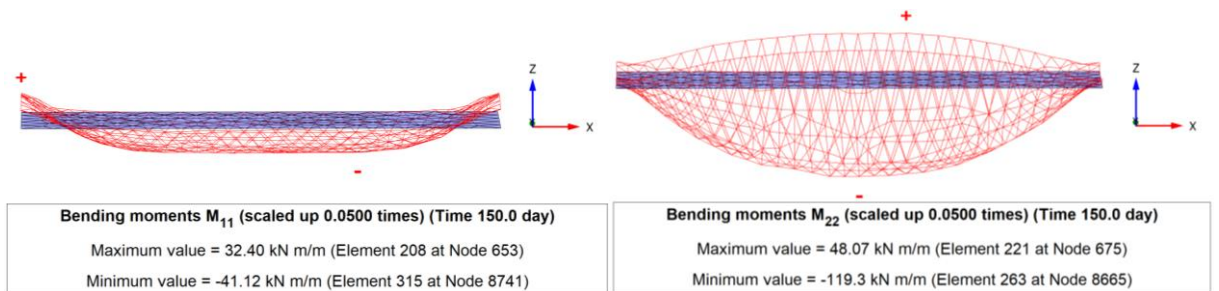
**Şekil Ek-153.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 20)



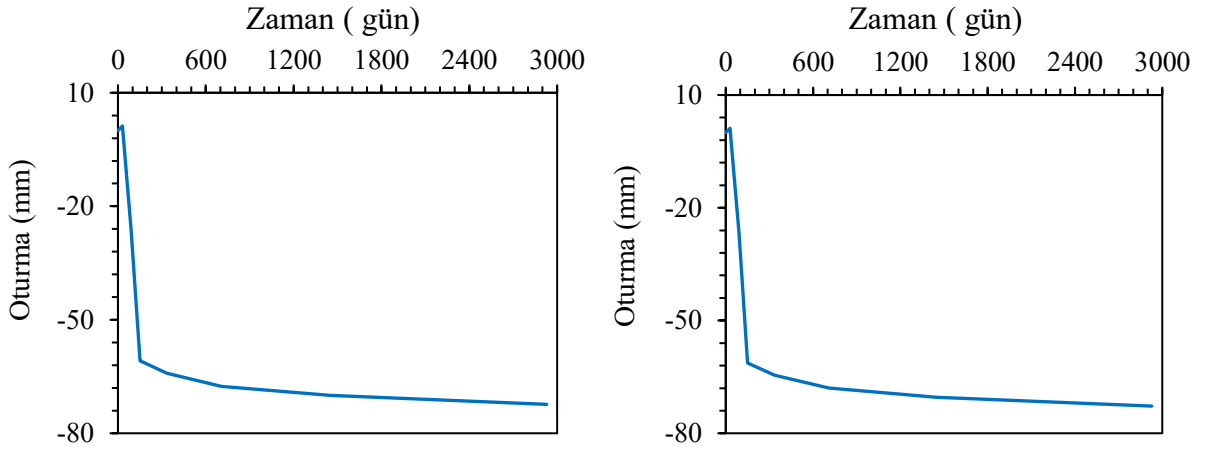
**Şekil Ek-154.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 20)



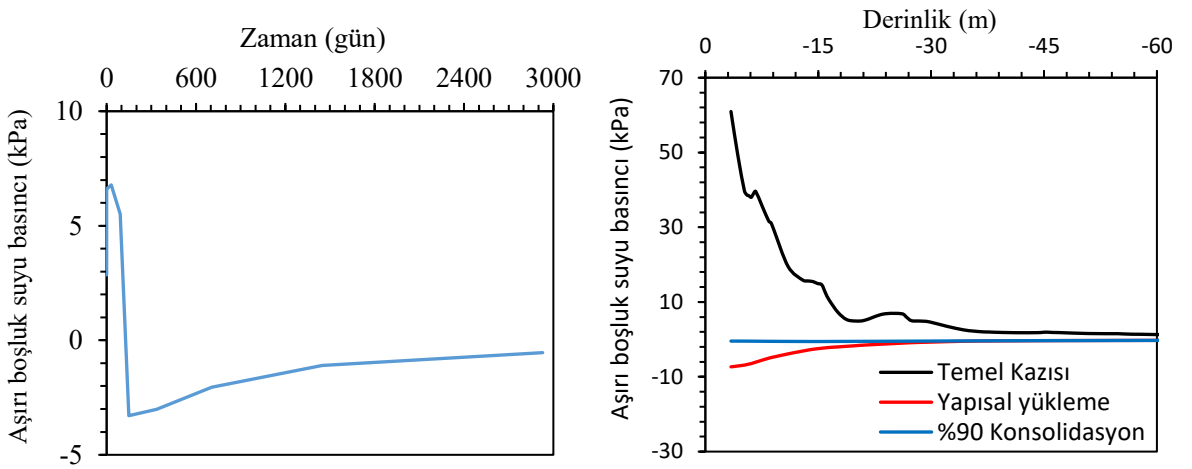
**Şekil Ek-155.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 20)



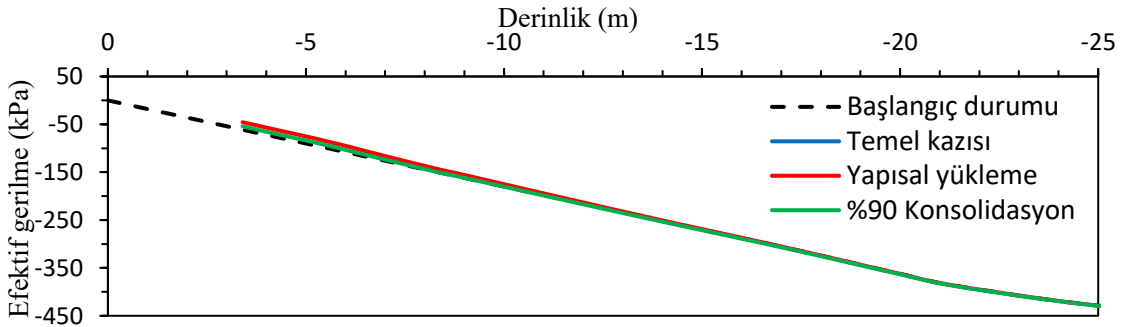
**Şekil Ek-156.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 20)



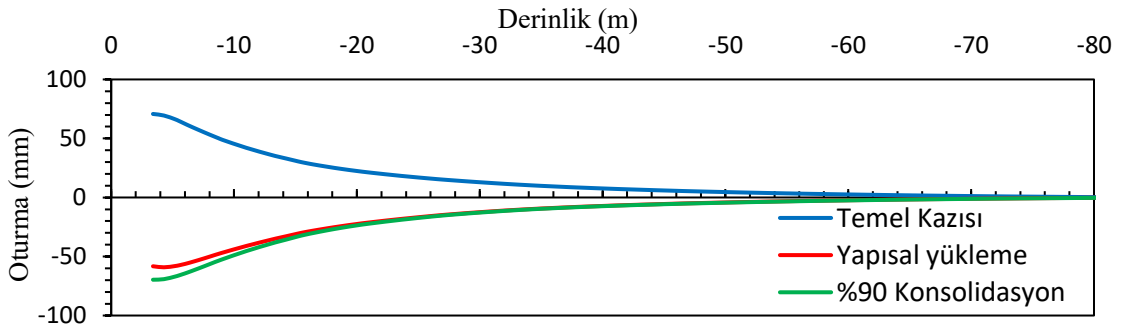
Şekil Ek-157. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 20)



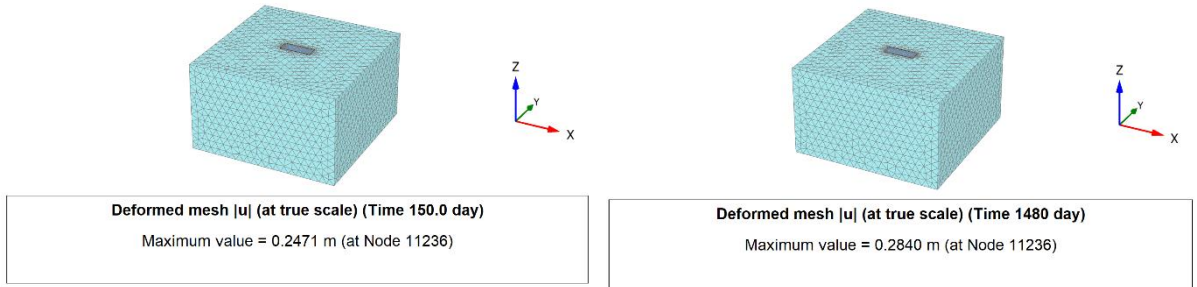
Şekil Ek-158. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 20)



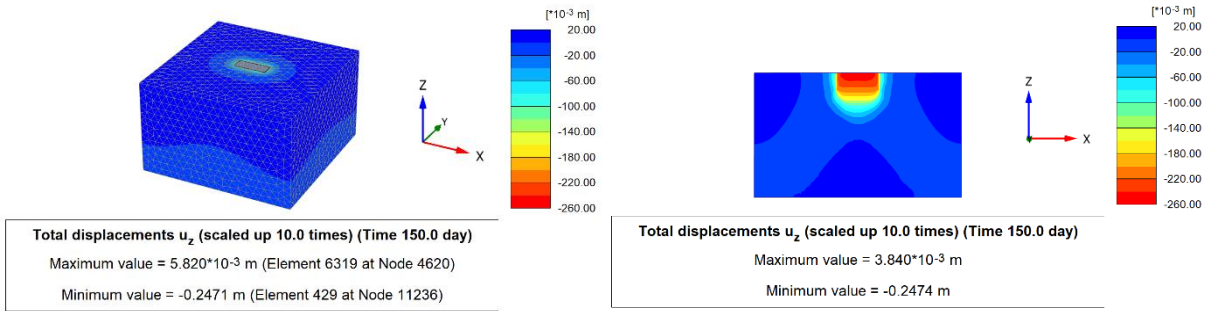
Şekil Ek-159. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 20)



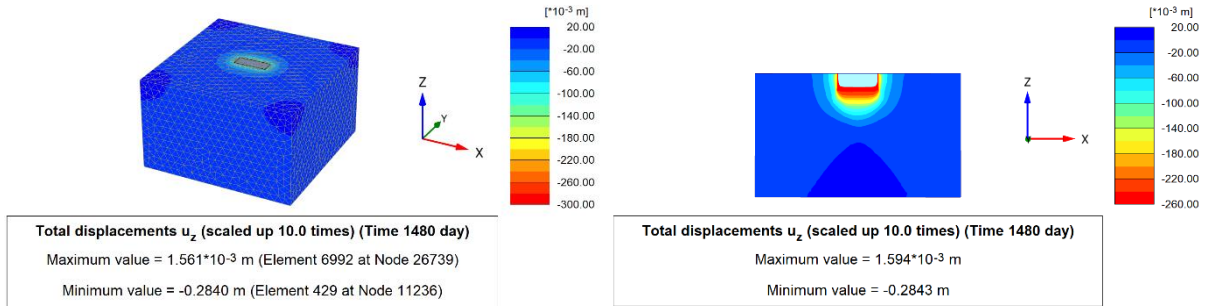
Şekil Ek-160. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 20)

**Analiz 21**

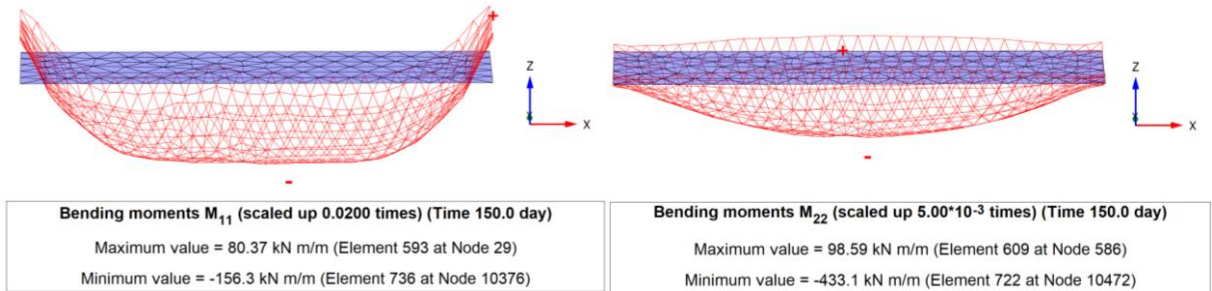
**Şekil Ek-161.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 21)



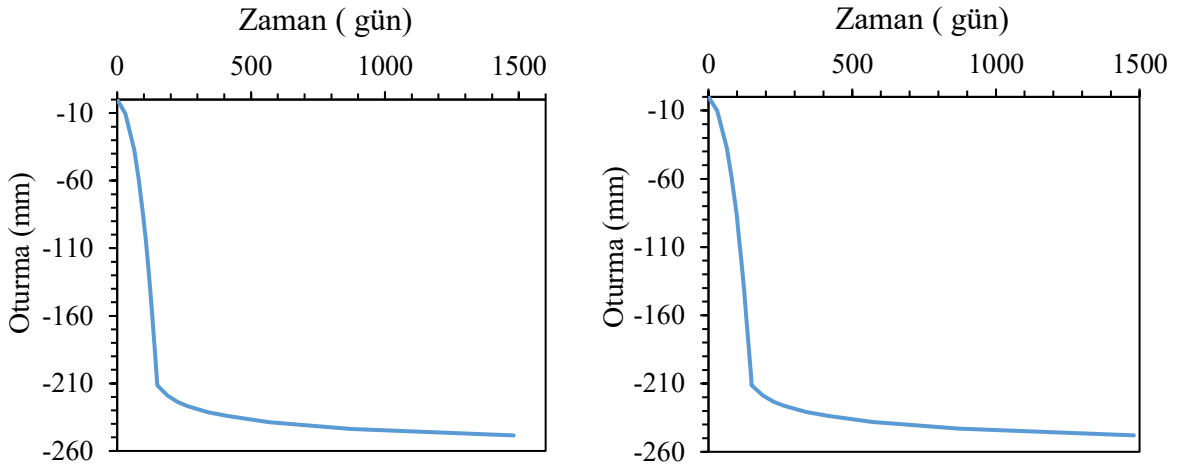
**Şekil Ek-162.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 21)



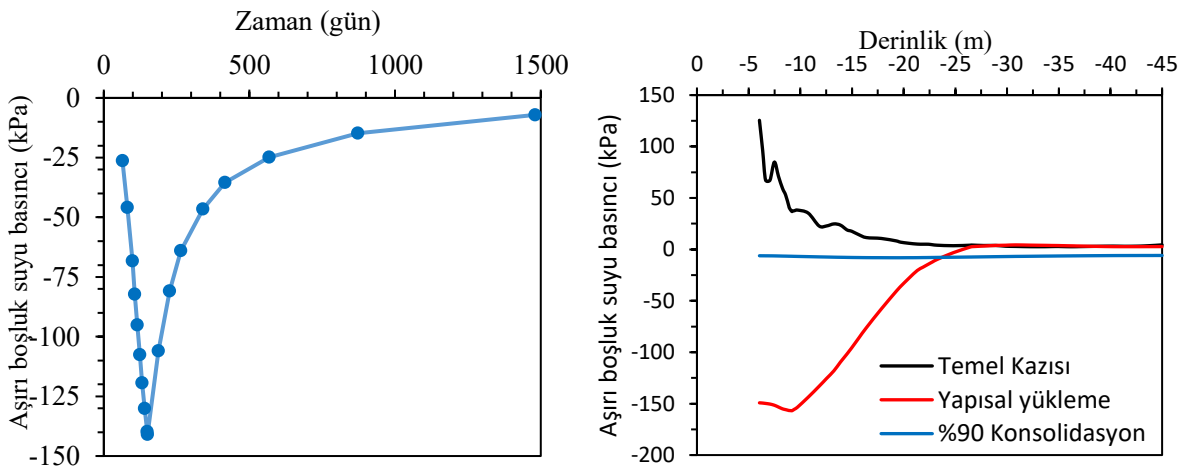
**Şekil Ek-163.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 21)



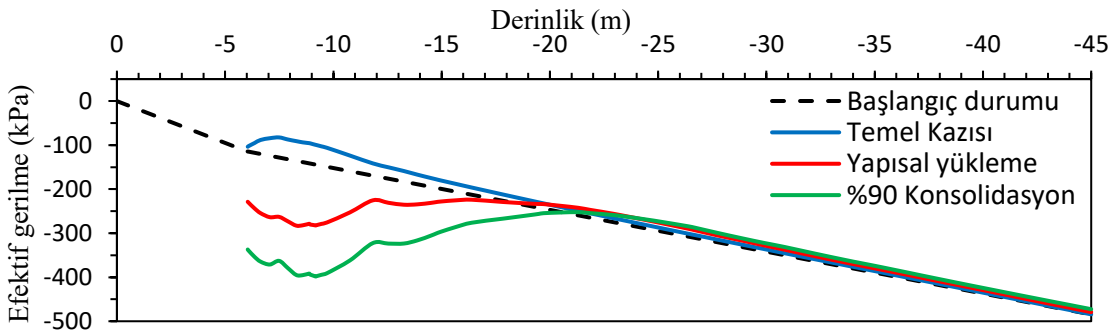
**Şekil Ek-164.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 21)



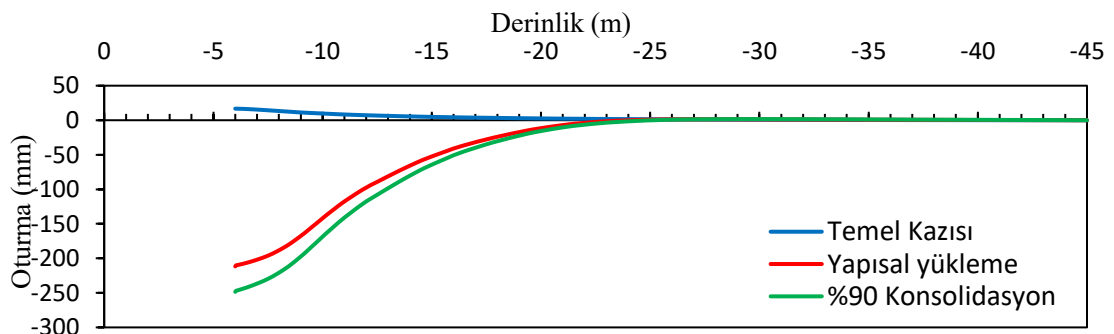
Şekil Ek-165. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 21)



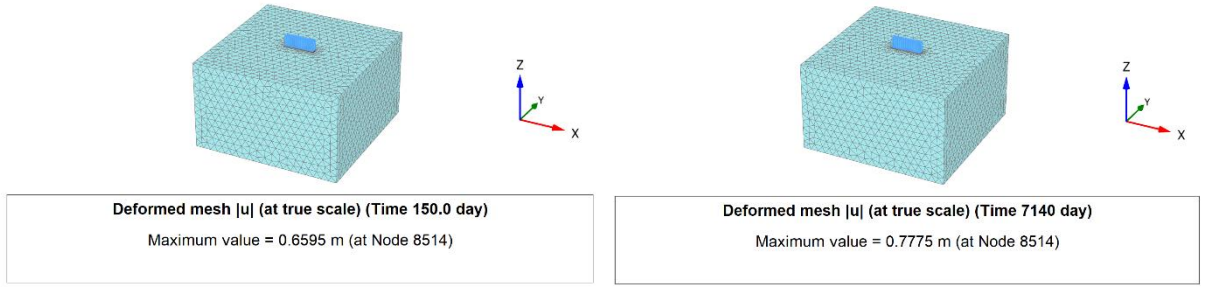
Şekil Ek-166. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 21)



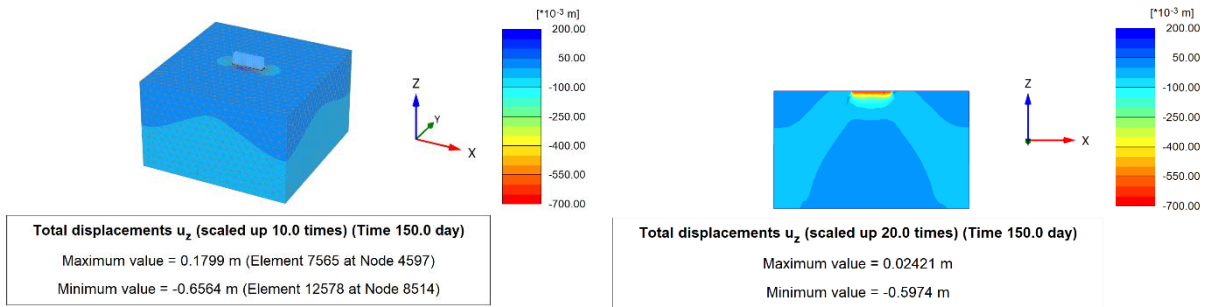
Şekil Ek-167. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 21)



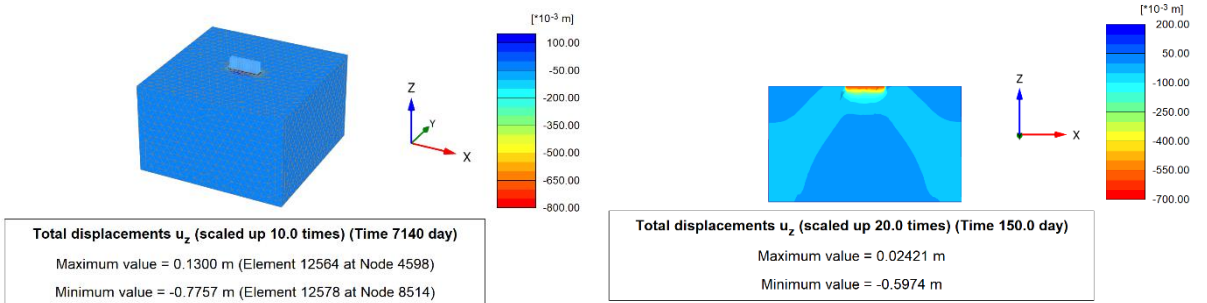
Şekil Ek-168. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 21)

**Analiz 22**

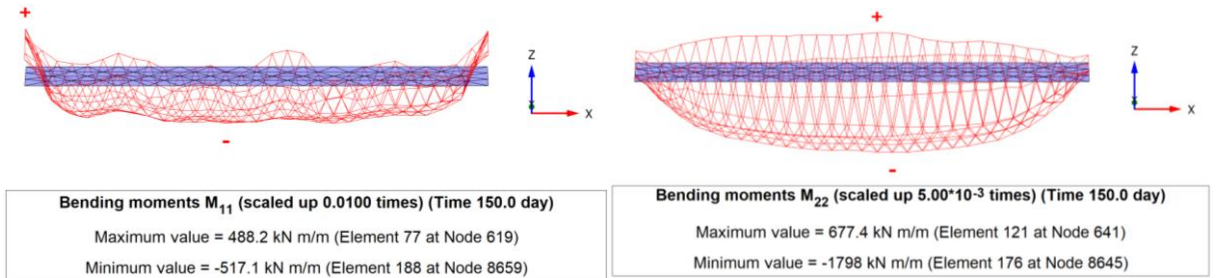
**Şekil Ek-169.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklemeye (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 22)



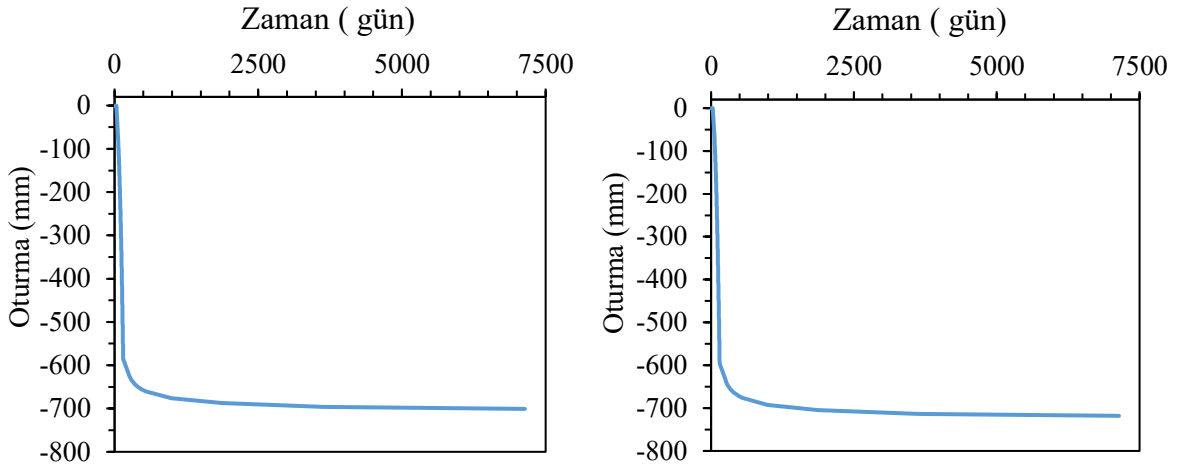
**Şekil Ek-170.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 22)



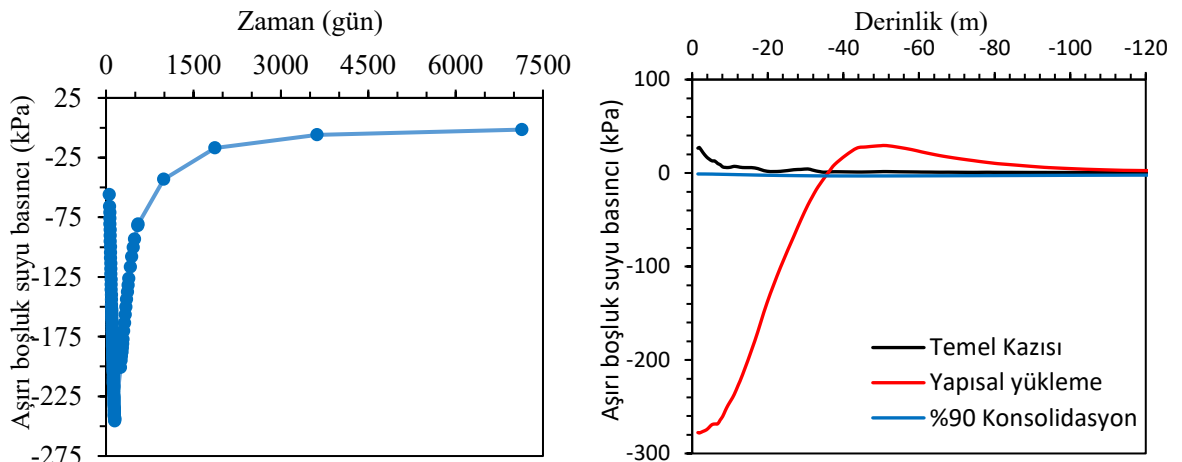
**Şekil Ek-171.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 22)



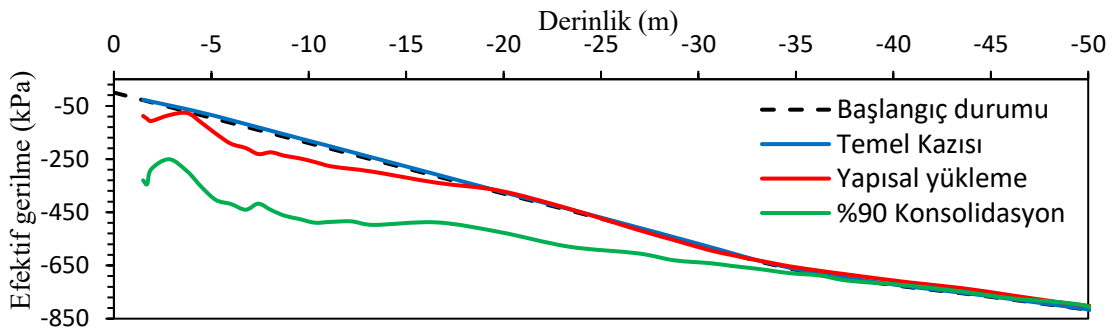
**Şekil Ek-172.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 22)



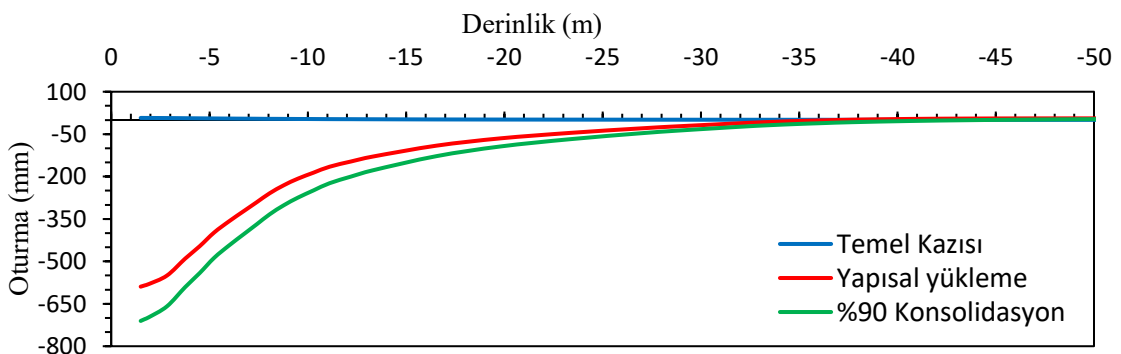
Şekil Ek-173. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 22)



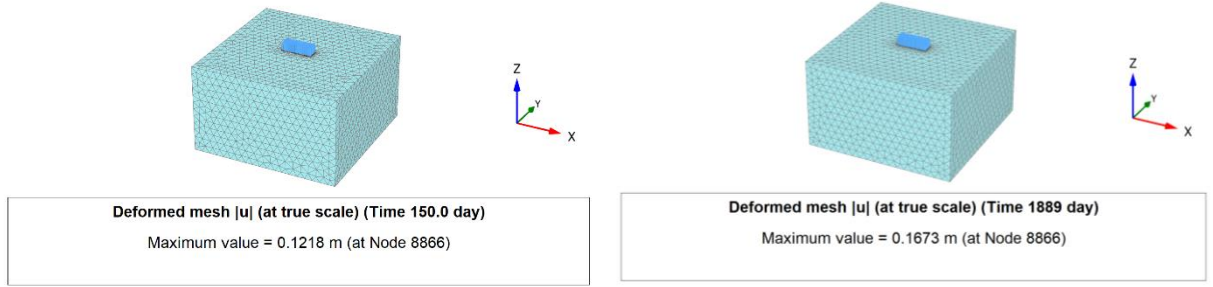
Şekil Ek-174. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 22)



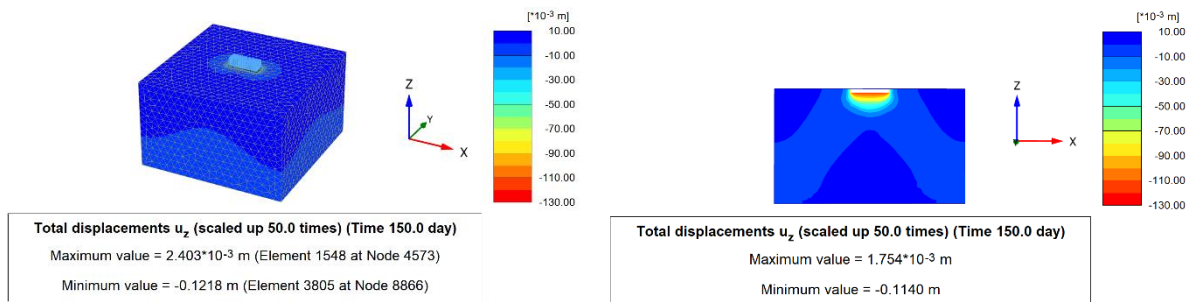
Şekil Ek-175. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 22)



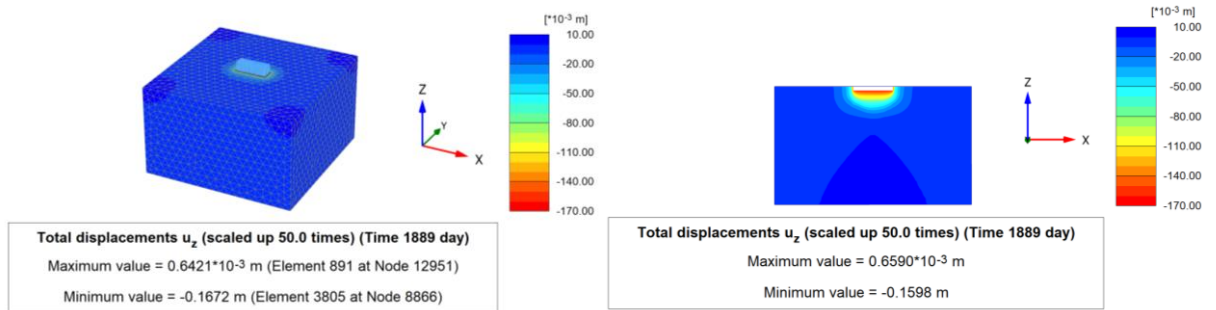
Şekil Ek-176. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 22)

**Analiz 23**

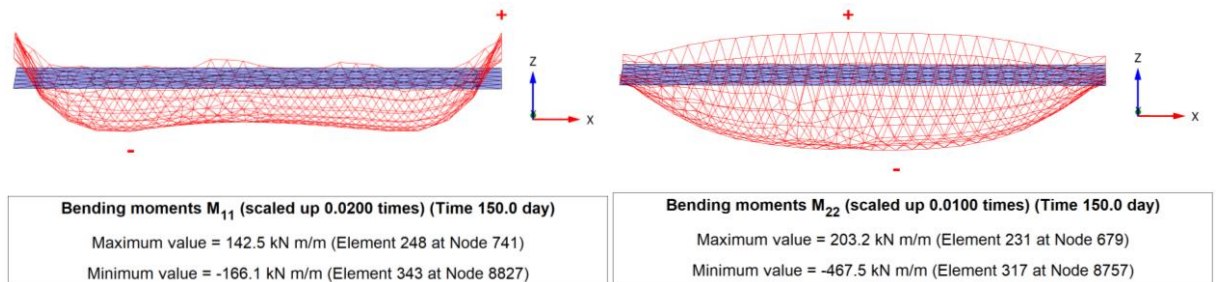
**Şekil Ek-177.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 23)



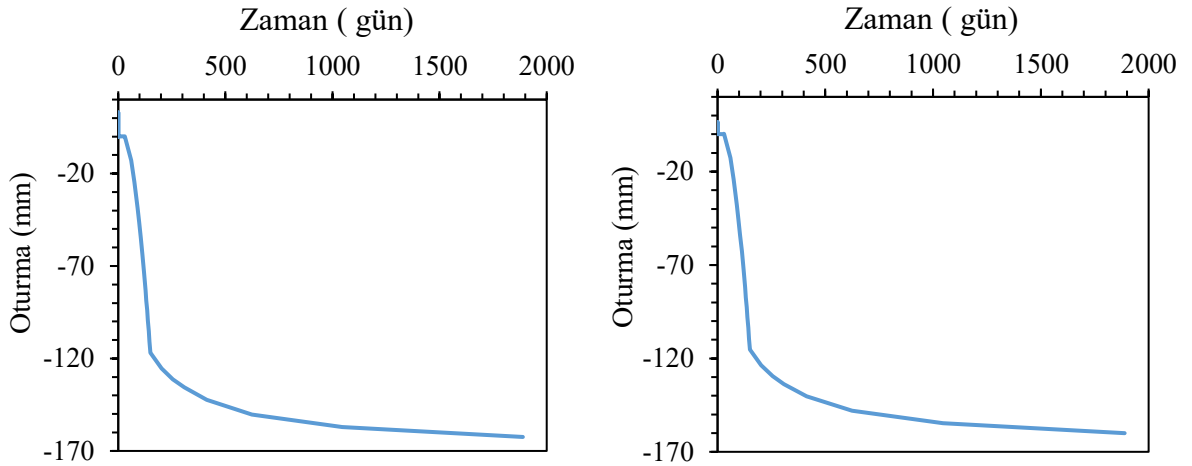
**Şekil Ek-178.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 23)



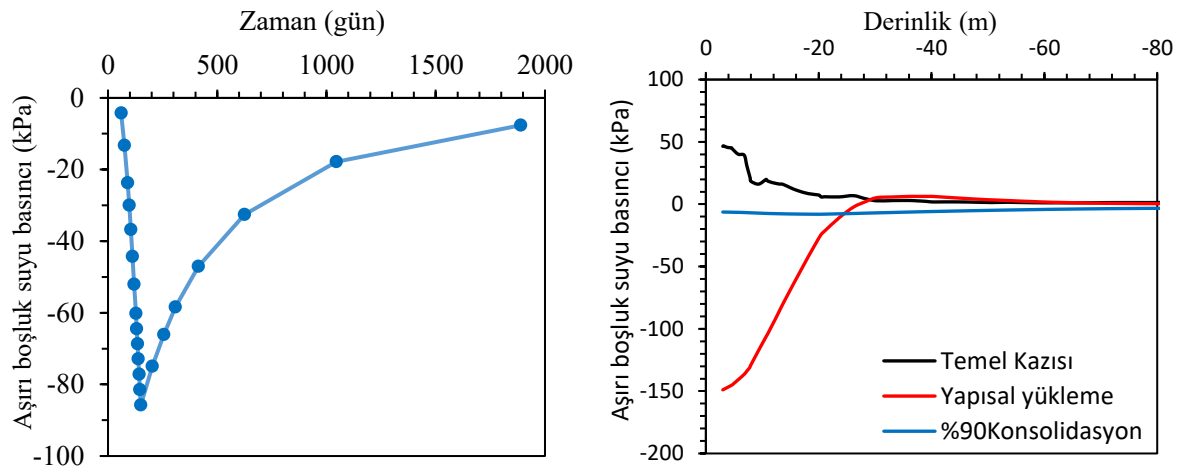
**Şekil Ek-179.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 23)



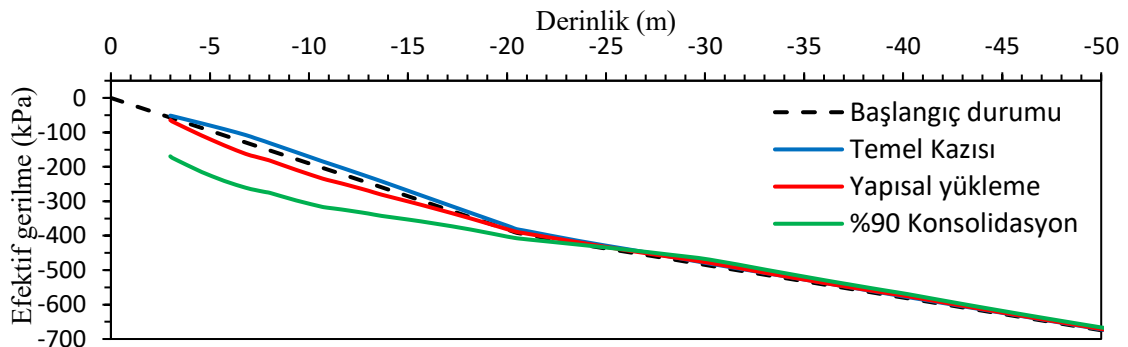
**Şekil Ek-180.** Radye temel in uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 23)



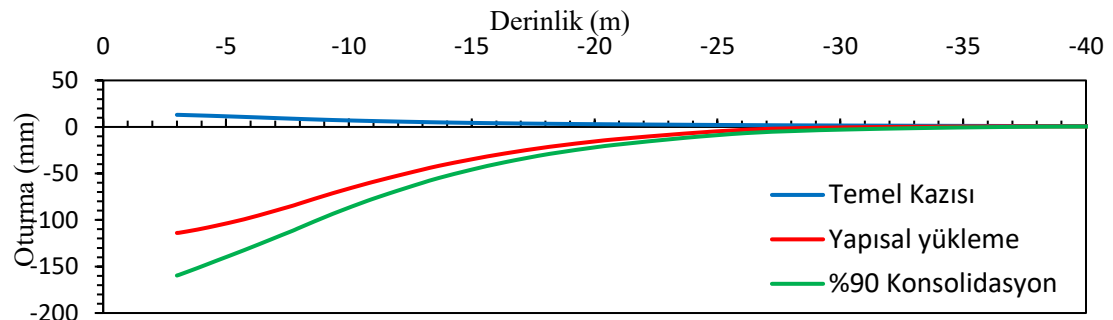
Şekil Ek-181. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 23)



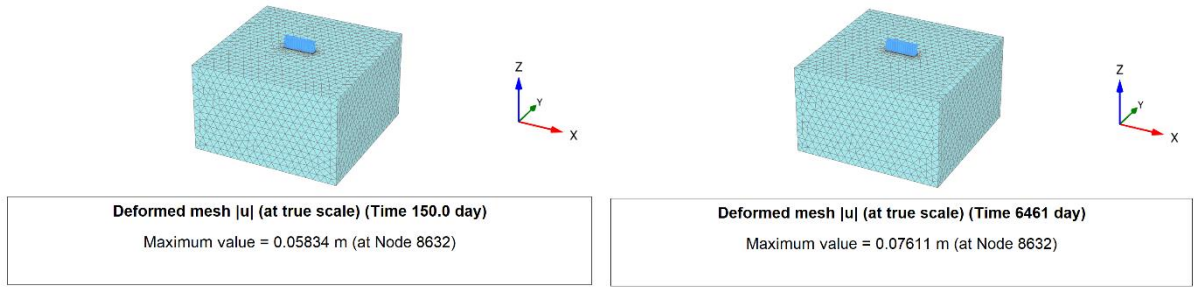
Şekil Ek-182. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 23)



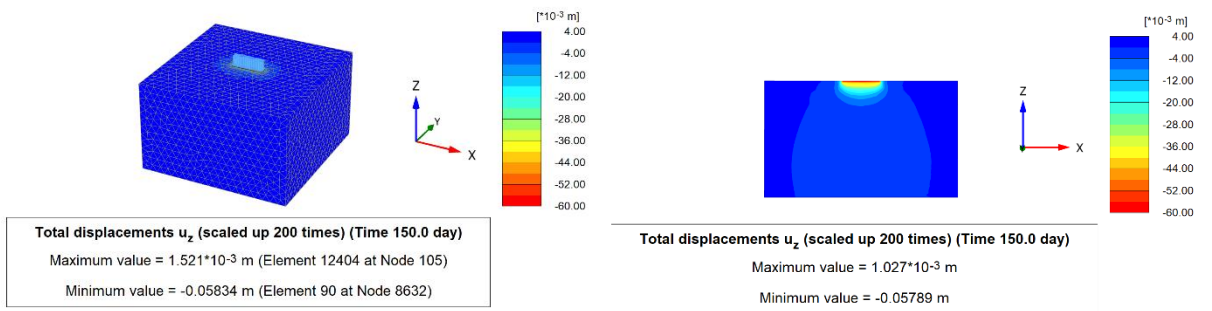
Şekil Ek-183. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 23)



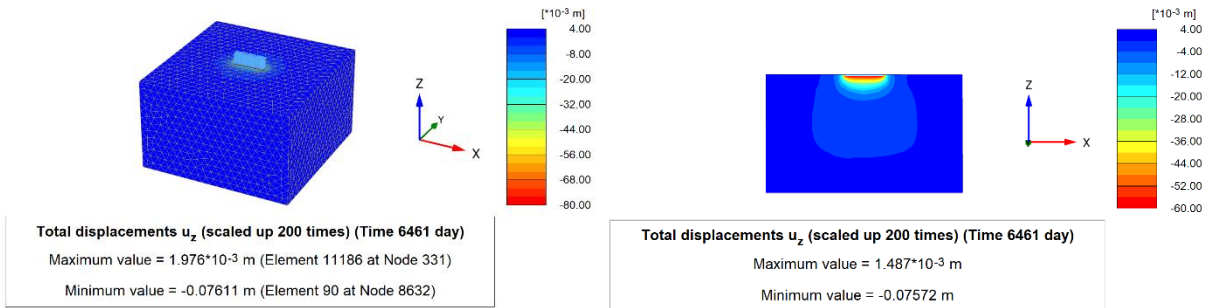
Şekil Ek-184. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 23)

**Analiz 24**

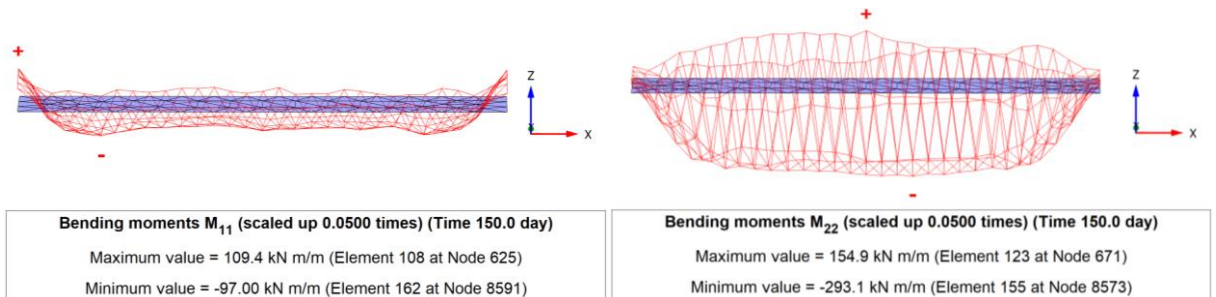
**Şekil Ek-185.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 24)



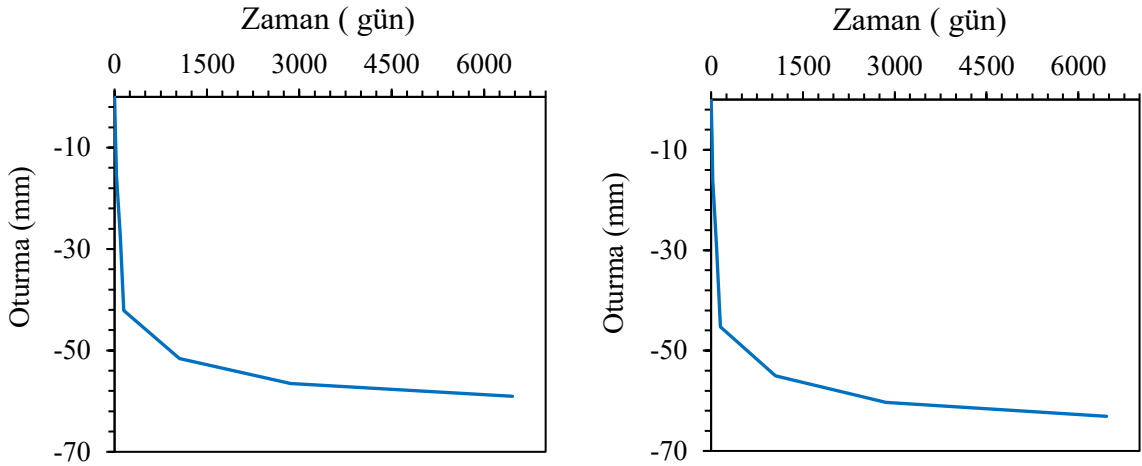
**Şekil Ek-186.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 24)



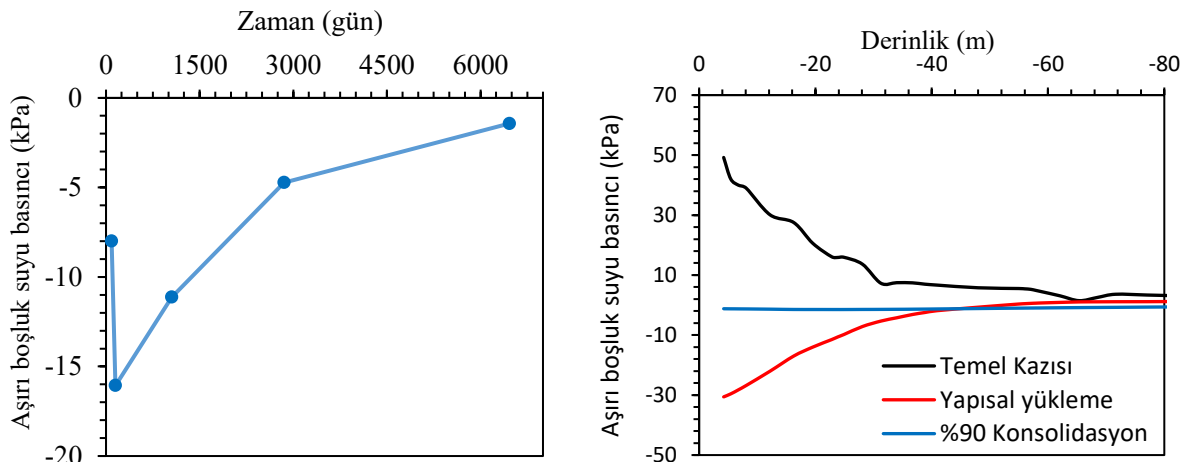
**Şekil Ek-187.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 24)



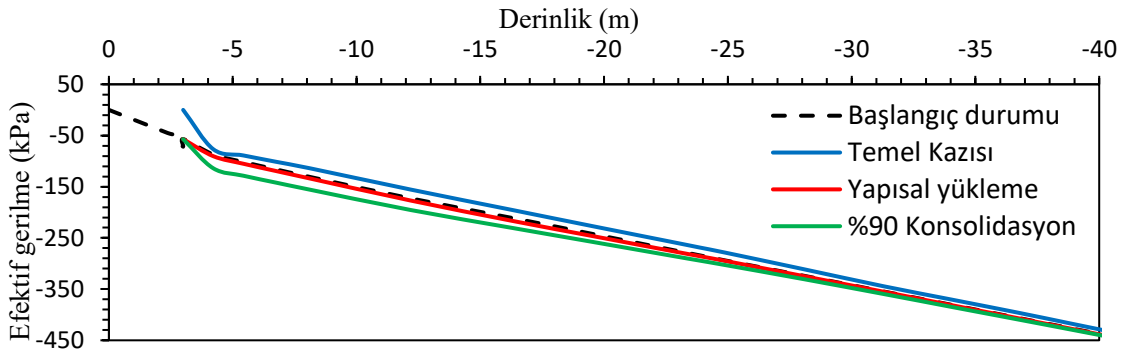
**Şekil Ek-188.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 24)



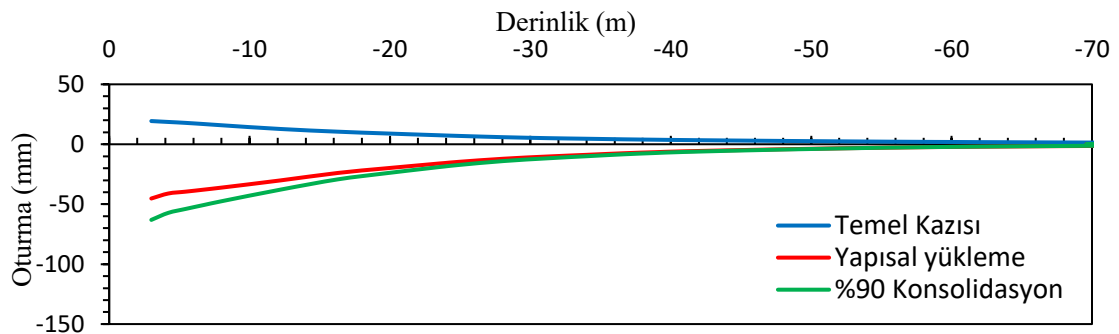
Şekil Ek-189. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 24)



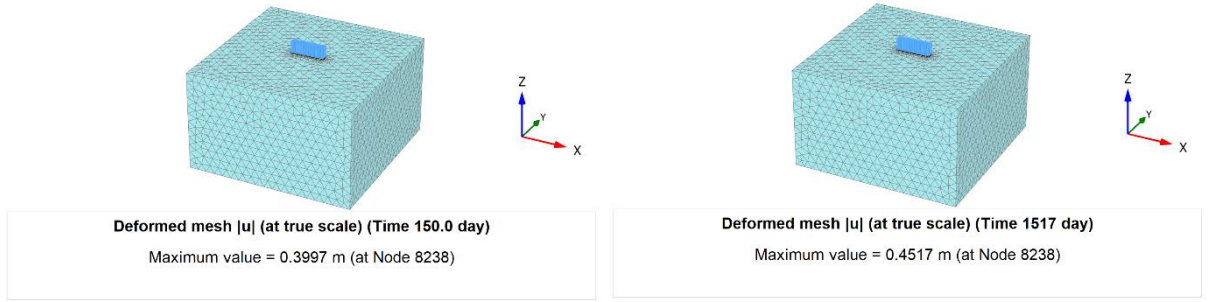
Şekil Ek-190. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 24)



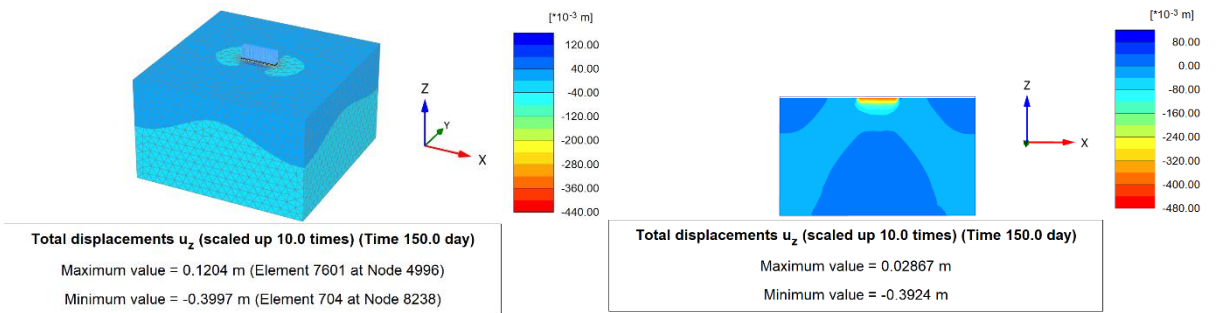
Şekil Ek-191. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 24)



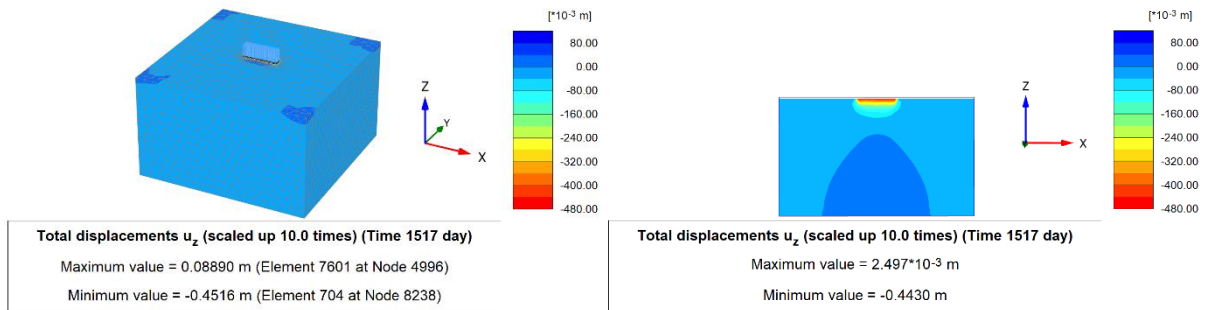
Şekil Ek-192. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 24)

**Analiz 25**

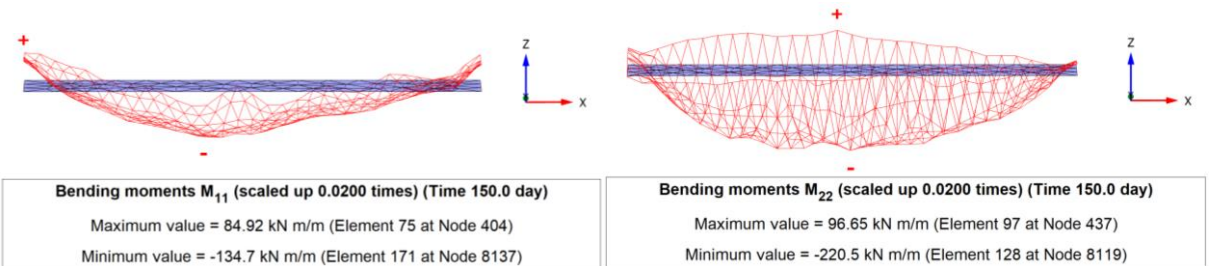
**Şekil Ek-193.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 25)



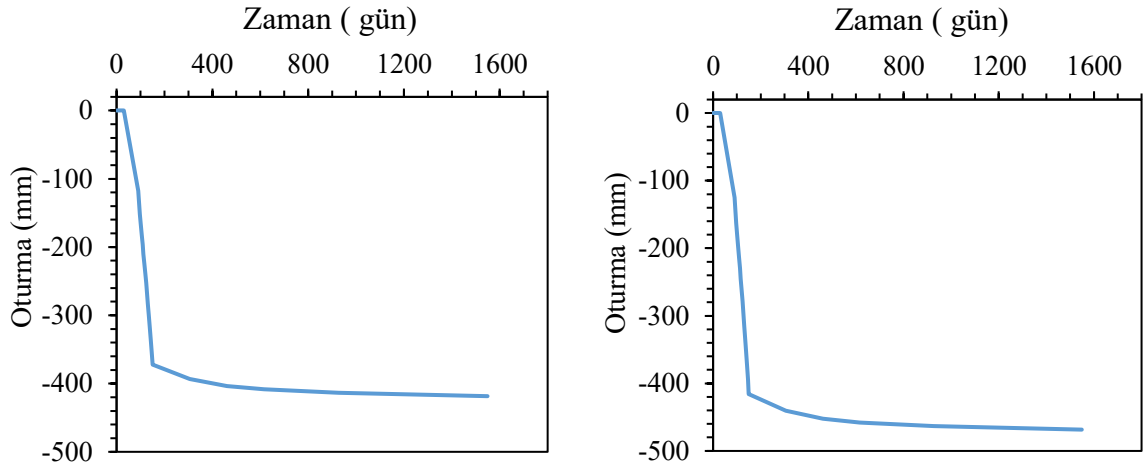
**Şekil Ek-194.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 25)



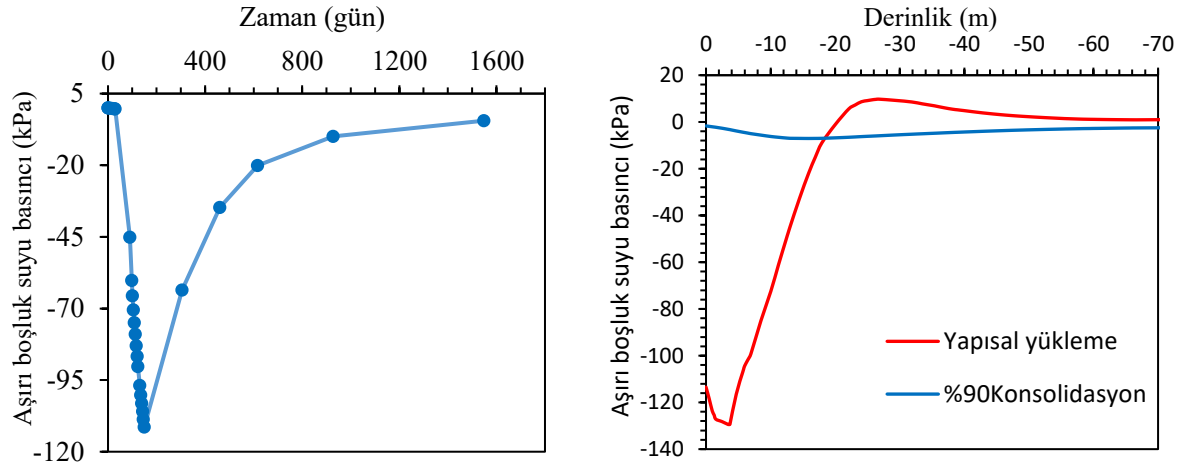
**Şekil Ek-195.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 25)



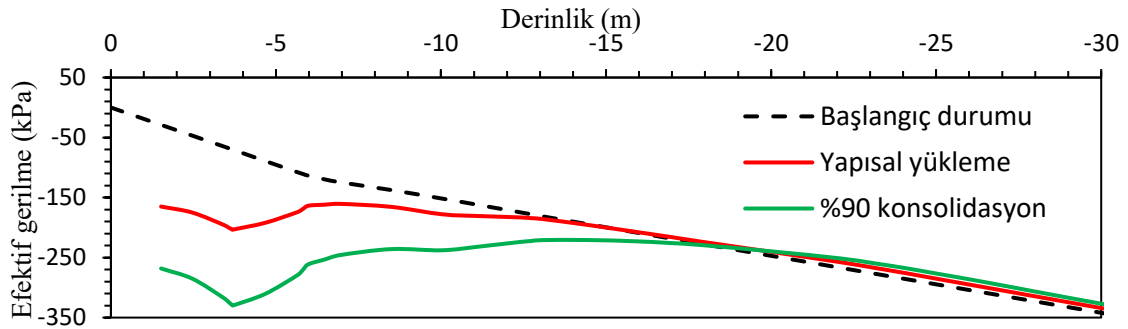
**Şekil Ek-196.** Radye temelin kısa (solda) ve uzun (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 25)



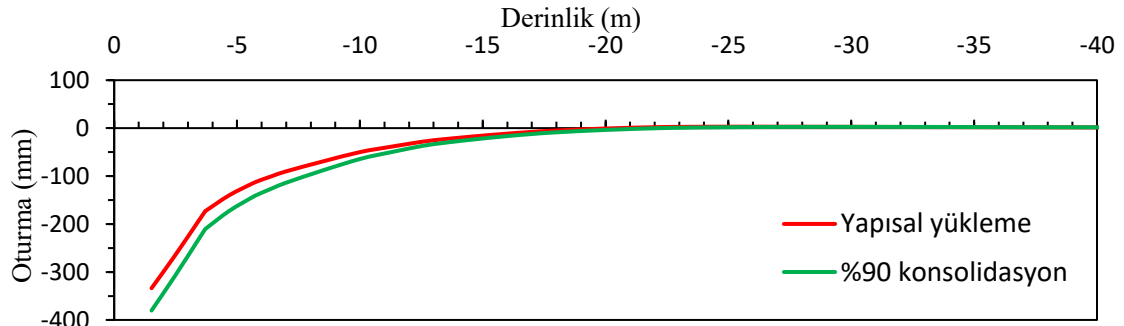
Şekil Ek-197. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 25)



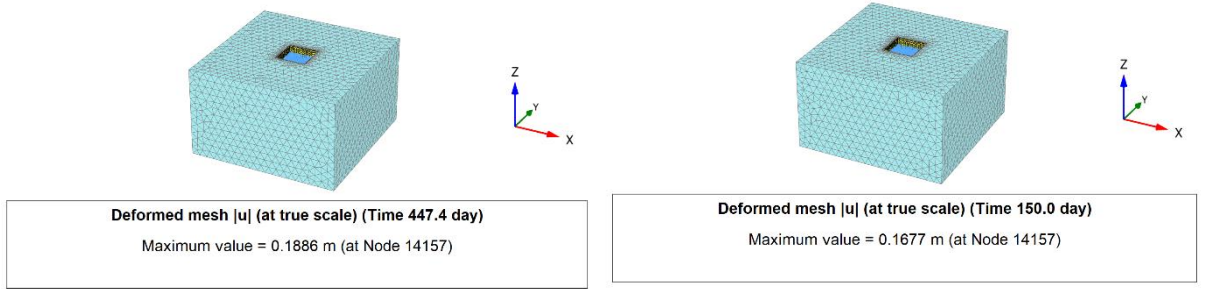
Şekil Ek-198. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 25)



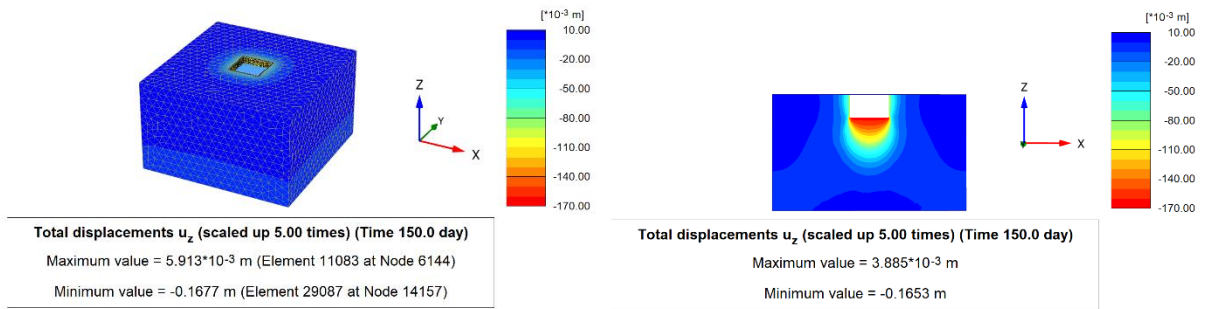
Şekil Ek-199. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 25)



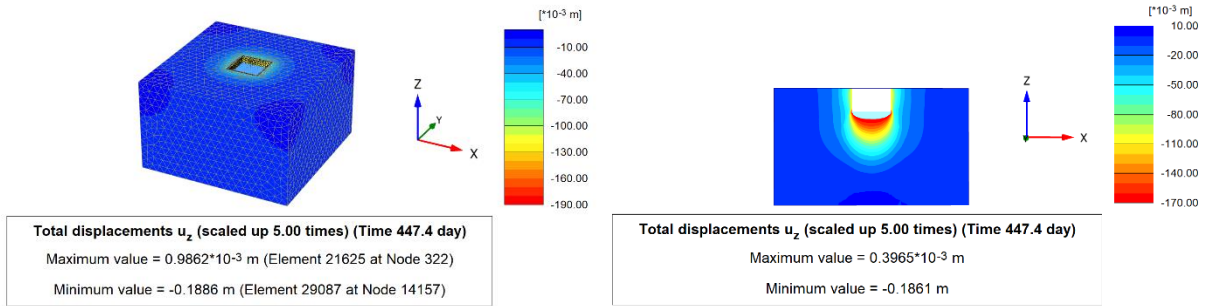
Şekil Ek-200. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 25)

**Analiz 26**

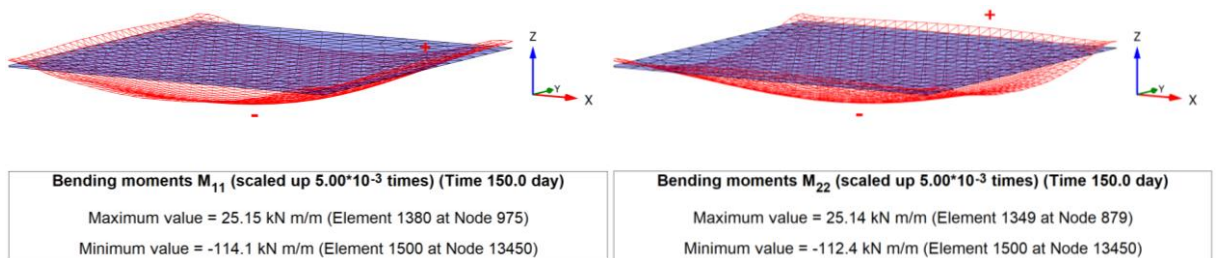
**Şekil Ek-201.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 26)



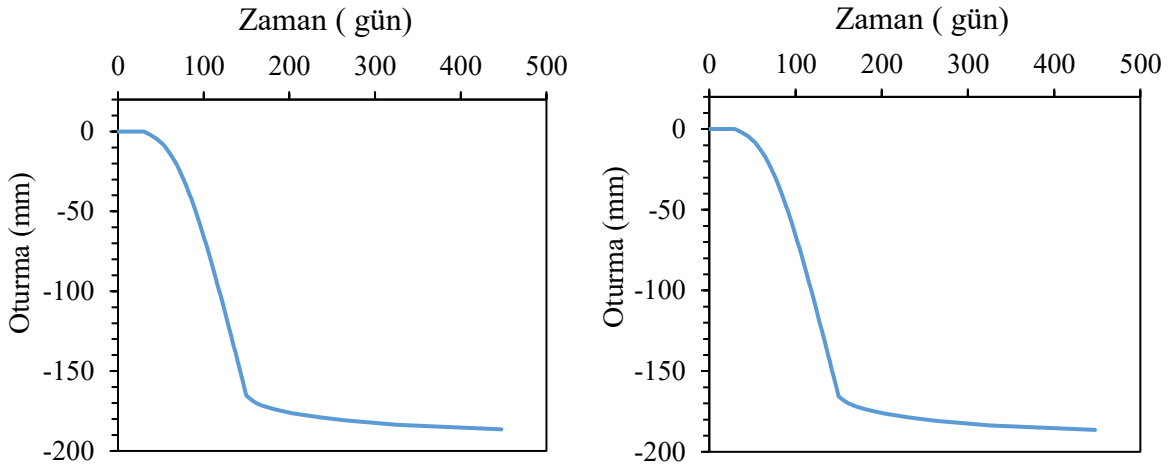
**Şekil Ek-202.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 26)



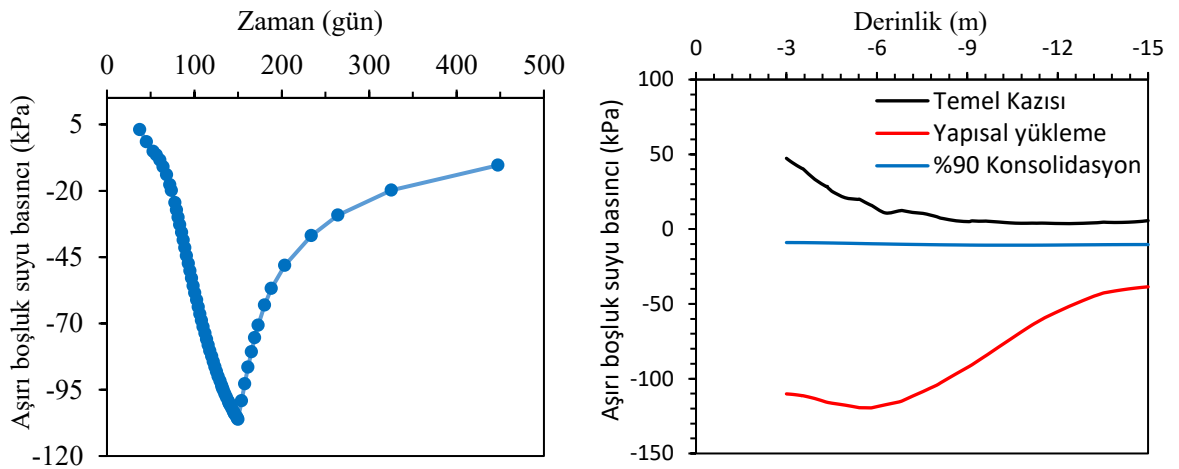
**Şekil Ek-203.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 26)



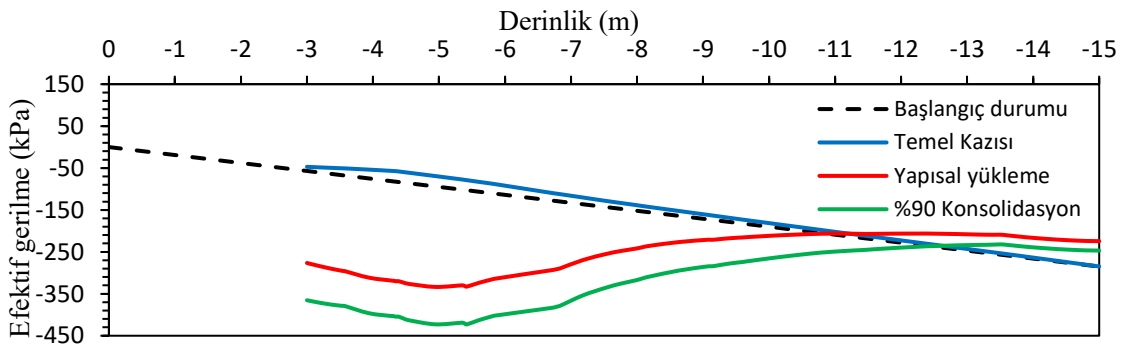
**Şekil Ek-204.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 26)



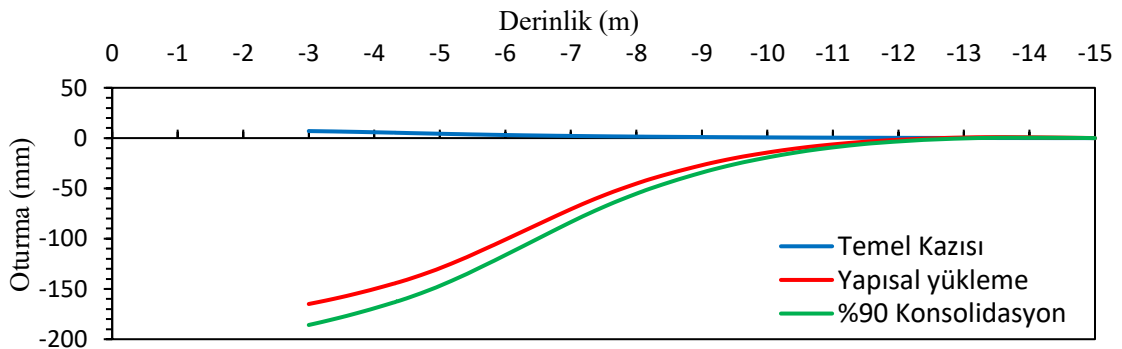
Şekil Ek-205. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 26)



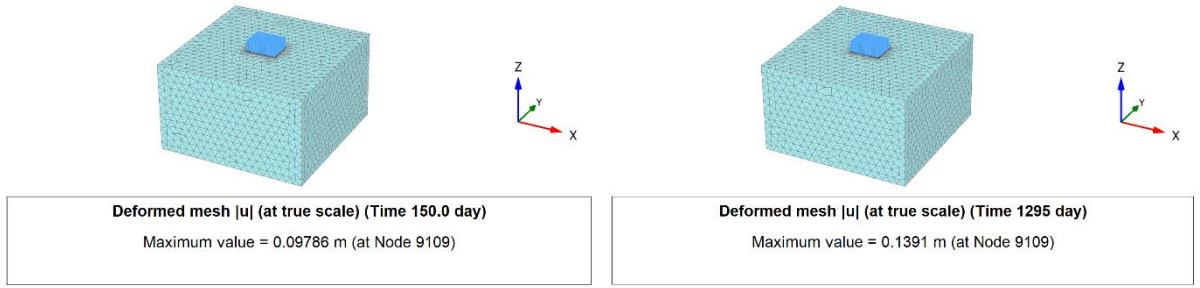
Şekil Ek-206. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 26)



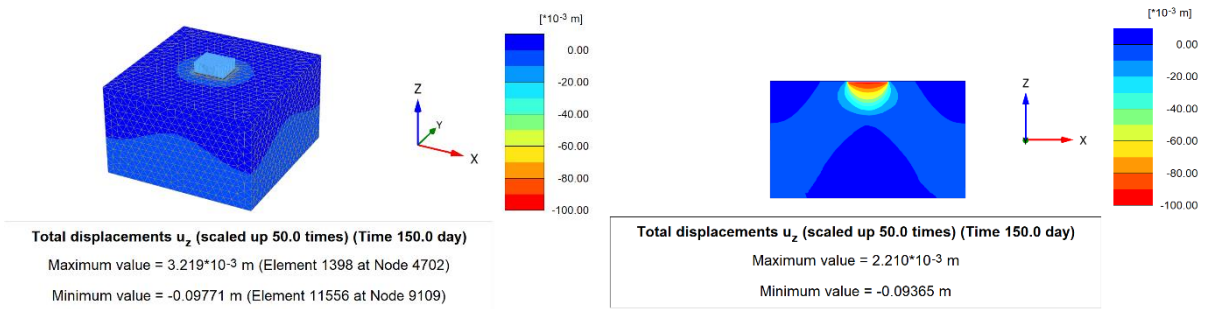
Şekil Ek-207. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 26)



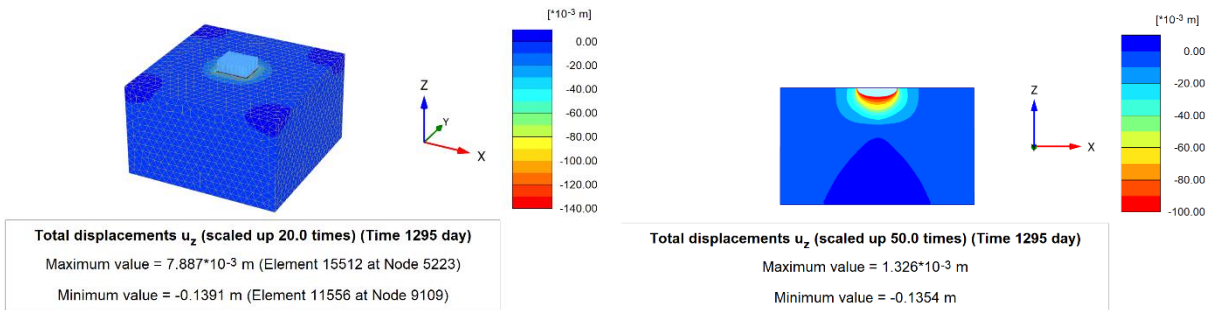
Şekil Ek-208. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 26)

**Analiz 27**

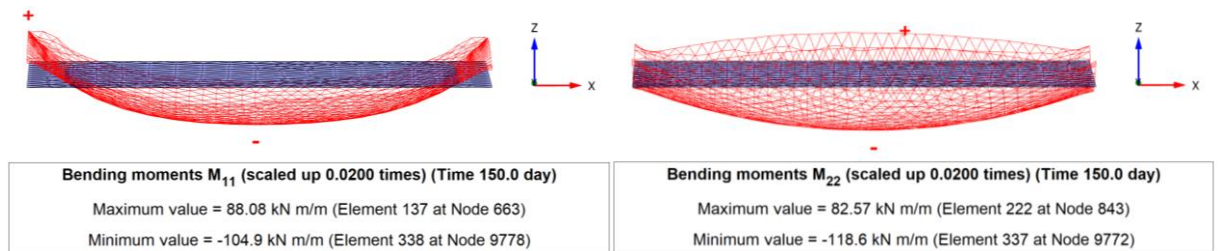
**Şekil Ek-209.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklemeye (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 27)



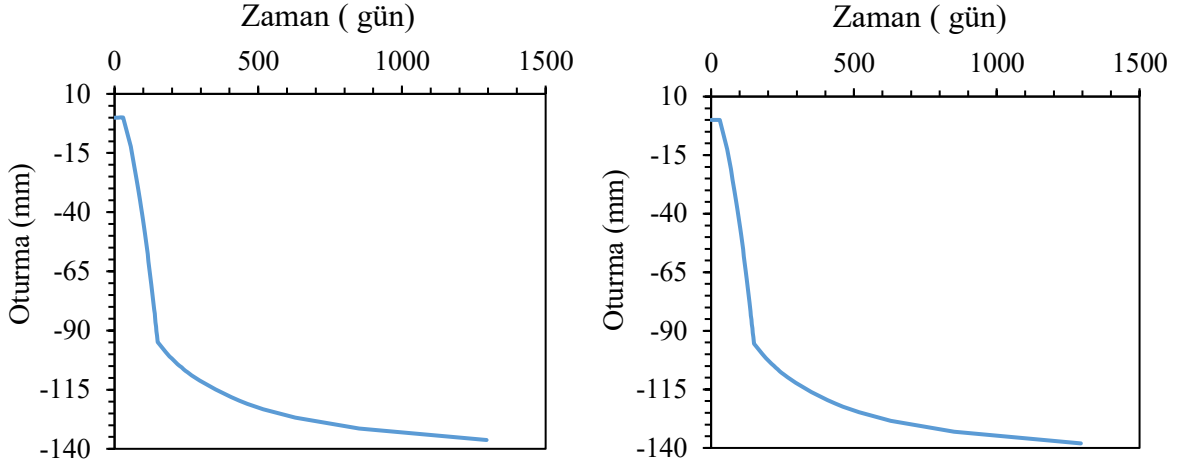
**Şekil Ek-210.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 27)



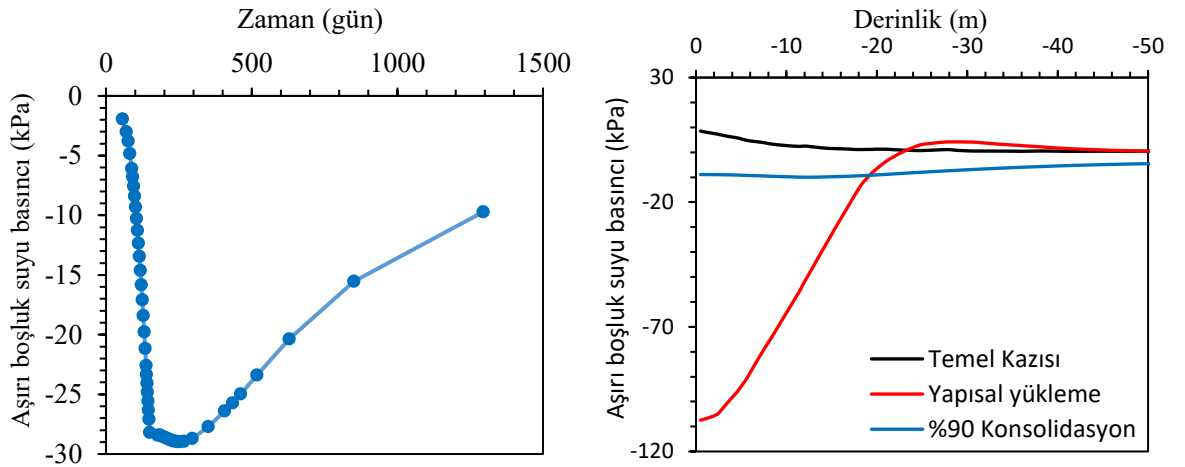
**Şekil Ek-211.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 27)



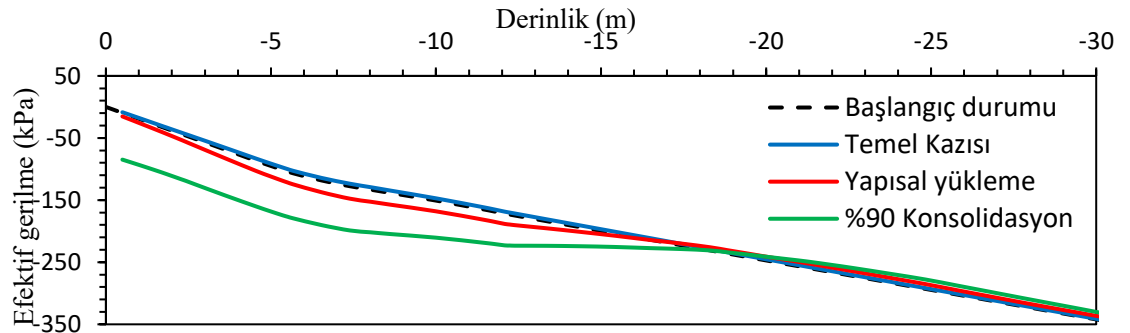
**Şekil Ek-212.** Radye temel in uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 27)



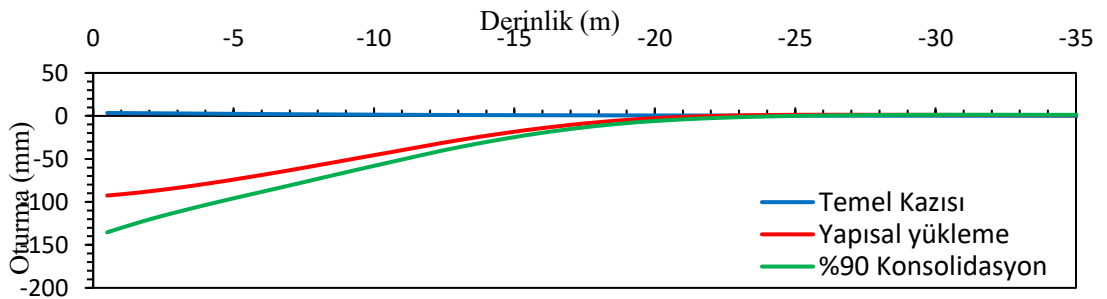
Şekil Ek-213. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 27)



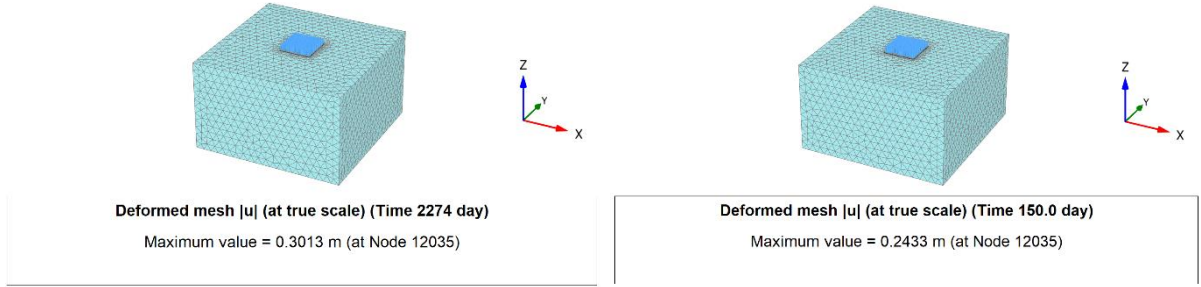
Şekil Ek-214. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 27)



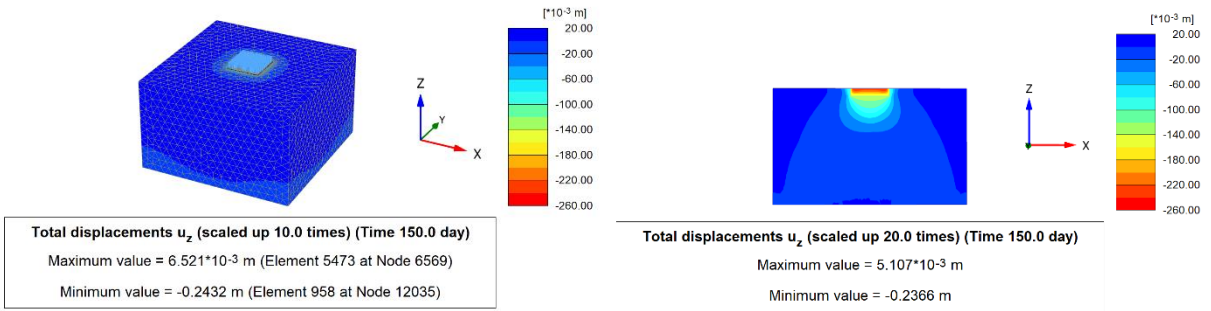
Şekil Ek-215. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 27)



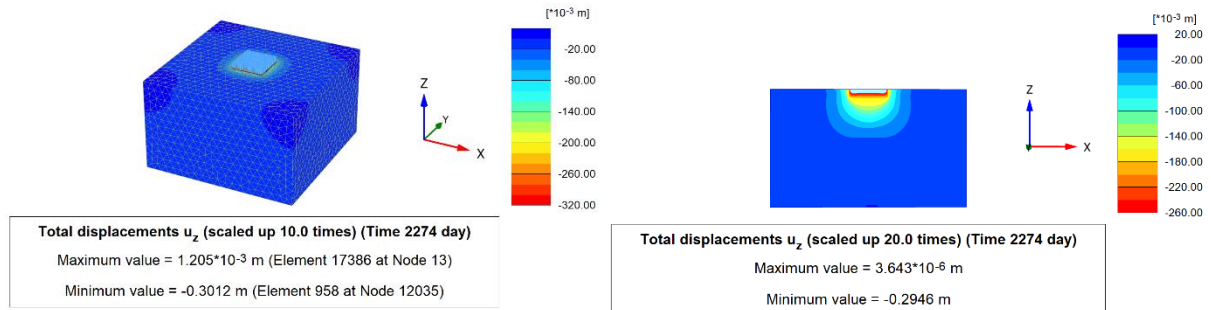
Şekil Ek-216. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 27)

**Analiz 28**

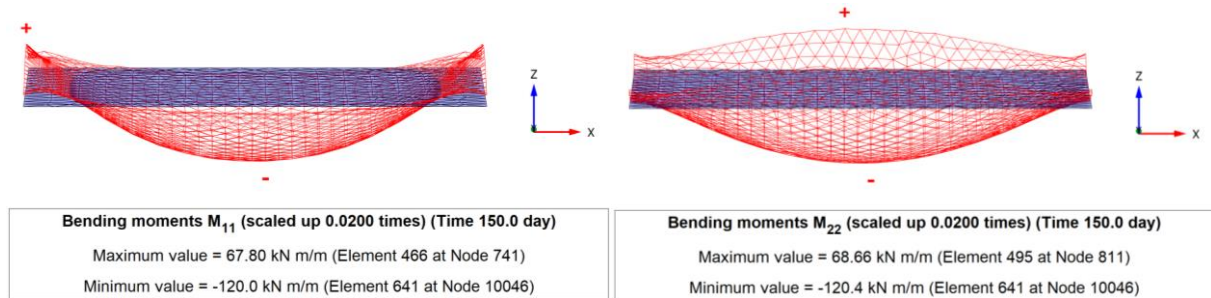
**Şekil Ek-217.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 28)



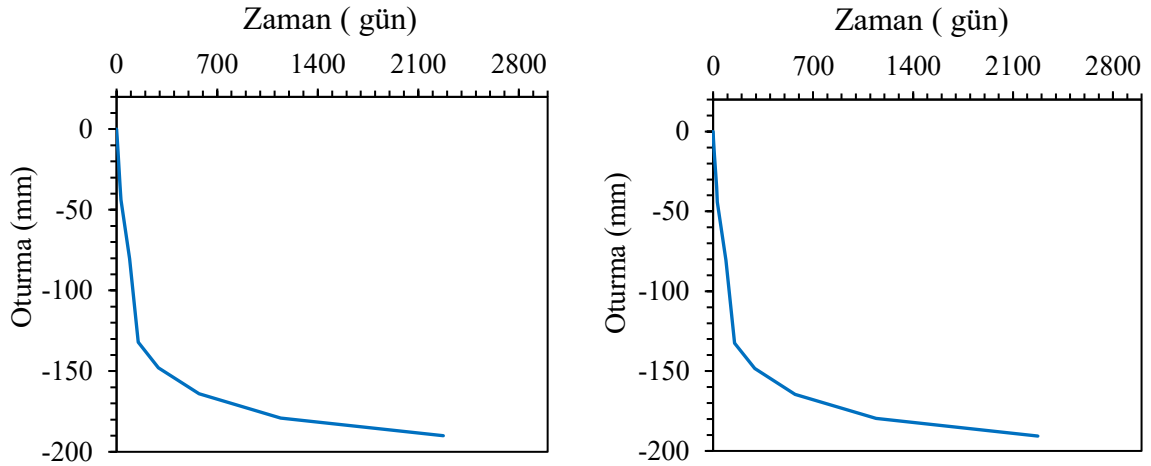
**Şekil Ek-218.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 28)



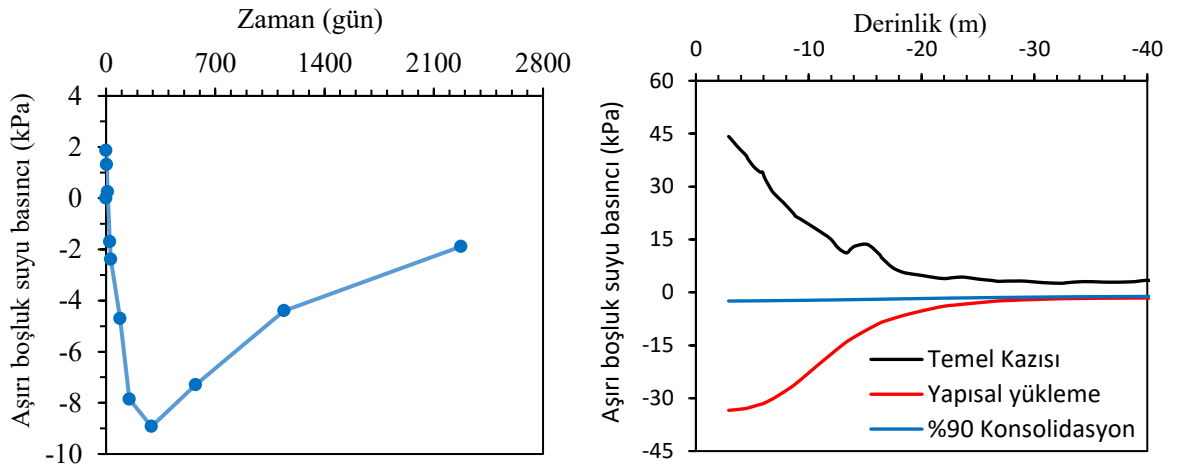
**Şekil Ek-219.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 28)



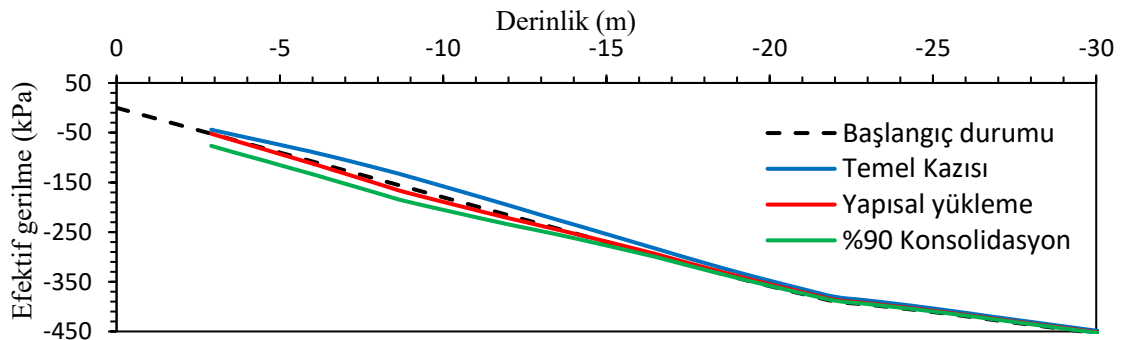
**Şekil Ek-220.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 28)



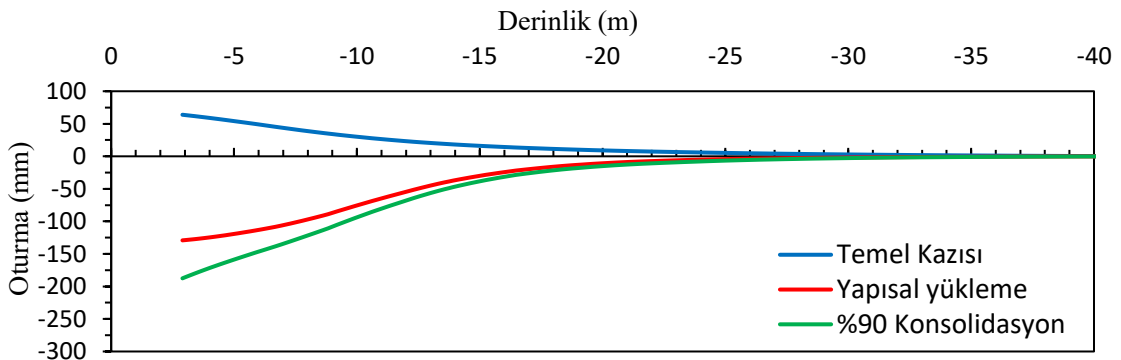
Şekil Ek-221. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 28)



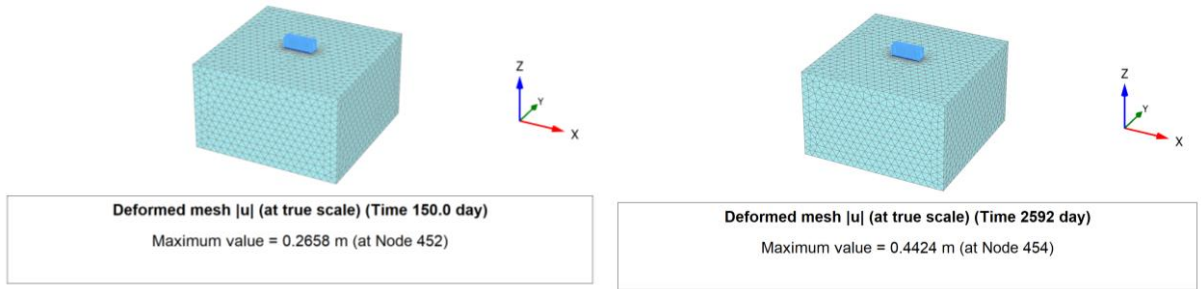
Şekil Ek-222. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 28)



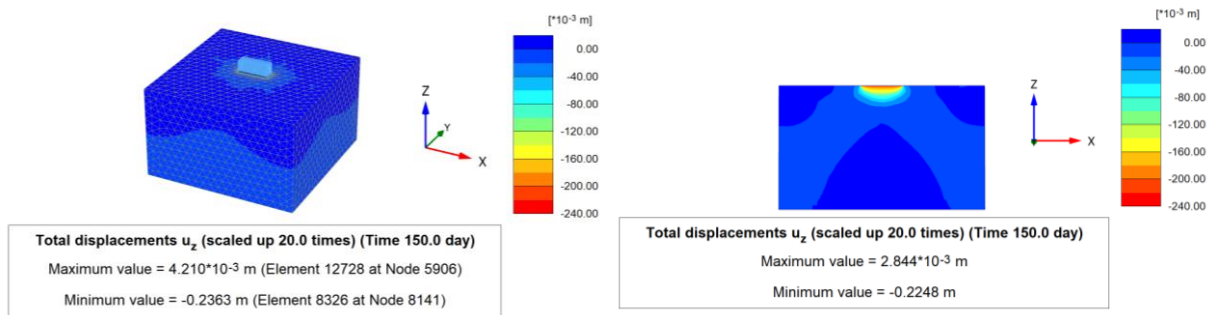
Şekil Ek-223. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 28)



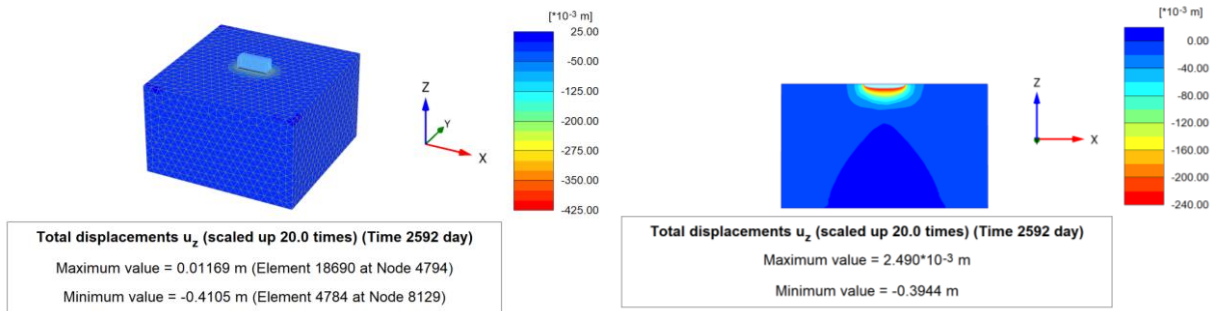
Şekil Ek-224. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 28)

**Analiz 29**

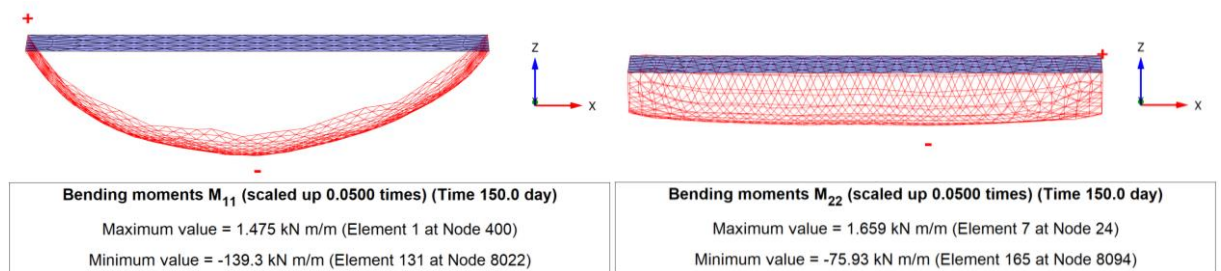
**Şekil Ek-225.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 29)



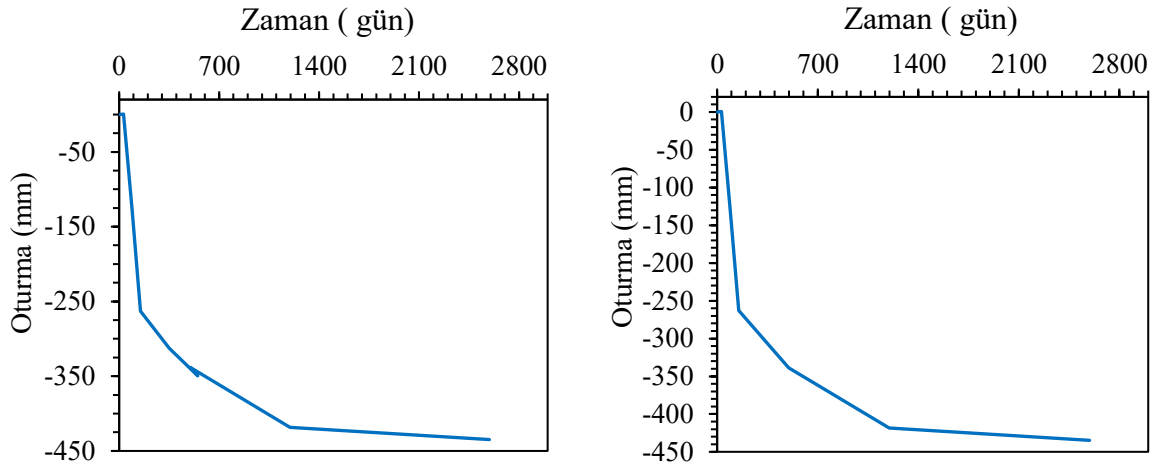
**Şekil Ek-226.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 29)



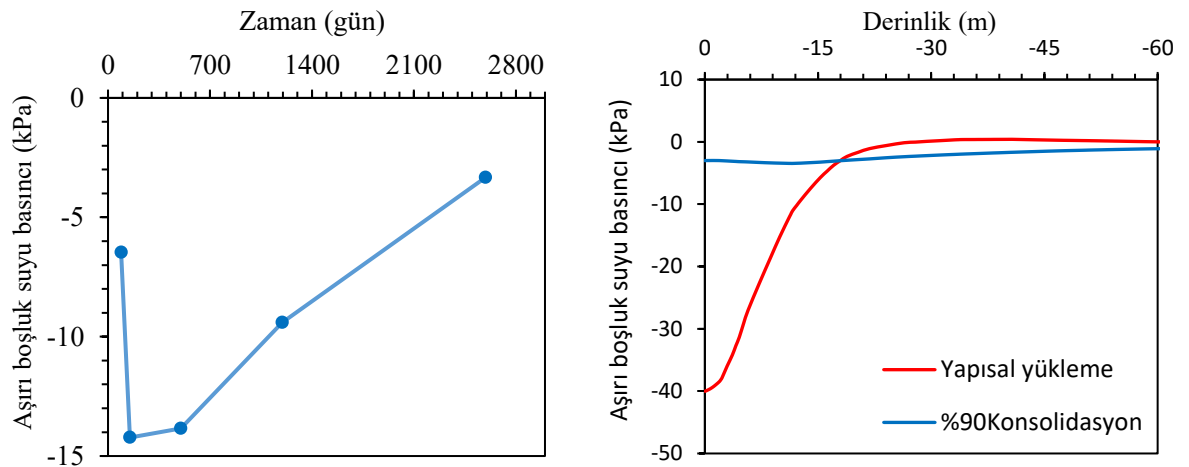
**Şekil Ek-227.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 29)



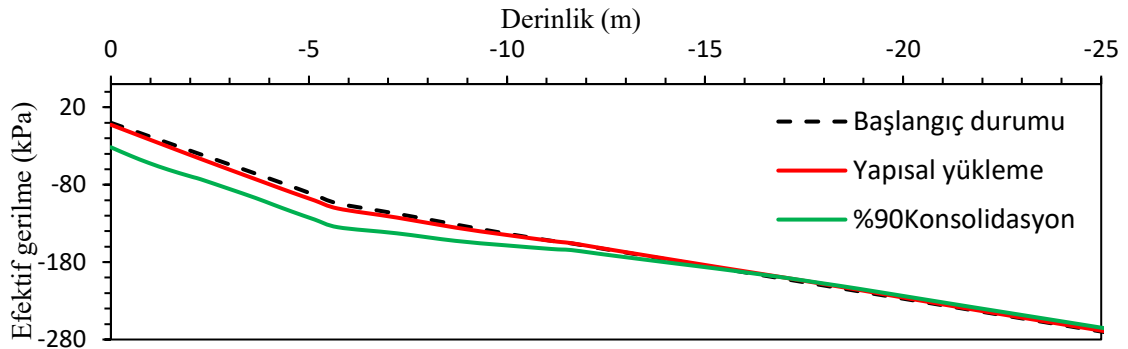
**Şekil Ek-228.** Radye temel in uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 29)



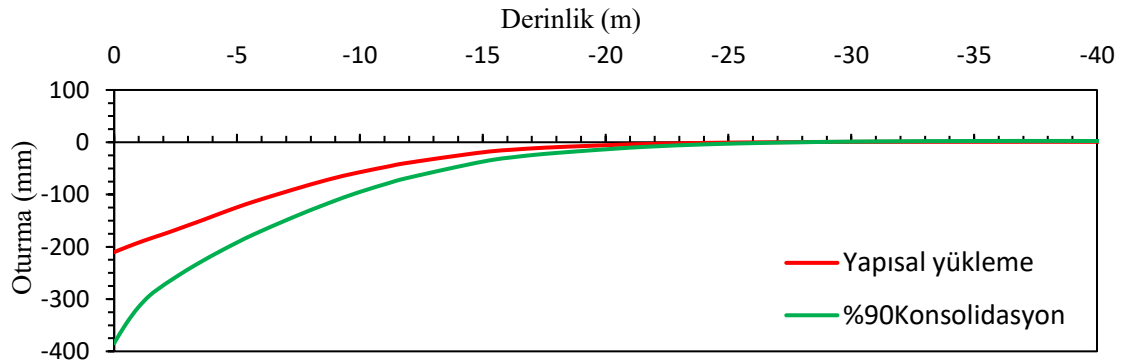
Şekil Ek-229. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 29)



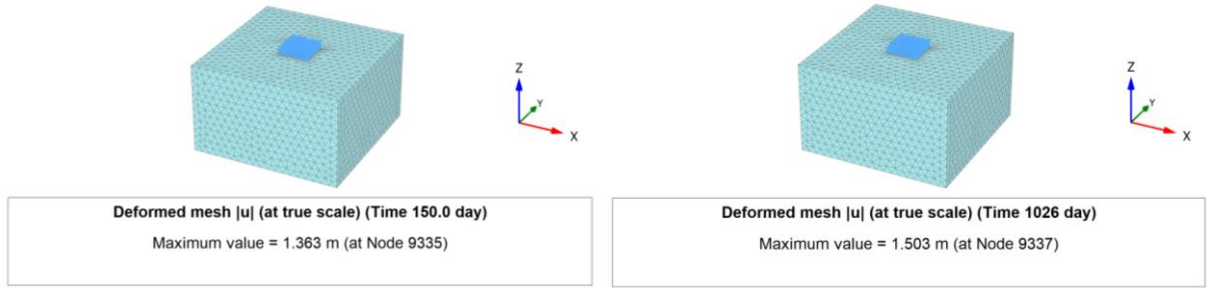
Şekil Ek-230. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 29)



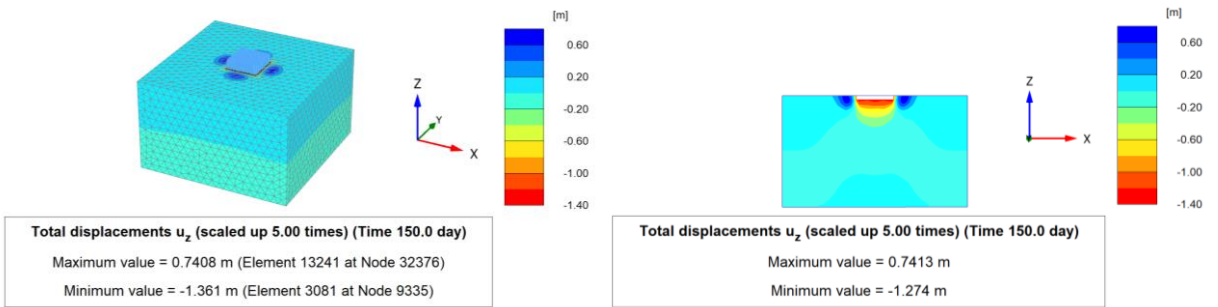
Şekil Ek-231. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 29)



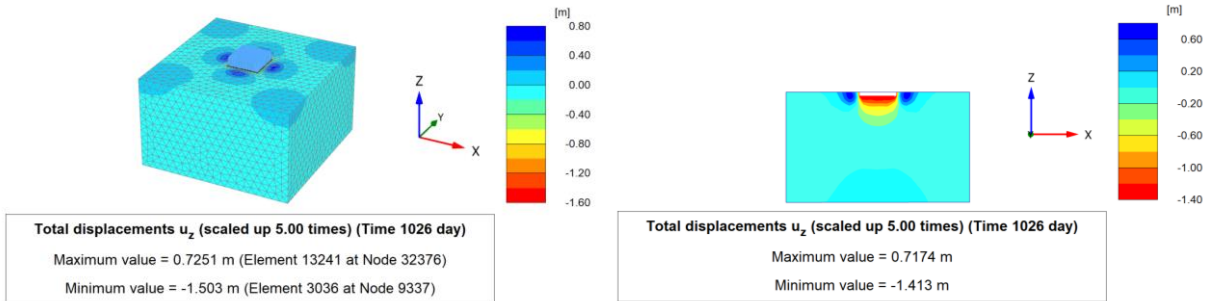
Şekil Ek-232. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 29)

**Analiz 30**

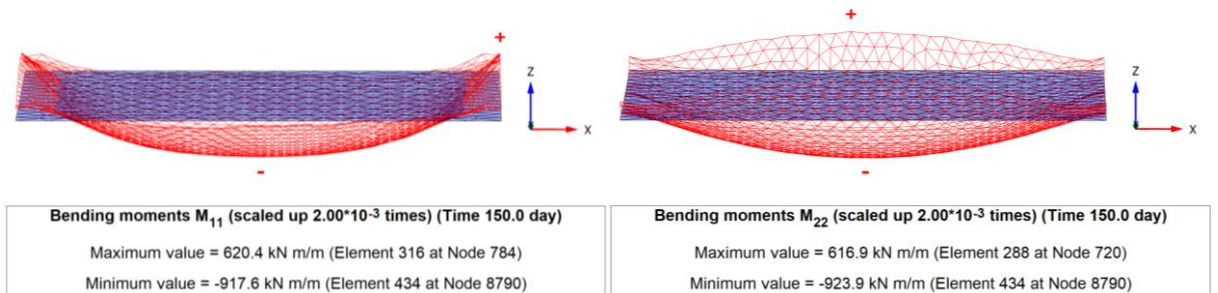
**Şekil Ek-233.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklemeye (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 30)



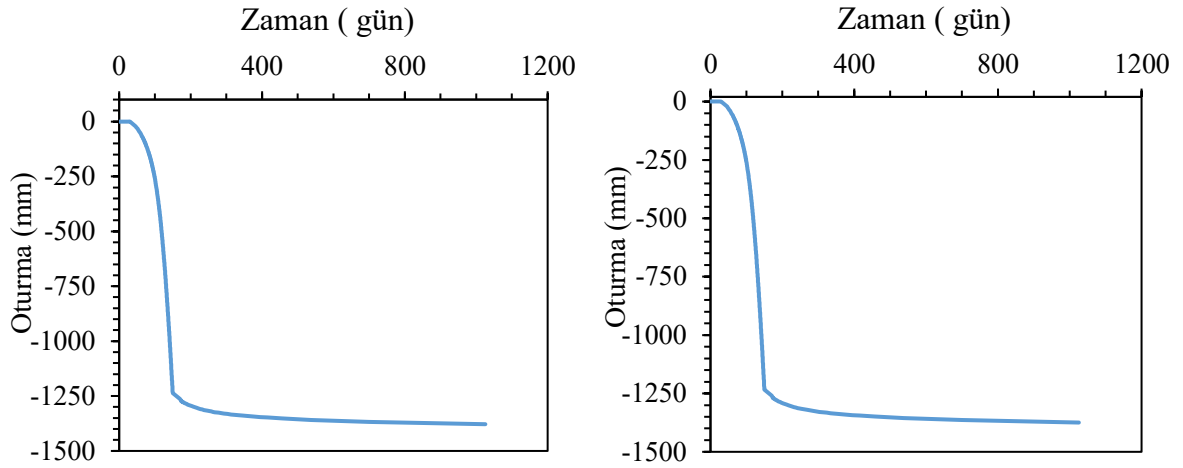
**Şekil Ek-234.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 30)



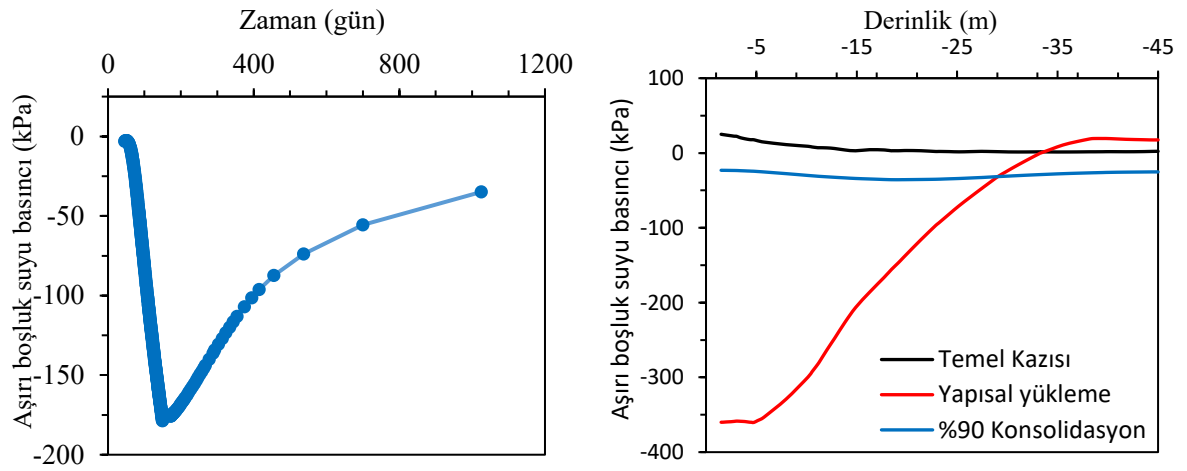
**Şekil Ek-235.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 30)



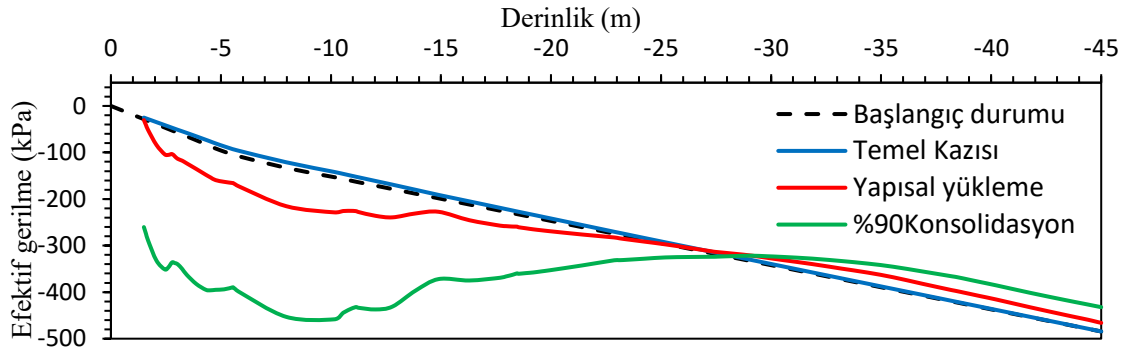
**Şekil Ek-236.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 30)



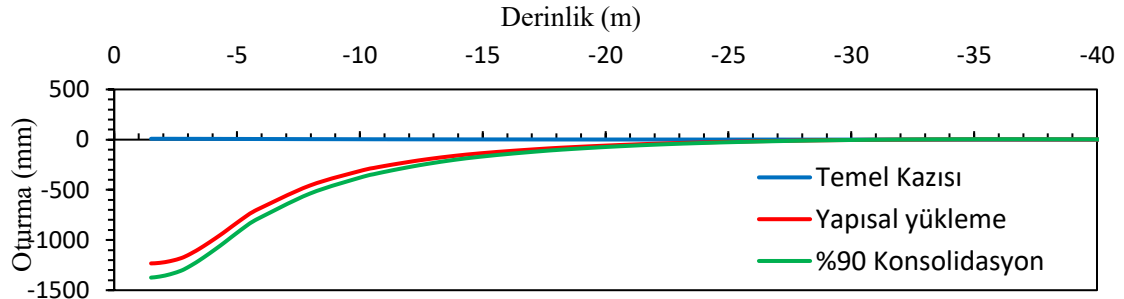
Şekil Ek-237. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 30)



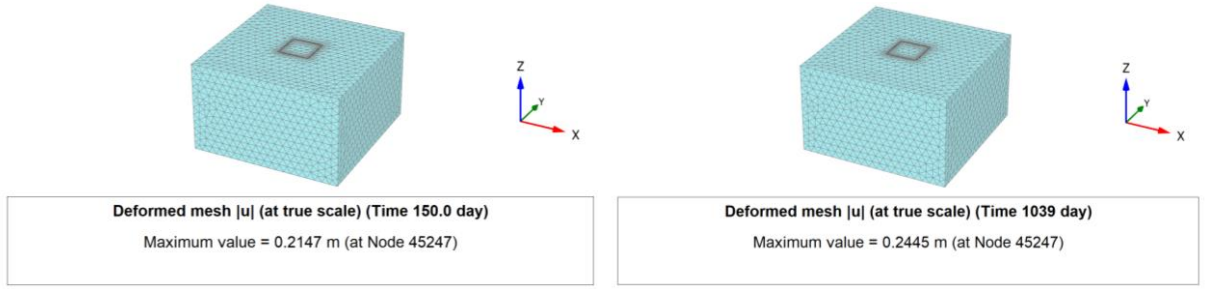
Şekil Ek-238. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 30)



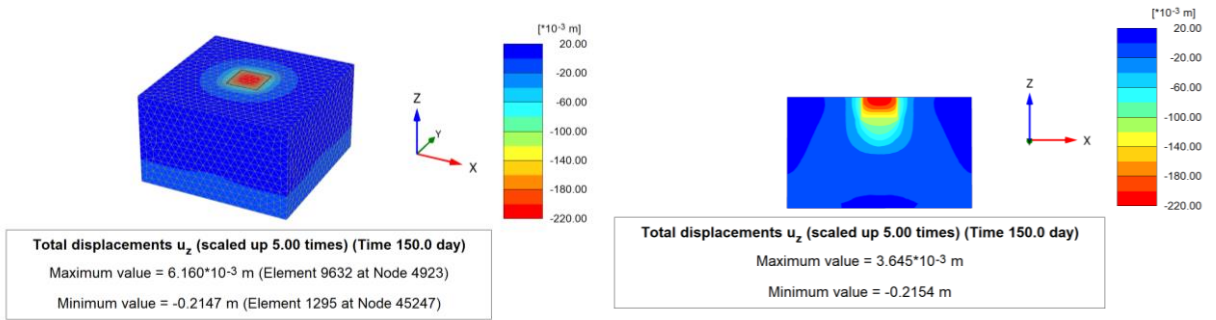
Şekil Ek-239. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 30)



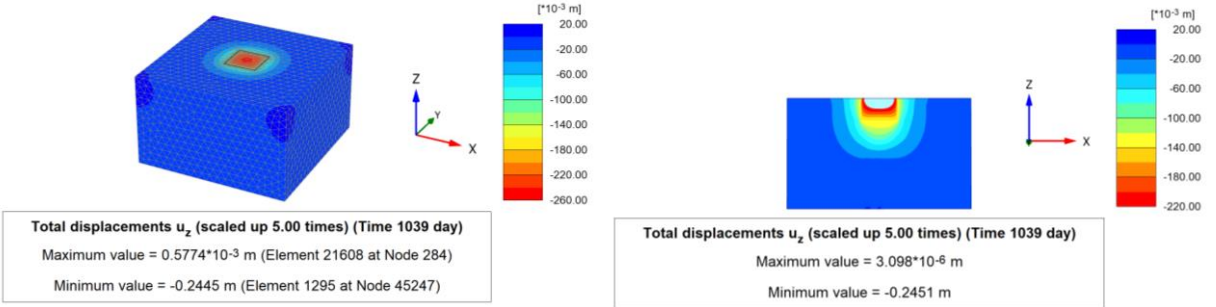
Şekil Ek-240. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 30)

**Analiz 31**

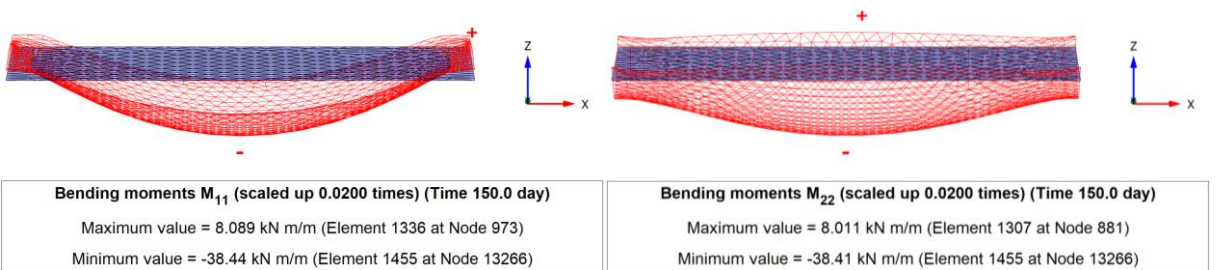
**Şekil Ek-241.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 31)



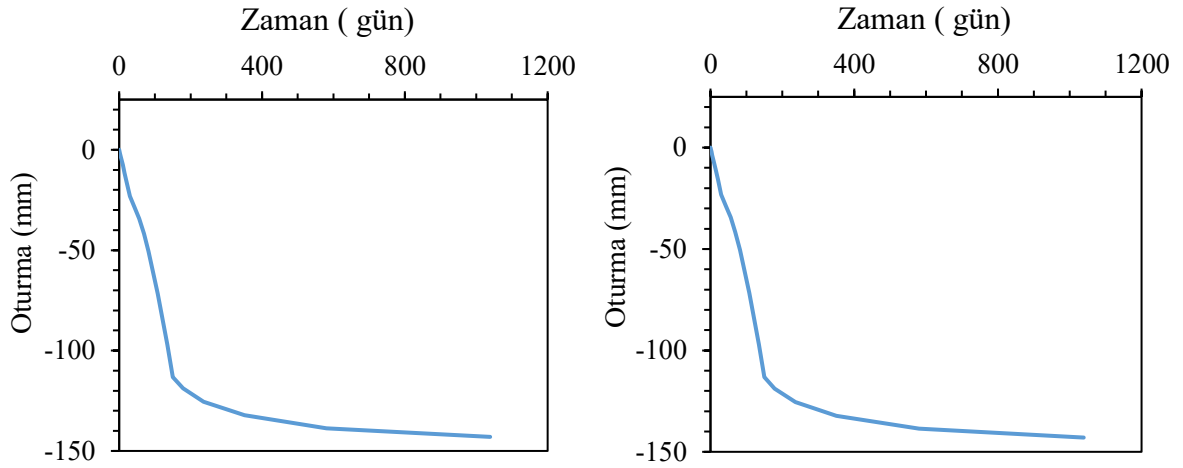
**Şekil Ek-242.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 31)



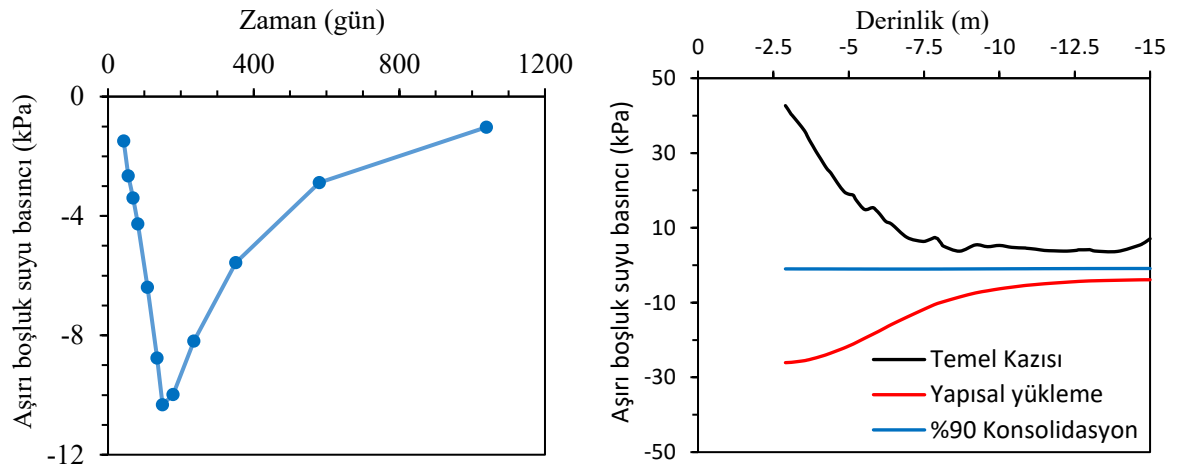
**Şekil Ek-243.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 31)



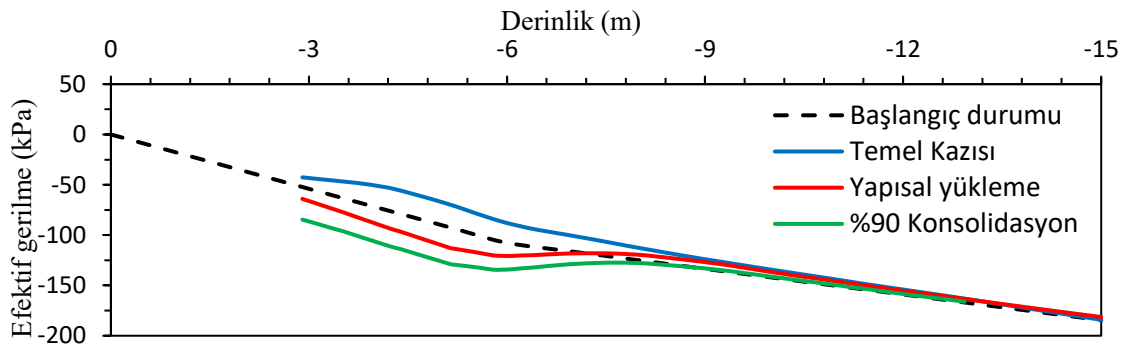
**Şekil Ek-244.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 31)



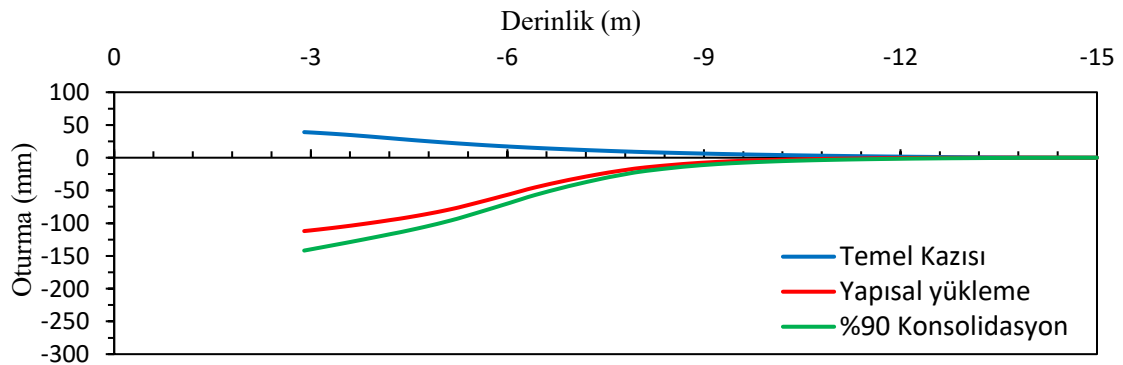
Şekil Ek-245. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 31)



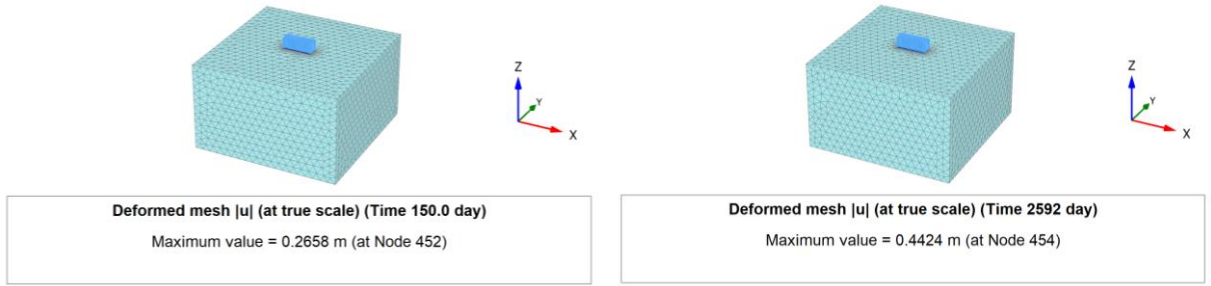
Şekil Ek-246. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 31)



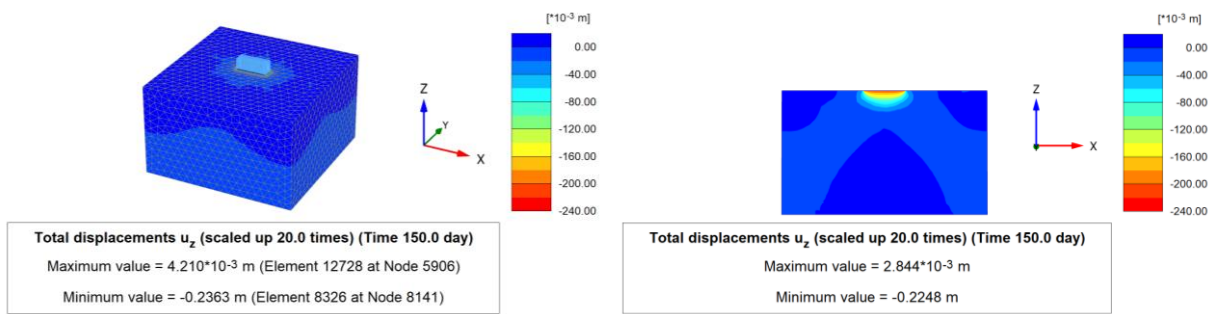
Şekil Ek-247. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 31)



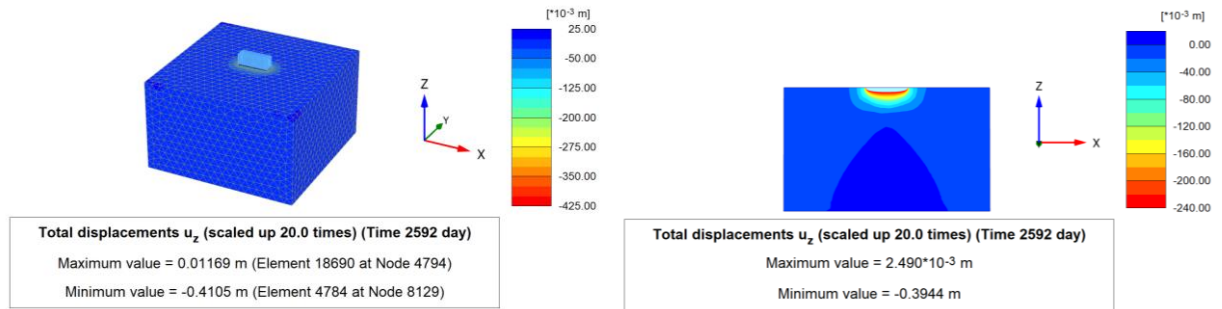
Şekil Ek-248. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 31)

**Analiz 32**

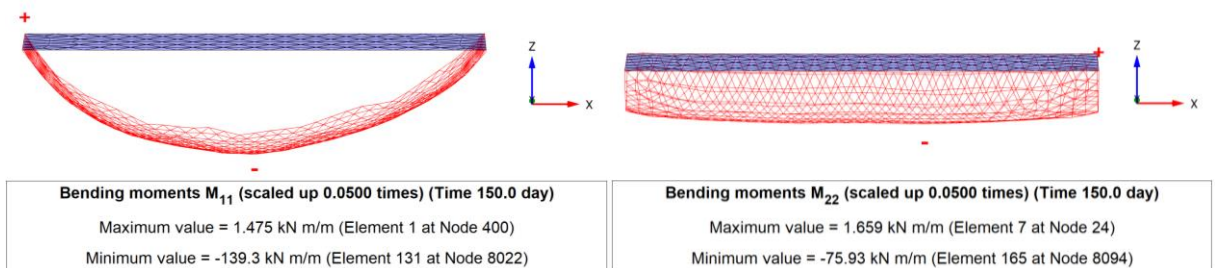
**Şekil Ek-249.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 32)



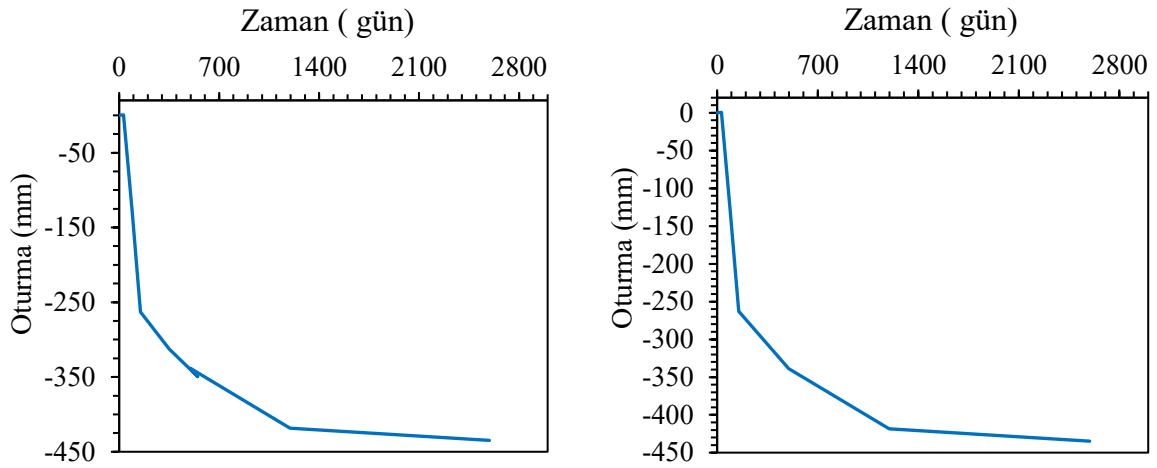
**Şekil Ek-250.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 32)



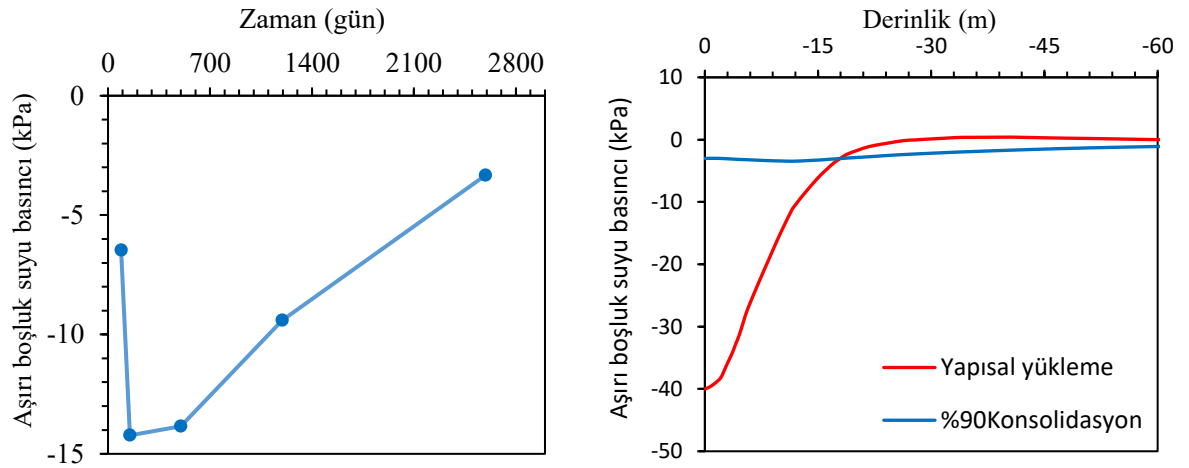
**Şekil Ek-251.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 32)



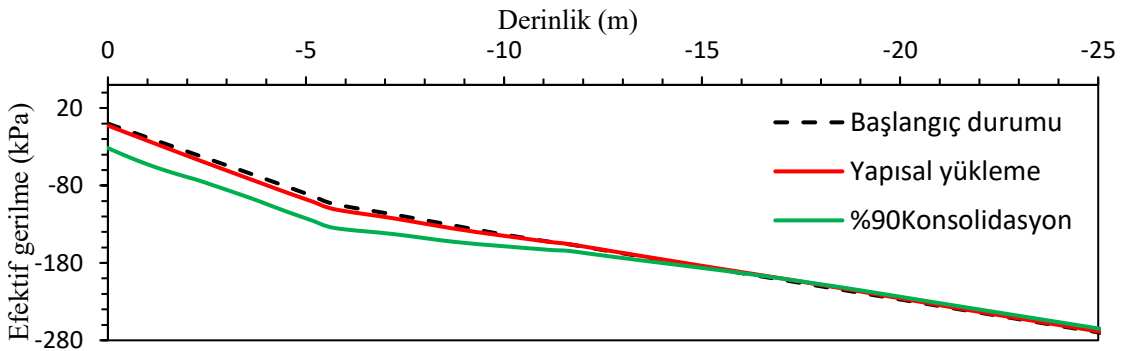
**Şekil Ek-252.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 32)



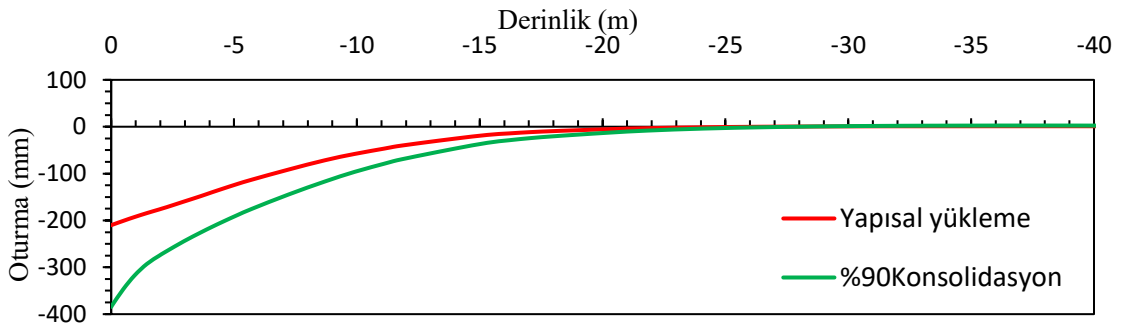
Şekil Ek-253. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 32)



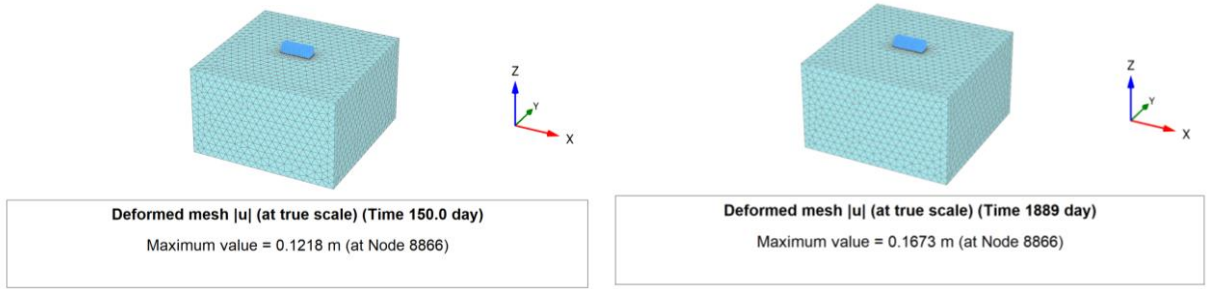
Şekil Ek-254. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 32)



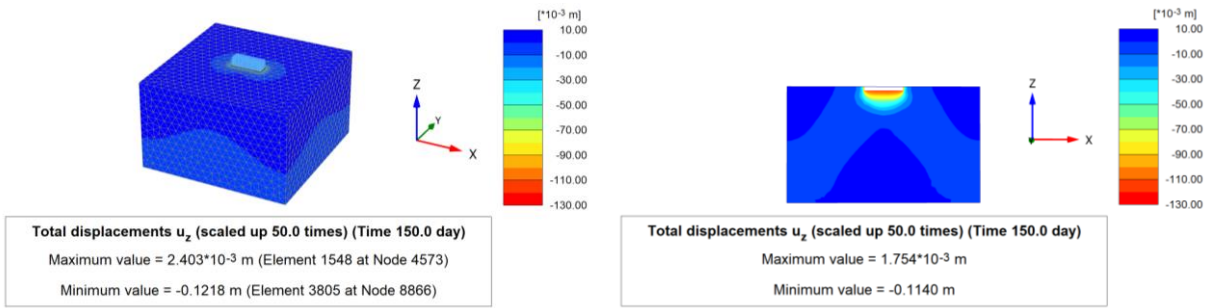
Şekil Ek-255. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 32)



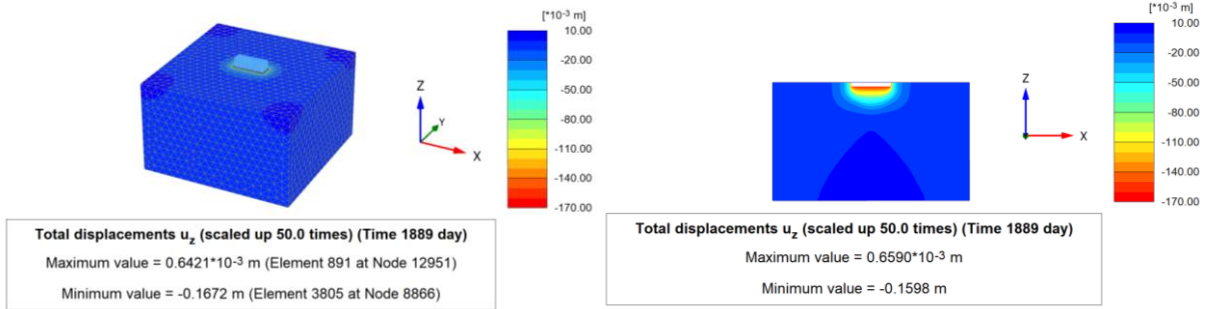
Şekil Ek-256. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 32)

**Analiz 33**

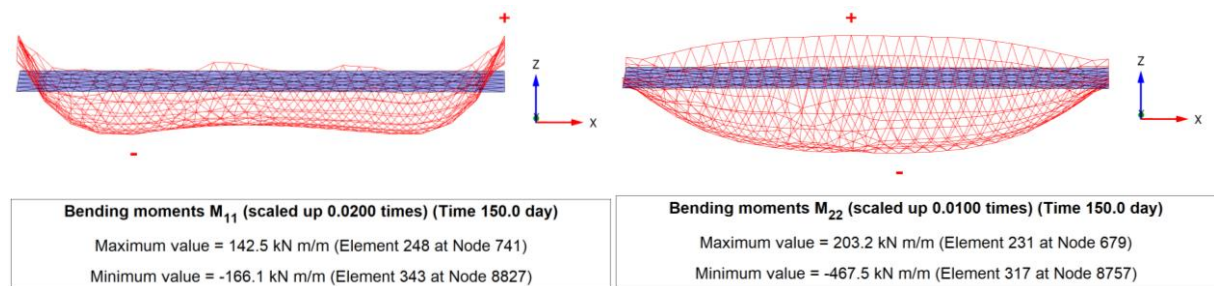
**Şekil Ek-257.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 33)



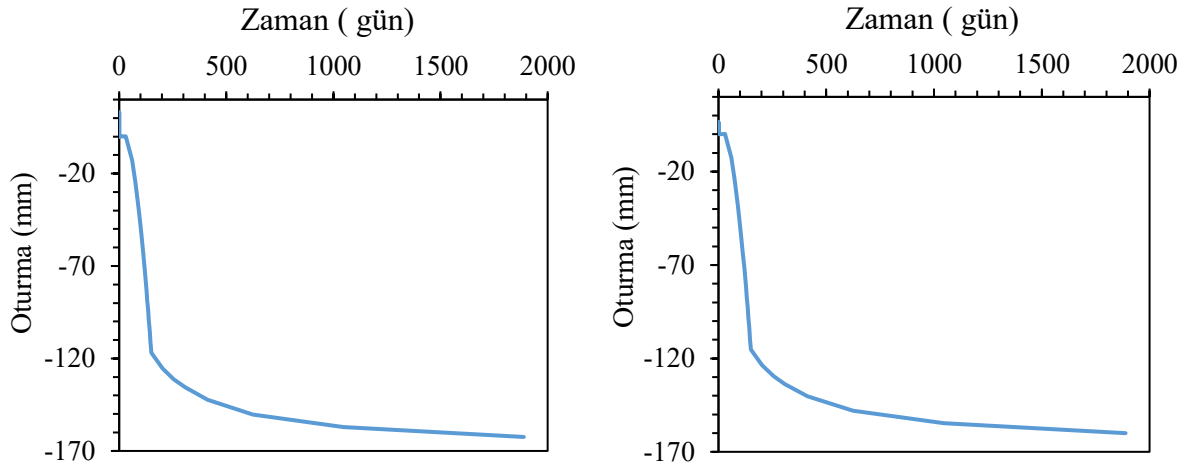
**Şekil Ek-258.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 33)



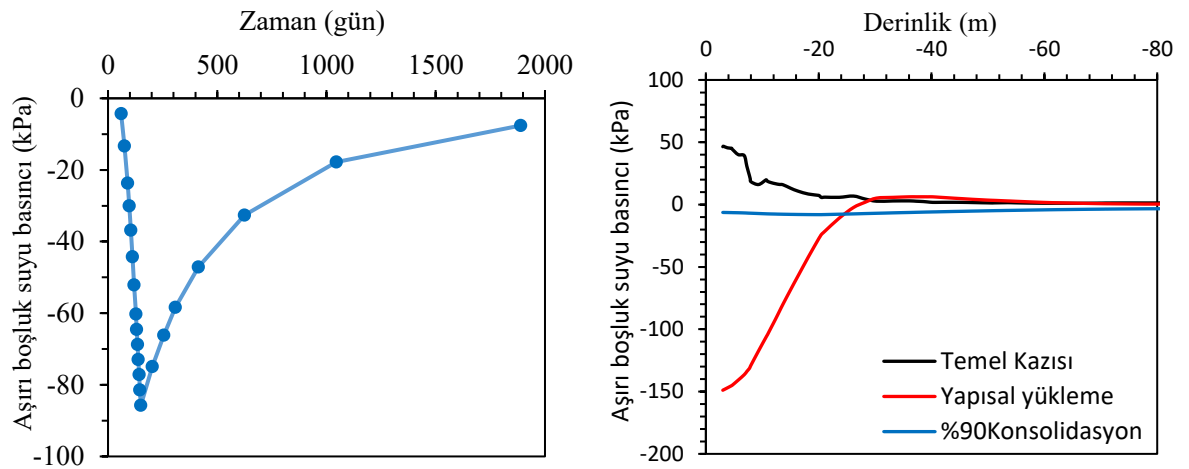
**Şekil Ek-259.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 33)



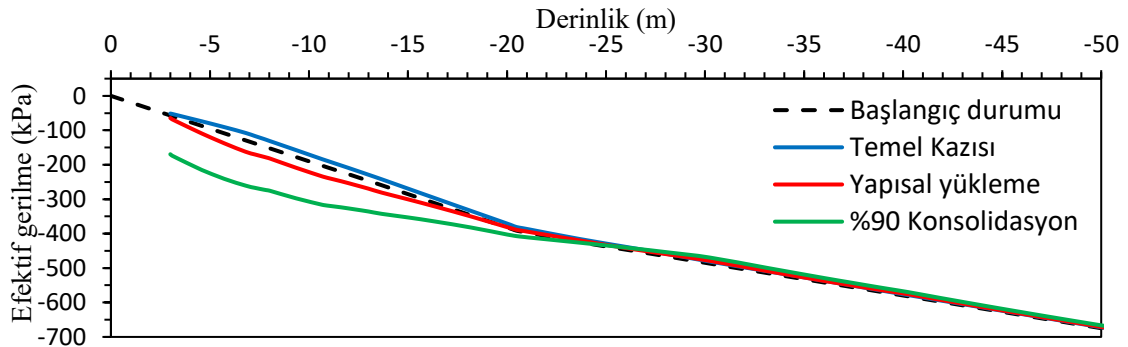
**Şekil Ek-260.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 33)



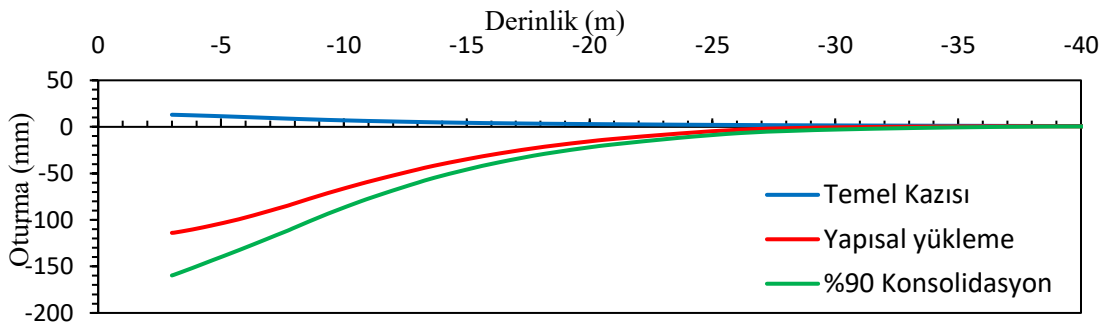
Şekil Ek-261. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 33)



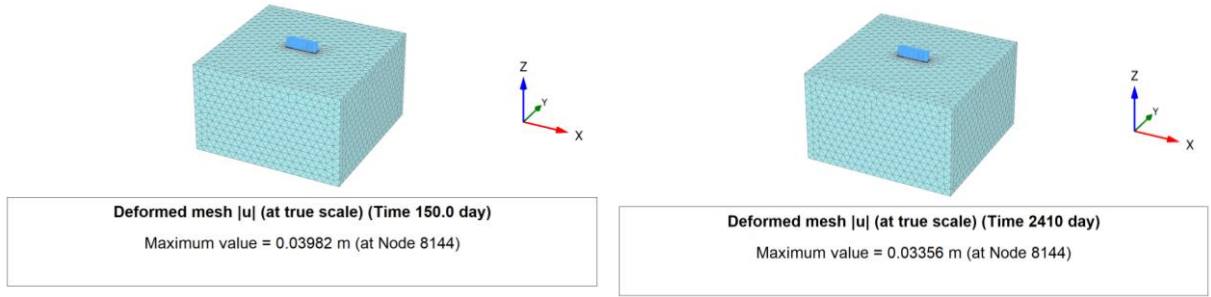
Şekil Ek-262. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 33)



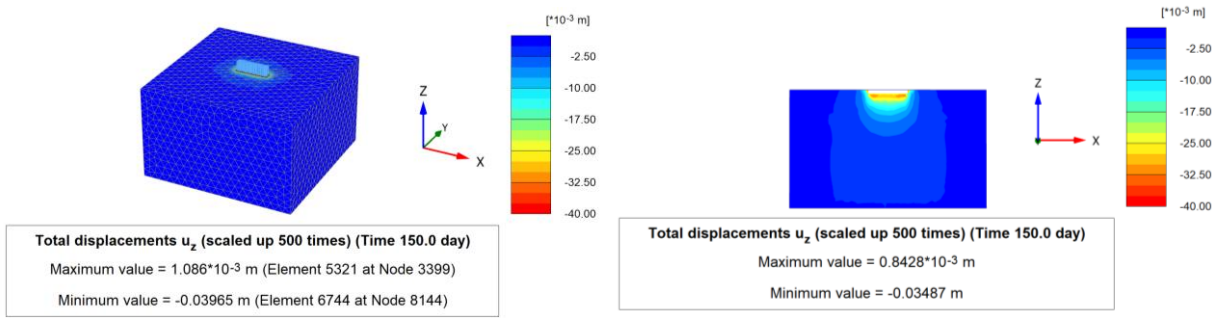
Şekil Ek-263. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 33)



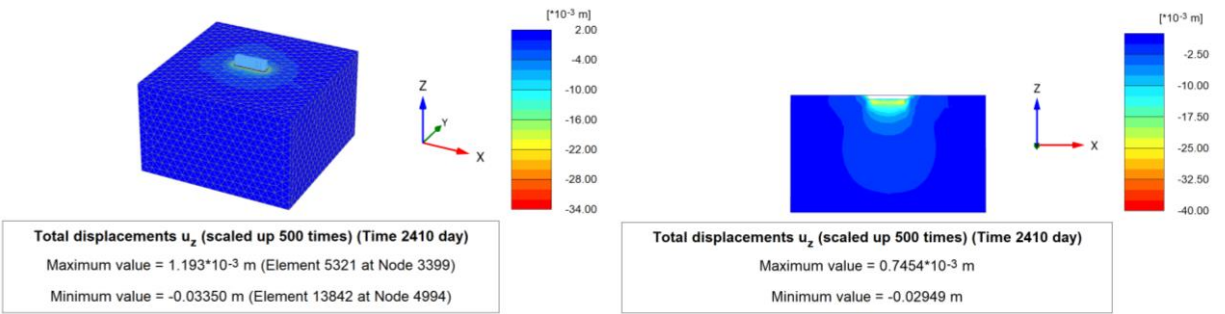
Şekil Ek-264. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 33)

**Analiz 34**

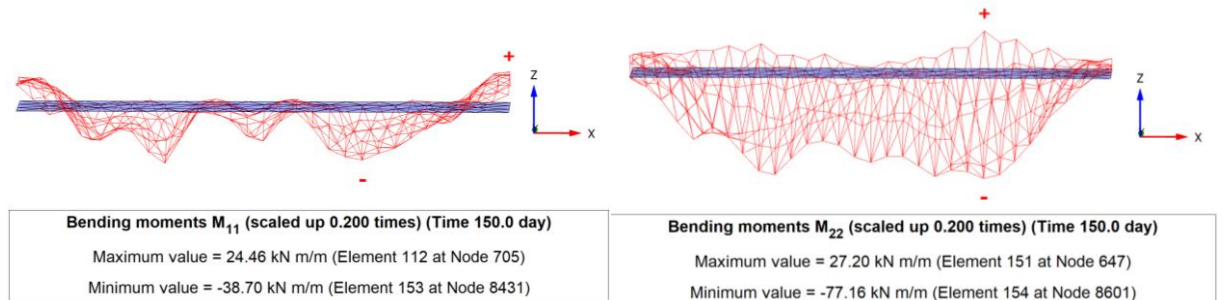
**Şekil EK-265.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 34)



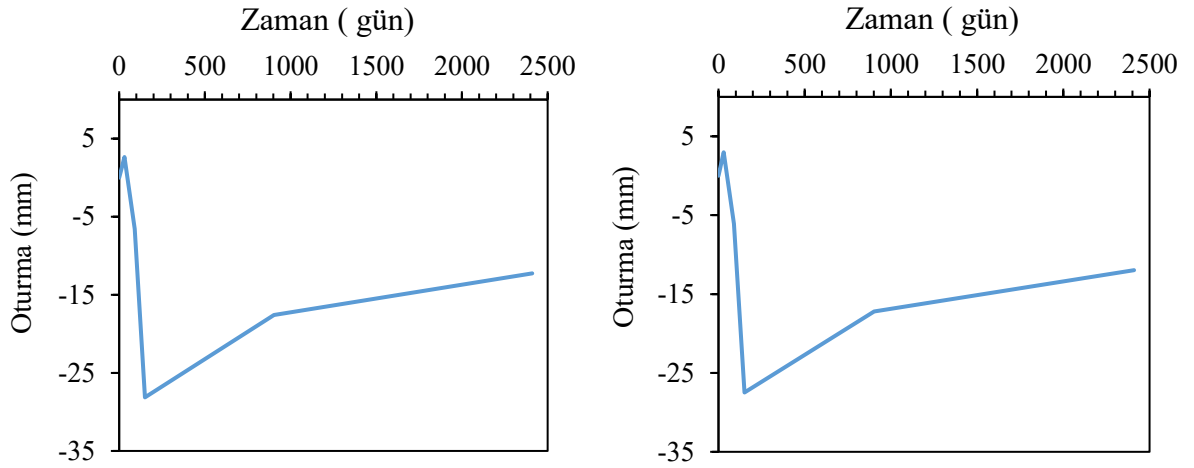
**Şekil EK-266.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 34)



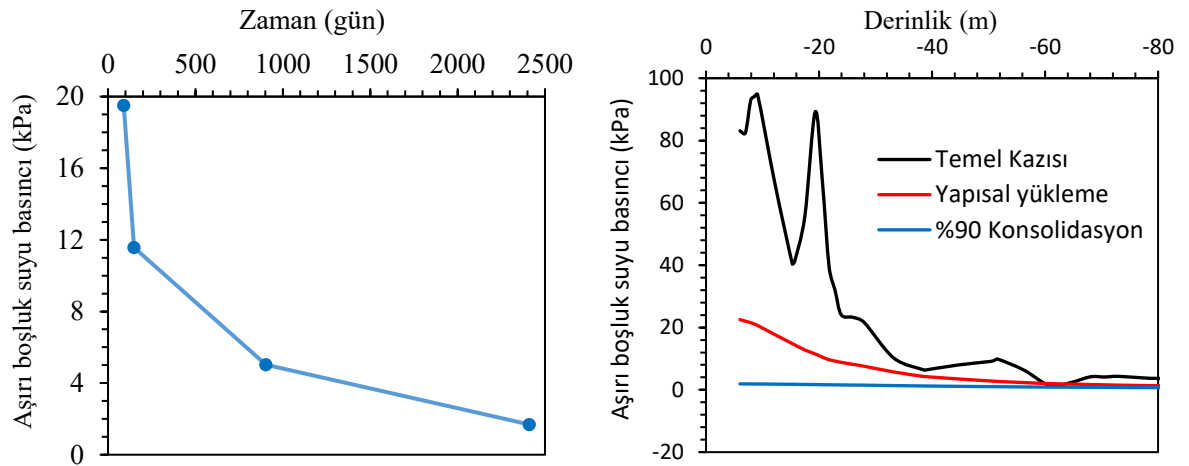
**Şekil EK-267.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 34)



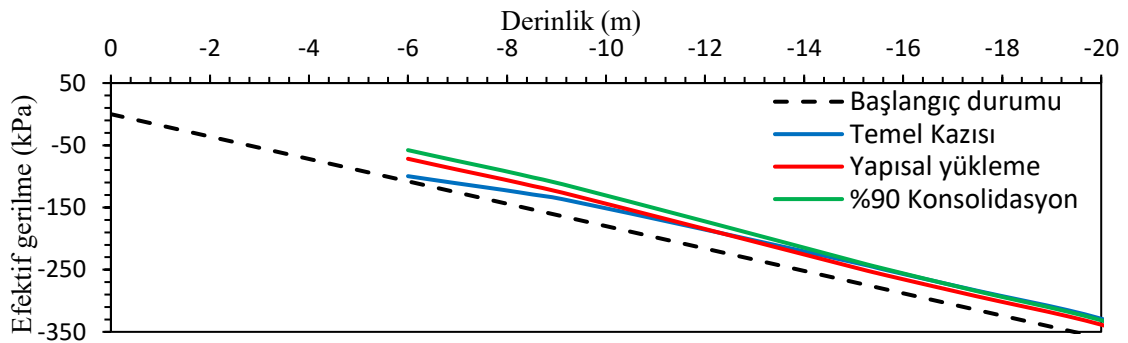
**Şekil EK-268.** Radye temel in uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 34)



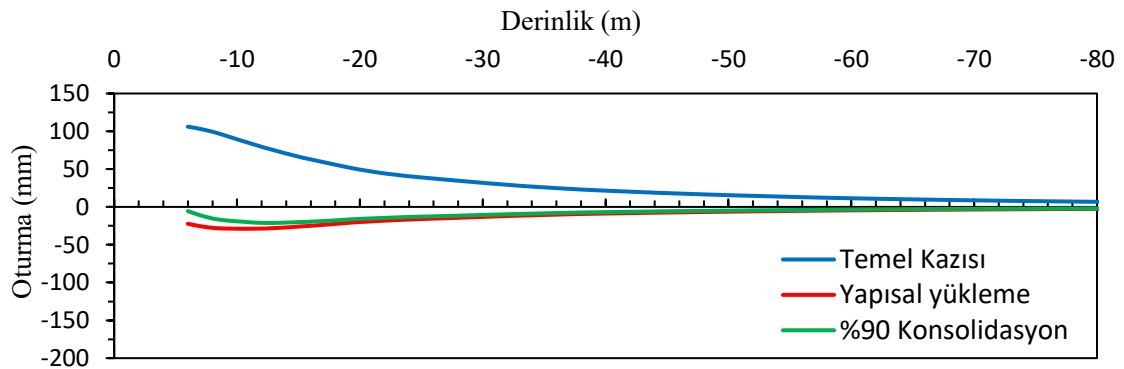
Şekil Ek-269. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 34)



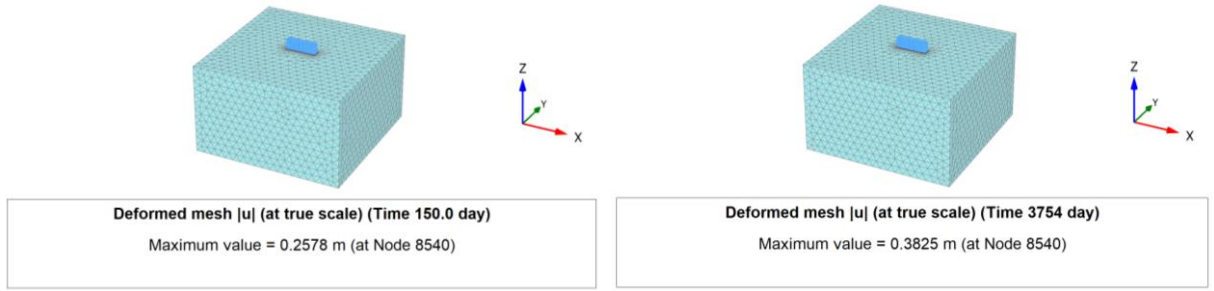
Şekil Ek-270. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 34)



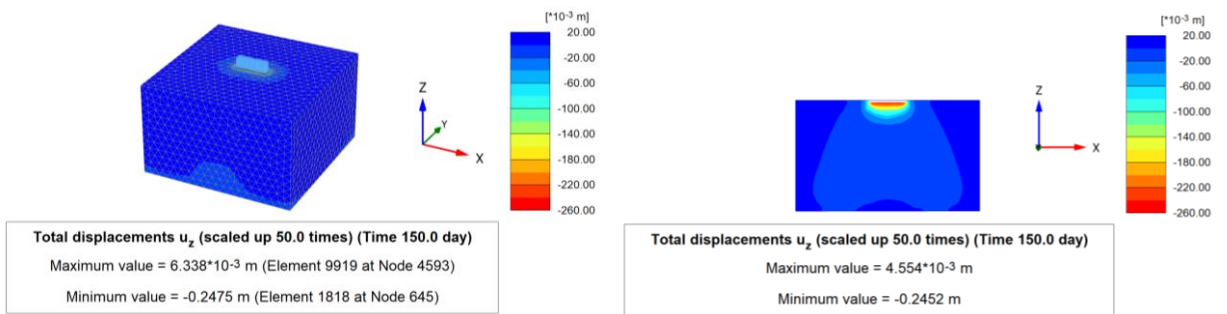
Şekil Ek-271. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 34)



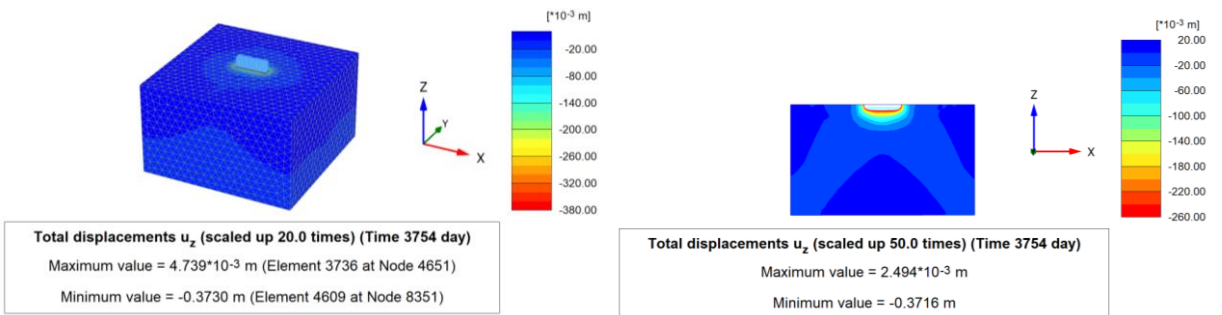
Şekil Ek-272. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 34)

**Analiz 35**

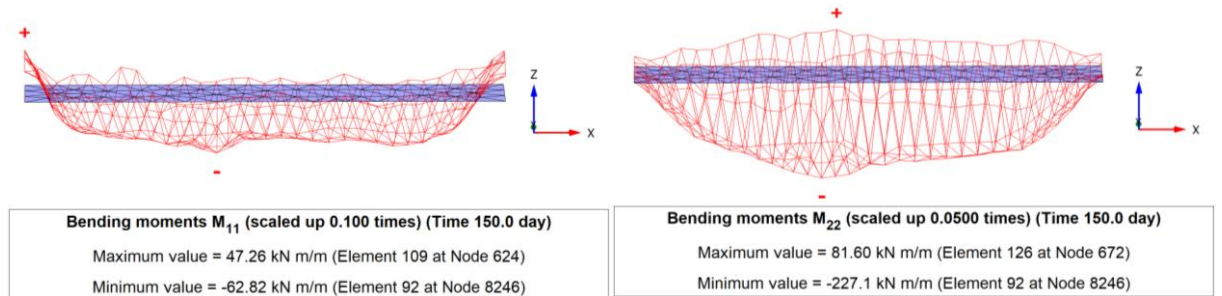
**Şekil Ek-273.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklemeye (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 35)



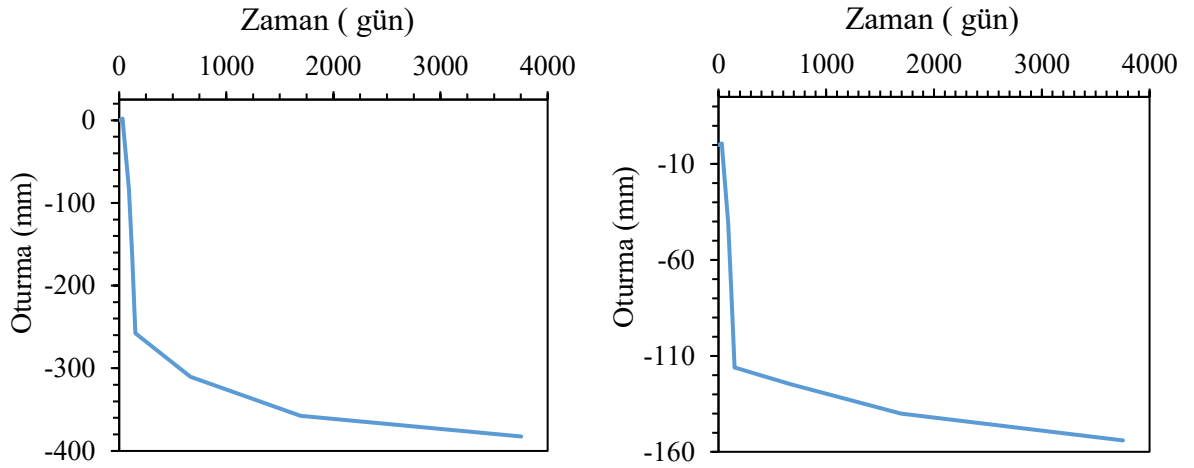
**Şekil Ek-274.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 35)



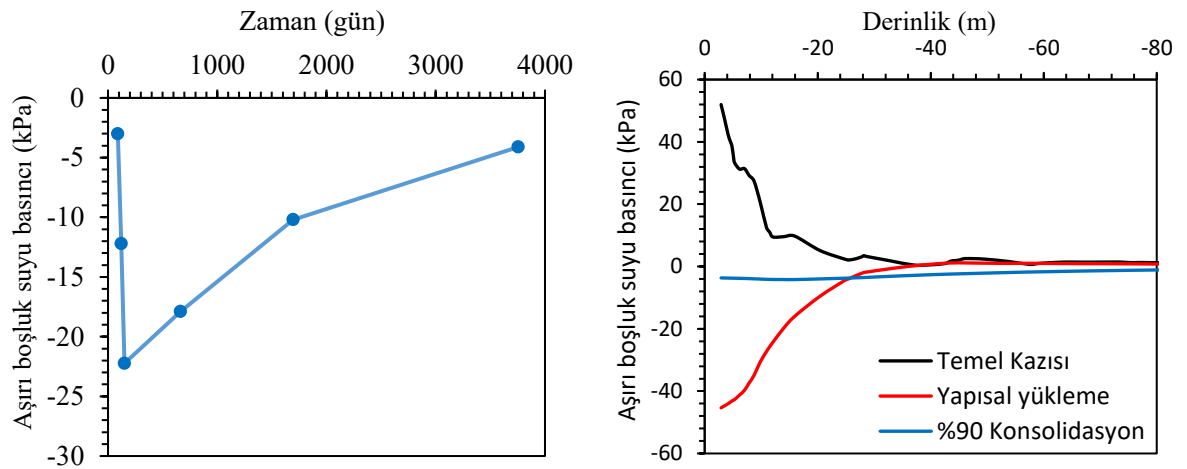
**Şekil Ek-275.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 35)



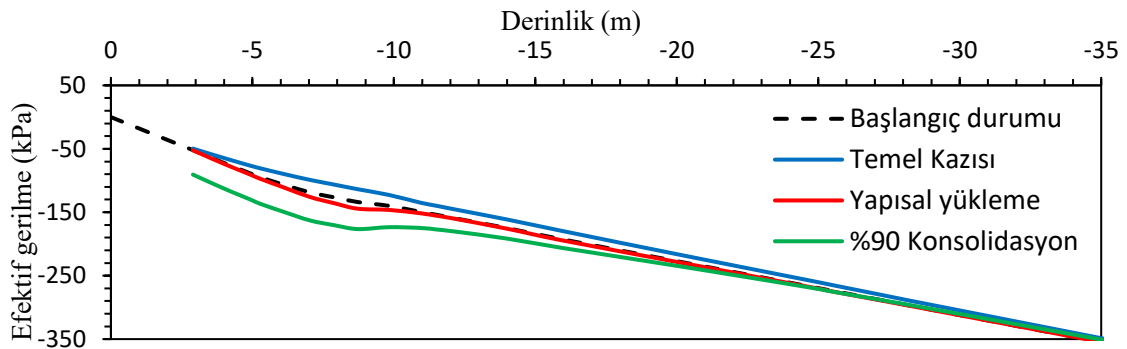
**Şekil Ek-276.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 35)



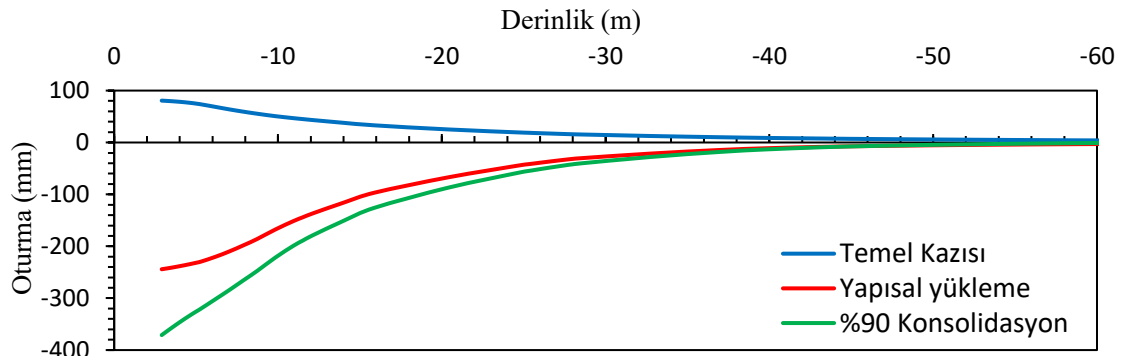
Şekil Ek-277. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 35)



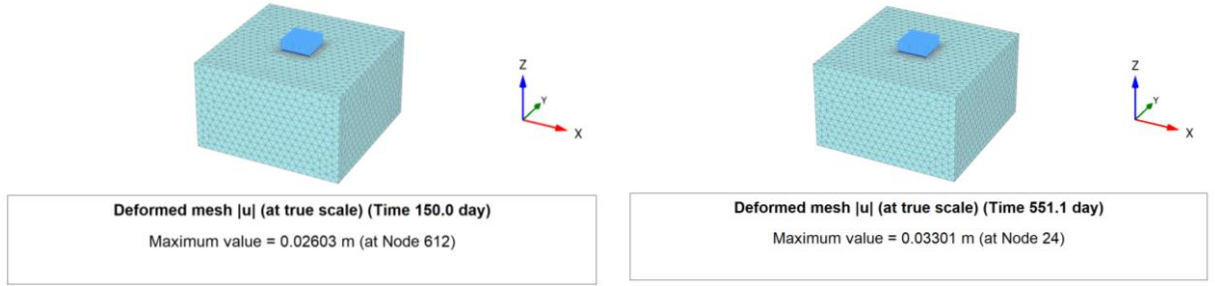
Şekil Ek-278. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 35)



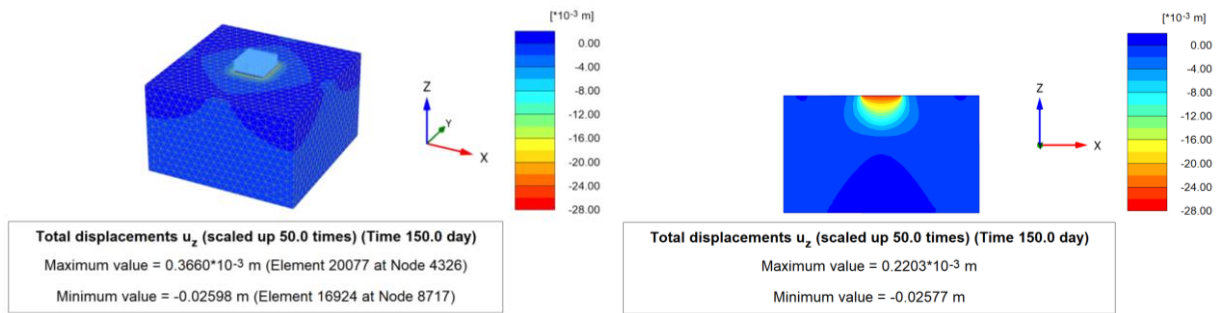
Şekil Ek-279. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 35)



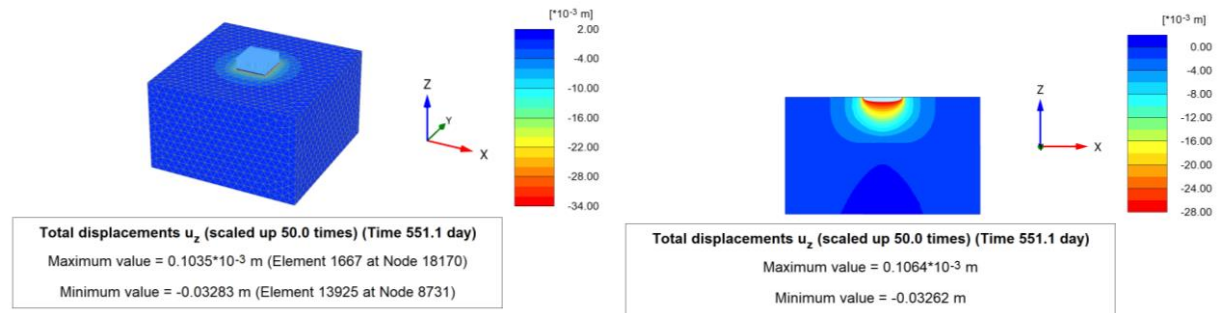
Şekil Ek-280. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 35)

**Analiz 36**

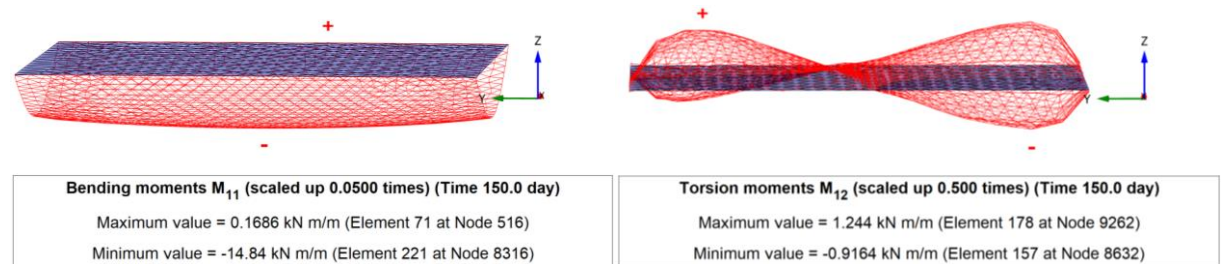
**Şekil EK-281.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 36)



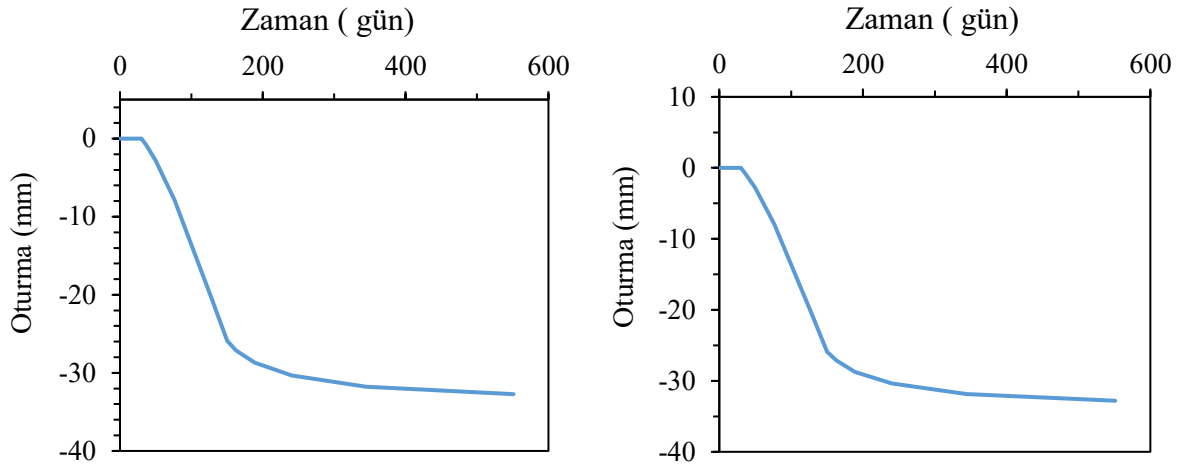
**Şekil EK-282.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 36)



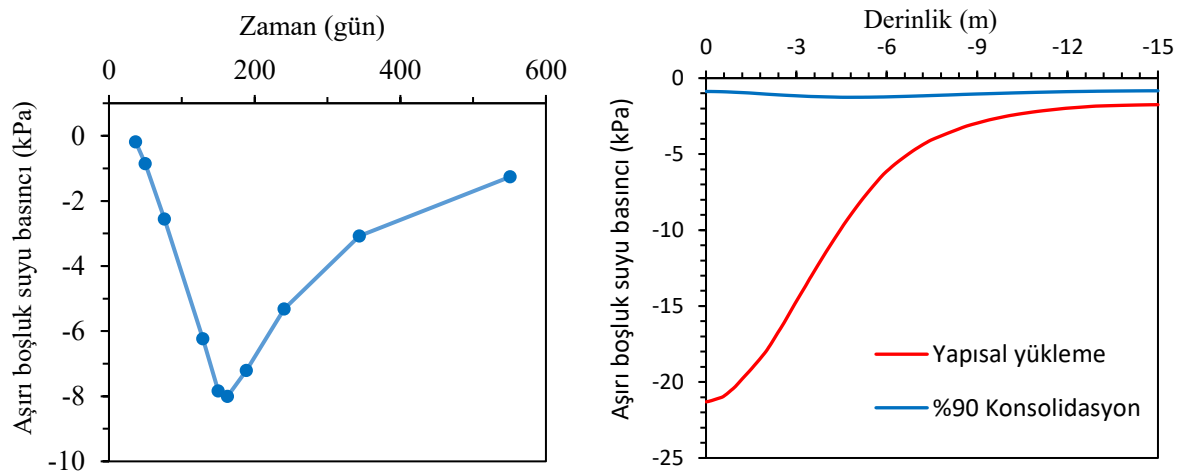
**Şekil EK-283.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 36)



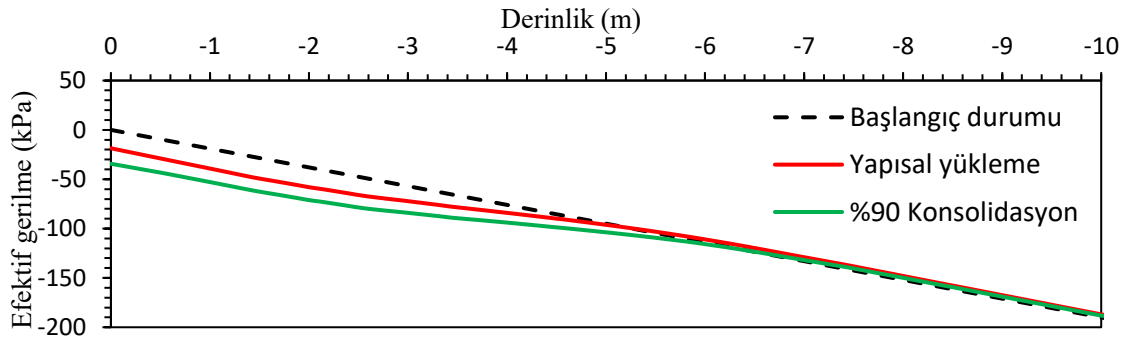
**Şekil Ek-284.** Radye temel uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 36)



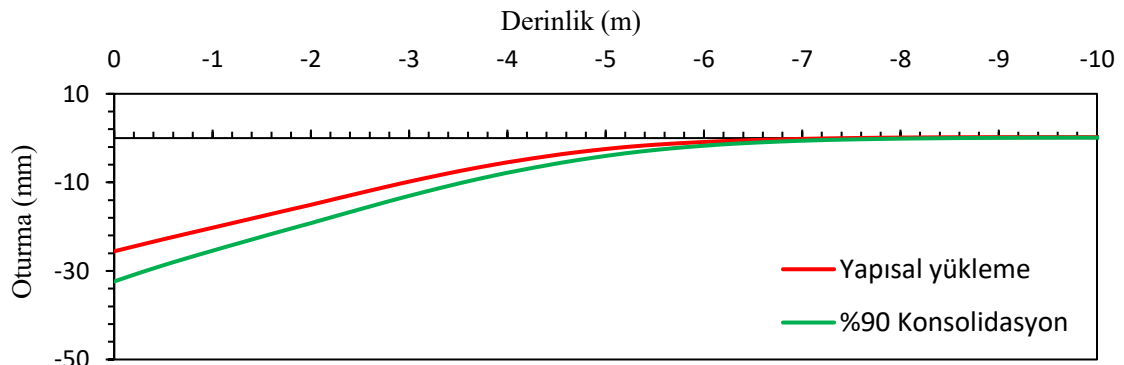
Şekil EK-285. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 36)



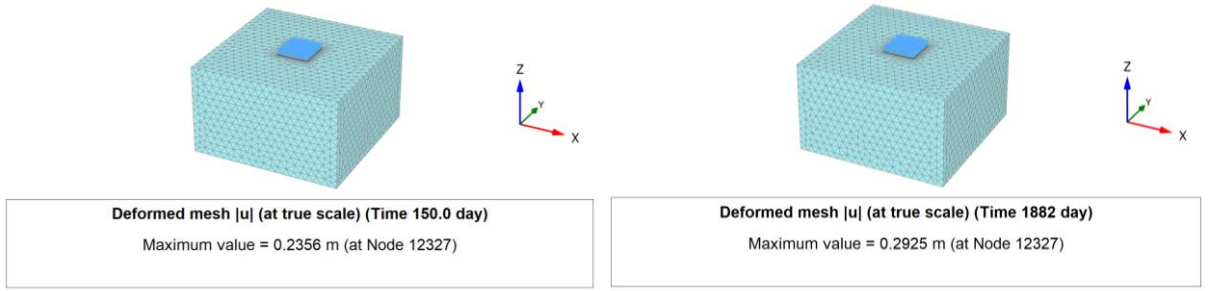
Şekil EK-286. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 36)



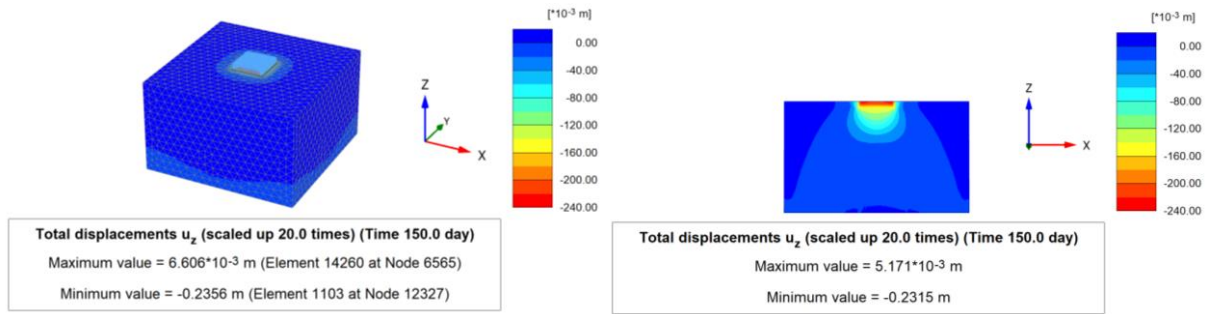
Şekil EK-287. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 36)



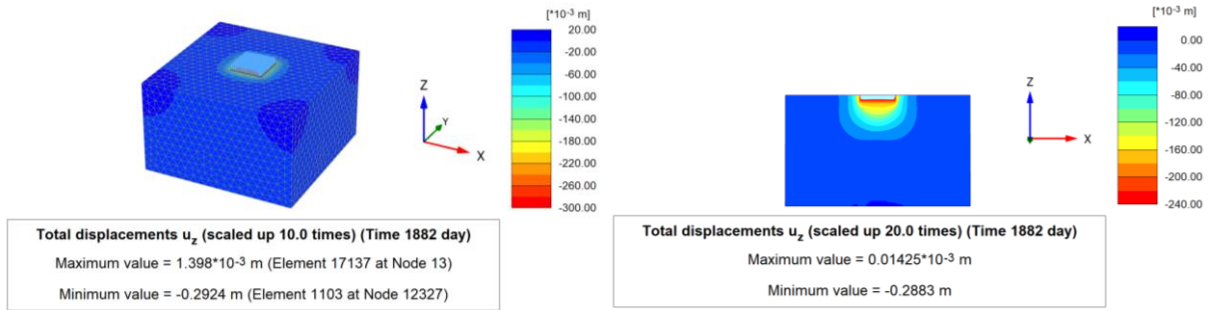
Şekil EK-288. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 36)

**Analiz 37**

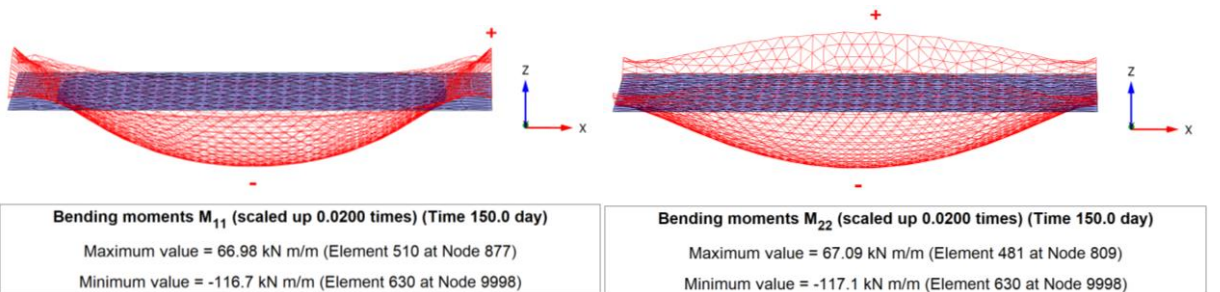
**Şekil EK-289.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 37)



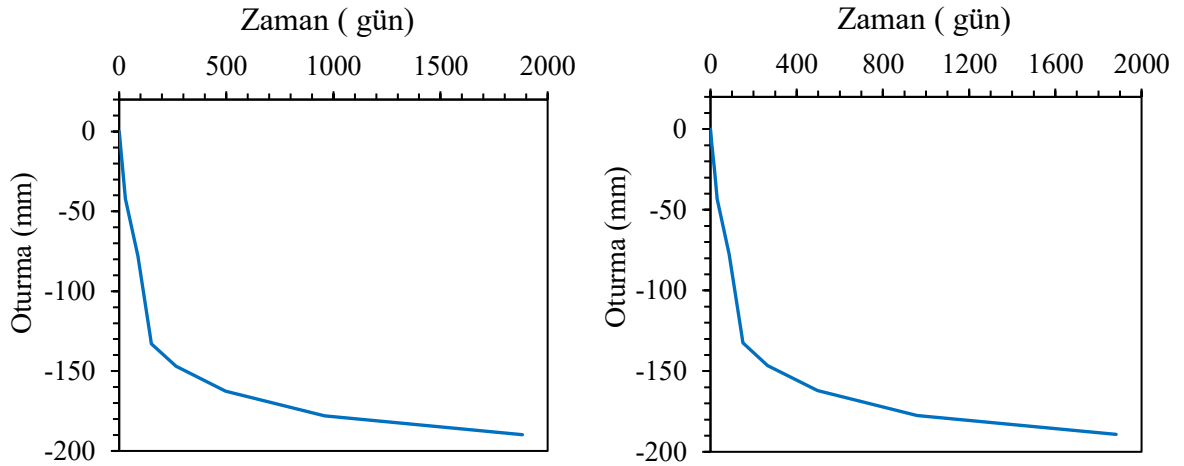
**Şekil EK-290.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 37)



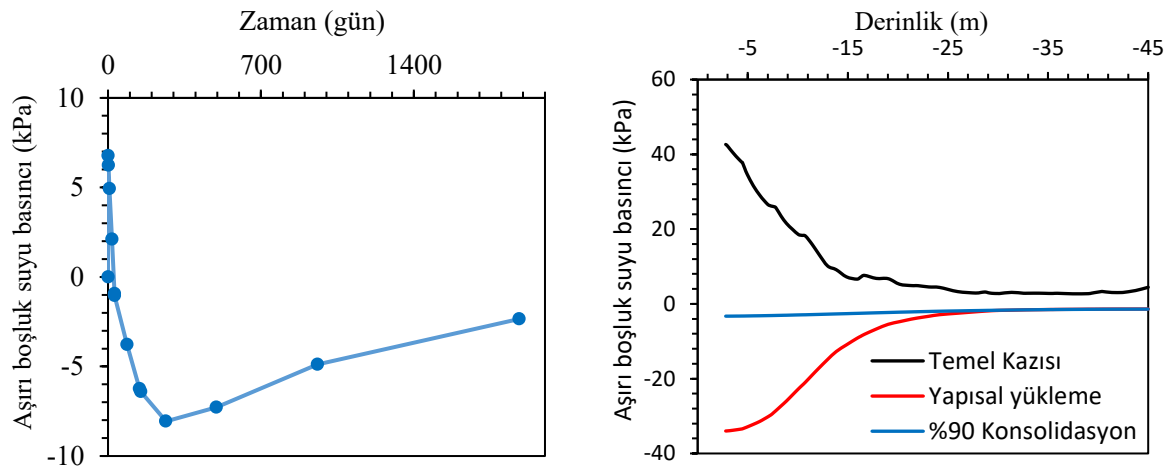
**Şekil EK-291.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 37)



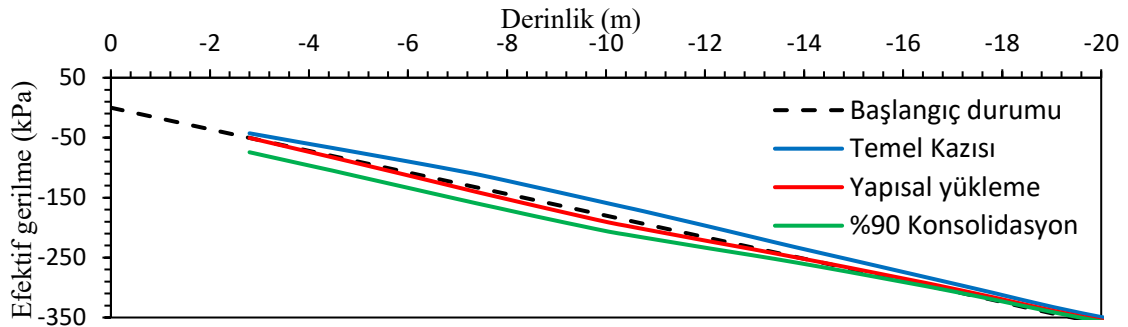
**Şekil EK-292.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 37)



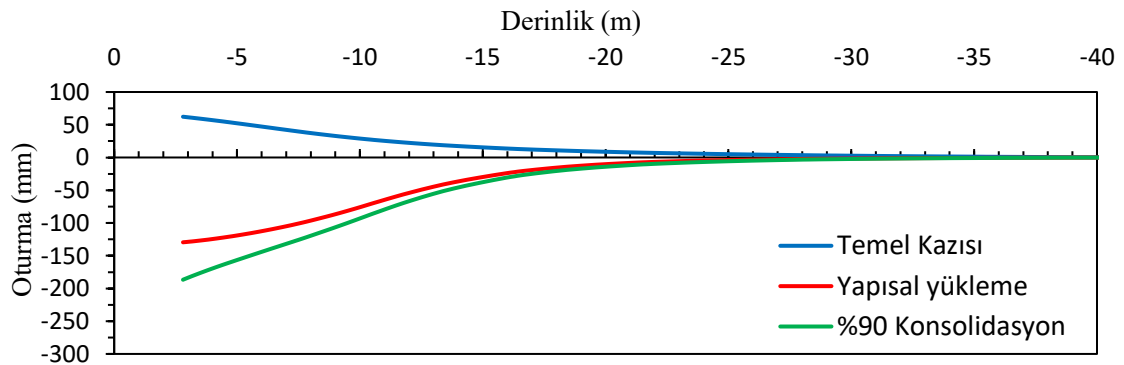
Şekil EK-293. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 37)



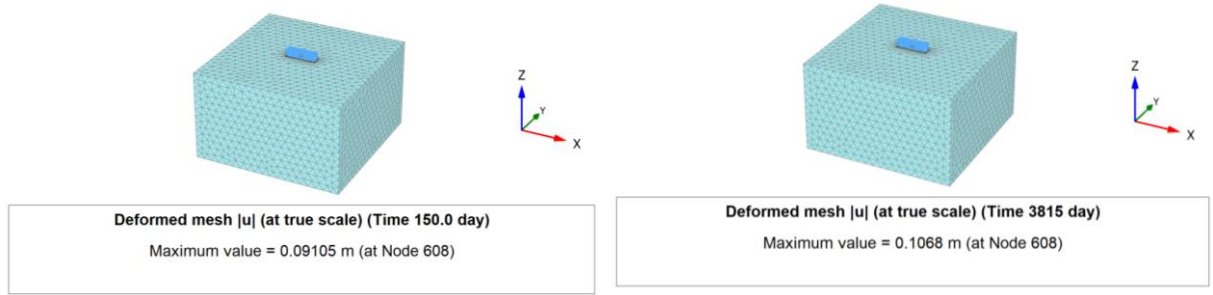
Şekil EK-294. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 37)



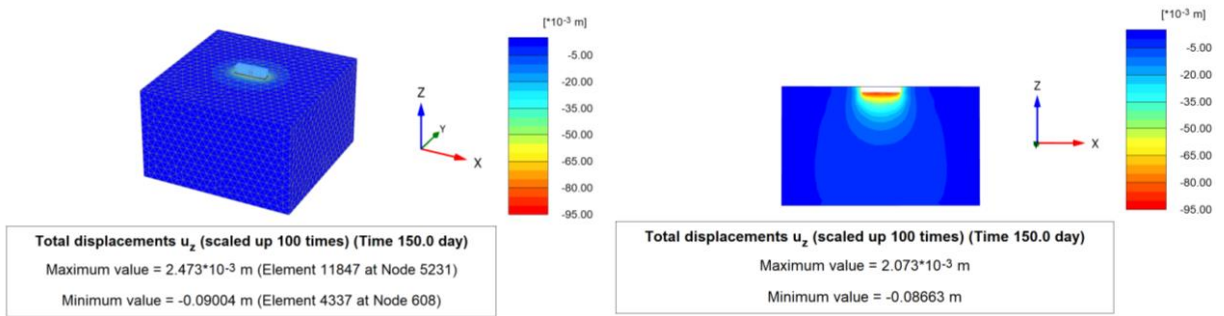
Şekil EK-295. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 37)



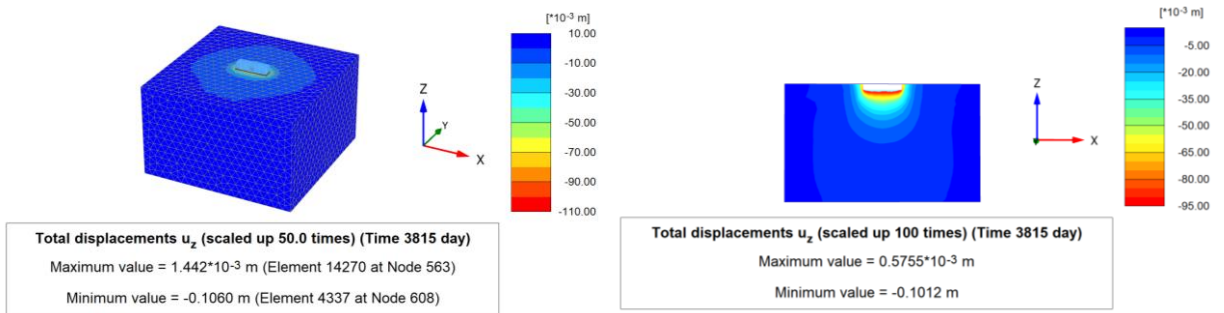
Şekil EK-296. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 37)

**Analiz 38**

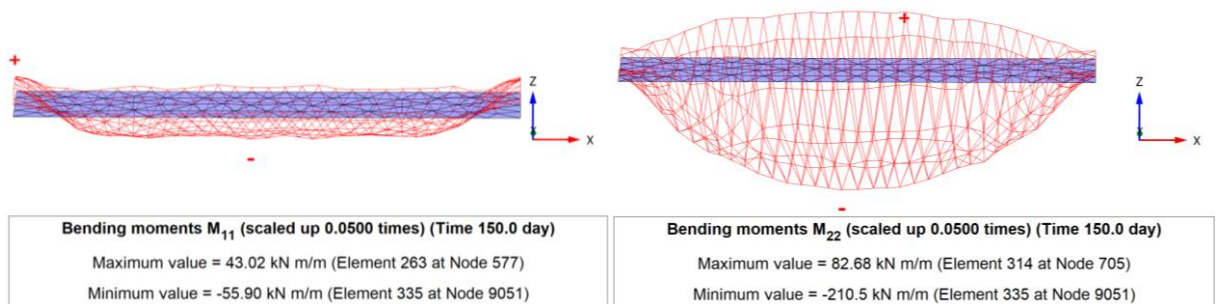
**Şekil EK-297.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 38)



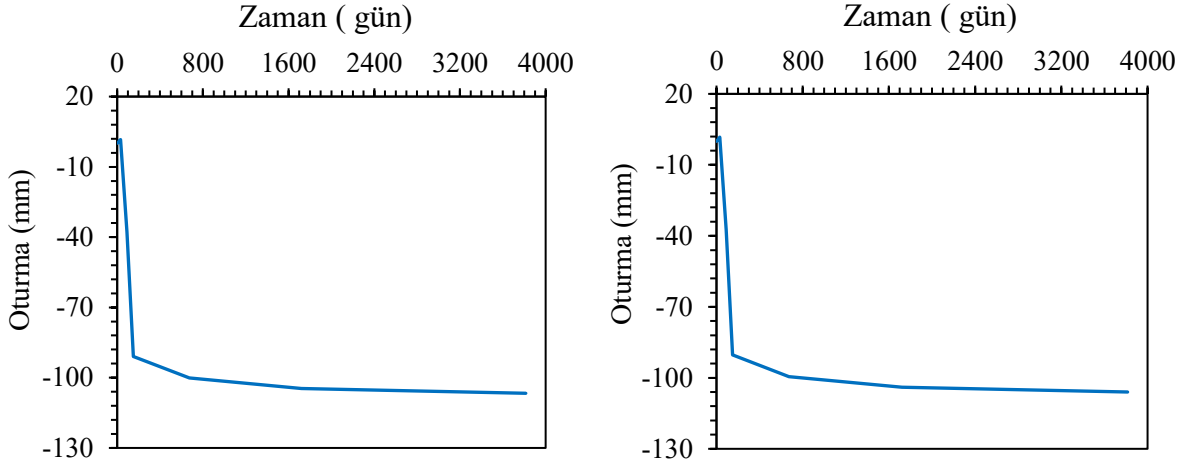
**Şekil EK-298.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 38)



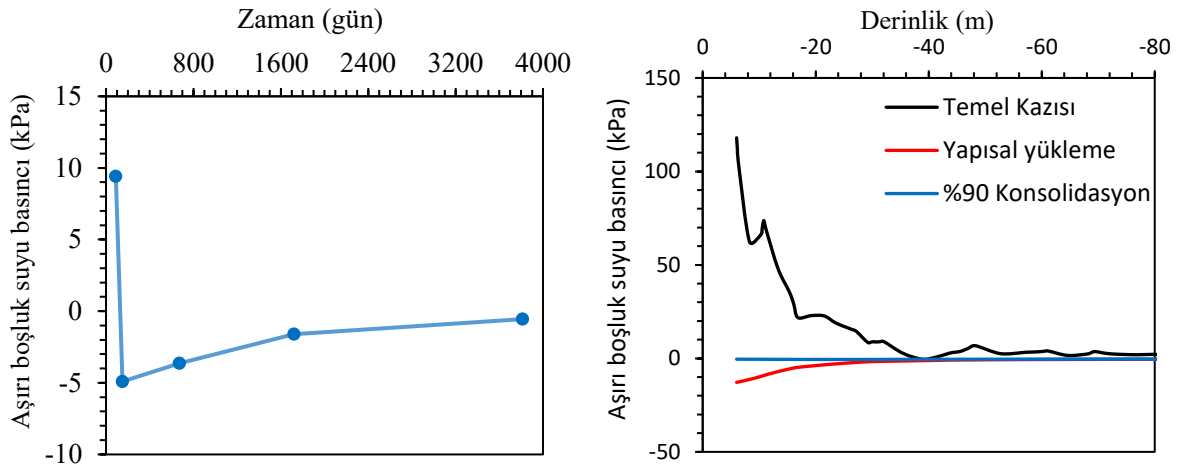
**Şekil EK-299.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 38)



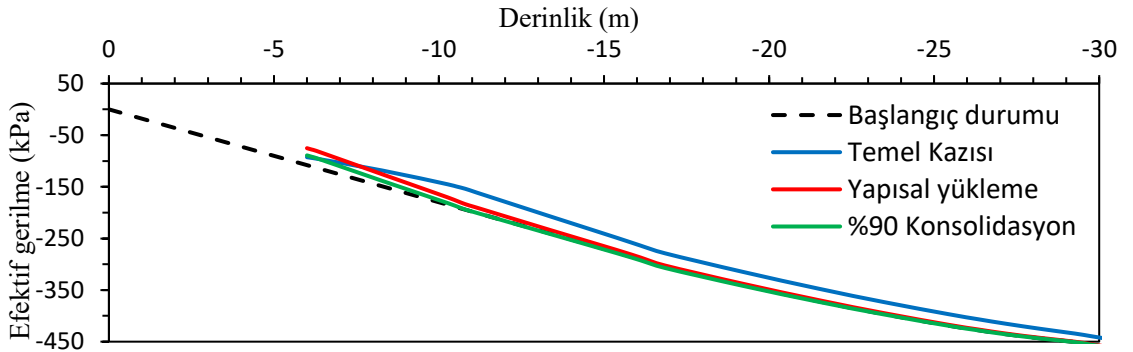
**Şekil EK-300.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 38)



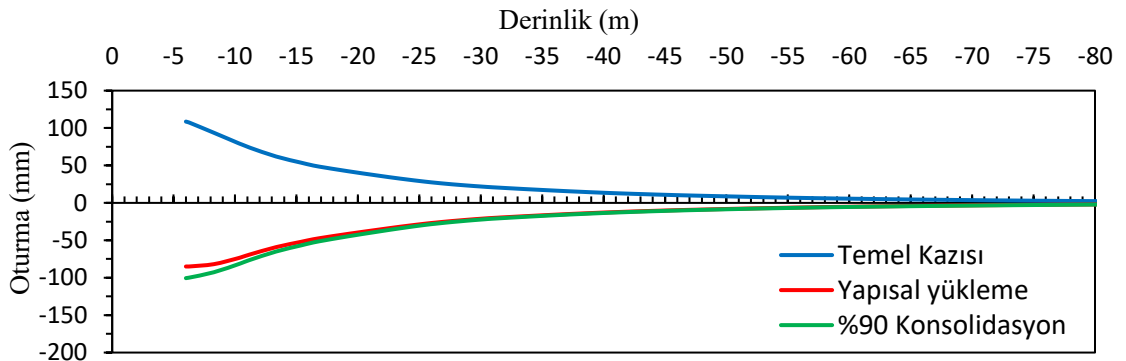
Şekil EK-301. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 38)



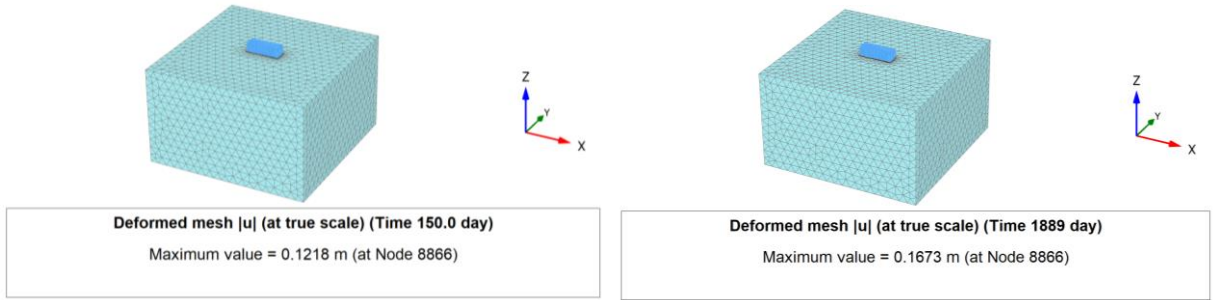
Şekil EK-302. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 38)



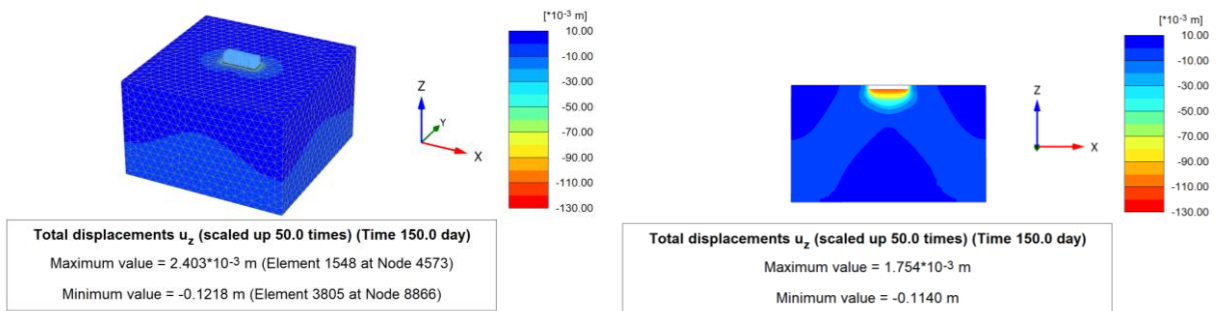
Şekil EK-303. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 38)



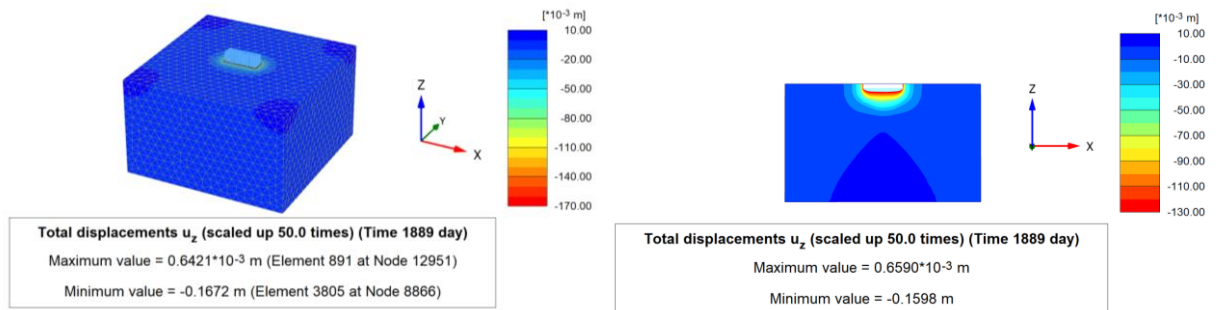
Şekil EK-304. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 38)

**Analiz 39**

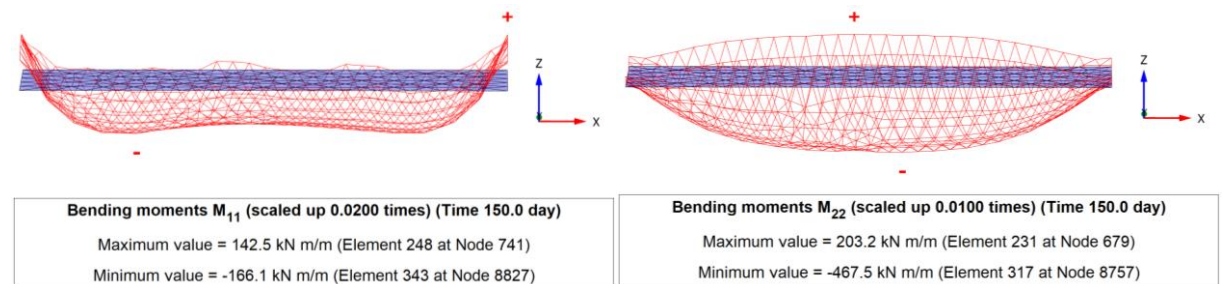
**Şekil EK-305.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 39)



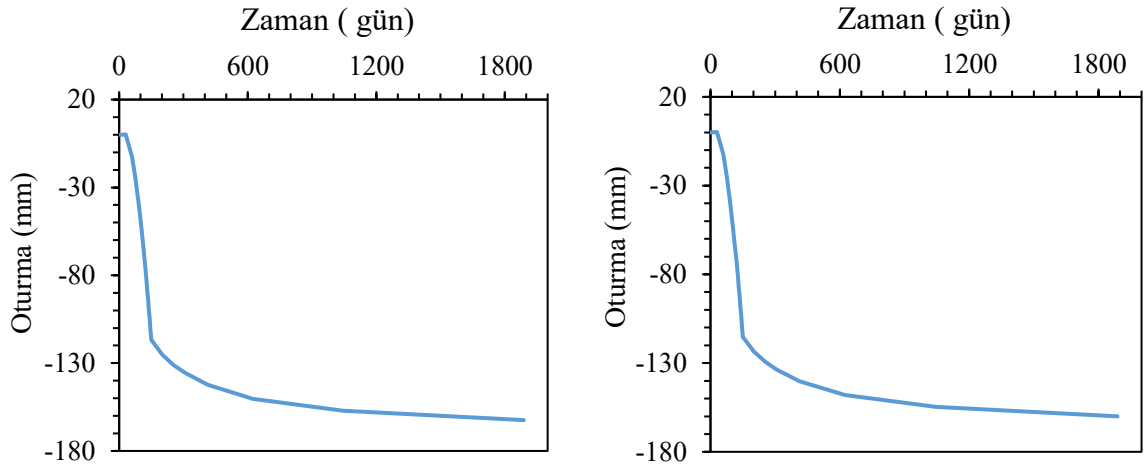
**Şekil EK-306.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 39)



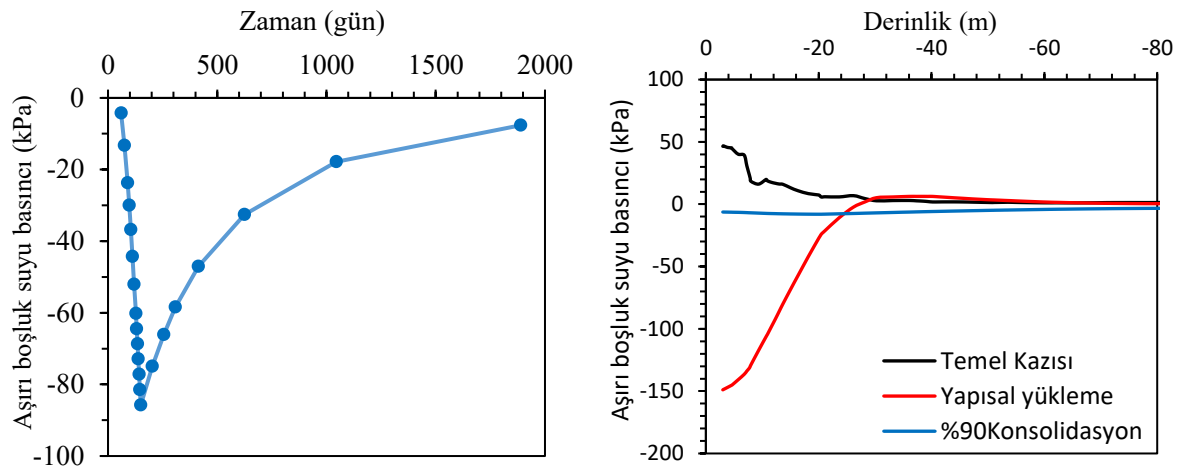
**Şekil EK-307.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 39)



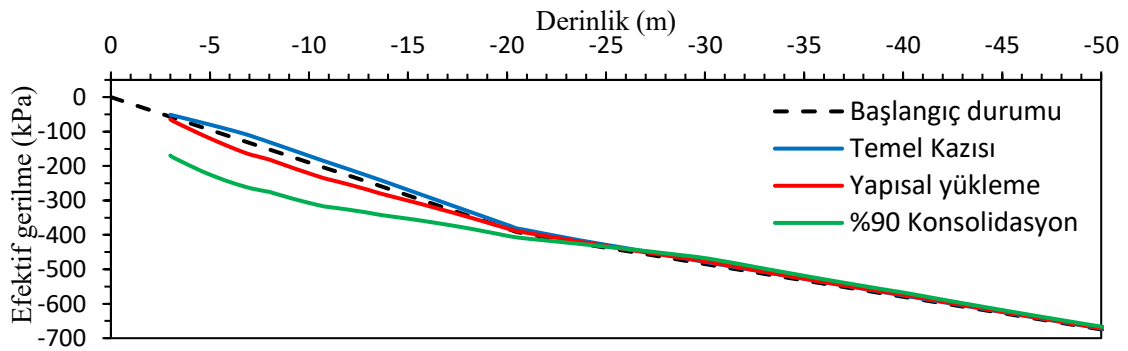
**Şekil EK-308.** Radye temel in uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 39)



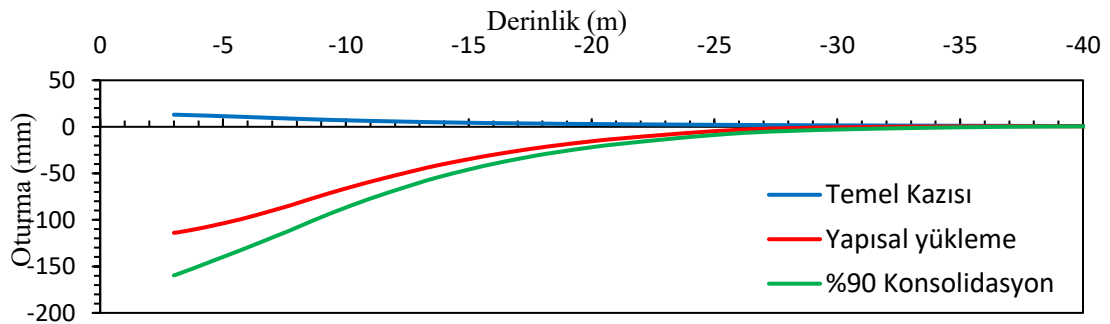
Şekil EK-309. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 39)



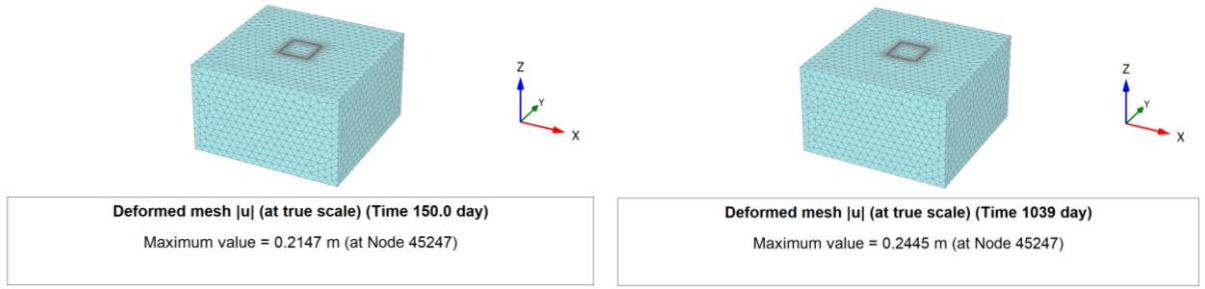
Şekil EK-310. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 39)



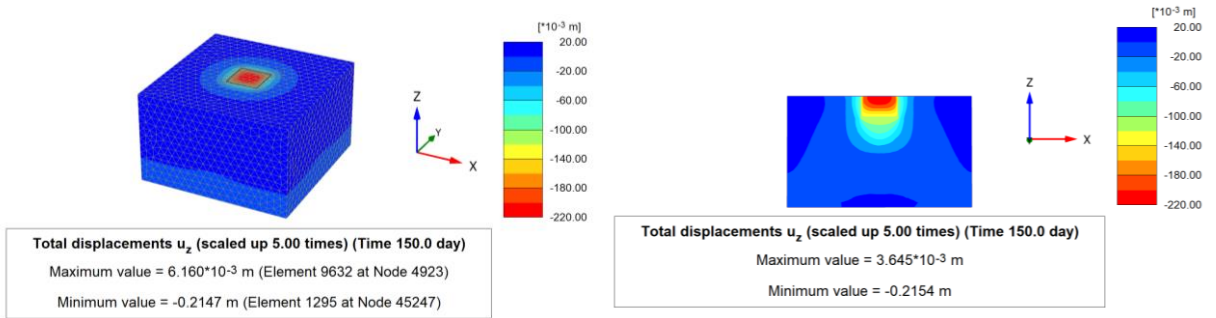
Şekil EK-311. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 39)



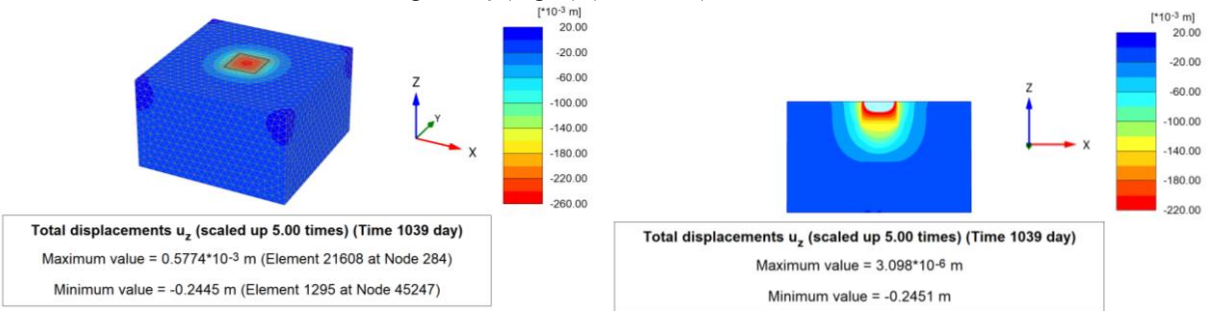
Şekil EK-312. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 39)

**Analiz 40**

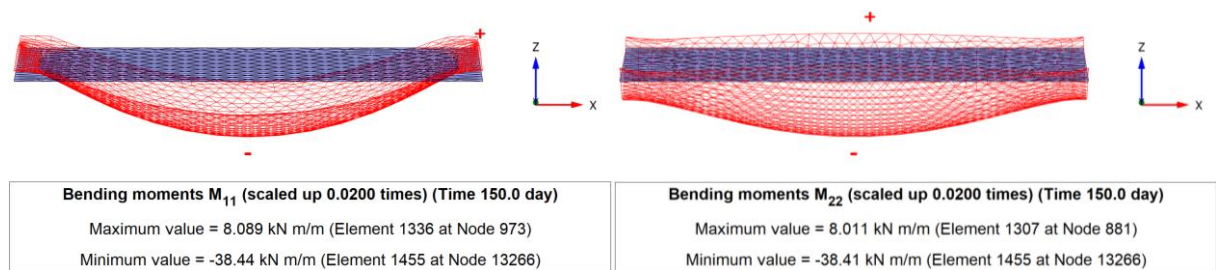
**Şekil EK-313.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yükleme (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 40)



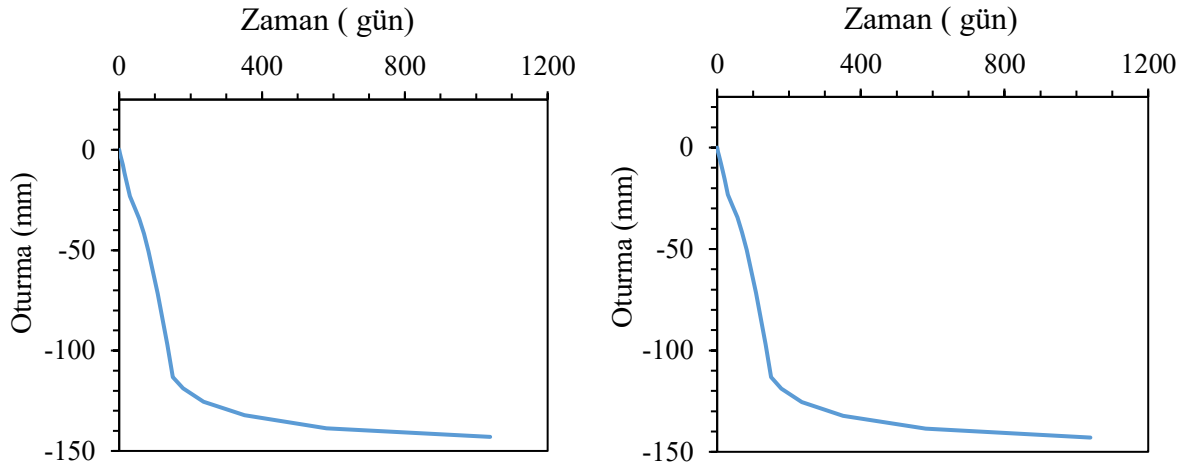
**Şekil EK-314.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 40)



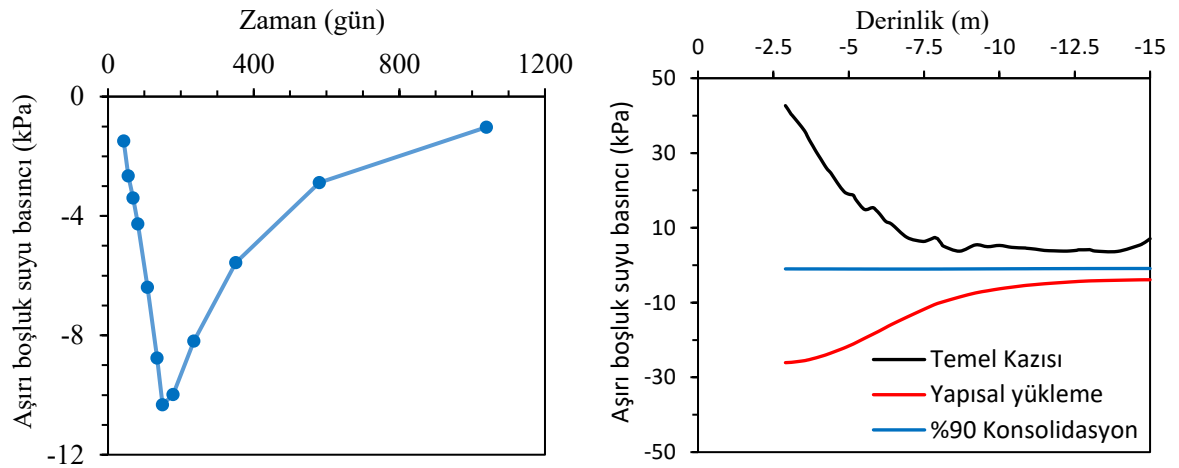
**Şekil EK-315.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 40)



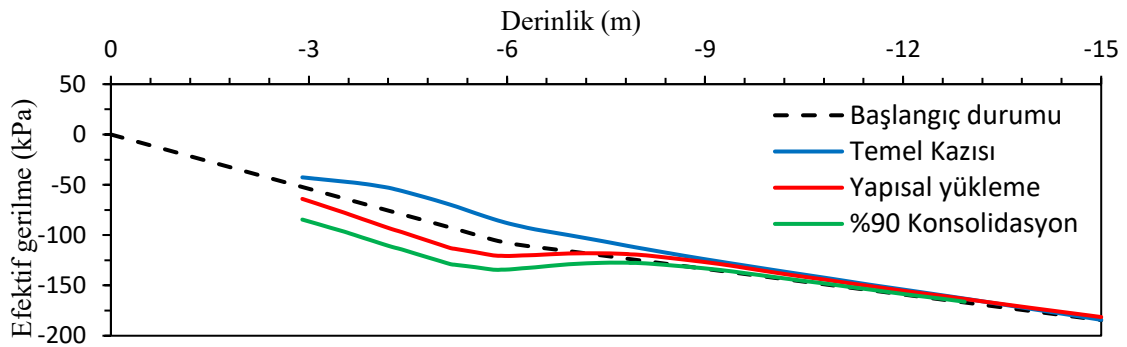
**Şekil EK-316.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 40)



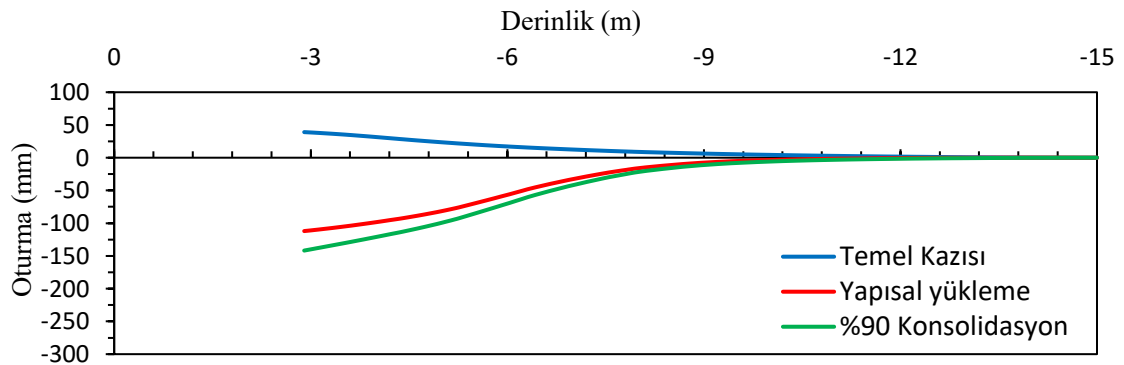
Şekil EK-317. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 40)



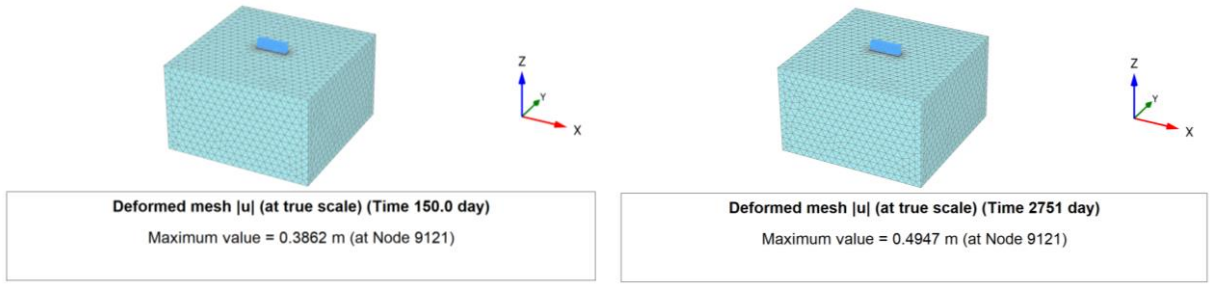
Şekil EK-318. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 40)



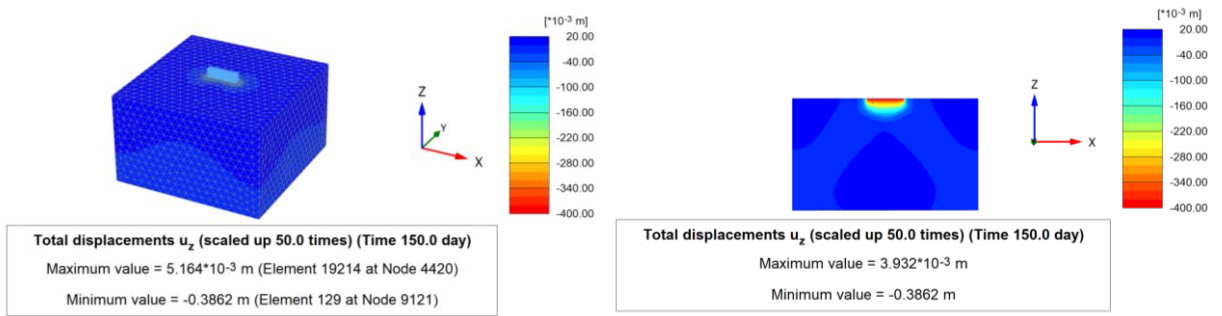
Şekil EK-319. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 40)



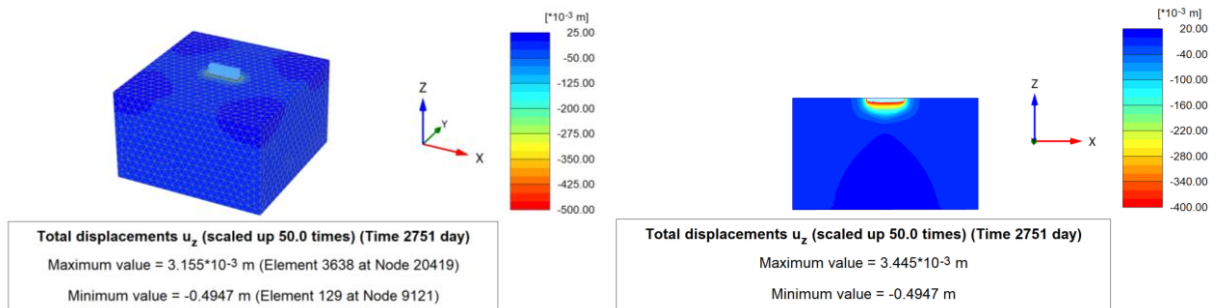
Şekil EK-320. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 40)

**Analiz 41**

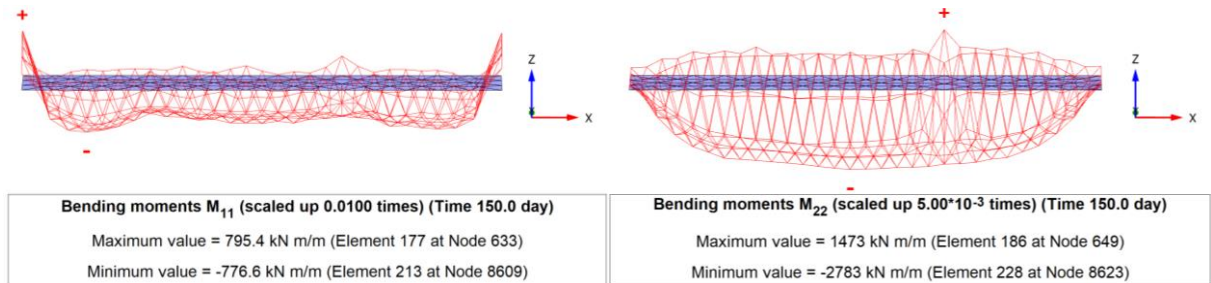
**Şekil EK-321.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklemeye (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 41)



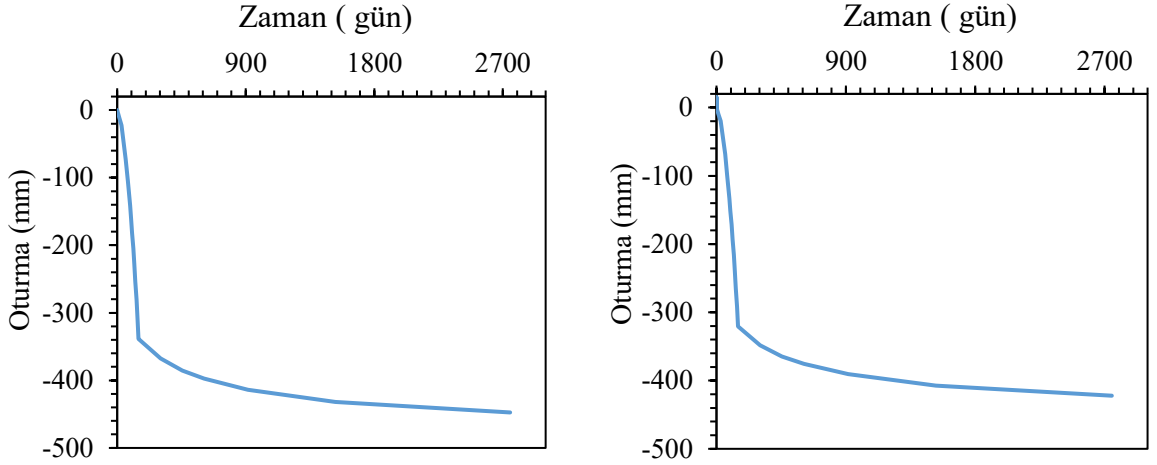
**Şekil EK-322.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 41)



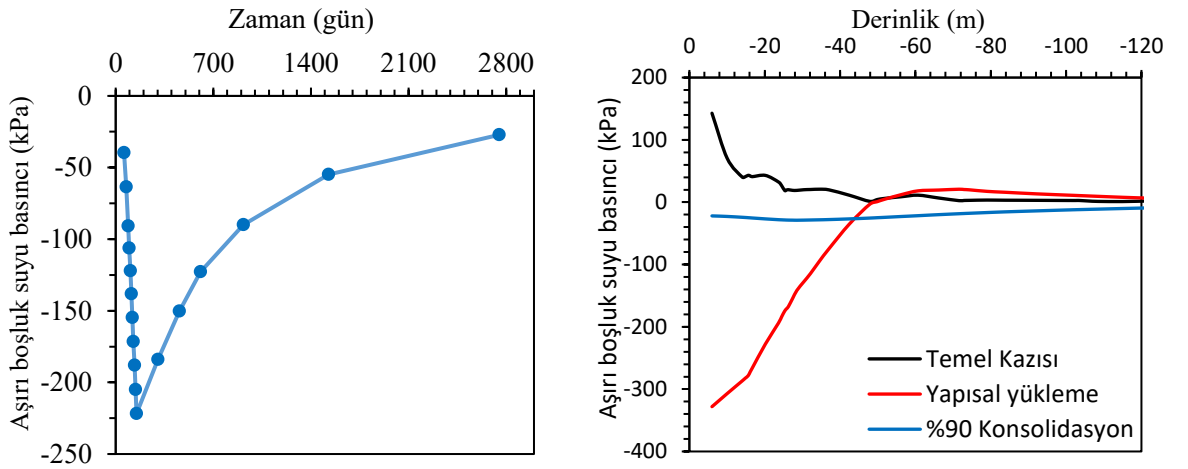
**Şekil EK-323.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 41)



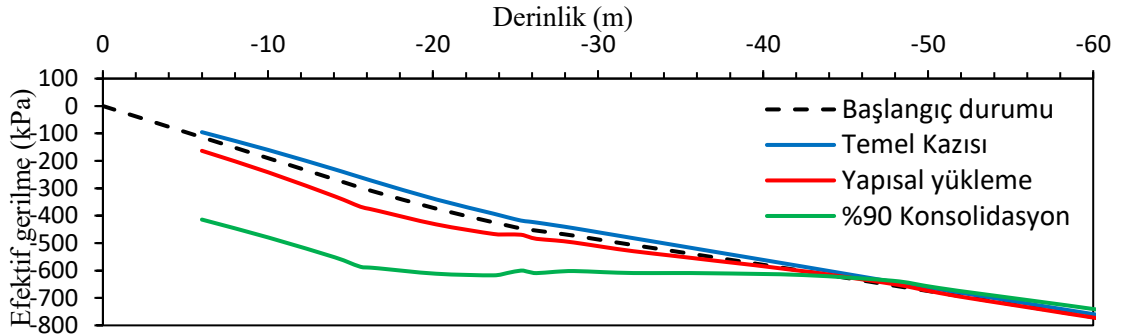
**Şekil EK-324.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 41)



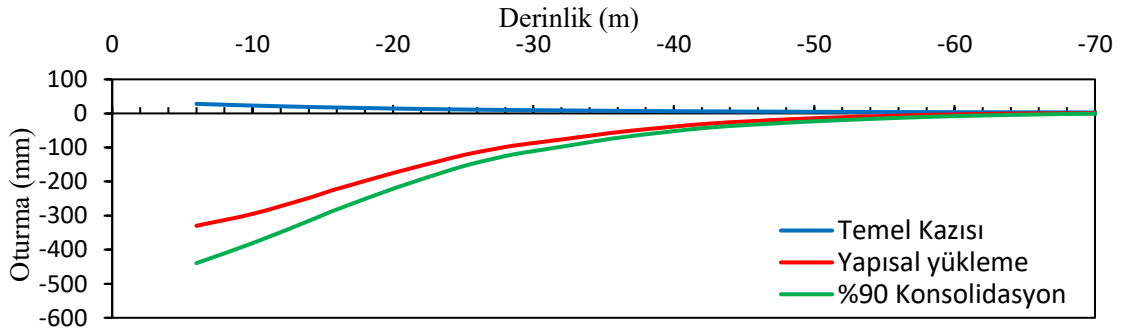
Şekil EK-325. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 41)



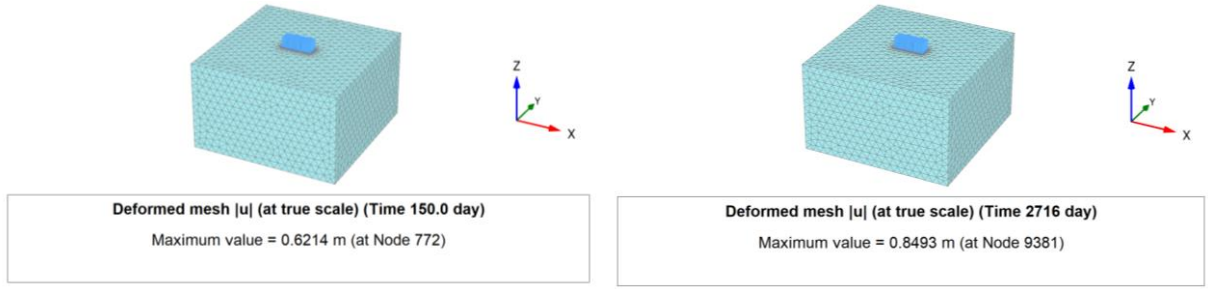
Şekil EK-326. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 41)



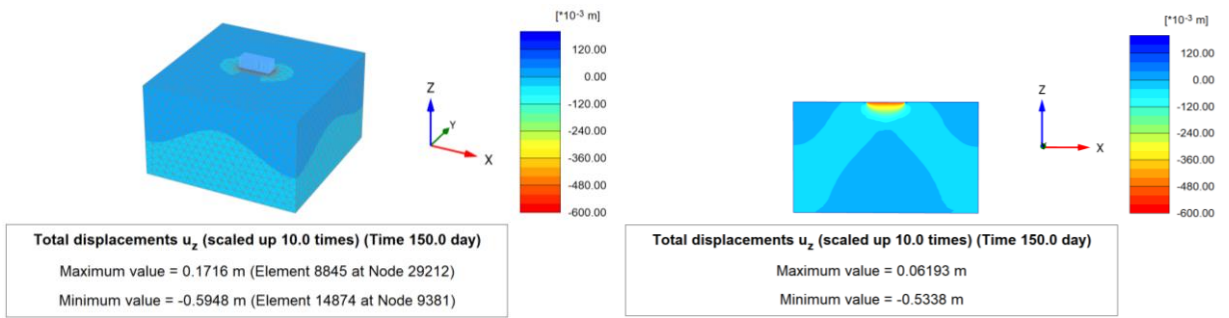
Şekil EK-327. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 41)



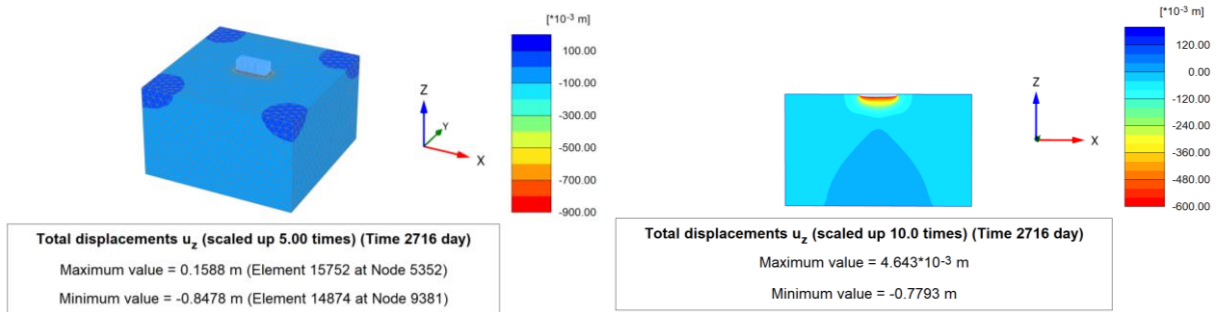
Şekil EK-328. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 41)

**Analiz 42**

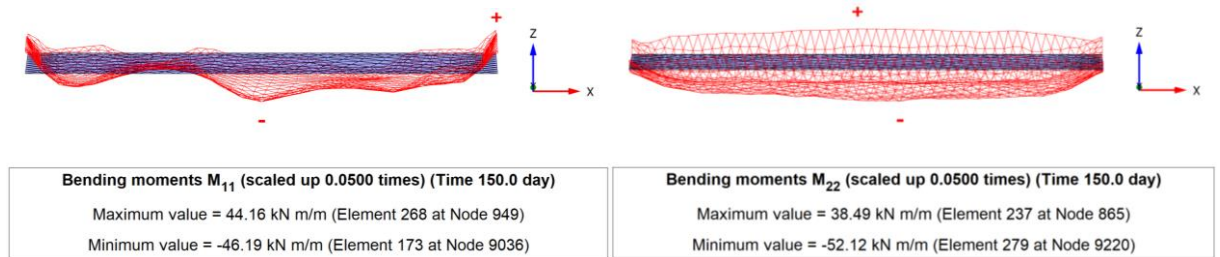
**Şekil EK-329.** Gerçek ölçekli 3D deforme mesh görünümü: Yapısal yüklemeye (solda) ve %90 konsolidasyon sonrasındaki (sağda) maksimum toplam yer değiştirme (Analiz 42)



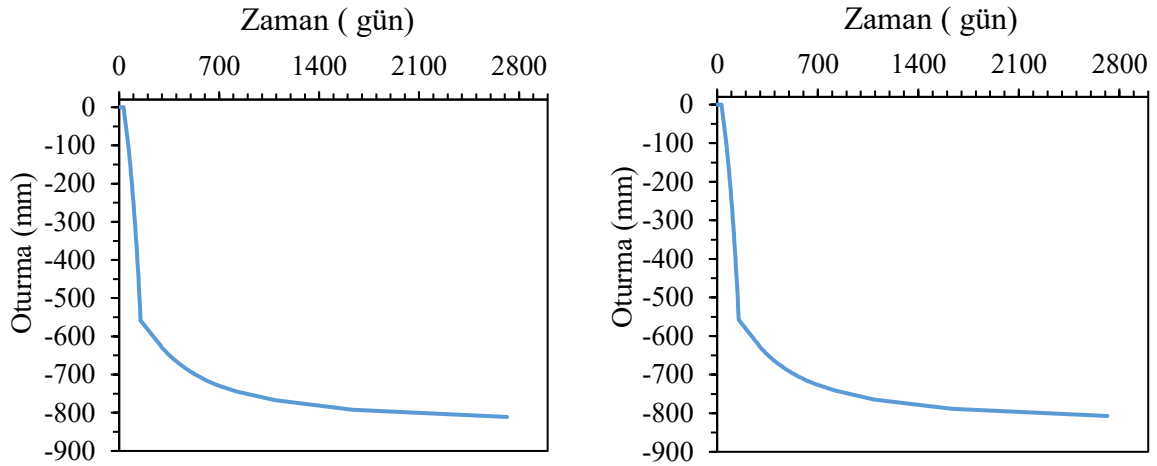
**Şekil EK-330.** Yapısal gerilme aşamasındaki toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 42)



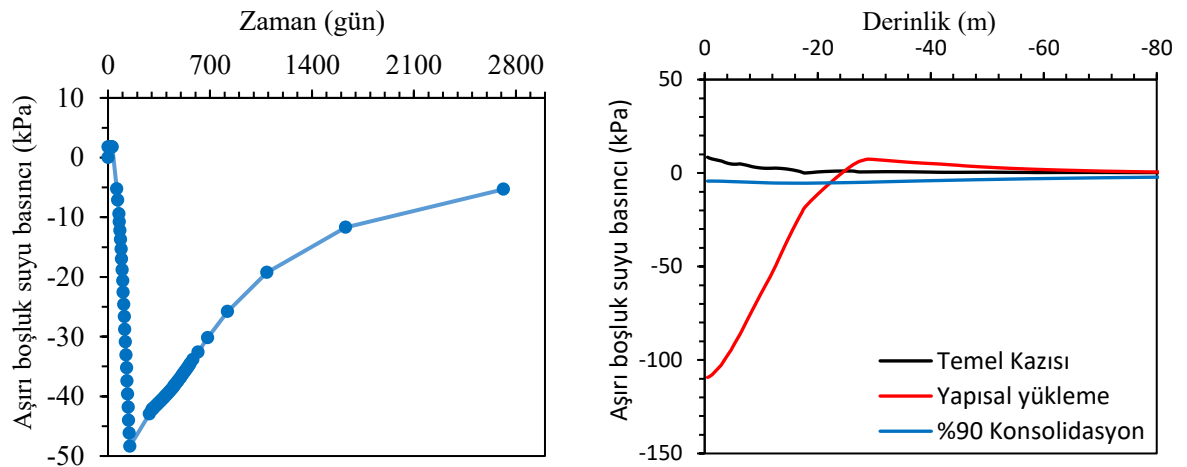
**Şekil EK-331.** %90 konsolidasyon sonrasında toplam düşey deplasman: 3D görünüş (solda) ve kesit görünüş (sağda) (Analiz 42)



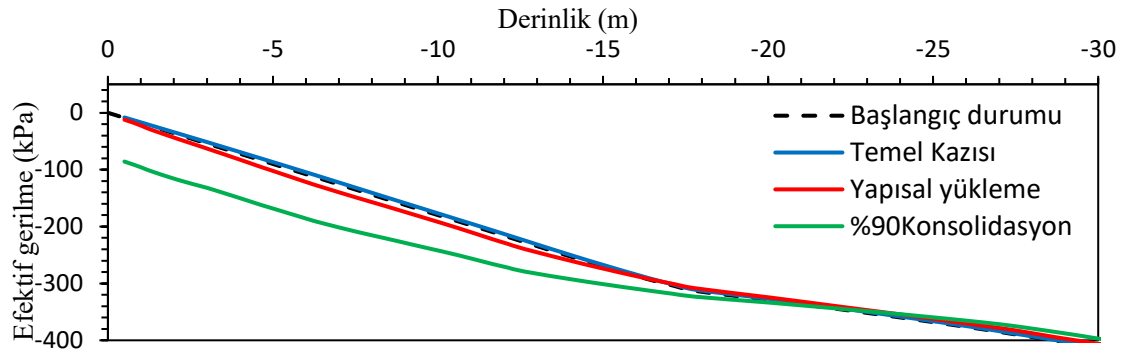
**Şekil EK-332.** Radye temelin uzun (solda) ve kısa (sağda) doğrultularındaki moment değerleri (Analiz 42)



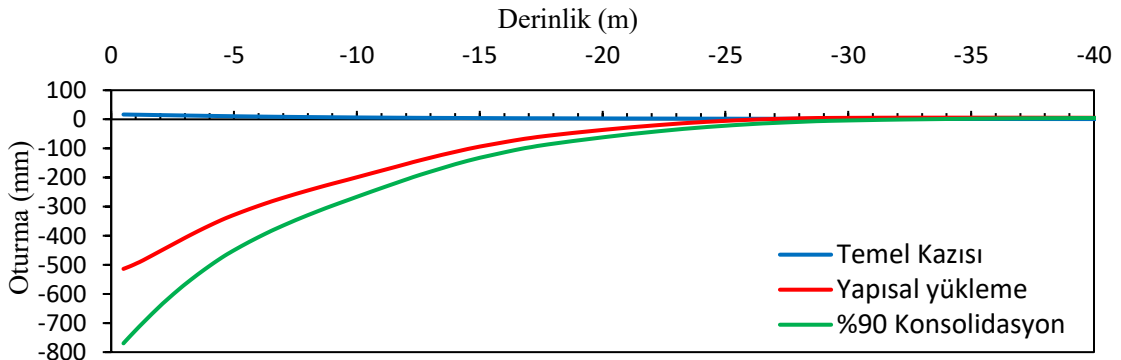
Şekil EK-333. %90 konsolidasyon sonrasındaki oturma-zaman grafiği: temel kenarında (solda) ve temel merkezinde (sağda) (Analiz 42)



Şekil EK-334. Aşırı boşluk suyu basıncının zamanla (solda) ve derinlikle (sağda) değişimi (Analiz 42)



Şekil EK-335. Düşey efektif gerilmenin derinlikle değişimi (Analiz 42)



Şekil EK-336. Düşey oturmaların derinlikle değişimi (Analiz 42)