



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FORE KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ ÜZERİNE
BİR DEĞERLENDİRME**

Mazlum ALPASLAN

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FORE KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ ÜZERİNE
BİR DEĞERLENDİRME**

Mazlum ALPASLAN

**Danışman
Doç. Dr. Nuray ALPASLAN**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet Salih KESKİN

Doç. Dr. Abdulrezzak Bakış

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mazlum ALPASLAN tarafından hazırlanan “FORE KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME” adlı tez çalışması 28/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mehmet Salih KESKİN

.....

Danışman

Doç. Dr. Nuray ALPASLAN

.....

Üye

Doç. Dr. Abdulrezzak Bakış

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Mazlum ALPASLAN

Tarih:28.08.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FORE KAZIK ZEMİN ETKİLEŞİMİ ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Mazlum ALPASLAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nuray ALPASLAN

2025, 56 Sayfa

İnşaat alanlarının en verimli şekilde kullanılması, yerleşime uygun olmayan arazilerin düzenlenmesi yeni sistem binalar için son derece önemlidir. Çevresel düzenlemelerin gerçekleştirilmesi, bunun yanı sıra depreme dayanıklı konutların inşa edilmesi kazıklı sistemlerin hedefleri arasında yer almaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, zayıf zemin tabakası üzerinde yer alan, üst yapıdan gelen yükleri taşıyıcı zemin tabakasına aktaran fore kazıklar, farklı derinliklerdeki zemin profilleri dikkate alınarak iki tabakalı bir zemin ortamında analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, temel tasarımı üzerine, temel sisteminin zemin modellemeleri oluşturulup hesaplar yapılarak, statik yükler altında, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları yanı sıra toplam ve farklı oturmalar analiz edilerek yorumlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak üç farklı senaryo modellenmiş ve her birinde kazıkların yerdeğiştirme dağılımı değerlendirilmiştir. Farklı tasarım parametrelerinin zemin-kazık etkileşimi üzerindeki etkilerini karşılaştırarak optimum çözümün belirlenmesi amacıyla elde edilen sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

Yapılan analizlerde, optimum kazık tasarımında, kazık adedi ve yerleşiminin daha belirleyici olduğunu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, kazık sayısının artırılmasıyla daha dengeli yük paylaşımı sağlandığı, malzeme verimliliği ve oturma kontrolü açısından da başarılı sonuçlar elde edilebileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fore kazık, Plaxis 2D, Oturma, Statik yük, Zemin-kazık etkileşimi

ABSTRACT
MASTER THESIS
**AN EVALUATION OF THE INTERACTION BETWEEN FORE PILES AND
THE SOIL**

Mazlum ALPASLAN

Batman University Graduate Education Institute

Civil Engineering Department of Science

Advisor: Associate Professor Nuray ALPASLAN

2025, 56 Pages

The most efficient use of construction sites and the development of land unsuitable for settlement are extremely important for new system buildings. The implementation of environmental regulations, along with the construction of earthquake-resistant housing, are among the objectives of pile systems.

Within the scope of this thesis study, bored piles, which transfer loads from the superstructure to the bearing soil layer on top of the weak soil layer, were analyzed in a two-layered soil environment, taking into account soil profiles at different depths. As a result of the analyses, foundation system soil models were created and calculations were performed on the foundation design. Under static loads, the stress-strain behavior of the soils as well as total and differential settlements were analyzed and interpreted.

In the second section of the study, three different scenarios were modeled using PLAXIS 2D finite element software, and the displacement distribution of the piles was evaluated in each scenario. The results obtained were analyzed and interpreted to determine the optimal solution by comparing the effects of different design parameters on the soil–pile interaction.

The analyses concluded that the number and placement of piles are more decisive factors in the optimal pile design. Therefore, it was determined that increasing the number of piles provides a more balanced load distribution and can yield successful results in terms of material efficiency and settlement control.

Keywords: Bored pile, Plaxis 2D, Settlement, Static load, Soil-pile interaction

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, uzun ve yoğun bir emek sürecinin ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Araştırma sürecinde edindiğim bilgi ve deneyimler yalnızca akademik bir birikim kazandırmakla kalmamış, aynı zamanda mesleki bakış açımı da derinleştirmiştir.

Çalışmam boyunca bana destek olan çok değerli hocam Doç. Dr. Nuray ALPASLAN'a teşekkürlerimi sunarım. Fikirleriyle yol gösteren Yüksek İnşaat Mühendisi Mevlüt KAÇMAZ'a teşekkür ederim. Her koşulda sabır ve anlayışla yanımda bulunan eşim Ayşe Gül ALPASLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tüm bu katkılar, bu çalışmanın şekillenmesinde ve tamamlanmasında büyük bir rol oynamıştır.

Mazlum ALPASLAN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
Simgeler.....	viii
Kısaltmalar.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	6
3.1. Zeminlerin İyileştirilmesi.....	6
3.2. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Amacı.....	6
3.3. Zemin İyileştirmesi Gerektiren Zeminler.....	6
3.4. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	6
3.5.Kazıklar.....	8
3.5.1. Kazık Çeşitleri.....	8
3.5.1.1. Fore Kazıklar.....	10
3.6.Zemin Ortamında Kazık Davranışı.....	12
3.6.1.Düşey yük altında tek kazık davranışı.....	12
3.6.2. Kazıklarda uç taşıma gücü.....	14
3.6.2.1.Killi zeminlerde uç taşıma kapasitesi.....	15
3.6.3. Kazıklarda çevre taşıma gücü.....	15
3.7.Düşey Yük Altında Grup Kazıkların Davranışı.....	15
3.8. Kazık Gruplarının Oturması.....	17
3.8.1. Blok oturma.....	18
3.8.2. Konsolidasyon oturması.....	18
3.9.Fore Kazıklarda Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	18
3.9.1. Sonlu elemanlar yönteminin fore kazık analizinde kullanımı.....	19
3.9.2. Kullanılan Yazılımlar ve Modeller.....	19
3.9.3. Avantajlar ve Dezavantajlar.....	20
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	21
4.1.İnceleme Alanında Yapılan Geoteknik Araştırmalar.....	21
4.2. İnceleme Alanında Fore Kazıkların Ve Davranışının TBDY, 2018’e Göre Ve Plaxis (2D) Yazılımı İle Gerçekleştirilen Analizi.....	22
4.2.1 TBDY, 2018’e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,60 m L=10 m).....	25

4.2.2 TB DY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,95 m L=18 m)....	27
4.2.3. TB DY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,80 m L=12 m)....	28
4.2.4. TB DY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,80 m L=10 m)....	29
4.2.5. TB DY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,95 m L=10 m)....	31
4.2.6. Sonlu elemanlar yöntemine göre analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	32
4.2.7. Sonlu elemanlar yöntemi ile alışan PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, kazık çapı ve uzunluk değişiminin toplam deformasyona etkisi	46
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	50
5.1. Sonuçlar.....	50
5.2. neriler	53
KAYNAKLAR.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	: Temel / Kazık taban genişliği
c	: Kohezyon
E	: Elastisite modülü
kN	: Kilonewton
L	: Kazık boyu / Serbest kazık uzunluğu
m	: Metre
mv	: Hacimsel sıkışabilirlik katsayısı
Nc	: Taşıma gücü katsayısı (killi zeminler için)
s	: Oturma miktarı
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
$\Delta\sigma$	: Üstyapı yükünden kaynaklanan gerilme artışı
ε_v	: Hacimsel şekil değiştirme
N	: Poisson oranı
σ	: Gerilme
σ'_c	: Önyükleme basıncı
σ'_{vo}	: İnşaat öncesi efektif düşey gerilme
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
φ_u	: Drenajsız kayma açısı

Kısaltmalar

C30	: Beton sınıfı
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
EA	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
Plaxis 2D/3D	: Sonlu elemanlar analiz programı
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
ZD	: Yerel zemin sınıfı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Temel altı fore kazık uygulaması (https://metaforzemin.com/forekazik.html)..	8
Şekil 3.2. Kazık taşıma gücü bileşenleri (Brown ve ark.,1987).....	9
Şekil 3.3. Tipik kazık çeşitleri (Bowles,1988)	9
Şekil 3.4. Fore kazık imalat aşamaları (https://www.geodenge.com/fore-kazik-uygulamaları/).....	10
Şekil 3.5. Fore kazık uygulaması (https://www.nkgoo.com/fore-kazik-nedir-)	11
Şekil 3.6. Fore kazık uygulaması (https://www.birimfiyatsec.com).....	11
Şekil 3.7. Yük-Oturma eğrisi (Tomlinson,1994).....	12
Şekil 3.8. Kazığın yük transferi (Tomlinson,1994).....	13
Şekil 3.9. Düşey Yük Altındaki Kazıklarda Kayma Yüzeyleri (Tomlinson, 1994).....	14
Şekil 3.10. Sürtünme kazığını çevreleyen gerilmeler ve kazık grubunda bunların toplam etkisi (Bowles, 1988).....	16
Şekil 3.11. Kazık grubunun kayma göçmesi (Tomlinson, 1994).....	17
Şekil 3.12. Temel sistemine bağlı gerilme dağılımları (https://www.birimfiyatsec.com)..	17
Şekil 3.13, Şekil 3.13b, Şekil 3.13c ve Şekil 3.13d’de, zemin profiline göre eşdeğer radye seviyesinin belirlenmesi gösterilmiştir. (https://geominds.com).....	19
Şekil 3.14. Zeminde jeolojik yük ve gerilme artışı diyagramı.....	20
Şekil 3.15. Boşluk oranı- $\log \sigma'$ diyagramı.....	20
Şekil 4.1. İdeal zemin profili.....	25
Şekil 4.2. Zayıf zemin tabakası üzerinde yer alan bir fore kazık temel.....	26
Şekil 4.3. Geometri modeli.....	36
Şekil 4.4. Kazık öncesi sonlu elemanlar ağı.....	37
Şekil 4.5. Kazık sonrası sonlu elemanlar ağı.....	37
Şekil 4.6. Kazık öncesi toplam deformasyon.....	38
Şekil 4.7. Kazık sonrası toplam deformasyon.....	39
Şekil 4.8. Yatay deformasyon.....	39
Şekil 4.9. Düşey deformasyon.....	40
Şekil 4.10. Efektif gerilme.....	41
Şekil 4.11. Boşluk Suyu Basıncı.....	42
Şekil 4.12. Eğilme Momenti Diyagramları.....	43
Şekil 4.13. Kesme Kuvveti.....	44

Şekil 4.14. Eksenel Kuvvet Dağılımları.....	45
Şekil 4.15. Artımsal Deplasman Grafiği.....	46
Şekil 4.16. Ara Yüzey Aderans Gerilmeleri.....	47
Şekil 4.17. Dönme Diyagramı.....	48
Şekil 4.18. Genel Analiz Sonuçları.....	49
Şekil 4.19. 80 cm çap ve 12 m uzunluğundaki kazıkların analiz sonucu.....	50
Şekil 4.20. 95 cm çap ve 18 m uzunluğundaki kazıkların analiz sonucu.....	51
Şekil 4.21. 60 cm çap ve 10 m uzunluğundaki kazıkların analiz sonucu.....	52

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Japan International Cooperation Agency (JICA,1994)'nin iyileştirme yönteminin uygulanabileceği zemin türüne göre yaptığı sınıflandırma.....	7
Çizelge 4.1. İdealize zemin profili ve tasarım parametreleri.....	26
Çizelge 4.2. İdealize zemin profili ve tasarım parametreleri.....	26
Çizelge 4.3. Modellemeye ait yapı parametrelerin özellikleri.....	26
Çizelge 4.4. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri.....	27
Çizelge 4.5. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri.....	27
Çizelge 4.6. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri.....	27
Çizelge 4.7. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri.....	28
Çizelge 4.8. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri.....	28

1.GİRİŞ

Dünya genelinde hızlı şehirleşme nedeniyle, arazilerin yetersizliği, dayanıklı olmayan zemin alanlarında inşaat yapma gerekliliğini doğurmuştur. Dolayısıyla, bu durum zayıf zeminler üzerinde çeşitli zemin güçlendirme yöntemleri uygulanması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Dolayısıyla, inşa edilecek mühendislik yapıları açısından; gelişen şehirlerde yeni yapılaşmalar için gerekli olan geniş alanların sayısı her gün daha da azalmaktadır.

Sonuç olarak, uygun bir temel zemin özelliğine sahip olan yerlerin sayısında azalma yaşanması, zayıf temel zemin özellikleri gösteren bölgelerde mühendislik yapılarının inşasını kaçınılmaz kılmıştır. Uygun olmayan zeminler üzerindeki yapılaşma; birçok mühendislik sorunlarını ortaya çıkarmıştır. Ortaya çıkan sorunlarla birlikte, bu konuyla alakalı yeni yöntemler ve teknikler farklı bölgelerde geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde bu teknikler artık sıkça ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Sahada yetersiz zemin koşulları ile karşılaşıldığı zaman farklı çözüm seçenekleri söz konusu olmaktadır. İnşaat alanının değiştirilmesi, zeminin değiştirilmesi veya tasarımın zemin koşuluna uygun hale getirilmesi buna örnek gösterilebilir. Bu yöntemlerin pahalı ve zaman alıcı olabilmesi nedeniyle mevcut zeminde iyileştirmeye gidilebilmektedir (Özaydın, 2012).

Zayıf zeminin kullanılabilir duruma getirilmesi için doğru iyileştirme tekniklerinin uygulanması gerekmektedir. Bir bina temeli tasarımını kapsayan projelerde, temel zemin ile ilgili geoteknik çalışmaların kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve değerlendirilmesi son derece önemlidir. Bu tür çalışmalarda yetersiz kalındığı projelerde, yapının kullanım döneminde çoğu zaman çözümü imkânsız olan farklı problemlerle karşılaşılabilir.

Taşıma kapasitesi açısından problemlili zeminlerde yüksek binaların inşa edilmesi nedeniyle ağır temel yükleri ortaya çıkmakta ve bu yüklerin kazıklı temel sistemleri aracılığıyla taşıma yeteneği fazla olan zemin katmanlarına iletilmesi sağlanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, zemin malzemesi problemlili olan bir sahada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deformasyon analizleri yapabilen PLAXIS 2D Foundation bilgisayar yazılımı ile sahadaki zemin iyileştirme öncesi ve sonrasında meydana gelen deformasyon ve gerilme analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir.

Yapılan analizlerde, temel tasarımı üzerine, temel sisteminin zemin modellemeleri oluşturulup hesaplar yapılarak, statik yükler altında, zeminlerdeki toplam ve farklı oturmalar analiz edilerek yorumlanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak üç farklı senaryo modellenmiş ve her birinde kazıkların yerdeğiştirme dağılımı değeriendirilmiştir. Farklı tasarım parametrelerinin zemin–kazık etkileşimi üzerindeki etkilerini karşılaştırarak optimum çözümün belirlenmesi amacıyla elde edilen sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Asaoka, (1978) tarafından yapılan çalışmada, klasik oturma tahmin yöntemlerinden biri geliştirilmiş olup, özellikle yumuşak zeminlerde gözlemsel veriler kullanılarak nihai oturma tahmini hesaplanmıştır. Bu yöntem, günümüzde sayısal analiz sonuçlarının doğrulanmasında da referans alınmaktadır.

Hausmann (1990) tarafından yapılan çalışmada, zemin iyileştirme yöntemlerini kapsamlı olarak sınıflandırmış ve her yöntemin mühendislik prensiplerini ortaya konulmuştur. Bu çalışma, günümüzde sayısal analizlerle desteklenen modern iyileştirme uygulamalarının teorik temelini oluşturması bakımından önemli bir başvuru kaynağıdır.

Priebe (1995) yaptığı çalışmada, taş kolon tasarımı için analitik bir yöntem geliştirmiş ve alan oranı ile kolon-zemin rijitlik oranına bağlı olarak taşıma gücü artışı ve oturma azalmasını hesaplayan bağıntılar önermiştir. Bu yöntem, taş kolon tasarımında en yaygın kullanılan analitik yaklaşım olup, günümüzde sayısal analiz sonuçlarının doğrulanmasında da temel referans olarak değerlendirilmektedir.

Croce ve Flora (2000) yaptıkları çalışmada, jet grout yönteminin teorisini, tasarım prensiplerini ve uygulama kontrolünü sistematik olarak ele almış, yöntemin zemin iyileştirme projelerinde güvenilir şekilde kullanılabilmesi için gerekli parametreleri tanımlamıştır. Bu çalışma, jet grout yöntemine ilişkin hem saha mühendisliği hem de sayısal modelleme çalışmalarına katkı sunan en önemli referanslardan biridir.

Hird ve Moseley (2000) yaptıkları çalışmada, düşey drenlerle yapılan zemin iyileştirme uygulamalarını sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiş ve sonuçları klasik teorik çözümlerle karşılaştırmıştır. Çalışma, özellikle tabakalı ve heterojen zeminlerde sayısal analizlerin drenaj davranışını daha gerçekçi biçimde temsil ettiğini göstermiştir. Bu nedenle günümüzde vakum konsolidasyonu ve ön yükleme analizlerinde FEM yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Soga ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada, jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zeminlerin konsolidasyon davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile modellemiş, su akışı ve deformasyonun eşzamanlı çözümünü önermiştir. Çalışma, jet grout uygulamalarında kolon geometrisinin konsolidasyon süresine ve oturma davranışına etkisini ortaya koymuş, günümüzde kullanılan coupled analizlerin temel referanslarından biri olmuştur.

Brinkgreve (2002) tarafından hazırlanan PLAXIS Scientific Manuel'de ayrıntılı olarak açıklanmış olup, bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar analizleri söz konusu manuel'de verilen teorik esaslara dayanmaktadır.

Moseley ve Kirsch (2004) yaptıkları çalışmada, modern zemin iyileştirme yöntemlerini teorik ve uygulamalı açıdan ele almış, özellikle taş kolon ve jet grout gibi yöntemlerin saha uygulamalarına ilişkin kapsamlı örnekler sunmuştur. Bu çalışma, günümüzde sayısal analizlerle desteklenen iyileştirme tasarımlarına temel oluşturan en güncel kaynaklardan biridir.

Indraratna ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada, vakum konsolidasyonu tekniğini ayrıntılı olarak incelemiş ve özellikle yumuşak zeminlerde konsolidasyon süresini önemli ölçüde kısaltabileceğini ortaya koymuştur. Geleneksel ön yükleme ve düşey dren yöntemlerine kıyasla daha ekonomik ve hızlı sonuçlar sunan bu yöntem, son yıllarda sayısal analizler ile de modellenerek mühendislik projelerinde etkinliğini kanıtlamıştır.

Massarsch (2005) yaptığı çalışmada, ince taneli zeminlerin deformasyon özelliklerinin sismik yöntemlerle güvenilir şekilde belirlenebileceğini vurgulamış ve özellikle kayma dalgası hızının, sayısal analizlerde kullanılan elastisite modülü değerlerinin tayininde etkin bir parametre olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, zemin iyileştirme uygulamalarının öncesinde ve sonrasında zeminin davranışının değerlendirilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

Ambily ve Gandhi (2007) yaptıkları çalışmada, taş kolonların davranışını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiş, yük–oturma ilişkisini başarılı biçimde modellemişlerdir. Çalışma, sayısal analizlerin taş kolon tasarımında güvenilir sonuçlar verdiğini ve kolon boyutu ile alan oranının performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuşlardır.

Çelik (2010) tarafından yapılan çalışmada, taş kolon uygulamalarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiş, kolon çapı, aralığı ve rijitlik oranı gibi parametrelerin taşıma gücü ve oturma davranışı üzerindeki etkilerini ortaya konulmuştur. Çalışma, Türkiye’de yapılan uygulamaların sayısal analizlerle uyumlu olduğunu ve FEM’in tasarım sürecinde güvenilir bir araç olduğunu göstermiştir.

Chandiwala (2013), kazıklı radye temelleri sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmıştır.

Güler ve Aytekin (2014) yaptıkları çalışmada, jet grout kolonlarının performansını saha ve laboratuvar verileri ışığında incelemiş ve yöntemin zemin rijitliği ile taşıma gücünü belirgin şekilde arttırdığını, oturmaları ise azalttığını göstermiştir. Bu çalışma, jet grout uygulamalarının Türkiye koşullarında başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koyan önemli bir yerel referanstır.

Holko ve ark. (2014) CFA kazıklarının sayısal incelemelerini ANSYS ve PLAXIS yazılımları ile gerçekleştirmiştir.

Basile (2015), kazıklı radye temeller için sonlu elemanlar (FEM) yöntemini kullanmıştır.

Elwakil ve Azzam (2016), kazıklı radye temeller üzerine yaptıkları çalışmalar sonucunda optimum oturma oranı (S/B) % 0.7 olduğunda kazıkların % 61 oranında yük taşıdıklarını tespit etmişlerdir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018), derin temel sistemleri kapsamında kazık temellere özel hükümler getirmiştir. Yönetmelikte kazık boyutları, çapları, malzeme özellikleri ve zeminle etkileşimleri için tasarım kriterleri detaylı olarak tanımlanmıştır. Fore kazıklar, taşıyıcı zemin tabakasına yük aktarımını hem uç direnci hem de yan sürtünme aracılığıyla sağladığından, bu iki parametrenin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bunun yanı sıra, kazık başlığı detayları, kazık gruplarının etkileşimleri ve deprem yükleri altındaki davranışları yönetmelikte açıkça belirtilmiştir. Bu kapsamda, TBDY 2018'in kazık temellerle ilgili hükümleri, literatürde yer alan zemin-kazık etkileşimi çalışmalarının uygulamadaki karşılığı olarak değerlendirilebilir ve kazık temellerin düşey ve yatay yükler altındaki güvenliğini sağlamaya yönelik temel dayanak oluşturmaktadır.

Karadağ (2019) yaptığı çalışmada, Yalova ilinde gençlik caddesindeki yolda meydana gelen çökme laboratuvar deneyleri sonucunda Plaxis ve Slide programlarını kullanarak incelemiştir.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Zeminlerin İyileştirilmesi

Dinamik ve hidrolik araçların kullanılmasıyla zemin taneleri arasındaki boşluklara farklı malzemelerin eklenmesi ve bu sayede kompozit bir yapının elde edilmesi, zemin taşıma kapasitesi, sıvılaşma, oturma gibi sorunların önlenmesi ve güvenliğin artırılması amacıyla gerçekleştirilen işlemlerin tümü zeminiyileştirme teknikleri olarak adlandırılmaktadır (Sağlam, 2014).

3.2. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Amacı

Zemin iyileştirme tekniklerinin temel amacı, mekanik cihazların kullanımıyla zeminin boşluk oranının azaltılması ya da bu boşlukların çimento, kireç, bentonit gibi çeşitli kimyasal karışımlarla doldurulmasıdır (Mitchell, 1976). Zemin iyileştirme tekniklerine, binaların statik yükleri altında istenen mukavemeti gösteremediği belirlenen zeminlerde daha fazla gereksinim duyulmaktadır.

3.3. Zemin İyileştirmesi Gerektiren Zeminler

Günümüzde inşa edilmeye uygun alanlarda yapılar için elverişli zemin bulmak zorlaşmıştır. Bunun sonucu olarak sağlam zemin özelliği göstermeyen alanlarda istenirse de yapılaşmanın olması, taşıma gücü, oturma, yeraltı su seviyesi ve sıvılaşma potansiyelinin yüksek olması gibi mühendislik problemlerine neden olmaktadır. Bu problemlerin önüne geçmek için, sağlam olmayan zeminlerde gerekli incelemelerin gerçekleştirilmesi uygun iyileştirme yöntemlerinin yapılması gerekmektedir.

3.4. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sınıflandırılması

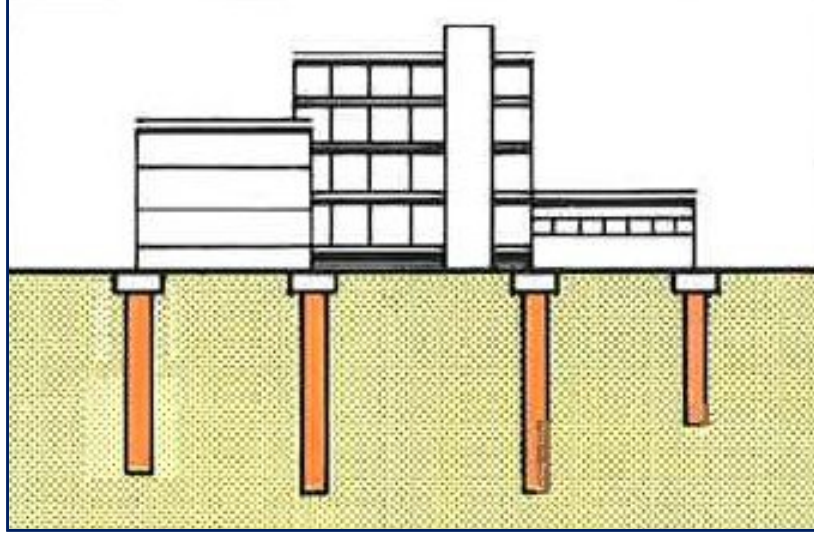
Araştırmacılar, zemin iyileştirme tekniklerini çeşitli şekillerde kategorize etmişlerdir. Bu sınıflandırma, iyileştirme yapılacak zeminin cinsine göre, zemin iyileştirme yönteminin zemin üzerinde yarattığı etkiye göre yapılmıştır. İyileştirme yönteminin uygulanabileceği zemin türüne göre yaptığı sınıflandırma Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Japan International Cooperation Agency (JICA,1994)'nin iyileştirme yönteminin uygulanabileceği zemin türüne göre yaptığı sınıflandırma

Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Sınıflandırılması			
Killi Zeminler İçin	Yer Değiştirme		Mekanik Yöntem
	Ön Yükleme		Yükleme İle Kilin
	Kum Dren	Düşey Dren	Konsolidasyonuna Dayanan
	Plastik Dren		Yöntemler
	Vakum Konsolidasyonu		Dış Yük Olmadan
	Ozmotik Basınc		Konsolidasyona Dayanan
	Elektro Osmoz		Yöntemler
	Kireç Kazıkları		
	Zemin Kolonları	Derin Taşıma	Kil İle Harç Arasında Kimyasal
		Jet Grout Kolonları	Reaksiyona Dayanan Yöntemler
Kumlu Zeminler İçin		Kum Kompaksiyon Kazıkları	Mekanik Yöntem
		Taş Kolon Ve Darbeli Kırmataş Kolon	
	Isıl Ve Elektro-Kimyasal İşlemler		Kimyasal Reaksiyon
	Kompaksiyon Kazığı		Sıkıştırma Özellikle Kazıklar
	Zemin Kolonları	Kum Kompaksiyon Kazıkları	Veya Vibrasyon İle Yatay Sıkılaştırma
		Vibroflotasyon Taş Kolon	
		Darbeli Kırmataş Kolonu	
		Jet Grout Kolonu	
	Patlatma Kompaksiyonu		Sıkılaştırma Özellikle Darbe İle Düşey Sıkılaştırma
	Elektroşok Kompaksiyonu		
Bütün Zeminler İçin	Dinamik Konsolidasyon		
	Çakıl Dren		Düşey Drenaj
	Enjeksiyon	Permeasyon Enjeksiyonu	Boşlukları Doldurma
		Kompaksiyon Enjeksiyonu	
		Çatlatma Enjeksiyonu	
	Sıkıştırılmış Granül Şilte		Tampon Tabaka
	Geotekstil Ve Geogrid Serme		Donatılendirma
	Well Point Yöntemi		Su Alarak Su Seviyesini Düşürme
	Dondurma		Boşluk Suyunu Geçici Olarak Düşürme
	Elektro-Osmoz		Elektriksel Susuzlaştırma

3.5.Kazıklar

Günümüzde inşa edilen yapıların büyük ve yüksek olması, zemin taşıma kapasitesi ile oturma koşullarının yetersiz kaldığı durumlarda, kazık temellere gereksinim duyulmaktadır. Kazıklı temellerin yükleri hem sürtünme kuvveti hem de kazık direnci yoluyla zemine aktarılır (Şekil 3.1).

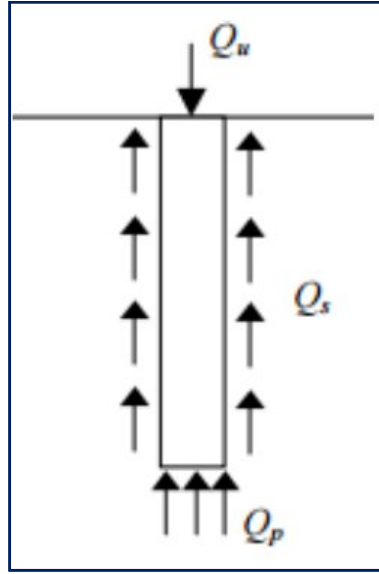


Şekil 3.1. Temel altı fore kazık uygulaması (<https://metaforzemin.com/forekazik.html>)

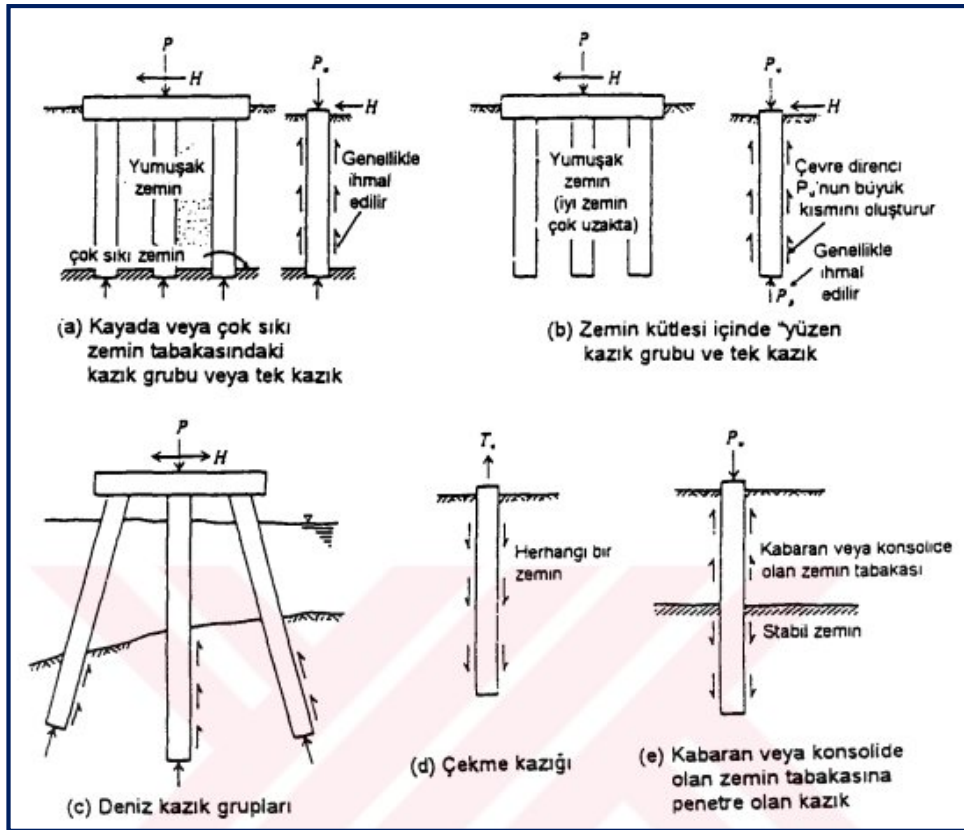
3.5.1. Kazık çeşitleri

Kazıklar mekanik anlamda çalışma şekline göre ve imal ediliş şekline göre sınıflandırılırlar. Çalışma şekline göre kazıklar; uç kazığı ve sürtünme kazığı olmak üzere başlıca iki ana sınıfta incelenirler. Uç kazığı, yapının oturduğu görece düşük dayanımlı zemini geçerek yapı yükünü doğrudan sert/sıkı zemine veya kayaya aktarır. Uç kazıklardaki sürtünme genellikle göz ardı edilen bir faktör olsa da, negatif çevre sürtünmesi dikkate alınması gereken önemli bir konudur ve zemin yapısına (yumuşak killer, turba, yumuşak silt vb.) bağlı olarak büyük değerlerde ortaya çıkabilmektedir, bu nedenle hesaplamalarda ihmal edilmemelidir (Das, 1999).

İmal ediliş şekline göre kazıklar; çakma kazıklar ve delme (fore) kazıklar olmak üzere iki ana sınıfta incelenir (Şekil 3.2).Çakma kazıklar, çakma sırasında kendi hacmi kadar zemini yana iten kazıklardır (Şekil 3.3).Çakma kazıklar, hafif ve ağır yüklerin olduğu durumlarda kısmen alüvyonlu yumuşak zeminlerde kullanıldığında zemin stabilitesi açısından olumlu sonuçlar elde edilmektedir (Hunt, 1986).



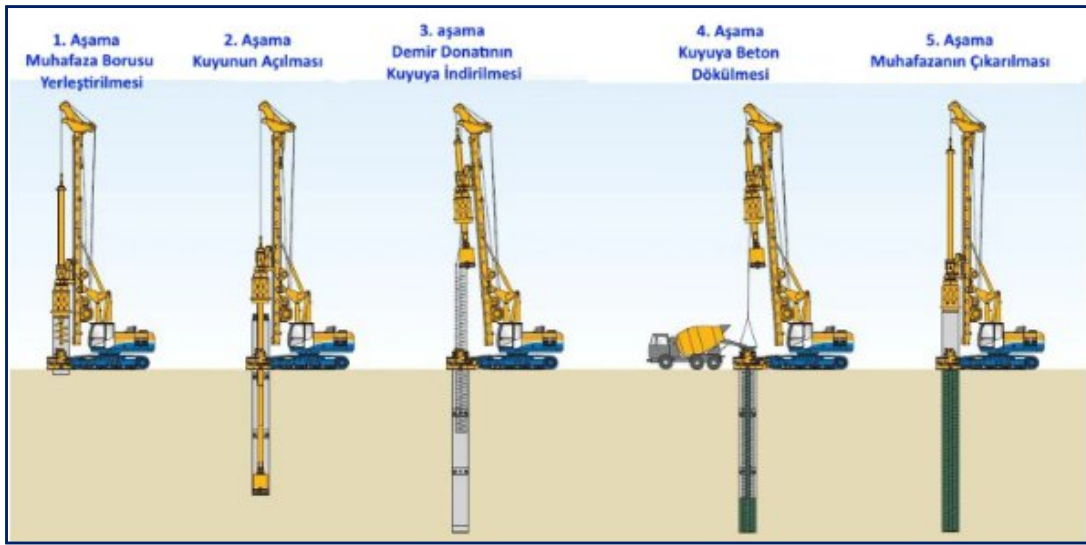
Şekil 3.2. Kazık taşıma gücü bileşenleri (Brown ve ark.,1987)



Şekil 3.3. Tipik kazık çeşitleri (Bowles,1988)

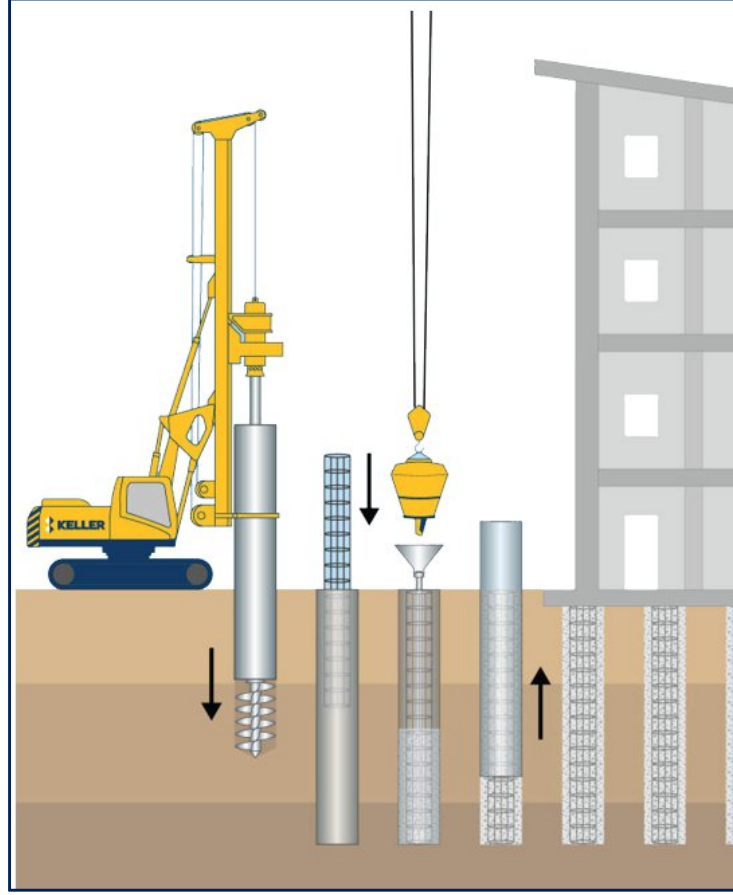
3.5.1.1. Fore kazıklar

Zemine açılan foraj çukurlarının içerisine uygun donatıların yerleştirilmesi ve ardından betonlama işleminin gerçekleştirilmesi prensibiyle oluşturulurlar. Fore kazıkların, yanal zemin basınçlarını karşılama özelliklerine bakıldığında sürtünme özelliklerinin çakma kazıklara göre daha düşüktür (Hunt, 1986). Şekil 3.4’de Fore kazık imalat aşamaları verilmiştir.



Şekil 3.4. Fore kazık imalat aşamaları (<https://www.geodenge.com/fore-kazik-uygulamalari/>)

Fore kazıklar, zemin üzerinde duran yapının yüklerini daha derin ve sağlam tabakalara aktarmak amacıyla tasarlanır ve yerleştirilir. Bu sayede, yüzeyde zayıf veya gevşek olan zemin tabakaları yapı üzerinde oluşan yükleri güvenli bir şekilde taşıyamazken, fore kazıklar bu yüklerin güçlü alt tabakalara iletilmesini sağlar (Şekil 3.5ve Şekil 3.6).



Şekil 3.5. Fore kazık uygulaması(<https://www.nkgoo.com/fore-kazik-nedir->)

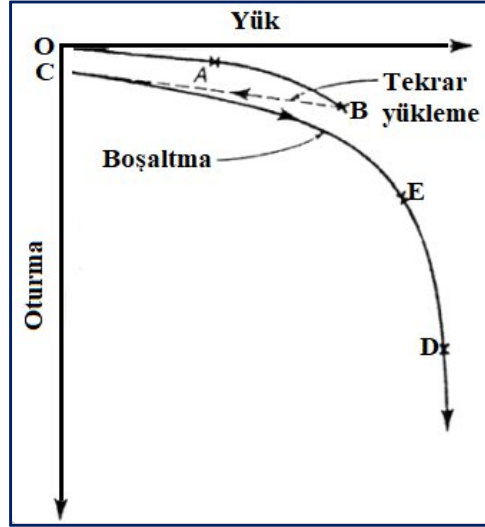


Şekil 3.6. Fore kazık uygulaması (<https://www.birimfiyatsec.com>)

3.6.Zemin Ortamında Kazık Davranışı

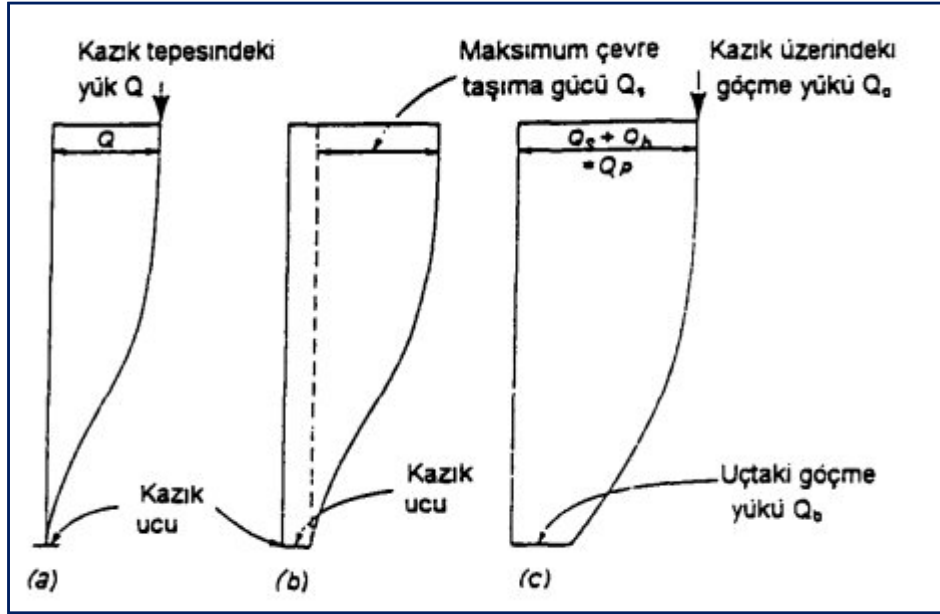
3.6.1.Düşey yük altında tek kazık davranışı

Yük ile oturma arasındaki ilişki O ile A noktası arasında lineerdir. B noktasında kazık üzerindeki yük kaldırıldığında, kazık tabanı C noktasına kadar geri dönecektir. Düşey doğrultuda OC mesafesi ise “kalıcı oturma” olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Yük-Oturma eğrisi (Tomlinson,1994)

Kazık tarafından zemine iletilen yüklerin A,B ve D noktalarındaki değişim mertebeleri Şekil 3.8’de gösterildiği biçimdedir. A ile B noktaları arasındaki bölgede yük, hem çevre sürtünmesi hem de kazık ucu direnci tarafından taşınmaktadır. D noktasında ise kazık ucu direnci maksimum seviyeye çıktığından bu aşamada çevre sürtünmesi yoluyla ek bir yük aktarımının gerçekleşmediği görülmektedir.



Şekil 3.8. Kazığın yük transferi (Tomlinson,1994)

Bir kazığın taşıma gücünü etkileyen başlıca iki temel faktör, kazığın yerleştirildiği zemin ve kazığın imalatında kullanılan malzemenin mekanik özellikleridir.

Kazık taşıma kapasitesinin statik hesabını çevre sürtünmesi ve kazık uç direnci oluştururlar. Kazığın nihai taşıma gücünün hesabı Denklem(3.1) ile ifade edilir.

$$Q_p = Q_b + Q_s - W_p \quad (3.1)$$

Burada;

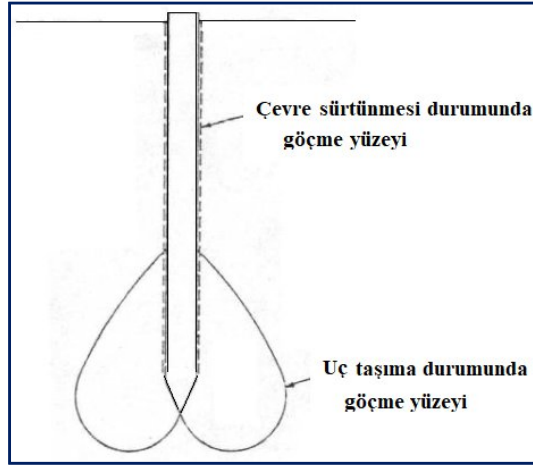
Q_p : Kazığın nihai taşıma gücü,

Q_b : Kazığa ait nihai uç direnci,

Q_s : Kazığın çevre sürtünmesi direnci,

W_p : Kazığın ağırlığıdır.

Düşey eksenel yüklemeye maruz kazıklarda gelişen potansiyel kayma düzlemleri, Şekil 3.9’de gösterilmiştir. Yük-oturma eğrisinde D noktasındaki yükleme nihai taşıma gücüdür. Bu evrede kazık ucunun altındaki zeminde genel bir kayma göçmesi oluşur.



Şekil 3.9. Düşey eksenel yüklemeye maruz kazıklarda gelişen potansiyel kayma düzlemleri (Tomlinson, 1994)

3.6.2. Kazıklarda uç taşıma gücü

Kazık ucunun taşıma kapasitesi, zeminin dayanım parametrelerine bağlı olarak belirlenir. Bu değer Terzaghi ve Meyerhof'un yüzeysel temeller için geliştirdikleri bağıntıdan uyarlanmış olup, Denklem(3.2) ile ifade edilmektedir (Yıldırım, 2002).

$$q_b = c.N_c^* + q.N_q^* + \gamma.B.N_\gamma^* \quad (\text{Denklem 3.2})$$

Burada;

q_b ; Birim alanda taşınabilecek maksimum yük,

N_c^* , N_q^* , N_γ^* ; Şekil ve derinlik faktörlerini içeren taşıma gücü katsayıları,

q ; Sürşarj yükü,

c ; Kohezyon,

B ; Kazık taban genişliği,

γ ; Zeminin birim hacim ağırlığıdır.

Denklem(3.2) efektif gerilmeler cinsinden yazılırsa, Denklem(3.3) şeklinde ifade edilir(Yıldırım, 2002).

$$q_b = c' . N_c' + q.N_q' \quad (3.3)$$

3.6.2.1. Killi zeminlerde uç taşıma kapasitesi

Killi zeminlerde, inşaat sonrasındaki durum taşıma gücü açısından genellikle en kritik aşamayı oluşturur. Bu zeminlerde drenajsız koşullarda kayma direnci açısı $\Phi_u=0$ kabul edilir. Bu nedenle, uç taşıma kapasitesi hesabında $N_c=9$ olarak alınmakta ve kapasite Denklem(3.4) şeklinde ifade edilir (Yıldırım, 2002).

$$Q_p = N_c \cdot c_u \cdot A_p = 9 \cdot c_u \cdot A_p \quad (3.4)$$

Burada;

Q_p ; Nihai kazık uç taşıma direnci,

N_c ; Taşıma gücü katsayısı,

c_u ; Örselenmemiş drenajsız kohezyon.

A_p ; Kazığın plandaki alanıdır.

3.6.3. Kazıklarda çevre taşıma gücü

Kazıklarda yan yüzeyler ile taşınabilecek maksimum yük Denklem(3.5) ile ifade edilir(Yıldırım, 2002).

$$Q_s = \sum p \cdot \Delta L \cdot f \quad (3.5)$$

Burada;

Q_s ; Kazık çevre taşıma gücü,

p ; Kazık çevresi,

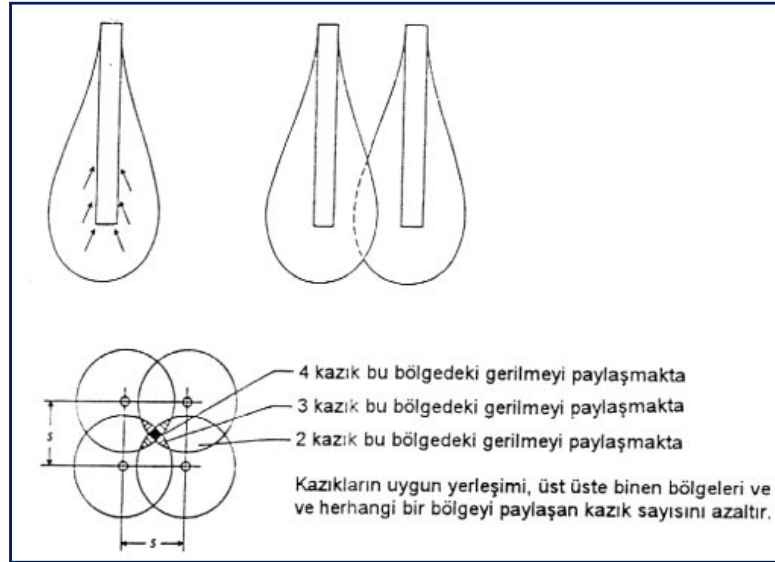
ΔL ; f ve p 'nin sabit alınabileceği kazık uzunluğu parçası,

f ; Birim sürtünme direncidir.

3.7. Düşey Yük Altında Grup Kazıkların Davranışı

Düşey yük altında kazık grubunun taşıma kapasitesi, grup içindeki her bir kazığın ayrı ayrı taşıma kapasitelerinin toplamından daha az olmaktadır. Daha düşük olmasının

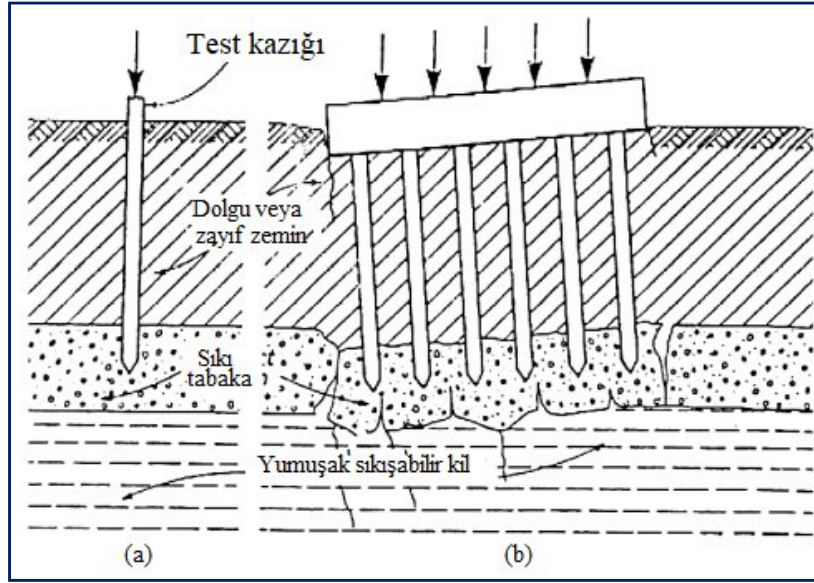
nedeni grup etkileşiminden kaynaklıdır. Şekil 3.10’ da, görüldüğü üzere, meydana gelen oturma kazık gruplarında tek kazıklara göre daha fazladır. Bu durum kazık grubu altındaki zemin tabakasında oluşan gerilmenin etki bölgesinin daha geniş olması olarak açıklanabilir.



Şekil 3.10. Sürtünme kazığının çevreleyen gerilmeler ve kazık grubunda bunların toplam etkisi (Bowles, 1988)

Kazıklı radye temellerin en iyi şekilde projelendirilmesi için kazıkların doğru mesafelerle yerleştirilmesi ve radyenin de ideal kalınlıkta üretilmesi gerekmektedir.

Şekil 3.11a’da ise tek kazığın davranışı verilmiştir. Tek kazıkta alttaki yumuşak kil tabakası yatay tabakalarda oluşan gerilmelerden etkilenmemektedir. Dolayısıyla tek kazıkta göçme meydana gelmez. Şekil 3.11b’de, dolgu zemin üzerinde yer alan ve alttaki sert tabakaya grup kazıklarla yük ileten kazıklı temelin, sert tabaka altındaki yumuşak zemin nedeniyle oluşan blok göçmesi gösterilmiştir (Tomlinson, 1994).



Şekil 3.11. Kazık grubunun kayma göçmesi (Tomlinson, 1994)

3.8. Kazık Gruplarının Oturması

Kazık gruplarının oturması hem grup genelindeki toplam oturma hem de her bir kazığın yaptığı bireysel deplasmanlar açısından değerlendirilir. Grup oturması genellikle zemin kütleindeki hacimsel şekil değiştirmeden (ϵ_v) kaynaklanırken, tekil kazık oturmaları daha çok kayma deformasyonlarıyla (γ) ilişkilidir. Kazıklı ve yüzeysel temellerin oluşturduğu farklı gerilme dağılımları incelendiğinde, kazıklı sistemlerin özellikle rijit tabakalara yük aktarımı sayesinde toplam oturmaya azalttığı görülmektedir. Ancak kazık tasarımı doğru yapılmadığında sıkı temellerdeki oturma problemlerine benzer davranışlar kazıklı temellerde de ortaya çıkabilir.

Kazık gruplarının oturmasının hesaplanabilmesi için, zemin sıkışma parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla yapılan sondajlar, genellikle eşdeğer temel derinliğinin altına kadar, yaklaşık $2B$ kadar devam ettirilir. Derin tabakalarda (yaklaşık 40 m ve altı) örselenmemiş numune almak zorlaştığından, sıkışma özellikleri çoğunlukla korelasyonlar aracılığıyla tahmin edilir.

Kum veya katı kıvamlı kil tabakalarında kazık gruplarının çevre sürtünmesi, tekil kazıklara göre daha yüksek değerler gösterir. Ayrıca, kumlu veya çakıllı zeminlerde, kazıklar arasında kalan zemin kütlelerinin sıkışması, taşıma gücünde artışa yol açar. Bu gözlemler, kazık grubunun bir bütün olarak değerlendirilmesi gerektiğini ve bu kapsamda “eşdeğer radye” kavramının kullanılmasını gerektirir.

3.8.1. Blok oturma

Kazık gruplarında blok oturma, eşdeğer radye temel seviyesinden itibaren gelişir. Bu seviye genellikle kazık boyunun $2L/3$ derinliğine karşılık gelir (L = kazığın serbest boyu). Ancak zemin profilindeki tabaka farklılıkları bu derinliğin değişmesine neden olabilir.

Eşdeğer radye seviyesinin altında kalan zemin tabakalarının ortasında oluşan gerilme artışı hesaplanır ve her bir tabakanın sıkışması belirlenir. Bu sıkışmaların toplamı, kazıklı temel sisteminin toplam oturmasını verir. Hesapta dikkate alınacak derinlik, ilave düşey gerilmenin doğal jeolojik gerilmenin %10'undan küçük olduğu seviyeye kadar alınır. Bu sınırın altında kalan tabakalar, temel yükünden anlamlı biçimde etkilenmez.

3.8.2. Konsolidasyon oturması

Suya doymuş kohezyonlu zeminlerde konsolidasyon oturması, laboratuvar konsolidasyon deneylerinden veya korelatif ilişkilerden elde edilen parametrelerle hesaplanır. Zemin ön yüklemeli veya normal konsolide durumuna göre uygun formüller seçilir ve tek boyutlu sıkışma teorisi esas alınır. Gerekli durumlarda üç boyutlu etki düzeltmeleri yapılır.

Eğer hacimsel sıkışabilirlik katsayısı (mv) kullanılıyorsa, oturma Denklem 3.6 ile hesaplanır:

$$s = h \cdot mv \cdot \Delta\sigma \quad (3.6)$$

Burada h tabaka kalınlığını, mv hacimsel sıkışabilirlik katsayısını, $\Delta\sigma$ ise ilave düşey gerilmeyi ifade eder. Numune alınamadığında, mv değeri korelatif ilişkilerden ortalama bir değer olarak belirlenir.

3.9. Fore Kazıklarda Sonlu Elemanlar Yöntemi

Fore kazıklar, özellikle yüksek taşıma kapasitesi ve derin temel gereksinimlerinde kullanılan sık uygulanan bir zemin iyileştirme ve taşıyıcı sistem çözümüdür. Geleneksel

yöntemlerde sadece yaklaşık çözümler elde edilirken, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) sayesinde karmaşık zemin–kazık etkileşimleri üç boyutlu olarak çözümlenebilir.

3.9.1. Sonlu elemanlar yönteminin fore kazık analizinde kullanımı

- ✓ Kazık–Zemin Etkileşimi:
- ✓ Zemin yayları yerine, zemin davranışı Mohr–Coulomb, Hardening Soil veya Cam Clay gibi gelişmiş konstitutif modellerle tanımlanabilir.
- ✓ Bu sayede sürtünme direnci, uç direnci ve çevresel zemin oturmaları gerçeğe yakın biçimde hesaplanır.
- ✓ Oturma Analizi:
- ✓ SEY ile tekil kazıkların ve kazık gruplarının oturma davranışı, kazıklar arasındaki etkileşim (group effect) dahil edilerek analiz edilir.
- ✓ Özellikle Asaoka (1978) gibi oturma tahmin yöntemleriyle karşılaştırılarak kalibrasyon yapılabilir.
- ✓ Taşıma Gücü ve Gerilme Dağılımı:
- ✓ Kazık ucundaki ve çevresindeki zemin gerilmeleri detaylı şekilde dağılım grafikleriyle elde edilir.
- ✓ Yanal yükler altında kazık rijitliği ve deplasman profili incelenebilir.

3.9.2. Kullanılan yazılımlar ve modeller

- ✓ PLAXIS 2D/3D: Fore kazık analizlerinde en yaygın kullanılan SEY tabanlı yazılımdır.
- ✓ Abaqus, ANSYS, MIDAS GTS NX: Daha ileri düzeyde 3D kazık-zemin etkileşimi analizlerinde kullanılır.
- ✓ Modelleme Parametreleri:
- ✓ Zemin tabakaları: SPT, CPT veya laboratuvar deneylerinden elde edilen parametrelerle modellenir.
- ✓ Kazık: Elastik–lineer malzeme ya da betonarme rijitlik parametreleriyle tanımlanır.
- ✓ Sınır Koşulları: Yanal ve taban sabitlemeleri ile gerçekçi sınır şartları uygulanır.

3.9.3. Avantajlar ve dezavantajlar

Avantajlar:

- ✓ Gerçekçi 2D–3D modelleme
- ✓ Karmaşık zemin koşullarını dikkate alabilme
- ✓ Grup etkisi ve oturma–taşıma gücü ilişkisini aynı anda çözümleme

Dezavantajlar:

- ✓ Yüksek hesap maliyeti (özellikle 3D analizlerde)
- ✓ Doğru parametre seçiminde zorluk
- ✓ Ölçeklendirme ve kalibrasyon ihtiyacı

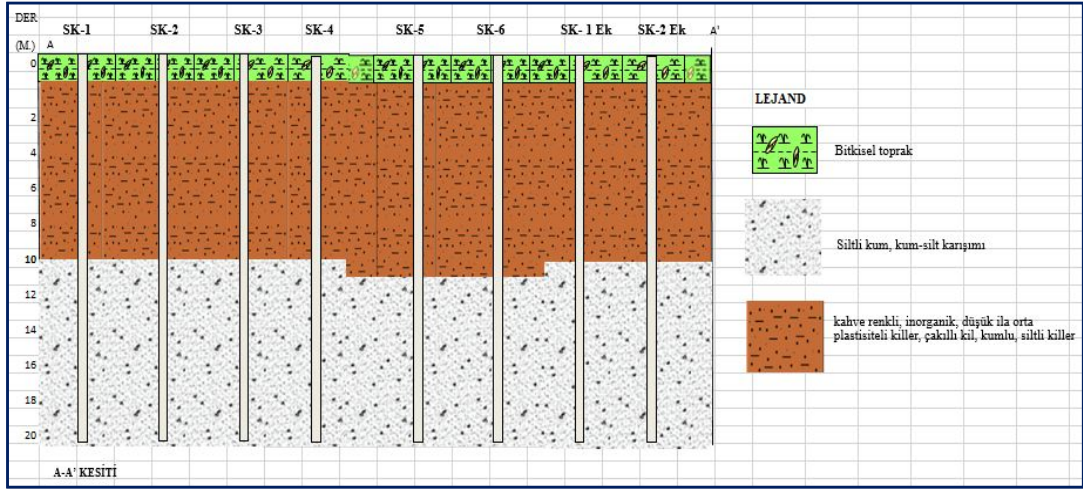
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, zemin malzemesi problemli olan bir sahada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak PLAXIS 2D Foundation bilgisayar programı ile sahadaki zemin iyileştirme öncesi ve sonrasında meydana gelen deformasyon ve gerilme analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde, temel tasarımı üzerine, temel sisteminin zemin modellemeleri oluşturulup hesaplar yapılarak, statik yükler altında, zemindeki toplam ve farklı oturmalar analiz edilerek yorumlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak üç farklı senaryo modellenmiş ve her birinde kazıkların yerdeğiştirme dağılımı değerlendirilmiştir. Farklı tasarım parametrelerinin zemin-kazık etkileşimi üzerindeki etkilerini karşılaştırarak optimum çözümün belirlenmesi amacıyla elde edilen sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

4.1.İnceleme Alanında Yapılan Geoteknik Araştırmalar

Tez çalışması kapsamında inceleme sahası Batman ili, kent merkezinde yer almaktadır. Çalışma sahasındaki bina oturum alanı yaklaşık 384 m² olacak şekilde inşa edilmesi planlanmıştır. Bina yüksekliği ise toplamda 18 m olacak ve 6 katlı bir yapı inşa edilecektir. İnceleme alanında, 6 adet 20 m ve 1 adet 30 metre olmak üzere toplam 180 m temel sondaj kuyuları açılarak zemin birimlerinin jeolojik özellikleri belirlenmiştir.

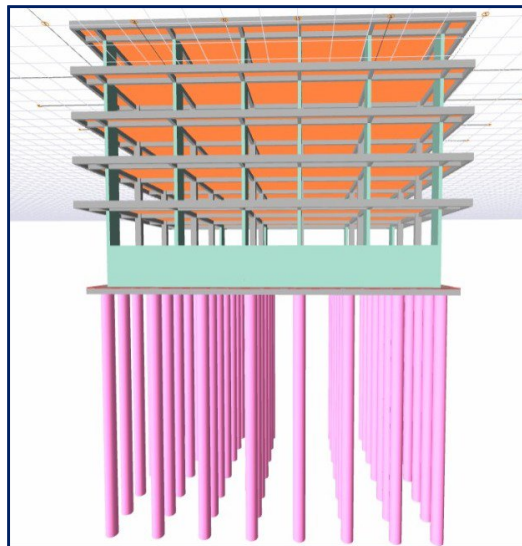
İnceleme alanında, sondaj kuyularından genel olarak elde edilen sonuçlara göre, oluşturulan idealize zemin profili (Şekil 4.1) yüzeyden itibaren sırası ile 0.00-0.40 arası bitkisel toprak, 0.40-10,00 m arası inorganik killler (düşük ile orta plastisitede), çakıllı kil, kumlu kil, siltli kil, 11.00-30.00 m arası siltli kum, kum silt, tabakası olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, yeraltı su seviyesi yüzeyden 3.5 m aşağıda alınmıştır. Çalışma sahasında yerel zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. İdeal zemin profili

4.2. İnceleme Alanında Fore Kazıkların Ve Davranışının TBDY, 2018'e Göre Ve Plaxis (2D) Yazılımı İle Gerçekleştirilen Analizi

Bu çalışmada, zayıf zemin tabakası üzerinde yer alan bir fore kazık temeli (Şekil 4.2) modellenmiştir. Üst yapıdan gelen yükleri taşıyıcı zemin tabakasına aktaran fore kazıklar, farklı derinliklerdeki zemin profilleri dikkate alınarak iki tabakalı bir zemin ortamında analiz edilmiştir. Çalışmada 4 farklı zemin tabakası tanımlanmıştır. Zemin davranışının gerçeğe daha yakın olması nedeniyle “Mohr-Coulomb” zemin modeli seçilmiştir ve analizler drenajlı duruma göre yapılmıştır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden 3.5 m aşağıdadır. Analizlerde kullanılan zemin, temel ve kazık parametreleri Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Zayıf zemin tabakası üzerinde yer alan bir fore kazık temel

Çizelge 4.1. İdealize zemin profili ve tasarım parametreleri

Kil Zemine ait analiz parametreleri	
İçsel sürtünme açısı ϕ°	3
Birim hacim ağırlık γ (kN/m ³)	19.2
Kohezyon c (kN/m ²)	68
Poisson oranı	0.33
E (kN/m ²)	5000

Çizelge 4.2. İdealize zemin profili ve tasarım parametreleri

Siltli Kum Zemine ait analiz parametreleri	
İçsel sürtünme açısı ϕ°	34
Birim hacim ağırlık γ (kN/m ³)	19.5
Kohezyon c (kN/m ²)	68
Poisson oranı	0.25
E (kN/m ²)	50000

Çizelge 4.3. Modellemeye ait yapı parametrelerin özellikleri

Yapı parametreleri	
Radye temel kalınlığı (m)	0,60
Temel genişliği (m)	24
Temel Derinliği (m)	16
EA (Axialstiffness)	43.2x10 ⁹
EI (Bendingstiffness)	12.69x10 ⁹
Yapı ağırlığı (t)	4800
Hesaplanan zemin taşıma gücü(t/m ²)	28.44
Yatak katsayısı (t/m ³)	1592

Çizelge 4.4. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri

Fore kazık parametreleri	
Kazık çapı (m)	0,95
Kazık boyu (m)	18
Malzeme özelliği	C30
EA (eksenel rijitlik) (Axial stiffness)	21.264.000 kN/m
EI (eğilme rijitliği) (Bending stiffness)	1.199.400 kNm ² /m
Yatay gerilme katsayısı (K)	0.95
Aderans katsayısı (α)	0.45

Çizelge 4.5. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri

Fore kazık parametreleri	
Kazık çapı (m)	0.60
Kazık boyu (m)	10
Malzeme özelliği	C30
EA (eksenel rijitlik) (Axial stiffness)	8.481.000 kN/m
EI (eğilme rijitliği) (Bending stiffness)	190.680 kNm ² /m
Yatay gerilme katsayısı (K)	0.95
Aderans katsayısı (α)	0.45

Çizelge 4.6. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri

Fore kazık parametreleri	
Kazık çapı (m)	0,80
Kazık boyu (m)	12
Malzeme özelliği	C30
EA (eksenel rijitlik) (Axial stiffness)	15.081.000 kN/m
EI (eğilme rijitliği) (Bending stiffness)	603.300 kNm ² /m
Yatay gerilme katsayısı (K)	0.95
Aderans katsayısı (α)	0.45

Çizelge 4.7. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri

Fore kazık parametreleri	
Kazık çapı (m)	0,80
Kazık boyu (m)	10
Malzeme özelliği	C30
EA (eksenel rijitlik) (Axial stiffness)	14.350.000 kN/m
EI (eğilme rijitliği) (Bending stiffness)	534.300 kNm ² /m
Yatay gerilme katsayısı (K)	0,95
Aderans katsayısı (α)	0,45

Çizelge 4.8. Modellemeye ait kazık parametrelerin özellikleri

Fore kazık parametreleri	
Kazık çapı (m)	0,95
Kazık boyu (m)	10
Malzeme özelliği	C30
EA (eksenel rijitlik) (Axial stiffness)	19.260.000 kN/m
EI (eğilme rijitliği) (Bending stiffness)	750.000 kNm ² /m
Yatay gerilme katsayısı (K)	0.95
Aderans katsayısı (α)	0.45

4.2.1 TBDY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,60 m L=10 m)

Çapı 0.60 m, boyu 10 m olan C30 beton fore kazığının taşıma gücü için, zemin parametreleri $c=68$ kN/m², $\gamma=19.2$ kN/m³, $\varphi\approx 33^\circ$ (N_q hesabı için), $\alpha=0.45$, $K=0.95$ ve $\delta=3^\circ$ olarak alınmıştır. Güvenlik katsayısı $FS=2.5$ seçilmiştir.

Geometrik Özellikler

- Kazık çapı $D = 0.60$ m
- Kazık boyu $L = 10$ m
- Uç alanı $A_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 0.283$ m²
- Çevre uzunluğu $U = \pi \cdot D = 1.885$ m
- Kazık alanı $A_s = U \cdot L = 18.85$ m²
- Beton birim hacim ağırlığı, $\gamma_c \approx 24$ kN/m³ (C30)
- Hacim $V = A \cdot L = 0.282743 \cdot 10 = 2.82743$ m³

Sürtünme Direnci

$$Q_s = (a \cdot c + K \cdot \sigma' v \cdot \tan \delta) \cdot A_s$$

$$\sigma' v \approx \gamma \cdot L / 2 = 19.2 \cdot 10 / 2 = 96 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = (0.45 \cdot 68 + 0.95 \cdot 96 \cdot \tan 3^\circ) \cdot 18.85$$

$$Q_s \approx 667 \text{ kN}$$

Uç Direnci

$$Q_b = (c \cdot N_c + \sigma' v \cdot N_q) \cdot A_p$$

($\phi=33^\circ$, $N_q \approx 25$):

$$q_b = c \cdot N_c + \sigma' v \cdot N_q = 68 \cdot 9 + 192 \cdot 25 = 5784 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_b = 5784 \cdot 0.283 \approx 1637 \text{ kN}$$

Kazık Ağırlığı

$$W_p = A_p \cdot L \cdot \gamma_p$$

$$\text{Kazık uç alanı } A_p = 0.283 \text{ m}^2$$

$$\text{Kazık boyu } L = 10 \text{ m}$$

$$\text{Kazık birim hacim ağırlığı } \gamma_p = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$W_p = 0.283 \cdot 10 \cdot 24 = 67.92 \text{ kN}$$

Toplam Taşıma Gücü

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b - W_p$$

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b = 667 + 1637 - 68 = 2236 \text{ kN}$$

$$Q_{em} = Q_{ult} / FS = 2236 / 2.5 \approx 895 \text{ kN} \approx 91 \text{ ton}$$

Sonuç olarak, kazık uç koşullarına bağlı olarak emniyetli taşıma kapasitesi yaklaşık 91 ton hesaplanmıştır.

Bina yükü 4800 ton olduğundan 53 adet kazık hesaplanmıştır.

4.2.2 TBDY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,95 m L=18 m)

Çapı 0.95 m, boyu 18 m olan C30 beton fore kazığın taşıma gücü için, zemin parametreleri $c=68 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=19.2 \text{ kN/m}^3$, $\varphi \approx 33^\circ$ (N_q hesabı için), $\alpha=0.45$, $K=0.95$ ve $\delta=3^\circ$ olarak alınmıştır. Güvenlik katsayısı $FS=2.5$ seçilmiştir.

Geometrik Özellikler

- Kazık çapı $D = 0.95 \text{ m}$
- Kazık boyu $L = 18 \text{ m}$
- Uç alanı $A_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 0.7088 \text{ m}^2$
- Çevre uzunluğu $U = \pi \cdot D = 2.98 \text{ m}$
- Kazık alanı $A_s = U \cdot L = 53.64 \text{ m}^2$
- Beton birim hacim ağırlığı, $\gamma_c \approx 24 \text{ kN/m}^3$ (C30)
- Hacim $V = A \cdot L = 0.282743 \cdot 10 = 12.7584 \text{ m}^3$

Sürtünme Direnci

$$Q_s = (a \cdot c + K \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta) \cdot A_s$$

$$\sigma'_v \approx \gamma \cdot L / 2 = 19.2 \cdot 10 / 2 = 96 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = (0.45 \cdot 68 + 0.95 \cdot 96 \cdot \tan 3^\circ) \cdot 53.64$$

$$Q_s \approx 1898 \text{ kN}$$

Uç Direnci

$$Q_b = (c \cdot N_c + \sigma'_v \cdot N_q) \cdot A_p$$

($\varphi=33^\circ$, $N_q \approx 25$):

$$q_b = c \cdot N_c + \sigma'_v \cdot N_q = 68 \cdot 9 + 192 \cdot 25 = 5784 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_b = 5784 \cdot 0.7088 \approx 4100 \text{ k}$$

Kazık Ağırlığı

$$W_p = A_p \cdot L \cdot \gamma_p$$

$$\text{Kazık uç alanı } A_p = 0.7088 \text{ m}^2$$

$$\text{Kazık boyu } L = 18 \text{ m}$$

$$\text{Kazık birim hacim ağırlığı } \gamma_p = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$W_p = 0,7088 \cdot 18 \cdot 24 = 307 \text{ kN}$$

Toplam Taşıma Gücü

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b - W_p$$

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b = 1898 + 4100 - 307 = 5691 \text{ kN}$$

$$Q_{em} = Q_{ult} / FS = 5691 / 2.5 \approx 2276 \text{ kN} \approx 232 \text{ ton}$$

Sonuç olarak, kazık uç koşullarına bağlı olarak emniyetli taşıma kapasitesi yaklaşık 232 ton hesaplanmıştır.

Bina yükü 4800 ton olduğundan 21 adet kazık hesaplanmıştır.

4.2.3. TBDY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,80 m L=12 m)

Çapı 0.80 m, boyu 12 m olan C30 beton fore kazığın taşıma gücü için, zemin parametreleri $c=68 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=19.2 \text{ kN/m}^3$, $\phi \approx 33^\circ$ (Nq hesabı için), $\alpha=0.45$, $K=0.95$ ve $\delta=3^\circ$ olarak alınmıştır. Güvenlik katsayısı $FS=2.5$ seçilmiştir.

Geometrik Özellikler

- Kazık çapı $D = 0.80 \text{ m}$
- Kazık boyu $L = 12 \text{ m}$
- Uç alanı $A_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 0.6283 \text{ m}^2$
- Çevre uzunluğu $U = \pi \cdot D = 2.51 \text{ m}$
- Kazık alanı $A_s = U \cdot L = 30,12 \text{ m}^2$
- Beton birim hacim ağırlığı, $\gamma_c \approx 24 \text{ kN/m}^3$ (C30)
- Hacim $V = A \cdot L = 0.6283 \cdot 12 = 7,54 \text{ m}^3$

Sürtünme Direnci

$$Q_s = (a \cdot c + K \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta) \cdot A_s$$

$$\sigma'_v \approx \gamma \cdot L / 2 = 19.2 \cdot 10 / 2 = 96 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = (0.45 \cdot 68 + 0.95 \cdot 96 \cdot \tan 3^\circ) \cdot 30,12$$

$$Q_s \approx 1073 \text{ kN}$$

Uç Direnci

$$Q_b = (c \cdot N_c + \sigma' v \cdot N_q) \cdot A_p$$

($\phi=33^\circ$, $N_q \approx 25$):

$$q_b = c \cdot N_c + \sigma' v \cdot N_q = 68 \cdot 9 + 192 \cdot 25 = 5784 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_b = 5784 \cdot 0.6283 \approx 3635 \text{ kN}$$

Kazık Ağırlığı

$$W_p = A_p \cdot L \cdot \gamma_p$$

Kazık uç alanı $A_p = 0.6283 \text{ m}^2$

Kazık boyu $L = 12 \text{ m}$

Kazık birim hacim ağırlığı $\gamma_p = 24 \text{ kN/m}^3$

$$W_p = 0.6283 \cdot 12 \cdot 24 = 181 \text{ kN}$$

Toplam Taşıma Gücü

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b - W_p$$

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b = 1073 + 3635 - 181 = 4527 \text{ kN}$$

$$Q_{em} = Q_{ult} / FS = 4527 / 2.5 \approx 1810 \text{ kN} \approx 184 \text{ ton}$$

Sonuç olarak, kazık uç koşullarına bağlı olarak emniyetli taşıma kapasitesi yaklaşık 184 ton hesaplanmıştır.

Bina yükü 4800 ton olduğundan 26 adet kazık hesaplanmıştır.

4.2.4. TBDY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,80 m L=10 m)

Çapı 0.80 m, boyu 10 m olan C30 beton fore kazığın taşıma gücü, taşıma gücü için, zemin parametreleri $c=68 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=19.2 \text{ kN/m}^3$, $\phi \approx 33^\circ$ (N_q hesabı için), $\alpha=0.45$, $K=0.95$ ve $\delta=3^\circ$ olarak alınmıştır. Güvenlik katsayısı $FS=2.5$ seçilmiştir.

Geometrik Özellikler

- Kazık çapı $D = 0.80 \text{ m}$

- Kazık boyu $L = 10 \text{ m}$
- Uç alanı $A_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 0.5027 \text{ m}^2$
- Çevre uzunluğu $U = \pi \cdot D = 2,51 \text{ m}$
- Kazık alanı $A_s = U \cdot L = 25,1 \text{ m}^2$
- Beton birim hacim ağırlığı, $\gamma_c \approx 24 \text{ kN/m}^3$ (C30)
- Hacim $V = A \cdot L = 0.5027 \cdot 10 = 5,07 \text{ m}^3$

Sürtünme Direnci

$$Q_s = (a \cdot c + K \cdot \sigma'_v \cdot \tan \delta) \cdot A_s$$

$$\sigma'_v \approx \gamma \cdot L / 2 = 19.2 \cdot 10 / 2 = 96 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = (0.45 \cdot 68 + 0.95 \cdot 96 \cdot \tan 3^\circ) \cdot 25,1$$

$$Q_s \approx 888 \text{ kN}$$

Uç Direnci

$$Q_b = (c \cdot N_c + \sigma'_v \cdot N_q) \cdot A_p$$

($\phi=33^\circ$, $N_q \approx 25$):

$$q_b = c \cdot N_c + \sigma'_v \cdot N_q = 68 \cdot 9 + 192 \cdot 25 = 5784 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_b = 5784 \cdot 0.5027 \approx 2907 \text{ kN}$$

Kazık Ağırlığı

$$W_p = A_p \cdot L \cdot \gamma_p$$

$$\text{Kazık uç alanı } A_p = 0.5027 \text{ m}^2$$

$$\text{Kazık boyu } L = 10 \text{ m}$$

$$\text{Kazık birim hacim ağırlığı } \gamma_p = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$W_p = 0.5027 \cdot 10 \cdot 24 = 120 \text{ kN}$$

Toplam Taşıma Gücü

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b - W_p$$

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b = 888 + 2907 - 120 = 3675 \text{ kN}$$

$$Q_{em} = Q_{ult} / FS = 3675 / 2.5 \approx 1470 \text{ kN} \approx 149 \text{ ton}$$

Sonuç olarak, kazık uç koşullarına bağlı olarak emniyetli taşıma kapasitesi yaklaşık 149 ton hesaplanmıştır.

Bina yükü 4800 ton olduğundan 32 adet kazık hesaplanmıştır.

4.2.5. TBDY, 2018'e göre, kazıkların taşıma gücü hesabı (D=0,95 m L=10 m)

Çapı 0.95 m, boyu 10 m olan C30 beton fore kazığın taşıma gücü, taşıma gücü için, zemin parametreleri $c=68 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=19.2 \text{ kN/m}^3$, $\varphi \approx 33^\circ$ (Nq hesabı için), $\alpha=0.45$, $K=0.95$ ve $\delta=3^\circ$ olarak alınmıştır. Güvenlik katsayısı FS=2.5 seçilmiştir.

Geometrik Özellikler

- Kazık çapı $D = 0.95 \text{ m}$
- Kazık boyu $L = 10 \text{ m}$
- Uç alanı $A_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 0.7088 \text{ m}^2$
- Çevre uzunluğu $U = \pi \cdot D = 2,98 \text{ m}$
- Kazık alanı $A_s = U \cdot L = 29,8 \text{ m}^2$
- Beton birim hacim ağırlığı, $\gamma_c \approx 24 \text{ kN/m}^3$ (C30)
- Hacim $V = A \cdot L = 0.5027 \cdot 10 = 7,088 \text{ m}^3$

Sürtünme Direnci

$$Q_s = (a \cdot c + K \cdot \sigma' v \cdot \tan \delta) \cdot A_s$$

$$\sigma' v \approx \gamma \cdot L / 2 = 19.2 \cdot 10 / 2 = 96 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = (0.45 \cdot 68 + 0.95 \cdot 96 \cdot \tan 3^\circ) \cdot 29,8$$

$$Q_s \approx 1055 \text{ kN}$$

Uç Direnci

$$Q_b = (c \cdot N_c + \sigma' v \cdot N_q) \cdot A_p$$

($\varphi=33^\circ$, $N_q \approx 25$):

$$q_b = c \cdot N_c + \sigma' v \cdot N_q = 68 \cdot 9 + 192 \cdot 25 = 5784 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_b = 5784 \cdot 0.7088 \approx 4100 \text{ kN}$$

Kazık Ağırlığı

$$W_p = A_p \cdot L \cdot \gamma_p$$

$$\text{Kazık uç alanı } A_p = 0.7088 \text{ m}^2$$

$$\text{Kazık boyu } L = 10 \text{ m}$$

$$\text{Kazık birim hacim ağırlığı } \gamma_p = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$W_p = 0.7088 \cdot 10 \cdot 24 = 170 \text{ kN}$$

Toplam Taşıma Gücü

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b - Wp$$

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b = 1055 + 4100 - 170 = 4985 \text{ kN}$$

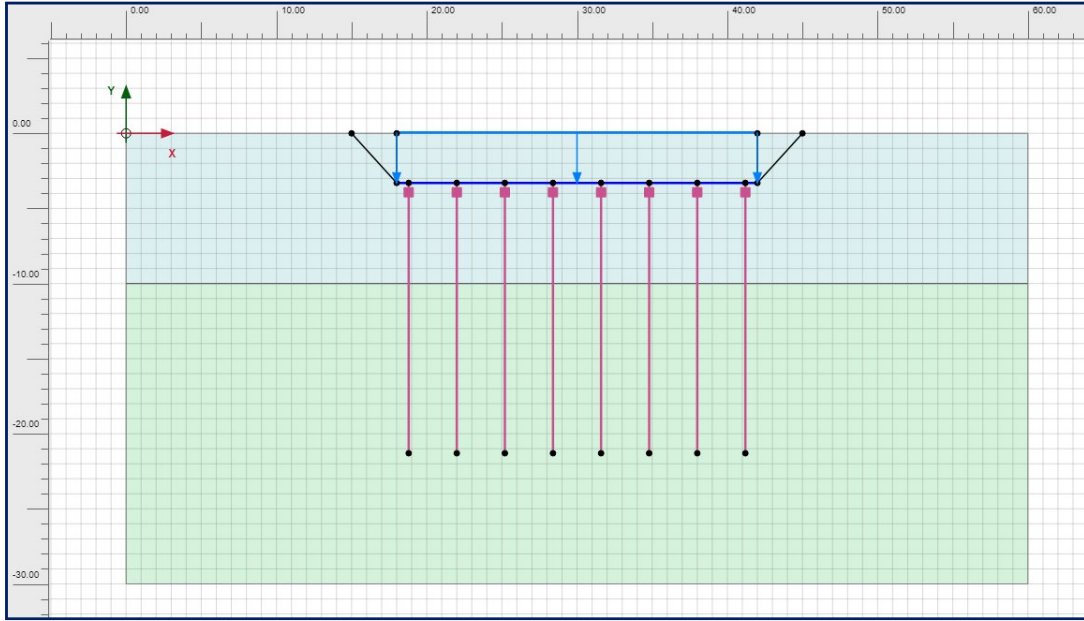
$$Q_{em} = Q_{ult} / FS = 4985 / 2.5 \approx 1994 \text{ kN} \approx 203 \text{ ton}$$

Sonuç olarak, kazık uç koşullarına bağlı olarak emniyetli taşıma kapasitesi yaklaşık 203 ton hesaplanmıştır.

Bina yükü 4800 ton olduğundan 24 adet kazık hesaplanmıştır.

4.2.6. Sonlu elemanlar yöntemine göre analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

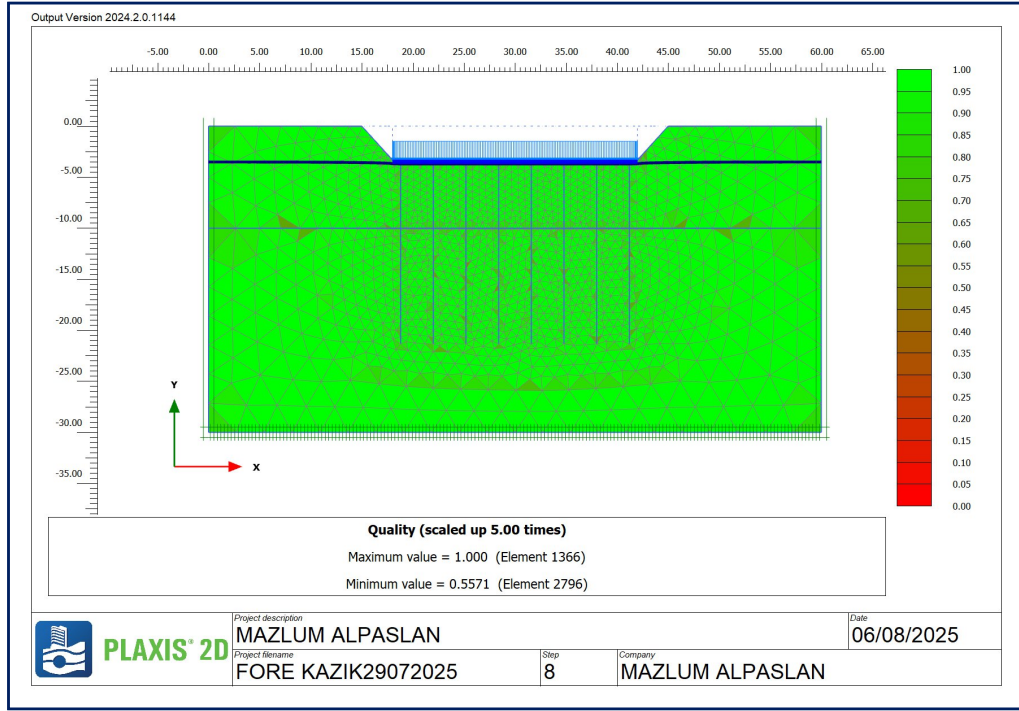
PLAXIS yazılımında, ele alınan problem için uygun bir şekilde düzlem şekil değiştirmeye ilişkin geometri modeli geliştirilmiştir. Daha doğru bir çözüm elde etmek için zemin ortamı 15 düğüm noktalı olan üçgen elemanlarla modellenmiştir. Bu geometrik modelin genişliği 60 m, zemin yüksekliği ise toplam 30 m'dir. Şekil 4.3'te oluşturulan modelin geometrisi yer almaktadır. Bu çalışmada, zayıf zemin tabakası üzerinde yer alan bir fore kazık temeli modellenmiştir. Üst yapıdan gelen yükleri taşıyıcı zemin tabakasına aktaran fore kazıklar, farklı derinliklerdeki zemin profilleri dikkate alınarak iki tabakalı bir zemin ortamında analiz edilmiştir.



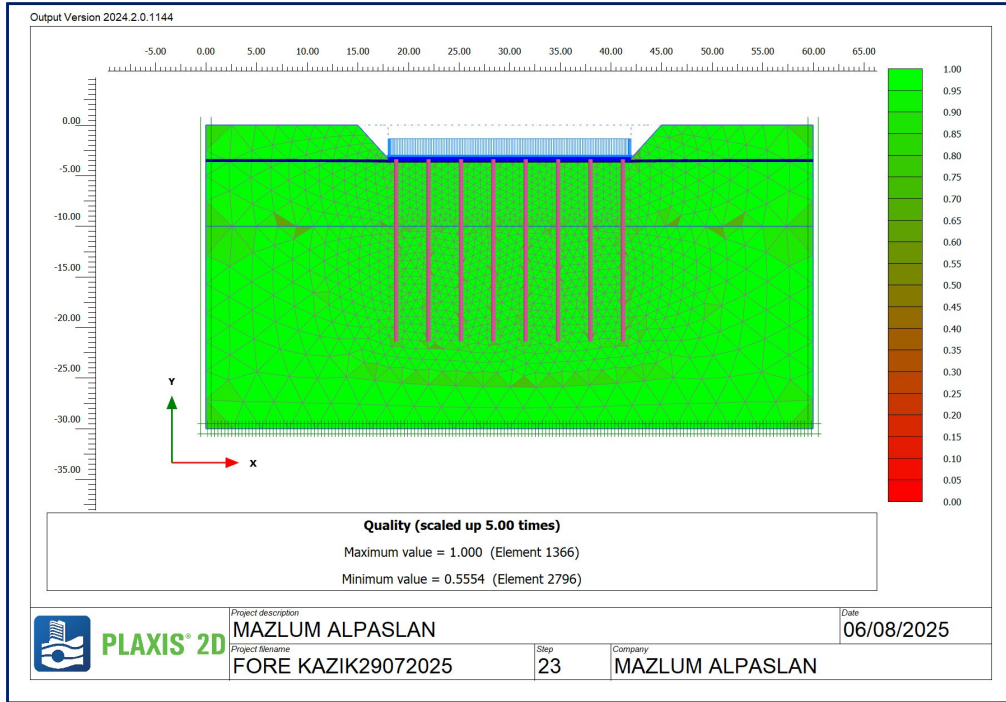
Şekil 4.3. Geometri modeli

Analizlerde, sonlu eleman ağı oluşturulurken sonuçların etkilenmediği en uygun sonlu eleman ağ yapısı (mesh) uygulanmıştır. PLAXIS’de mevcut çok kaba (very coarse), kaba (coarse), orta (medium), hassas (fine) ve çok hassas (very fine) sonlu eleman ağ yapısı seçenekleri bulunmaktadır. Analizler sonucunda hassas(fine) sonlu elemanlar ağı seçilmiştir (Şekil 4.3). Her iki modelde de üçgen sonlu elemanlar kullanılarak oluşturulan ağ (mesh) yapısının kalite dağılımı incelenmiştir. Şekil 4.4’te kazık öncesi sonlu elemanlar ağı, Şekil 4.5’te kazık sonrası sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir.

Mesh kalitesi, elemanların geometriye uygunluğu ve sayısal çözümdeki doğruluk açısından büyük önem taşımaktadır. Kazıksız modelde, mesh kalitesi 0.5571 ile 1.000 arasında değişmekte olup, minimum kalite değeri fore kazıklı modele göre çok az daha yüksek bulunmuştur. Bu modelde deformasyon alanı daha geniş olduğundan, bazı bölgelerde çözünürlük sınırlı kalmıştır. Fore kazıklı modelde ise kalite aralığı 0.5554 ile 1.000 arasında olup, mesh kalitesi genel olarak oldukça iyidir. Kazıkların varlığı, çözümün yoğunlaştığı bölgelerde daha homojen ve düzgün bir ağ yapısı oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Her iki modelde de minimum kalite değeri 0.55’in üzerinde kalmış olup, bu değer PLAXIS’in önerdiği kabul edilebilir limitlerin içindedir. Bu durum, her iki analizde de güvenilir sayısal sonuçlar elde edildiğini göstermektedir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).



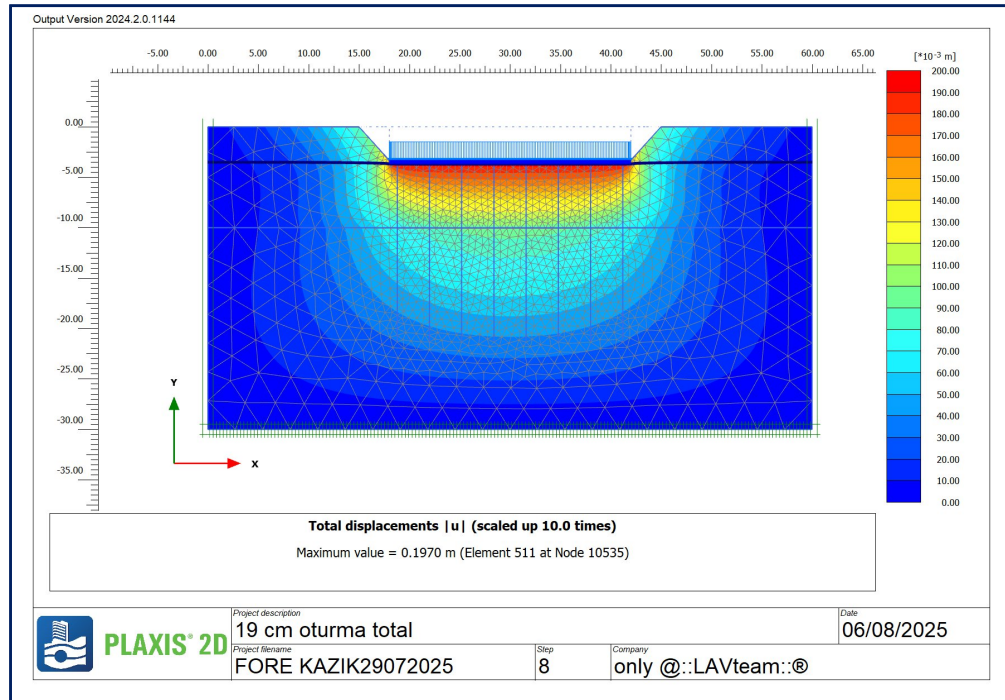
Şekil 4.4. Kazık öncesi sonlu elemanlar ağı



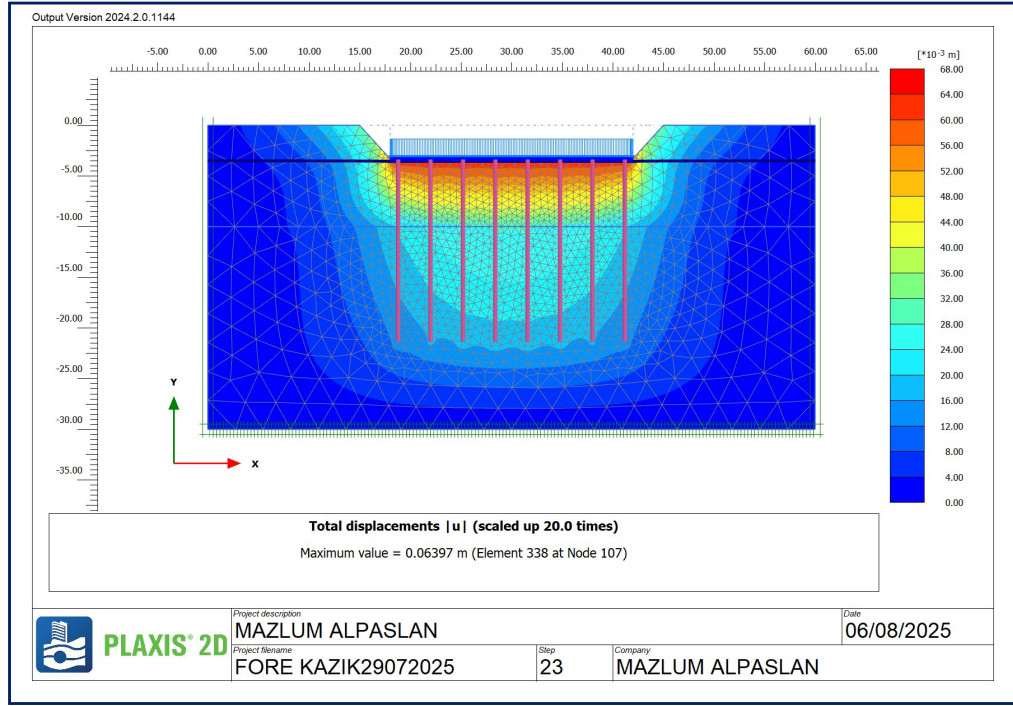
Şekil 4.5. Kazık sonrası sonlu elemanlar ağı

Şekil 4.6’da kazık öncesi toplam deformasyon, Şekil 4.7’de kazık sonrası toplam deformasyon, Şekil 4.8’de yatay deformasyon ve Şekil 4.9’da düşey deformasyon modelleri verilmiştir.

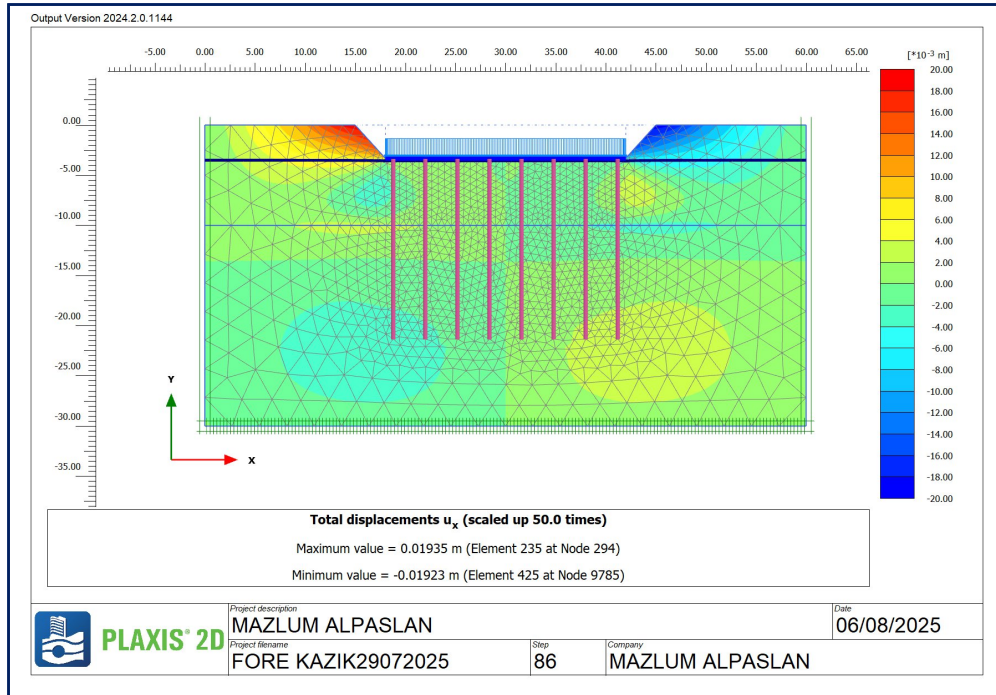
Yapılan analizler sonucunda, aynı zemin koşulları altında yapılan yapısal yüklemeler sonucu oluşan toplam yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. İlk modelde temel doğrudan zemin üzerine oturtulmuş, ikinci modelde ise yükler fore kazıklarla derin taşıyıcı zemine aktarılmıştır. Kazıksız modelde (Şekil 4.6) maksimum yer değiştirme değeri 0.1970 m olarak tespit edilmiştir. Bu yüksek oturma değeri, zeminin yüzey tabakasının düşük taşıma kapasitesi nedeniyle yapının ciddi şekilde oturduğunu göstermektedir. Fore kazıklı modelde ise (Şekil 4.7) maksimum yer değiştirme değeri 0.06397 m'ye düşmüştür. Bu değer, kazıkların zemine yük aktarması sayesinde oturmanın yaklaşık %67 oranında azaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, zayıf zemin koşullarında fore kazık sistemlerinin, oturmaları sınırlandırarak yapısal stabiliteyi önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.



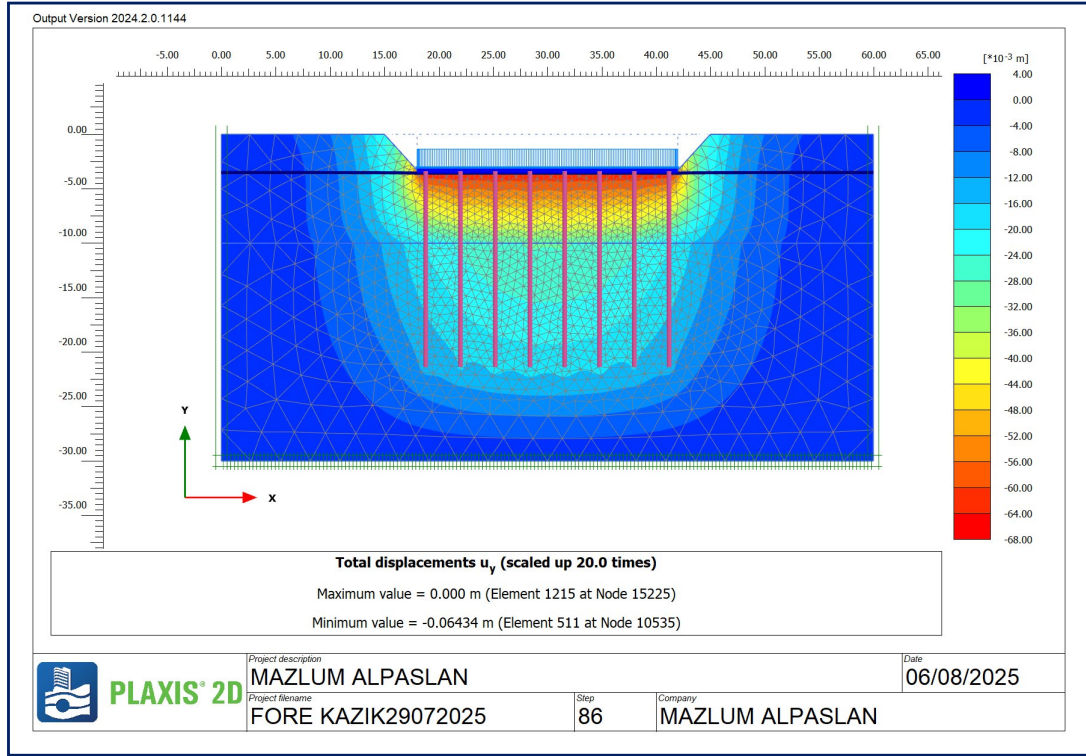
Şekil 4.6. Kazık öncesi toplam deformasyon



Şekil 4.7. Kazık sonrası toplam deformasyon

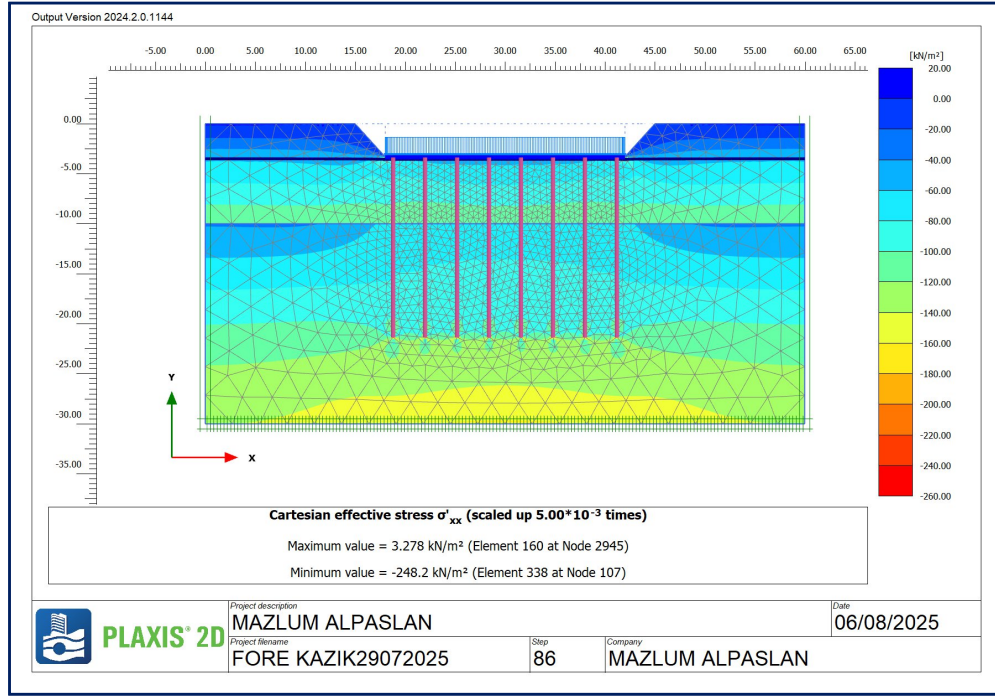


Şekil 4.8. Yatay deformasyon



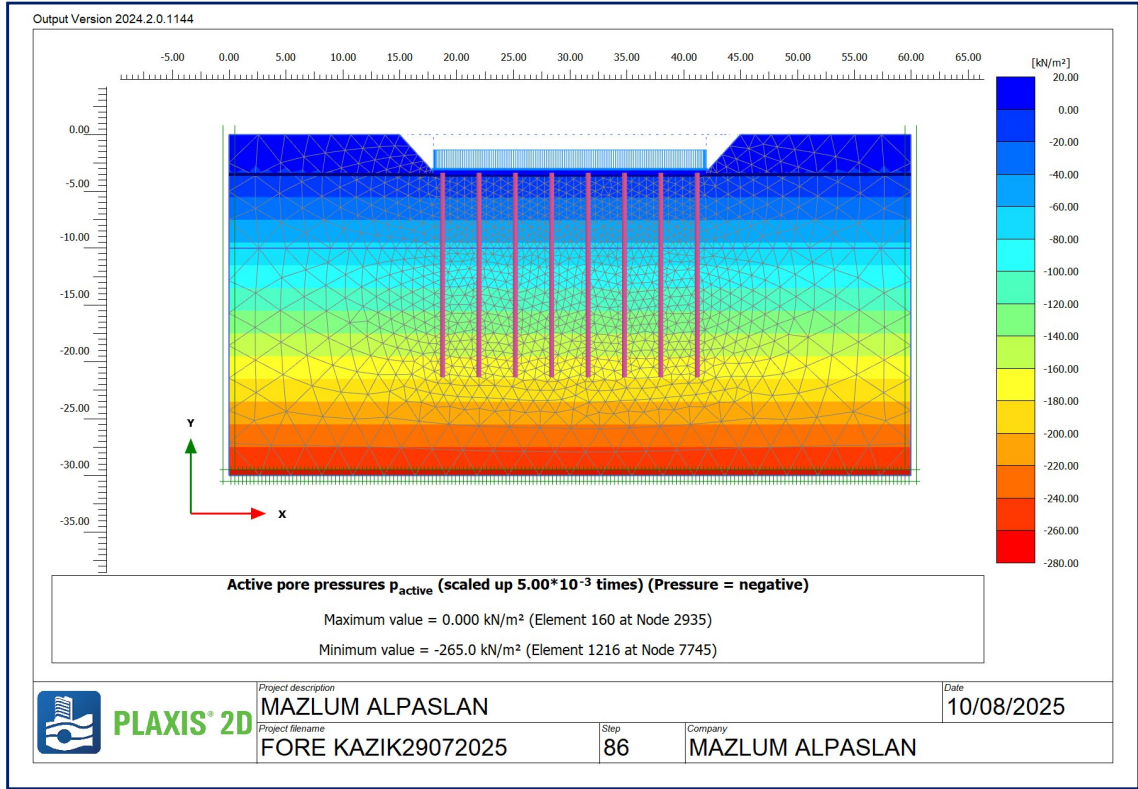
Şekil 4.9. Düşey deformasyon

Yapılan analizde, x yönündeki kartezyen efektif gerilme değerleri incelenmiş (Şekil 4.10) en yüksek gerilme 3.278 kN/m^2 , en düşük gerilme ise -248.2 kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Bu dağılım, kazık çevresinde zemin-kazık etkileşiminin yoğunlaştığı bölgelerde basınç gerilmelerinin belirginleştiğini göstermektedir.



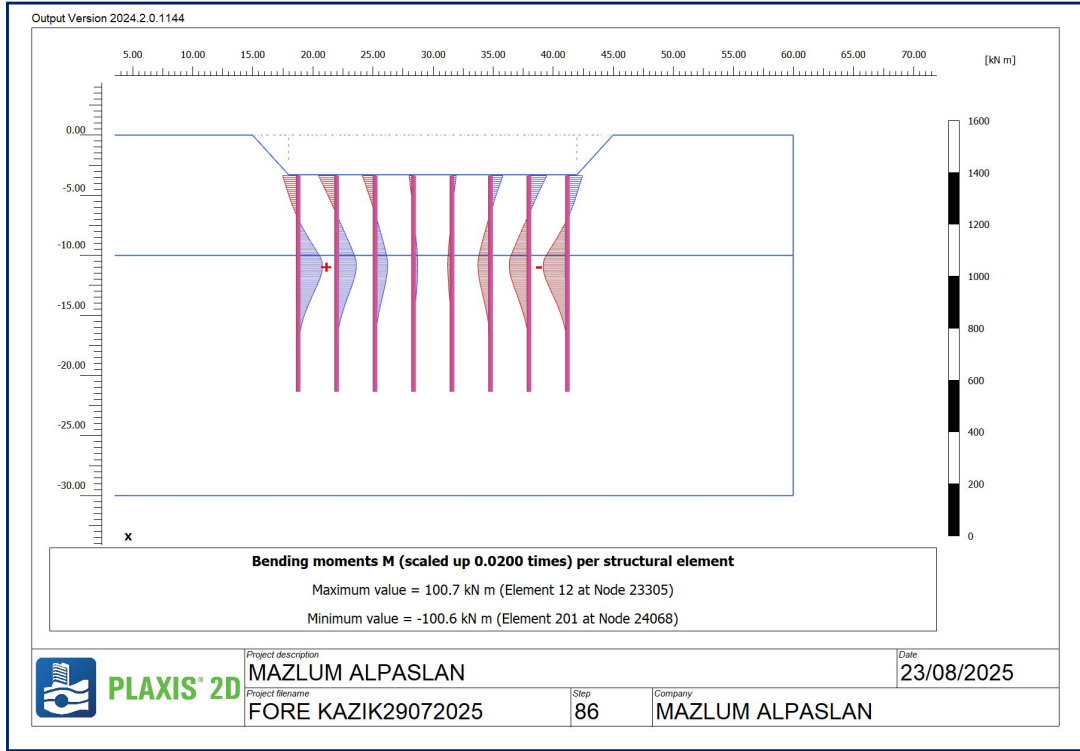
Şekil 4.10. Efektif gerilme

Şekil 4.11’de, fore kazık sistemi için hesaplanan aktif boşluk suyu basınçları hesaplanmıştır. Analiz sonucuna göre maksimum değer 0.000 kN/m² iken minimum değer –265.0 kN/m² olarak belirlenmiştir. Negatif değerlerin ortaya çıkması, drenaj koşullarının etkisiyle zeminde su basıncının azaldığını ve bu bölgelerde emici (suction) davranışının hâkim olduğunu göstermektedir. Renk dağılımı incelendiğinde, yüzeye yakın bölgelerde daha düşük basınçlar, derin tabakalarda ise daha belirgin negatif basınç değerleri gözlenmektedir. Bu durum, kazık çevresindeki tabakaların farklı geçirgenlik özelliklerine sahip olduğunu ve suyun hareketinin zemin davranışına doğrudan yansıdığını ortaya koymaktadır.



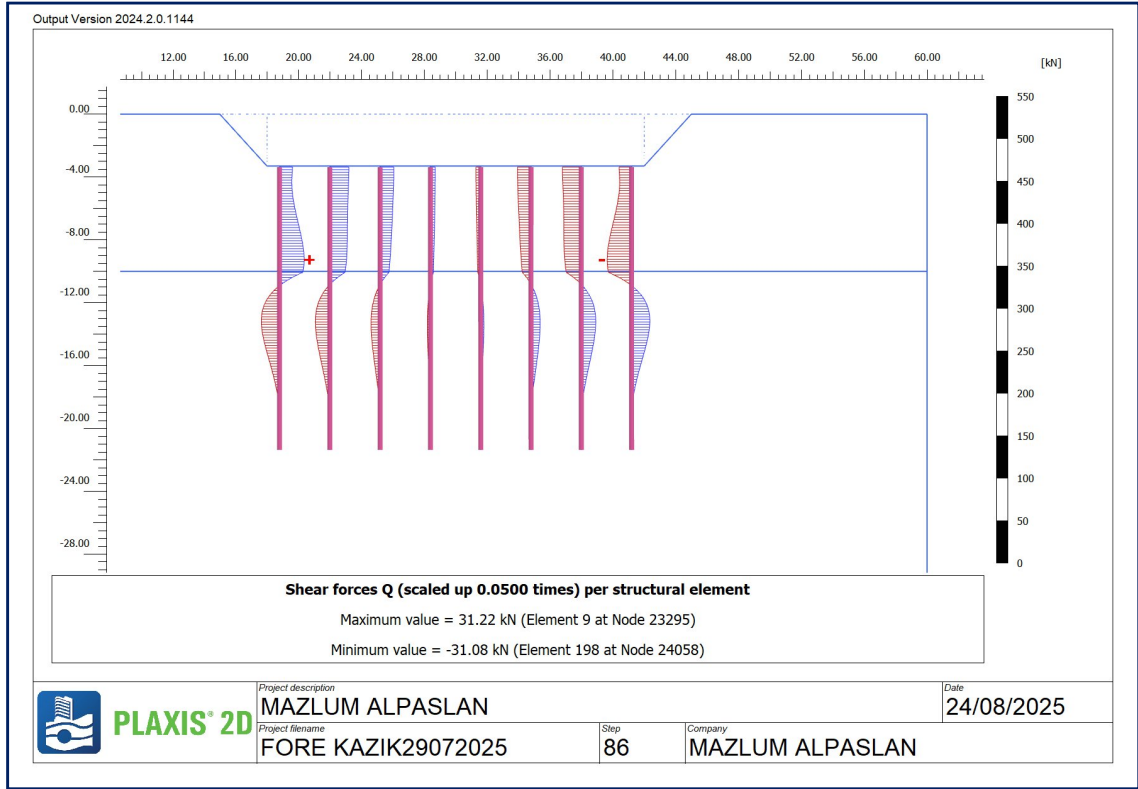
Şekil 4.11. Boşluk suyu basıncı

Plaxis 2D analizinden elde edilen eğilme momenti dağılımları Şekil 4.12’de verilmiştir. Görüldüğü üzere kazık boyunca moment değerleri derinliğe bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Analiz sonucunda elde edilen maksimum moment değeri +100.7 kNm , minimum moment değeri ise –100.6 kNm olarak hesaplanmıştır. Moment dağılımı incelendiğinde, özellikle kazık üst kotlarına yakın bölgelerde (yaklaşık 4–8 m derinlik aralığında) moment değerlerinin daha yüksek olduğu, derinlikle birlikte momentin azalarak kazık uç kısımlarında minimum seviyelere düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, yüzeye yakın tabakalarda zemin–kazık etkileşiminin daha yoğun gerçekleştiğini, dolayısıyla kazık gövdesinde en büyük eğilme etkilerinin bu bölgelerde ortaya çıktığını göstermektedir.



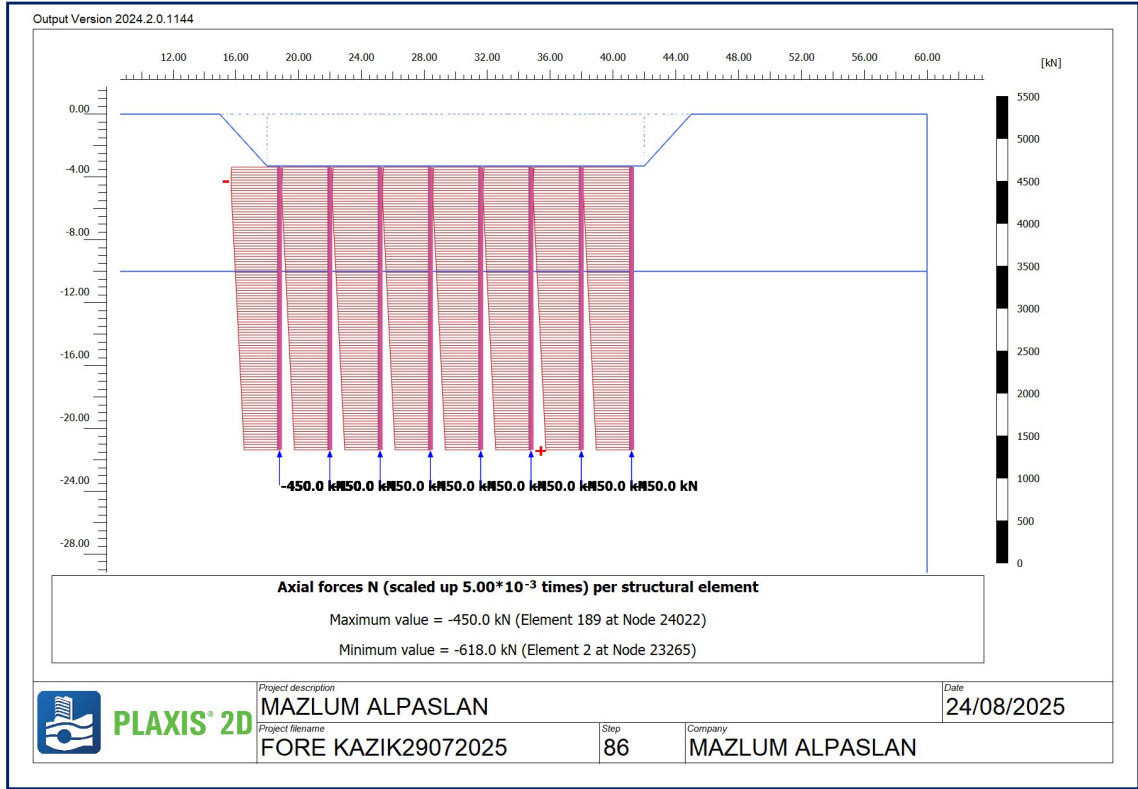
Şekil 4.12. Eğilme momenti diyagramları

Plaxis 2D analizinden elde edilen kesme kuvveti dağılımları Şekil 4.13’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, kazık boyunca maksimum kesme kuvveti +31.22 kN, minimum kesme kuvveti ise -31.08 kN olarak hesaplanmıştır. Kesme kuvveti dağılımı incelendiğinde, özellikle kazık başına yakın bölgelerde ve zemin tabaka geçişlerinin bulunduğu seviyelerde kesme kuvvetlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Derinlik arttıkça kesme kuvveti değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmekte ve kazık uçlarına doğru bu değerler minimum seviyelere ulaşmaktadır. Pozitif ve negatif kesme kuvveti değerlerinin birbirine yakın büyüklüklerde bulunması, kazıkların her iki yönde de kayma zorlanmasına maruz kaldığını göstermektedir. Bu durum, kazıkların yatay yükler ve zemin-kazık etkileşiminden kaynaklanan kesme kuvvetlerini taşımak üzere tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.



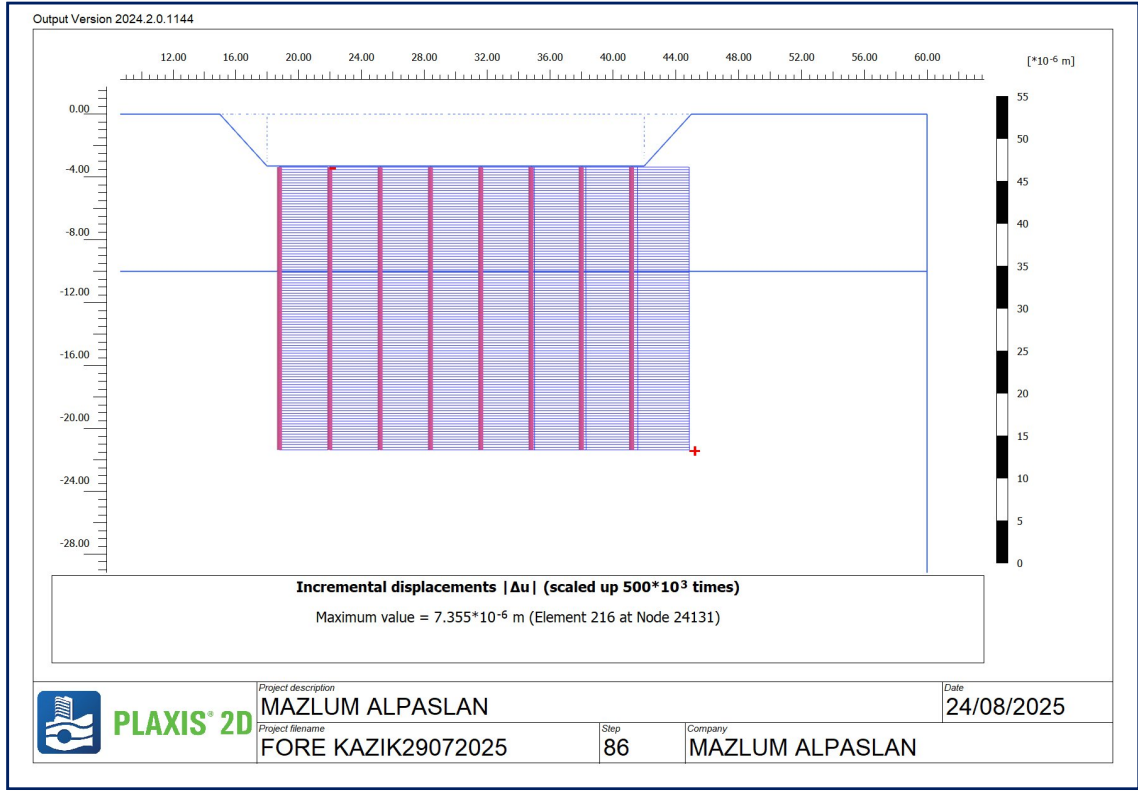
Şekil 4.13. Kesme kuvveti

Plaxis 2D analizinden elde edilen eksenel kuvvet dağılımları Şekil 4.14’de verilmiştir. Analiz sonucunda maksimum eksenel kuvvet -450.0 kN, minimum eksenel kuvvet ise -618.0 kN olarak hesaplanmıştır. Negatif işaretli değerler kazıkların basınç yükü altında olduğunu göstermektedir. Eksenel kuvvet dağılımı incelendiğinde, kazıkların derinliği boyunca basınca maruz kaldığı ve yükün büyük oranda kazık eksenini boyunca zemine aktarıldığı görülmektedir. Özellikle kazık başına yakın bölgelerde yükler daha düzenli bir dağılım gösterirken, kazık ucu bölgelerinde kuvvetlerin büyüklüğünde artış gözlenmiştir. Bu durum, kazık uç bölgelerinin taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkı sağladığını göstermektedir.



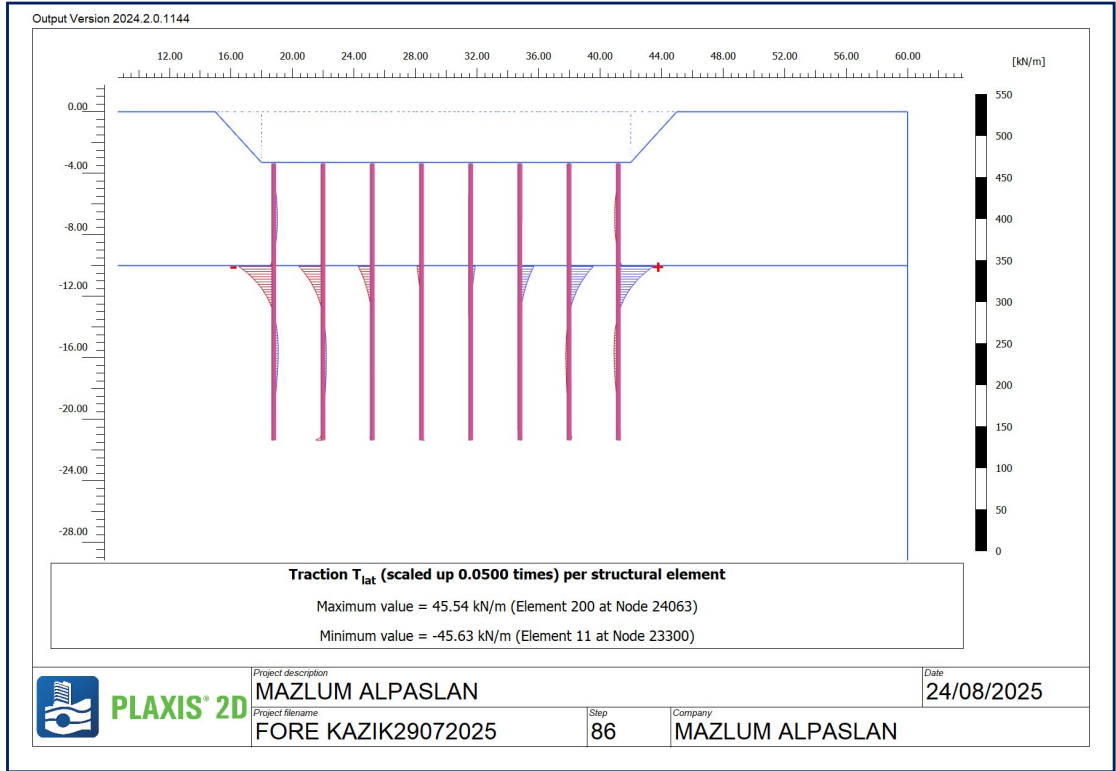
Şekil 4.14. Eksenel kuvvet dağılımları

Plaxis 2D analizinden elde edilen artımsal deplasman dağılımları Şekil 4.15’de sunulmuştur. Analiz sonucunda maksimum deplasman değeri 7.355×10^{-6} m olarak belirlenmiştir. Bu değer, fore kazıkların yer değiştirmelerinin oldukça düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir. Deplasman diyagramı incelendiğinde, kazık gövdesi boyunca deformasyonların homojen bir dağılım sergilediği ve özellikle üst bölgelerde daha sınırlı deplasman meydana geldiği gözlemlenmektedir. Derinlik boyunca deplasman değerlerinde önemli bir artış bulunmamakta, sistem genelinde oldukça rijit bir davranış sergilenmektedir.



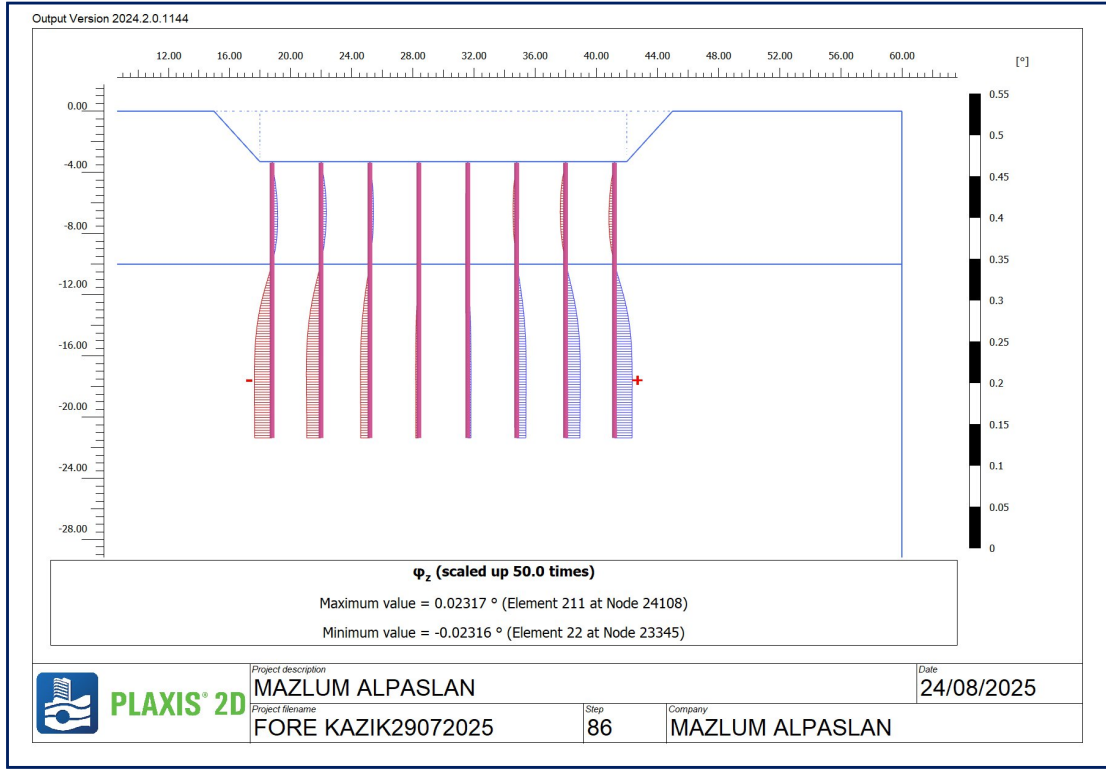
Şekil 4.15. Artımsal deplasman grafiği

Plaxis 2D analizinden elde edilen ara yüzey aderans gerilmeleri (traction) dağılımları Şekil 4.16’da sunulmuştur. Analiz sonucunda maksimum değer +45.54 kN/m, minimum değer ise -45.63 kN/m olarak hesaplanmıştır. Aderans gerilmeleri, kazık ile çevreleyen zemin arasındaki sürtünme kuvvetlerini ifade etmektedir. Diyagram incelendiğinde, özellikle üst tabakalar ile zemin geçiş bölgelerinde pozitif ve negatif yönde önemli gerilmeler olduğu görülmektedir. Bu durum, kazığın yük taşıma kapasitesine önemli katkı sağlayan çevresel sürtünme (skin friction) mekanizmasının etkinliğini ortaya koymaktadır. Pozitif ve negatif değerlerin birbirine yakın büyüklüklerde bulunması, kazığın farklı bölgelerinde hem çekme hem de basınç yönlü sürtünme kuvvetlerinin devreye girdiğini göstermektedir. Bu etkileşim, kazık grubunun taşıma gücünü artırmakla birlikte, zemin koşullarına bağlı olarak kazıklar üzerinde farklı zorlanmaların da oluşabileceğini göstermektedir.



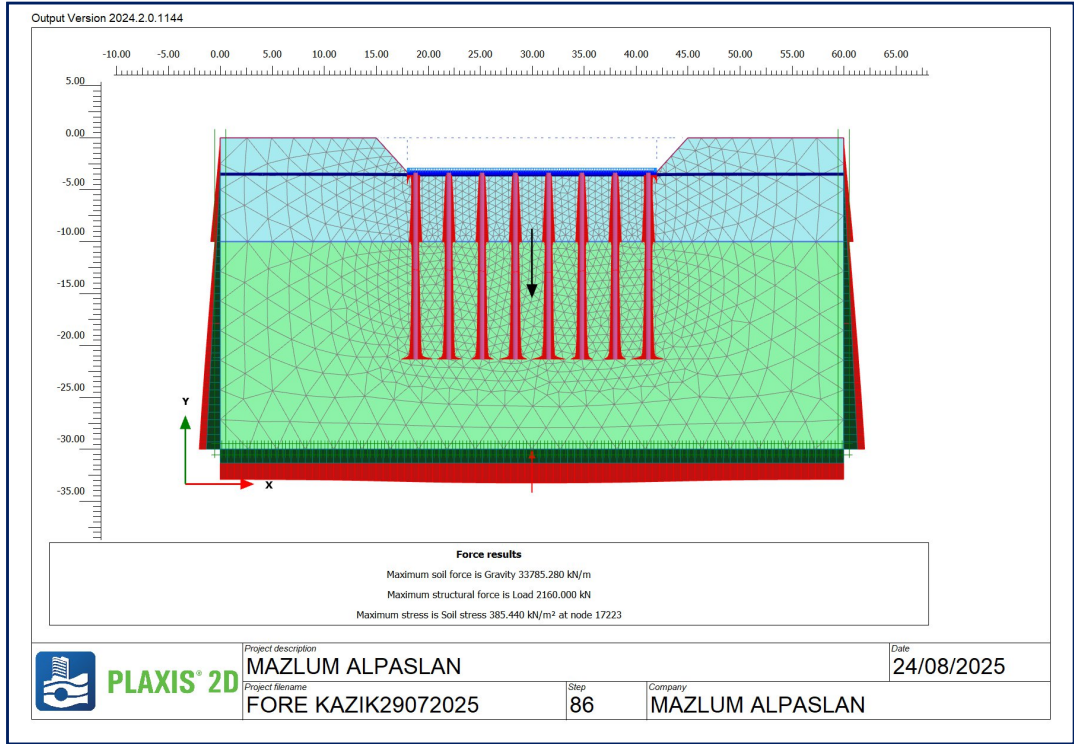
Şekil 4.16. Ara yüzey aderans gerilmeleri

Plaxis 2D analizinden elde edilen dönme (ϕ_z) dağılımları Şekil 4.17’de sunulmuştur. Analiz sonucunda maksimum dönme değeri $+0.02317^\circ$, minimum değer ise -0.02316° olarak hesaplanmıştır. Dönme diyagramı incelendiğinde, kazıkların gövdesi boyunca dönme miktarlarının oldukça düşük seviyelerde kaldığı ve sistemin genel olarak rijit bir davranış sergilediği gözlemlenmektedir. Özellikle zemin tabaka geçişlerinde ve kazık uç bölgelerinde küçük dönme değerleri ortaya çıkmış, ancak bu değerler mühendislik açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır.



Şekil 4.17. Dönme diyagramı

Şekil 4.18’de, fore kazık sisteminin Plaxis 2D ortamında oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve analiz sonuçları görülmektedir. Modelde zemin tabakaları farklı renklerle temsil edilmiş, kazıklar ise düşey doğrultuda yerleştirilerek yük taşıyıcı sistemin ana bileşenleri olarak tanımlanmıştır. Analizde kullanılan üçgen ağ (mesh) yapısı, sistemin davranışını doğru şekilde yakalayacak yoğunlukta düzenlenmiştir. Analiz bulgularına göre; maksimum zemin kuvveti 33785.280 kN/m olarak hesaplanmış, uygulanan maksimum yapısal yük ise 2160.000 kN seviyesine ulaşmıştır. Bunun yanında, zemin içerisindeki maksimum gerilme değeri 385.440 kN/m² olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kazık grubunun önemli bir kısmının yükleri derin tabakalara aktardığını ve zeminin taşıma kapasitesine etkin bir şekilde katkıda bulunduğunu göstermektedir.



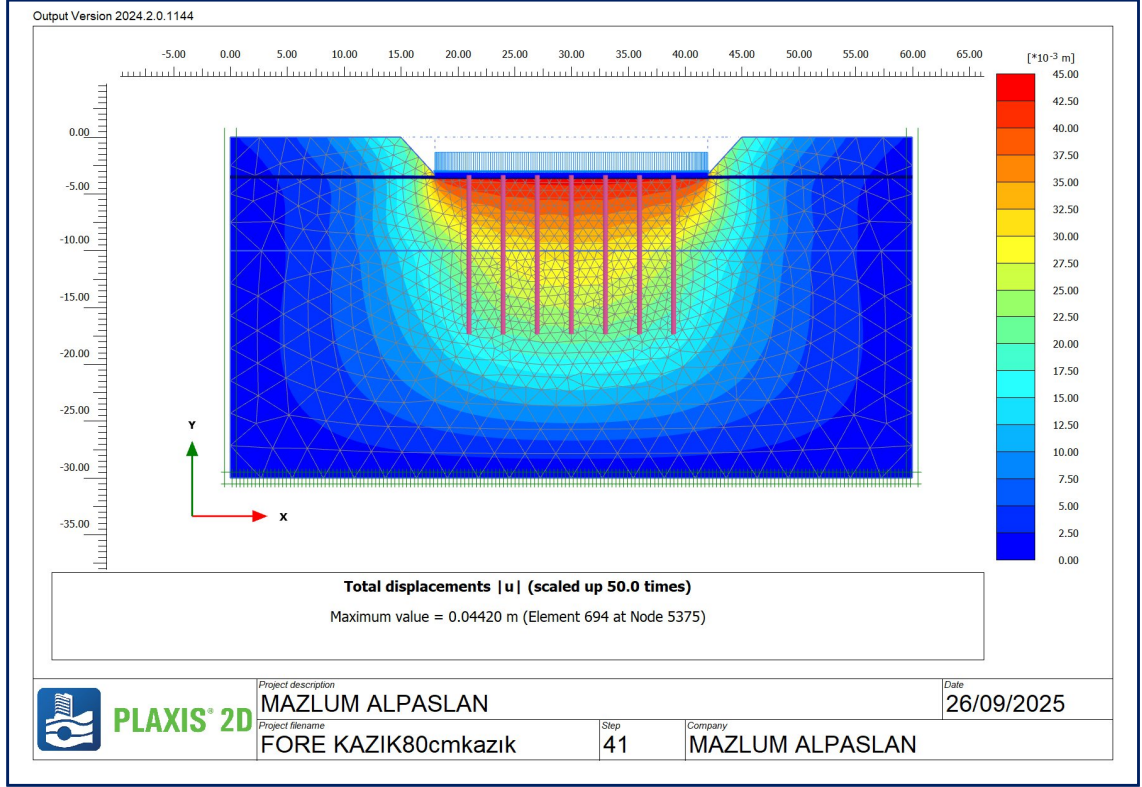
Şekil 4.18.Genel analiz sonuçları

4.2.7. Sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, kazık çapı ve uzunluk değişiminin toplam deformasyona etkisi

Zemin koşullarına bağlı olarak yapı temellerinde karşılaşılan en kritik problemlerden biri oturma davranışudur. Fore kazıklar, taşıma gücü ve oturma performansını iyileştirmek amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, kazıkların çapı, boyu ve sayısı yalnızca tekil taşıma gücünü değil, aynı zamanda grup rijitliği, shaft sürtünmesinin mobilizasyonu ve yük dağılımını da doğrudan etkilemektedir.

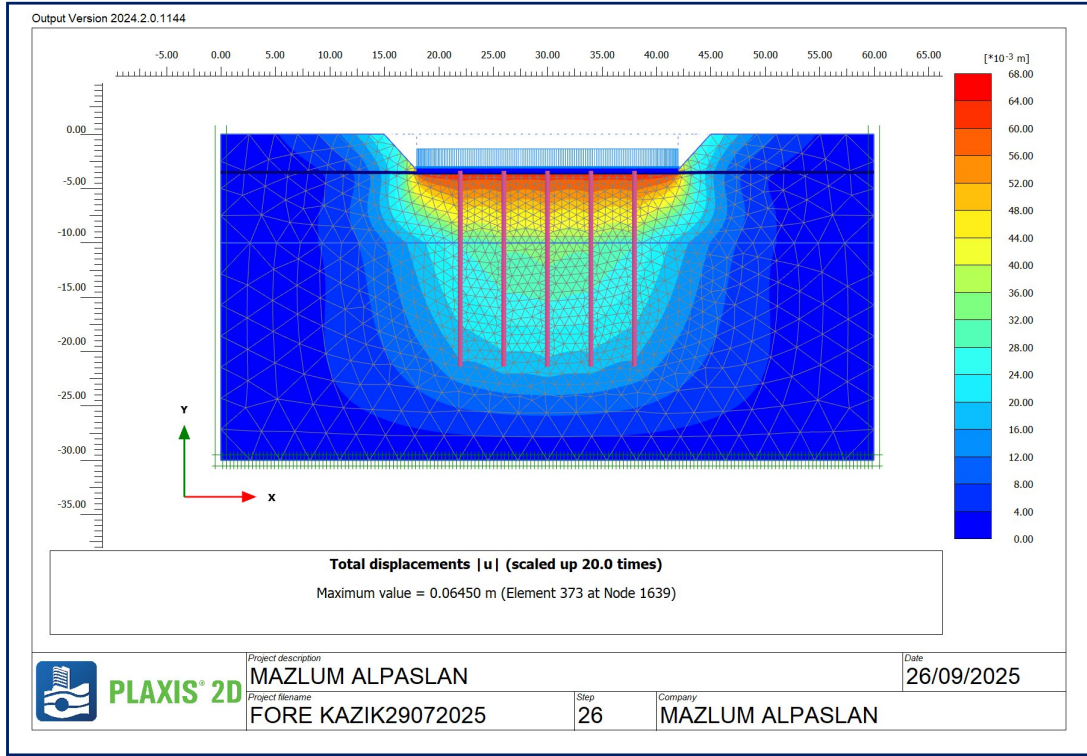
Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak üç farklı senaryo modellenmiş ve her birinde kazıkların yerdeğiştirme dağılımı değerlendirilmiştir. Farklı tasarım parametrelerinin zemin-kazık etkileşimi üzerindeki etkilerini karşılaştırarak optimum çözümün belirlenmesi amacıyla elde edilen sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

İlk senaryoda; 80 cm çapında 12 m uzunluğunda kazıklar modellenmiştir. Hesaplanan taşıma gücüne göre 26 adet kazık uygun görülmüştür. Kazıklar modellendikten sonra yapılan analizlerde 4,42 cm deformasyon ölçülmüştür(Şekil 4.19). Deformasyon zonları kazık başı altında yoğun olarak görülmüştür.



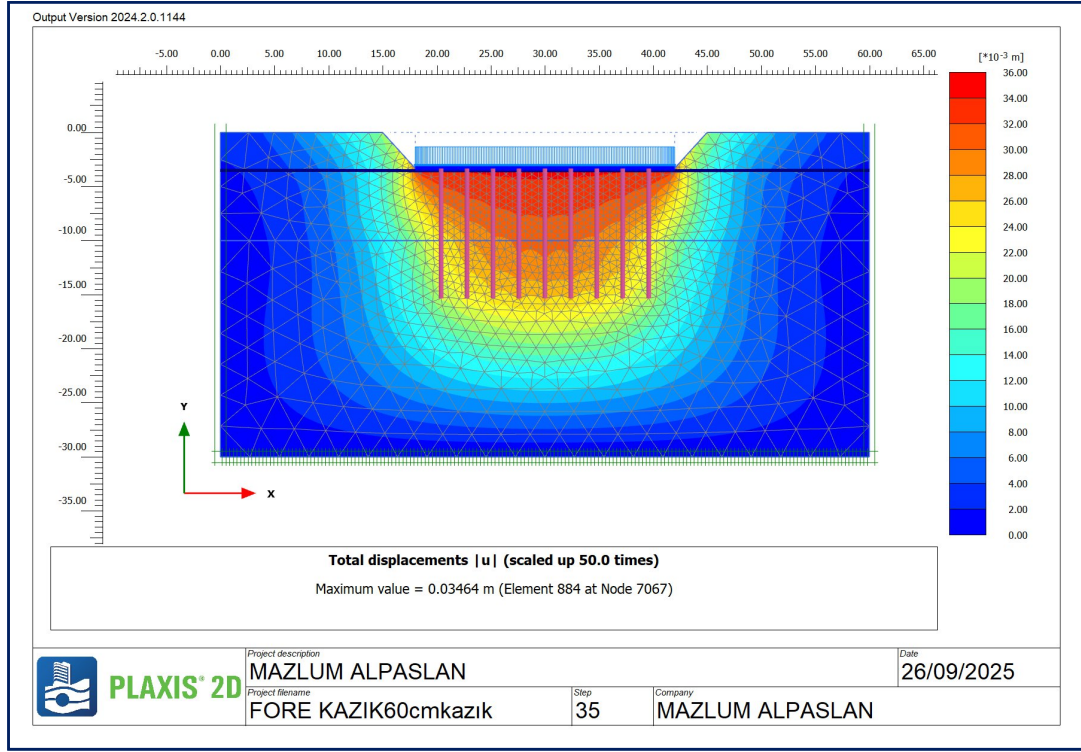
Şekil 4.19. 80 cm çap ve 12 m uzunluğundaki kazıkların analiz sonucu

İkinci senaryoda; 95 cm çapında 18 m uzunluğunda kazıklar modellenmiştir. Hesaplanan taşıma gücüne göre 21 adet kazık uygun görülmüştür. Toplam 6,45 cm deformasyon ölçülmüştür (Şekil 4.20). Deformasyon zonları görece daha geniş bir alana yayılmıştır. Çap ve uzunluğun fazla olmasından grup rijitliği daha düşüktür.



Şekil 4.20. 95 cm çap ve 18 m uzunluğundaki kazıkların analiz sonucu

Üçüncü senaryoda; 60 cm çapında 10 m uzunluğunda kazıklar modellenmiştir. Hesaplanan taşıma gücüne göre 53 adet kazık uygun görülmüştür. Toplam 3,46 cm deformasyon ölçülmüştür (Şekil 4.21). Kazık sayısının fazla olmasından dolayı yük paylaşımı artmış, deformasyon üst bölgelerde sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.21. 60 cm çap ve 10 m uzunluğundaki kazıkların analiz sonucu

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, zemin malzemesi problemlili olan bir sahada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplayan, deformasyon ve stabilite analizleri yapabilen PLAXIS 2D Foundation bilgisayar yazılımı ile sahadaki zemin iyileştirme öncesi ve sonrasında meydana gelen deformasyon ve gerilme analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, zayıf zemin tabakası üzerinde yer alan bir fore kazık sistemi modellenmiştir. Üst yapıdan gelen yükleri taşıyıcı zemin tabakasına aktaran fore kazıklar, farklı derinliklerdeki zemin profilleri dikkate alınarak iki tabakalı bir zemin ortamında analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, temel tasarımı üzerine, temel sisteminin zemin modellemeleri oluşturulup hesaplar yapılarak, statik yükler altında, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları yanı sıra toplam ve farklı oturmalar analiz edilerek yorumlanmıştır. Bununla birlikte, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak üç farklı senaryo modellenmiş ve her birinde kazıkların yer değiştirme dağılımı değerlendirilmiştir. Farklı tasarım parametrelerinin zemin-kazık etkileşimi üzerindeki etkilerini karşılaştırarak optimum çözümün belirlenmesi amacıyla elde edilen sonuçlar analiz edilerek yorumlanmıştır.

5.1. Sonuçlar

- 1) İnceleme alanında yapılan araştırmalar ve temel sondaj kuyularından genel olarak elde edilen sonuçlara göre, oluşturulan idealize zemin profili yüzeyden itibaren sırası ile 0.00-0.40 arası bitkisel toprak, 0.40-10,00 m arası inorganik killer (düşük ile orta plastisitede), çakıllı kil, kumlu kil, siltli kil, 11.00-30,00 m arası siltli kum, kum silt, tabakası olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, yeraltı su seviyesi yüzeyden 3.5 m aşağıda alınmıştır. Çalışma sahasında yapılan zemin etüt araştırmalarında, yerel zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiştir.
- 2) Kazıksız modelde, mesh kalitesi 0.5571 ile 1.000 arasında değişmekte olup, minimum kalite değeri fore kazıklı modele göre çok az daha yüksek bulunmuştur. Bu modelde deformasyon alanı daha geniş olduğundan, bazı bölgelerde çözünürlük sınırlı kalmıştır. Fore kazıklı modelde ise kalite aralığı 0.5554 ile 1.000 arasında olup, mesh kalitesi genel olarak oldukça iyidir. Kazıkların varlığı, çözümün yoğunlaştığı bölgelerde daha homojen ve düzgün bir ağ yapısı

oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Her iki modelde de minimum kalite değeri 0.55'in üzerinde kalmış olup, bu değer PLAXIS'in önerdiği kabul edilebilir limitlerin içindedir.

- 3) Yapılan analizler sonucunda, aynı zemin koşulları altında yapılan yapısal yüklemeler sonucu oluşan toplam yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. İlk modelde temel doğrudan zemin üzerine oturtulmuş, ikinci modelde ise yükler fore kazıklarla derin taşıyıcı zemine aktarılmıştır. Kazıksız modelde maksimum yer değiştirme değeri 0.1970 m olarak tespit edilmiştir. Bu yüksek oturma değeri, zeminin yüzey tabakasının düşük taşıma kapasitesi nedeniyle yapının ciddi şekilde oturduğunu göstermektedir.
- 4) Fore kazıklı modelde ise, maksimum yer değiştirme değeri 0.06397 m'ye düşmüştür. Bu değer, kazıkların zemine yük aktarması sayesinde oturmanın yaklaşık %67 oranında azaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, zayıf zemin koşullarında fore kazık sistemlerinin, oturmaları sınırlandırarak yapısal stabiliteyi önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.
- 5) Yapılan analizde, x yönündeki kartezyen efektif gerilme değerleri incelenmiş en yüksek gerilme 3.278 kN/m² olarak hesaplanmıştır.
- 6) Yapılan analizde, x yönündeki kartezyen efektif gerilme değerleri incelenmiş en düşük gerilme ise -248.2 kN/m² olarak hesaplanmıştır. Bu dağılım, kazık çevresinde zemin-kazık etkileşiminin yoğunlaştığı bölgelerde basınç gerilmelerinin belirginleştiğini göstermektedir.
- 7) Sonuç olarak, aktif boşluksuyu basıncı analizi kazıkların yalnızca yapısal yüklerle değil, aynı zamanda zemin içerisindeki su koşulları ile de etkileşim halinde olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, kazık tasarımında boşluk suyu basınçlarının dikkate alınması, özellikle uzun vadeli oturma ve stabilite değerlendirmelerinde kritik önem taşımaktadır.
- 8) Yapılan analizde pozitif ve negatif moment değerlerinin yaklaşık olarak simetrik büyüklüklerde bulunması, kazıkların hem çekme hem de basınç yönlü zorlanmalara maruz kaldığını ortaya koymaktadır. Tasarım açısından değerlendirildiğinde, özellikle kazık başına yakın bölgelerde donatı gereksiniminin daha yüksek olduğu ve bu bölgelerde boyuna donatı oranının artırılması gerektiği sonucuna varılabilir. Derinlere doğru ise moment etkisi azaldığından, kazık gövdesi daha çok eksenel yük taşımakta ve eğilme momenti etkisi sınırlı kalmaktadır.

- 9) Yapılan analizde, kesme kuvveti dağılımları kazıkların özellikle üst bölgelerinde donatı düzenlemesinde ve kesme güvenliği kontrollerinde kritik rol oynamaktadır. Derinlik boyunca azalan kesme etkisi ise kazık uç bölgelerinde daha çok aksiyel yük aktarımının ön planda olduğunu göstermektedir.
- 10) Sonuç olarak, analiz bulguları fore kazıkların esas olarak eksenel yük taşımada etkin olduğunu ve kazık uçlarının yük aktarımında kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Tasarım açısından değerlendirildiğinde, kazık boyuna donatılarının bu yük transfer mekanizmasını karşılayacak düzeyde seçilmesi gereklidir.
- 11) Yapılan analizde, elde edilen deplasman değerleri fore kazıkların taşıyıcı sistem olarak yüksek rijitlik sağladığını ve zemin–kazık etkileşimi sonucunda meydana gelen yer değiştirmelerin mühendislik açısından kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Bu bulgu, fore kazıkların güvenli ve etkin bir temel çözümü sunduğunu teyit etmektedir.
- 12) Sonuç olarak, elde edilen bulgular fore kazıkların yalnızca uç direnciyle değil, aynı zamanda çevresel sürtünme ile de yük taşıdığı gerçeğini teyit etmektedir. Tasarımda, bu ara yüzey davranışlarının dikkate alınması kazık sisteminin güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.
- 13) Sonuç olarak, elde edilen dönme bulguları fore kazıkların deplasman ve moment değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde, yapının yük aktarımı sürecinde kararlı bir davranış sergilediğini ve kazıkların rijitliklerinin sistemin stabilitesine önemli ölçüde katkı sağladığını ortaya koymaktadır.
- 14) Elde edilen genel sistem çıktısı, fore kazıkların yalnızca düşey yükleri karşılamadığını, aynı zamanda çevresel zeminle etkileşim yoluyla sistemin genel stabilitesine de katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, tasarım aşamasında fore kazıkların sadece taşıma gücü yönüyle değil, zemin–yapı bütünlüğü açısından da dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.
- 15) Yapılan analizlerde, kazık taşıma gücünün kazık tasarım parametrelerine göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür.
- 16) Sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, fore kazıklarda yalnızca çap ve boy artışının tek başına yeterli

olmadığını; kazıkların sayısı yerleşim düzeni ve grup rijitliğinin oturma davranışı üzerinde kritik rol oynadığı görülmüştür.

- 17) Üç farklı senaryodan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde 60 cm çap, 10 m uzunluk, 53 adet kazıklı senaryoda en düşük deplasmanı (0.03464 m) vermiştir. Daha küçük çaplı ve daha kısa kazıkların çok sayıda kullanılması, yük paylaşımını artırmış, şaft sürtünmesinin toplamda daha fazla devreye girmesini sağlamış ve deformasyonun üst bölgelerde sınırlı kalmasına neden olmuştur. Aynı zamanda bu çözüm, kullanılan beton hacmi açısından da en ekonomik alternatif olmuştur.
- 18) 80 cm çap, 12 m uzunluk, 26 adet kazıklı senaryoda 0.04420 m deplasman değeri ile orta seviyede performans göstermiştir. Kazık sayısı 60 cm çaplı senaryo'ya kıyasla az olduğu için grup rijitliği daha düşüktür ve bu durum oturmanın artmasına yol açmıştır.
- 19) 95 cm çap, 18 m uzunluk, 21 adet kazıklı senaryoda ise, en yüksek deplasman değerine (0.06450 m) ulaşmıştır. Büyük çap ve uzunluğa rağmen az sayıda kazık kullanılması sebebiyle grup etkisi yeterli düzeyde devreye girememiş, deformasyon derin tabakalara kadar yayılmıştır.
- 20) Bu analizlerden elde edilen bulgular, optimum kazık tasarımında çap ve boydan ziyade adet ve yerleşimin daha belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, kazık sayısının artırılmasıyla daha dengeli yük paylaşımı sağlandığı, hem malzeme verimliliği hem de oturma kontrolü açısından da daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

5.2. Öneriler

Genel olarak, kazık grupları tasarlanırken aralıklara dikkat edilmelidir. Optimum tasarım yapılmalıdır. Maliyet performans dengesi sağlanmalıdır. Gerçek saha koşullarını yansıtmak için farklı yükleme senaryoları, güvenlik katsayıları ve dinamik etkilerde ayrıca değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Ambily, A. P., & Gandhi, S. R. (2007). *Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 405–415. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:4\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(405))
- Asaoka, A. (1978). *Observational procedure of settlement prediction. Soils and Foundations*, 18(4), 87–101. https://doi.org/10.3208/sandf1972.18.4_87
- Basile, F. (2015). *Numerical analysis of piled raft foundations by finite element method. Computers and Geotechnics*, 63, 73–84.
- Brinkgreve, R. B. J. (2002). *PLAXIS scientific manual*. Balkema.
- Chandiwala, A. (2013). *Finite element analysis of piled raft foundations*. [Doktora tezi].
- Croce, P., & Flora, A. (2000). *Jet grouting: Theoretical and design aspects. Geotechnical Special Publication*, 112, 164–188.
- Çelik, S. (2010). *Taş kolonların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi*. [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Das, M. B. (2007). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Das, M. B. (2014). *Principles of foundation engineering*. Cengage Learning.
- Elwakil, A. Z., & Azzam, W. R. (2016). *Behavior of piled raft foundation subjected to vertical load. Soils and Foundations*, 56(1), 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.01.003>
- Güler, E., & Aytekin, M. (2014). *Performance of jet grout columns: Case study from Turkey. Acta Geotechnica Slovenica*, 11(1), 55–66.
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill.
- Hird, C. C., & Moseley, M. P. (2000). *Numerical modeling of vertical drain systems. Geotechnique*, 50(1), 89–105.
- Holko, J., Fiala, L., & Jendzelovský, N. (2014). *Numerical analysis of CFA piles using PLAXIS and ANSYS. Civil and Environmental Engineering*, 10(2), 35–42.
- Hunt, R. E. (1986). *Geotechnical engineering analysis and evaluation*. McGraw-Hill.
- Indraratna, B., Rujikiatkarnjorn, C., & Balasubramaniam, A. S. (2005). *Vacuum consolidation techniques*. Taylor & Francis.

- Karadağ, F. (2019). *Yalova Gençlik Caddesinde meydana gelen çökmenin Plaxis ve Slide programları ile incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi].
- Massarsch, K. R. (2005). *Deformation properties of fine-grained soils determined by field and laboratory tests. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE)*, Osaka, 1, 69–88.
- Moseley, M. P., & Kirsch, K. (2004). *Ground improvement* (2nd ed.). Spon Press.
- Önalp, A., & Sert, S. (2010). *Geoteknik bilgisi III: Bina temelleri*. Birsen Yayınevi.
- Özçep, F. (2009). *Zeminlerin geoteknik ve jeofizik analizi (inşaatların tasarımı sürecinde)*. Nobel Yayın.
- Özdemir, O. U. (2006). *Kazıklı radye temellerde taban basıncı değişiminin incelenmesi*. [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *Foundation engineering*. John Wiley & Sons.
- Plaxis. (2007). *Plaxis 3D Foundation V2 material manual*. Delft University of Technology & Plaxis bv.
- Plaxis. (2012a). *Plaxis 2D reference manual*. Plaxis B.V.
- Plaxis. (2012b). *Plaxis 2D material models manual*. Plaxis B.V.
- Priebe, H. J. (1995). *The design of vibro replacement*. Ground Engineering, 28(10), 31–37.
- Savage, W. Z., Baum, R. L., Morrissey, M. M., & Arndt, B. P. (2000). *Finite element analysis of the Woodway landslide*, Washington. U.S. Geological Survey Bulletin, 2180.
- Schanz, T., & Vermeer, P. A. (1999). *The hardening soil model: Formulation and verification. In Beyond 2000 in Computational Geotechnics: 10 Years of PLAXIS*. Balkema.
- Small, J. H. (2008). *Time-settlement behaviour of piled raft foundations using infinite elements. Computers and Geotechnics*, 35(2), 187–195.
- Şahan, M. Ü. (2016). *Yapım işlerinde zemin iyileştirme teknikleri*. [Uzmanlık tezi, İller Bankası A.Ş.].
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.
- Tomlinson, M. J. (1994). *Pile design and construction practice* (4th ed.). E & FN Spon.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY). (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).

Uzuner, B. A. (1996). *Temel mühendisliğine giriş*. Derya Kitabevi.

Uzuner, B. A. (2016). *Temel mühendisliğine giriş* (6. baskı). Derya Kitabevi.