

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ZEMİN GÜÇLENDİRMESİNDE MİKRO KAZIKLARIN
ETKİSİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Rahim Khan NASERY

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Geoteknik Bilim Dalı

OCAK 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**ZEMİN GÜÇLENDİRMESİNDE MİKRO KAZIKLARIN ETKİSİNİN
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Tez Yazarı

Rahim Khan NASERY

Danışman

Doç. Dr. Mesut GÖR

OCAK 2024

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Zemin Güçlendirmesinde Mikro Kazıkların Etkisinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi

Yazarı: Rahim Khan NASERY

İlk Teslim Tarihi: 19.12.2023

Savunma Tarihi: 15.01.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Mesut GÖR Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Hüseyin Suha AKSOY Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Abdullah İÇEN Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım ‘‘Zemin Güçlendirmesinde Mikro Kazıkların Etkisinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi’’ Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

15.01.2024

Rahim Khan NASERY



ÖNSÖZ

Nüfus ve şehirleşmenin artmasıyla barınma ihtiyacı günden güne artmakta ve ekonomik açıdan çok önemli olan tarım arazilerinin dahi inşaat amaçlı kullanıldığı bilinmektedir. Bu problemin önüne geçebilmek için Güney Kore gibi bazı ülkeler yeni binaların yapılması yerine mevcut binaların üstünde yeni katların yapılmasını önermektedir. Yapılan yeni katlar ilave yüklerin oluşmasına sebebiyet vermekte ve bu yüklerin karşılanması için farklı zemin güçlendirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Bazen de güçlendirilmesi gereken yapı, tarihi ve hasas temel sistemlerine sahip olan bir yapı olabilmektedir. Tarihi yapı temellerinin altında yapılacak çalışmalar binanın güvenliğini tehlikeye atabilmekte ya da kullanılan geleneksel iyileştirme yöntemleri yapının estetiğini bozabilmektedir. Güçlendirilmesi gereken binanın bütünlüğü, güvenliği, estetiği ve tarihi dokusunu bozmadan, dar alanlarda da çalışma imkanı sağlayan, diğer kazık türlerine nazaran daha ekonomik çözümler sunan ve son yıllarda daha çok tercih edilmeye başlanan güçlendirme yöntemlerinden biri de mikro kazıklar ile temel güçlendirme yöntemidir. Bina temelinin altında çalışmalar yapmak her zaman mümkün olamamaktadır. Bu tez çalışmasında bir yapı temelini kenarlarına dışarıdan belli bir mesafe uzaklıkta, farklı kazıklar arası mesafe ve kazık sayısı ile mikro kazıklar yerleştirilerek temel altında bulunan zeminin sıkıştırılması neticesinde bu uygulamanın taşıma gücüne etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yüksek lisans öğrenimime ve yüksek lisans tez çalışmalarına başladığım günden bugüne kadar bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, her türlü katkıyı sağlayan, her ulaşmak istediğimde kapısı açık olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, gerektiğinde profesyonel bir hoca gerektiğinde ise içtenlik ve samimiyetiyle kendilerini bana kendi öz ailemin bir büyüğü gibi hissettiren değerli hocam, tez danışmanım Doç. Dr. Mesut GÖR'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bilgi birikimi ile deneysel ve nümerik çalışmalar konusunda bana yardımcı olan ve daha doğru sonuçların elde edilmesi için duruma farklı açılardan bakmamı sağlayan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ragıp İNCE'ye, Prof. Dr. Erkut SAYIN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Sedat SAVAŞ'a en derin saygılarımı sunarım.

Kıymetli zamanımı ayırıp nümerik analizler konusunda fikirlerine danıştığım ve desteklerini benden esirgemeyen çok değerli arkadaşım Dr. Nichirvan Ramadhan TAHER'e ve bilgisayar programları konusunda kıymetli bilgi birikimlerini benimle paylaşan Yük. İnş. Müh. Mevlüt Emre ORHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımda beni yalnız bırakmayan, beni destekleyerek çalışmaların zorluğunu aşmama yardımcı olan ve iş yükümü hafifleten değerli arkadaşlarım İnş. Müh. Sayed Enayatullah SAYEDZADA'ya ve Husnulmaab RAHMANI'ye teşekkürlerimi sunarım.

Destek ve dualarını benden esirgemeyen, kendisi Afganistan'daki iç savaşlardan dolayı eğitim nimetinden mahrum kalmasına ve yaşadığı bütün zorluklara rağmen beni eğitilmiş bir birey olarak yetiştirmeye gayret edip çabalayan, topluma faydalı bir insan olmam gerektiğini sürekli kulaklarıma fısıldayan, her şart ve koşulda yanımda olan saygıdeğer annem ve bütün aileme yürekten teşekkür eder, saygılar sunarım.

Rahim Khan NASERY

ELAZIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
ABSTRACT	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIV
EKLER LİSTESİ	XVI
SİMGELER	XVII
KISALTMALAR	XIX
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı ve Amacı	2
2. TEMELLER VE KAZIK ÇEŞİTLERİ.....	4
2.1. Temel Tipleri ve Genel Özellikleri.....	4
2.1.1. Yüzeysel Temeller.....	4
2.1.2. Derin Temeller	5
3. MİKRO KAZIKLAR	7
3.1. Mikro Kazık Tanımı	7
3.2. Mikro Kazıkların Tarihi.....	8
3.3. Mikro Kazıkların Yapımı	8
3.4. Mikro Kazıkların Sınıflandırılması.....	9
3.5. Mikro Kazık Uygulamaları.....	14
3.5.1. Yeni Temel Yapımında Mikro Kazık Kullanımı.....	15
3.5.2. Mevcut Temellerin Güçlendirmesinde Mikro Kazık Kullanımı.....	20
3.6. Mikro Kazıkların Tasarımı	24
3.6.1. Yapısal Tasarım.....	25
3.6.2. Geoteknik Tasarım	29
3.6.3. Eksenel Yük Altında Grup Mikro Kazıkların Geoteknik Tasarımı	30
3.6.4. Yanal Yüklü Mikro Kazıkların Tasarımı	34
3.6.5. Mikro Kazıklar için Burkulma Hususları	40
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	45
5. MATERYAL VE METOT.....	53
5.1. Deneysel Çalışmalar	53
5.2. Kum Zemin.....	53
5.3. Rölatif Sıkılık Deneyleri.....	54
5.4. Deney Tankı, Kum Bunkerı ve Kovalı Elevatör.....	55
5.5. Radye Plaka.....	57
5.6. Kılavuz Başlık ve Çakma Aparatı	57
5.7. Model Kazıklar	58
5.8. Farklı Kazık Malzemeleri ile Zemin Arasındaki Yüzey Sürtünme Açılarının Tespiti ve Taşıma Gücü Üzerindeki Etkisi	59
5.9. Yükleme Düzeneği	60

5.10. Yük Hücresi.....	61
5.11. Veri Toplama Cihazı (Datalogger).....	62
5.12. Titreşim Cihazı (El Kompaktörü).....	62
5.13. Deplasman Ölçerler (LVDT).....	63
5.14. Zemin Yüzeyinin Oluşturulması.....	63
5.15. Laboratuvarda Düşey Yükleme Deneylerinin Yapılması	65
5.16. Deneysel Sonuçlar	69
5.17. Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	74
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	87
6.1. PLAXIS 3D Programı	87
6.2. Model Kazık Analizi	88
6.2.1. Sınır Koşulları	88
6.3. Malzeme Özellikleri	88
6.3.1. Model Zemin	88
6.3.2. Model Temel	90
6.3.3. Model Kazıklar.....	90
6.3.4. Sonlu Elemanlar Ağı	90
6.4. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı Analiz Sonuçları	91
7. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	103
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR.....	117
EKLER	123
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Zemin Güçlendirmesinde Mikro Kazıkların Etkisinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi

Rahim Khan NASERY

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2024, Sayfa: xix + 122

Nüfusun her geçen gün artması ile yapılaşmaya uygun olan zeminler azalmakta, ormanlar ve tarım arazileri gibi çevresel ve ekonomik açıdan önemli alanlar inşaat amaçlı kullanılmakta ve bu tür uygulamaların çevreye zararlı olduğu bilinmektedir. Buna alternatif olarak yapılaşmanın olması gerektiği ve arazi sıkıntısı olan yerlerde mevcut yapıların üstüne yeni katların yapılmasının, yeni yapıların inşasının önüne geçmek için uygun bir seçenek olduğu düşünülmektedir. Mevcut yapıların üstüne ek katların yapılması yapı temellerine etki eden yüklerin artmasına sebep olmaktadır. Bu durumlarda temel sistemi ve zeminin bu ilave yükleri karşılayabilmesi için güçlendirilmesi gerekmektedir. Zemin güçlendirme tekniklerinden biri olan mikro kazıkların kullanımı, zeminin taşıma kapasitesini arttırmakta ve oturmaları azaltmaktadır. Bu sebeple mikro kazıklar birçok zemin güçlendirme uygulamasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mikro kazıklar, çoğunlukla çelik malzemesinden imal edildiğinden dolayı kazık sayısı arttıkça proje maliyetleri de artmaktadır. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında, kazık sayısı ve kazıklar arası mesafenin zemin güçlendirmesi ve taşıma gücüne etkisinin belirlenmesi dolayısıyla da daha ekonomik tasarımların yapılması amaçlanmıştır. Çalışmalar kapsamında deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmış olup elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Düşey yükleme deneyleri, üç adet kazıksız ve radye temelin bir kenar, iki kenar, iki karşılıklı kenar, üç kenar ve dört kenarına 4,5 cm'lik mesafe ile mikro kazıklar yerleştirilerek oluşturulan kazık kombinasyonları üzerinde farklı kum zemini sıklıklarında ($D_r = \%10, \%40$ ve $\%65$) olacak şekilde toplamda 48 farklı deney olarak yapılmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde kazıklar arası mesafe azaldıkça, zemin sıklığı, kazık sayısı ve kazık çakılan kenarların sayısı arttıkça taşıma gücünün arttığı görülmüştür. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda nümerik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Mikro kazık, Sonlu elemanlar metodu, Taşıma gücü, Rölatif sıklık, Kazık aralığı

ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Micropiles on Soil Improvement

Rahim Khan NASERY

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

January 2024, Pages: xix + 122

With the increase of the population, the lands that are suitable for construction decreases, therefore, environmentally and economically important areas such as forests and agricultural lands are used for construction purposes and such applications are harmful to the environment. Alternatively, the construction of new floors above existing buildings is thought to be a suitable option for preventing the construction of new buildings. Additional floors lead to an increase in the loads that affect the foundations, and in such cases the soil underneath the foundation must be improved. Micropiles are widely used in many soil improvement applications to increase the bearing capacity of the soil and reduce settlement. Since micropiles are mostly made of steel material project costs increase as the number of piles increases. For this reason, within the scope of this thesis study experimental and numerical studies were carried out and compared to determine the effect of number and spacing of micropiles on soil reinforcement and bearing capacity to make more economical designs. A total of 48 experiments were carried out on 3 pileless and 45 pile combinations formed by placing micropiles at a distance of 4.5 cm on one, two, two opposite, three and four sides of raft foundations at different densities of sand ($D_r = 10\%$, 40% and 65%). The results show increase in bearing capacity when the space between micropiles decreases, and also when the soil density, the number of piles and pile-driven sides increases. Comparisons show that the numerical and experimental results are compatible.

Keywords: Micropile, Finite elements, Bearing capacity, Relative density, Pile spacing

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Yüzeysel temel [11] 5
Şekil 2.2.	Kazıklı temellerin gerekli olduğu durumlar [13] 6
Şekil 3.1.	Durum 1 mikro kazıklar, yatay ve düşey yükleri doğrudan uygun zemin tabakaya aktarma mekanizmasının şematik gösterimi [17] 10
Şekil 3.2.	Durum 2 mikro kazık sisteminin mikro kazıklar ve zeminin bir araya gelerek oluşturduğu bileşik bir bloğun gösterimi [17]..... 11
Şekil 3.3.	Mikro kazıkların enjeksiyonlama yöntemlerine göre sınıflandırmanın şematik gösterimleri [19-20] 12
Şekil 3.4.	Tipik mikro kazık kesitleri [25] 13
Şekil 3.5.	Hütte HBR 202 E ve Beretta T45 mikro kazık sondaj makineleri [26] 14
Şekil 3.6.	Köprü ayağında kullanılan mikro kazık kesiti [31]..... 16
Şekil 3.7.	Köprü ayağında kullanılan mikro kazık plan görünümü [31] 17
Şekil 3.8.	3 ve 4 ayaklı mikro kazıkla güçlendirilmiş anten kulesinin plan görünümü [32] 18
Şekil 3.9.	Devrilmiş bir rüzgar türbininin yüzeysel temeli [25]..... 19
Şekil 3.10.	Bir rüzgar türbini için mikro kazık tasarımı ve yapımı [25] 19
Şekil 3.11.	İtalya’da, Milan ve Bergamo arasındaki otoyolun genişletilmesi [15] 20
Şekil 3.12.	İtalya’da bir köprü payandasının mikro kazıklarla desteklenmesi [15]..... 21
Şekil 3.13.	Mikro kazıkların viyadük güçlendirmesinde kullanım planları [15]..... 22
Şekil 3.14.	İspanya’nın Teruel şehrinde yapılan viyadükte mikro kazık uygulaması [15] 22
Şekil 3.15.	Fransa’da bulunan Tourny Kilisesi’nin temellerinin güçlendirme planı [15]..... 23
Şekil 3.16.	Agrigento Katedral’ın güçlendirmesinde kullanılan mikro kazık planı [15] 24
Şekil 3.17.	Başlığı zeminle temas halinde olan kohezyonlu zemindeki mikro kazık grubu için blok göçme modeli [16]..... 32
Şekil 3.18.	Katmanlı zeminlerdeki kazıkların uç taşıma direnci [37] 33
Şekil 3.19.	Eğilme momenti için LPILE analiz sonucu [16]..... 36
Şekil 3.20.	Mikro kazıkların yanal yer değiştirmesi için LPILE analiz sonucu [16] 36
Şekil 3.21.	Yanal yüklemeye altında olan mikro kazık grup analizi için P-çarpmanı kavramının şematik gösterimi [42]..... 39
Şekil 3.22.	Yanal yüklemeye altında olan kazık grubunun analizi için yük-yer değiştirme ve eğilme momenti-yer değiştirme grafiklerinin gösterimi [42]..... 40
Şekil 3.23.	Karstik arazide boşlukların arasına yerleştirilen mikro kazık; (a) gerçek durum modeli, (b) yapısal kapasitenin hesaplanması için kullanılan model [44] 44
Şekil 4.1.	Temel etrafına yerleştirilen mikro kazıkların gösterimi [53] 47

Şekil 4.2.	Dikdörtgen temel ve mikro kazıkların plan ve kesit görünümü [54]	48
Şekil 4.3.	Kare temel ve mikro kazıkların plan ve kesit görünümü [61].....	50
Şekil 4.4.	Deney sistemi ve şematik gösterimi [65-67].....	52
Şekil 5.1.	Deneylerde kullanılan zemine ait granülometri eğrisi [64].....	54
Şekil 5.2.	Rölatif sıklık deneyleri [64].....	55
Şekil 5.3.	Deney tankı, kum bunker ve kovalı elevatör	56
Şekil 5.4.	Deney sisteminin şematik gösterimi [87].....	56
Şekil 5.5.	Radye plaka, bilye ve özel yük başlığı.....	57
Şekil 5.6.	Kılavuz başlık ve çakma aparatı kullanımı	58
Şekil 5.7.	Deneylerde kullanılan çelik kazıklar.....	59
Şekil 5.8.	Yüzey sürtünme açısı abağı [64].....	60
Şekil 5.9.	Yükleme düzeneği	61
Şekil 5.10.	S tipi 5 ton kapasiteli yük hücresi	61
Şekil 5.11.	Veri toplama cihazı.....	62
Şekil 5.12.	Titreşim cihazı ve kullanımı	62
Şekil 5.13.	Deplasman ölçerler (LVDT) ve radye plak üzerine yerleşimleri	63
Şekil 5.14.	Farklı rölatif sıklıklardaki zemin tabakalarının oluşturulması	64
Şekil 5.15.	Dikey kovalı elavatore kum aktarımı.....	66
Şekil 5.16.	Titreşim cihazının kullanımı	66
Şekil 5.17.	(1) Deney tankının orta noktasının belirlenmesi, (2) radye temelin yerleştirilmesi, (3) kılavuz başlıkların kullanılması, (4) kazıkların çakılması, (5) kum zemine yerleştirilen kazık uzunluğunun kontrolü, (6) kazık kombinasyonların oluşturulması.....	67
Şekil 5.18.	Deplasman ölçerlerin yerleştirilmesi	68
Şekil 5.19.	(1) Deney sisteminin düşey yüklemeye hazır hale getirilmesi, (2) yük hücresinden gelen verilerin ekranda gösterilmesi, (3) belirlenen oturma değerine ulaşıldıktan sonra deneyin sonlandırılması.....	68
Şekil 5.20.	Farklı Dr değerleri için kazıksız radye temelinin yük-oturma eğrileri.....	69
Şekil 5.21.	3x3 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=10\%$).....	70
Şekil 5.22.	4x4 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=10\%$).....	70
Şekil 5.23.	6x6 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=10\%$).....	71
Şekil 5.24.	3x3 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=40\%$).....	71
Şekil 5.25.	4x4 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=40\%$).....	72
Şekil 5.26.	6x6 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=40\%$).....	72
Şekil 5.27.	3x3 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=65\%$).....	73
Şekil 5.28.	4x4 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($Dr=65\%$).....	73

Şekil 5.29.	6x6 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri ($D_r=65$).....	74
Şekil 5.30.	Farklı kazık kombinasyonlarının $D_r=10$ sıklıktaki taşıma gücü değerleri.....	76
Şekil 5.31.	Farklı kazık kombinasyonlarının $D_r=40$ sıklıktaki taşıma gücü değerleri.....	77
Şekil 5.32.	Farklı kazık kombinasyonlarının $D_r=65$ sıklıktaki taşıma gücü değerleri.....	77
Şekil 5.33.	3x3 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri	78
Şekil 5.34.	4x4 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri	78
Şekil 5.35.	6x6 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri	79
Şekil 5.36.	Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları ($D_r=10$)	79
Şekil 5.37.	Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları ($D_r=40$)	80
Şekil 5.38.	Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları ($D_r=65$)	80
Şekil 5.39.	Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri ($D_r=10$)	81
Şekil 5.40.	Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri ($D_r=40$)	81
Şekil 5.41.	Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri ($D_r=65$)	82
Şekil 5.42.	$D_r=65$ zemin sıklığında ve kazıksız modelde yüklemekten dolayı oluşan kabarma ve yayılmalar	82
Şekil 5.43.	$D_r=65$ zemin sıklığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarma ve yayılmaların önlenmesine 3x3 kazık kombinasyonunun etkisi.....	83
Şekil 5.44.	$D_r=65$ zemin sıklığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarma ve yayılmaların önlenmesine 4x4 kazık kombinasyonunun etkisi.....	84
Şekil 5.45.	$D_r=65$ zemin sıklığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarma ve yayılmaların önlenmesine 6x6 kazık kombinasyonunun etkisi.....	85
Şekil 5.46.	Temel kenarlarına yerleştirilen kazıkların kum yayılmasının önlenmesine etkisi	86
Şekil 6.1.	3D Analizde Düğüm Elemanları [92]	88
Şekil 6.2.	PLAXIS 3D programında oluşturulan 2 ve 3 boyutlu sonlu eleman ağı.....	90
Şekil 6.3.	Farklı kazık kombinasyonlarının $D_r=10$ sıklıktaki taşıma gücü değerleri.....	93
Şekil 6.4.	Farklı kazık kombinasyonlarının $D_r=40$ sıklıktaki taşıma gücü değerleri.....	93
Şekil 6.5.	Farklı kazık kombinasyonlarının $D_r=65$ sıklıktaki taşıma gücü değerleri.....	94
Şekil 6.6.	3x3 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri	94
Şekil 6.7.	4x4 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri	95
Şekil 6.8.	6x6 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri	95
Şekil 6.9.	Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları ($D_r=10$)	96
Şekil 6.10.	Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları ($D_r=40$)	96
Şekil 6.11.	Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları ($D_r=65$).....	97
Şekil 6.12.	Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri ($D_r=10$)	97
Şekil 6.13.	Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri ($D_r=40$)	98

Şekil 6.14.	Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri ($D_r=65$)	98
Şekil 6.15.	$D_r=65$ zemin sıkılığında ve kazıksız modelde yüklemekten dolayı oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgeler (PLAXIS)	99
Şekil 6.16.	$D_r=65$ zemin sıkılığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgelerin küçülmesine 3x3 kazık kombinasyonunun etkisi (PLAXIS)	100
Şekil 6.17.	$D_r=65$ zemin sıkılığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgelerin küçülmesine 4x4 kazık kombinasyonunun etkisi (PLAXIS)	101
Şekil 6.18.	$D_r=65$ zemin sıkılığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgelerin küçülmesine 6x6 kazık kombinasyonunun etkisi (PLAXIS)	102
Şekil 7.1.	3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=10$)	103
Şekil 7.2.	4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=10$)	103
Şekil 7.3.	6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=10$)	104
Şekil 7.4.	3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=40$)	104
Şekil 7.5.	4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=40$)	104
Şekil 7.6.	6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=40$)	105
Şekil 7.7.	3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65$)	105
Şekil 7.8.	4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65$)	105
Şekil 7.9.	6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65$)	106
Şekil 7.10.	3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=10$)	106
Şekil 7.11.	4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=10$)	106
Şekil 7.12.	6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=10$)	107
Şekil 7.13.	3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=40$)	107
Şekil 7.14.	4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=40$)	107
Şekil 7.15.	6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=40$)	108

Şekil 7.16.	3x3 kazık kombinasyonu göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65\%$)	108
Şekil 7.17.	4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65\%$)	108
Şekil 7.18.	6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65\%$)	109
Şekil 7.19.	3x3 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=10\%$)	109
Şekil 7.20.	4x4 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=10\%$)	109
Şekil 7.21.	6x6 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=10\%$)	110
Şekil 7.22.	3x3 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=40\%$)	110
Şekil 7.23.	4x4 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=40\%$)	110
Şekil 7.24.	6x6 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=40\%$)	111
Şekil 7.25.	3x3 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=65\%$)	111
Şekil 7.26.	4x4 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=65\%$)	111
Şekil 7.27.	6x6 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması ($D_r=65\%$)	112

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Enjeksiyon-zemin nihai aderans mukavemeti [16].....	30
Tablo 3.2. Kohezyonlu zeminlerde mikro kazık grupları için grup tesir yüzdesi [16].....	31
Tablo 3.3. Örselenmemiş killer için ϵ_{50} değerleri [33].....	35
Tablo 3.4. Sert killer için ϵ_{50} değerleri [33].....	35
Tablo 3.5. Kumlar için zemin modülü (k) parametresinin değerleri [33]	35
Tablo 3.6. Killer için zemin modülü (k) parametresinin değerleri [33]	35
Tablo 3.7. Farklı zemin türlerine göre E_s değerleri [16]	42
Tablo 3.8. SPT-N Değerine göre çeşitli zemin türlerinin E_s değerleri [16].....	42
Tablo 5.1. Kum malzemesinin endeks özellikleri [64]	54
Tablo 5.2. Kum malzemesinin rölatif sıkılık ve sıkıştırma yöntemi arasındaki ilişkileri [64]	55
Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan çelik kazıkların özellikleri [64].....	59
Tablo 5.4. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri	74
Tablo 5.5. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri	75
Tablo 5.6. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri	75
Tablo 5.7. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri	75
Tablo 5.8. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri	75
Tablo 5.9. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri	75
Tablo 5.10. 3x3 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri	76
Tablo 5.11. 4x4 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri	76
Tablo 5.12. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri	76
Tablo 6.1. Model zemin için MC model parametreleri ($D_r = \% 10$).....	89
Tablo 6.2. Model zemin için MC model parametreleri ($D_r = \% 40$).....	89
Tablo 6.3. Model zemin için MC model parametreleri ($D_r = \% 65$).....	89
Tablo 6.4. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri (PLAXIS 3D).....	91
Tablo 6.5. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri (PLAXIS 3D).....	91
Tablo 6.6. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri (PLAXIS 3D).....	91
Tablo 6.7. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri (PLAXIS 3D).....	92
Tablo 6.8. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri (PLAXIS 3D)	92
Tablo 6.9. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri (PLAXIS 3D)	92
Tablo 6.10. 3x3 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri	92
Tablo 6.11. 4x4 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri	92

Tablo 6.12. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri 93



EKLER LİSTESİ

Sayfa

Ek- 1:	Farklı Kazık Kombinasyonlarının Yük-Oturma Eğrileri	115
---------------	---	-----



SİMGELER

A	: Kesit alanı
$A_{\text{çb}}$: Çelik borusunun alanı
$A_{\text{çç}}$: Çelik çubuğunun kesit alanı
A_{enj}	: Mikro kazık kesitindeki enjeksiyon alanı
B	: Temel genişliği (kısa kenar veya çap, m)
B_g	: Mikro kazık grubunun genişliği
c	: Kohezyon
C_c	: Narinlik oranı
D	: Mikro kazık grubunun derinliği
D_f	: Gömülü kazık boyu, temel derinliği
D_{mk}	: Mikro kazık çapı
D_{max}	: Maksimum dane boyutu
D_{min}	: Minimum dane boyutu
D_r	: Rölatif sıklık
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
$E_{\text{çb}}$: Çelik muhafaza borusunun elastisite modülü
EI	: Eğilme rijitliği
E_s	: Zemin yanıl reaksiyon modülü
E_s^{limit}	: Zeminin limit yanıl reaksiyon modülü
f_a	: Eksenel gerilme
f_b	: Eğilme gerilmesi
F_a	: Kabul edilebilir eksenel gerilme
F_b	: Kabul edilebilir eğilme gerilme
F'_b	: Kabul edilebilir eğilme gerilme
F'_e	: Euler burkulma gerilmesi
$F_{y-\text{çb}}$: Çelik muhafaza borusunun akma dayanımı
$f'_{b-\text{enj}}$: Enjeksiyon serbest basınç dayanımı
$F_{y-\text{çç}}$: Çelik çubuğunun akma dayanımı
$F_{y-\text{çelik}}$: Çelik akma dayanımı
G_s	: Özgül birim hacim ağırlığı
H	: Mikro kazıkların uç kısmından daha zayıf olan alt zemin tabakasına olan mesafe
I	: Atalet momenti
$I_{\text{çb}}$: Çelik muhafaza borusunun atalet momenti
I_{mk}	: Mikro kazık atalet momenti
ID	: Çelik muhafaza borusunun iç çapı
k	: Zemin modülü
K	: Etkin uzunluk katsayısı
L	: Mikro kazığın desteklenmeyen uzunluğu
L_a	: Aderans boyu
L_g	: Mikro kazık grubunun uzunluğu
M_{ke}	: Kabul edilebilir maksimum moment
M_{maks}	: Maksimum moment
N	: Mikro kazık grubundaki kazık sayısı

N_c	: Taşıma kapasitesinin katsayısı
$(N_1)_{60}$: Teorik serbest düşme tokmak enerjisinin % 60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı
OD	: Çelik muhafaza borusunun dış çapı
P_{ke-ak}	: Kabul edilebilir aderans kuvveti
P_b	: Basınç yükü
P_{ke-b}	: Kabul edilebilir basınç yükü
$P_{ke-ç}$: Kabul edilebilir maksimum çekme yükü
P_{kr}	: Kritik burkulma yükü
P_m	: P-çarpmanı
P_s	: Tekil mikro kazık için p-y eğrisi
$P_m p_s$: Grup içindeki mikro kazıklar için p-y eğrisi
r	: Çelik muhafaz borusunun dönme yarıçapı
r_t	: Çelik kesitinin atalet yarıçapı
R_{inter}	: Azaltma faktörü
q_1	: Üst tabakanın (daha güçlü zeminin) tepesindeki maksimum birim taban direnci
q_p	: Mikro kazıkların uçlarındaki nihai birim taban direnci
q_0	: Alt tabakanın (daha zayıf zeminin) tepesindeki maksimum birim taban direnci
Q_g	: Mikro kazık grubunun taşıma gücü
Q_p	: Uç mukavemeti
Q_s	: Sürtünme kuvveti
Q_u	: Düşey yük
Q_y	: Yatay yük
s	: Kazıklar arası mesafe
$S_{çb}$: Çelik muhafaz borusunun elastisite modülü
$\alpha_{aderans}$: Aderans mukavemeti
ϵ_{50}	: Eksenel şekil değiştirme
η_g	: Grup tesir yüzdesi (azaltma katsayısı)
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlığı
δ	: Zemin ile kazık yan yüzü arasındaki sürtünme açısı
ψ	: Dilatasyon açısı
ν	: Poisson oranı

KISALTMALAR

AASHTO	: American Society of State Highway and Transportation Official
ABAQUS	: Finite Element Computer Code
ANSYS	: Analysis System
ASDM	: Allowable Stress Design Method (Kabul Edilebilir Gerilme Tabanlı Tasarım Yöntemi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu)
CLM	: Characteristic Load Method (Karakteristik Yük Yöntemi)
FHWA	: Federal Highway Administration
FRP	: Cam Elyaf Takviyeli Plastik (Fiber Reinforced Plastic)
FS	: Factor of Safety (Güvenlik Katsayısı)
LVDT	: Linear Variable Differential Transformers (Deplasman Ölçer)
MC	: Mohr-Coulomb Model
NAVAC	: Naval Facilities Engineering Systems Command
PLAXIS	: Finite Element Code for Soil and Rock Analysis
PVC	: Polivinilklorür
SP	: Kötü Derecelendirilmiş Kum
SPT	: Standard Penetrasyon Testi
USCS	: Unified Soil Classification System (Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi)

1. GİRİŞ

Modernleşme ve büyük kentlere göçlerin hızla artmasıyla birlikte artan nüfusla beraber meydana gelen ihtiyaçları karşılamak amacıyla geçmiş yıllara oranla daha büyük, yüksek ve geniş yapıların inşasında hızlı bir artış meydana gelmiştir. Yapıların büyümesi böylece zemine aktarılacak yükün de büyümesi sonucu temel mühendisliğinin önemini daha çok ortaya çıkarmıştır. Yapının üzerine yapılacağı zemin şartları çeşitlilik göstermekte, en uygun temel sistemi seçimi daha önemli hale gelmekle birlikte teknolojinin gelişimi de bu temel sistemlerinin inşa olanağını artırmaktadır. Yapının inşa edildiği zemin, taşıma gücü, oturma, sıvılaşma gibi problemler meydana gelmeden yapıdan aldığı yükü taşıyabilecek karakteristik özelliklere sahipse yüzeysel temeller tercih edilirken, statik veya dinamik durumda bu problemlerden biriyle karşılaşılabilecek bir zemin üzerinde inşa edilen yapılarda ise derin temeller tercih edilmektedir. Bununla birlikte makine ve ekipman teknolojilerinin gelişimi ile birlikte derin temel sistemleri de gelişmiş, yapılaşmaya en müsait olmayan zeminlerin bile taşıyıcı olması sağlanmıştır [1]. Temellerin ana fonksiyonu mevcut yapı yüklerini güvenli ve ekonomik bir şekilde zemine aktarmaktır. Özellikle zayıf zeminlerde inşa edilmesi gereken yüksek katlı ve bina önem katsayısı yüksek binalarda temel sistemlerin tasarımı oldukça önemlidir [2]. Diğer yandan, nüfusun artması ve uygun zeminlerin her yerde bulunmaması nedeniyle sele ve heyelana eğilimli tehlikeli yerler, tarım arazileri ve bunun gibi çevresel açıdan çok önemli alanlar da inşaat amaçlı kullanılmaktadır. Bu inşaat uygulamalarının çevreye çok zararlı olduğu bilinmektedir. Buna alternatif olarak, mevcut binaların üstünde yeni katların yapılması, yeni yapıların inşasının önüne geçilmesi için bir seçenek olarak görülmektedir. Mevcut yapıların üstünde ek katların yapılması, yapı temellerine etki eden yüklerin artmasına sebep olacaktır. Temel sistemi ve zeminin bu ilave yükleri karşılayabilmesi için güçlendirilmesi gerekmektedir [3]. Bu amaçla, etki eden yüklere karşı zeminin taşıma kapasitesinin artırılması için çeşitli malzemeler ve yöntemler kullanılmaktadır. Geçmişten beri kullanılan yöntemlerde, iyileştirilmesi gereken zemin, istenen derinliğe kadar kazılarak güçlendirme elemanları yatay olarak yerleştirilip sonra da kazılan yer tekrar doldurulmaktadır. Bu yatay güçlendirme yöntemi zeminin yüzyıllar boyunca kazandığı mühendislik özelliklerini bozmakta, kazı ve dolgu işlemleri ekstra maliyetin oluşmasına sebep olmakta, projenin tamamlanma süresini uzatmakta ve sahada uygulanması her zaman mümkün olmamaktadır [4]. Bu nedenle, saha koşulları ve mevcut temellerin güçlendirilmesinde de kullanılabilir ve yatay olmayan iyileştirme teknikleri gerekmektedir. Bu amaçla, içi boş çelik borular, PVC borular, bambu kazıklar, çelik kazıklar, galvanizli demir veya alüminyum kazıklar gibi farklı malzemeler, güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaktadır [5]. Yatay olmayan iyileştirme tekniklerinden biri de mikro kazıkların kullanımınıdır. Mikro kazıklar, 1952'de İtalya'da uygulanmaya başlanmıştır. Kentsel ve endüstriyel yapılarda yapısal eleman ve mevcut temellerin güçlendirilmesinde, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve oturmaları azaltmak için birçok zemin

iyileştirme uygulamasında destek eleman olarak etkin bir şekilde kullanılmaktadır [6]. Çapı 150-300 mm arasında olan bu kazıklar, komşu yapılara, zemine ve çevreye rahatsızlık vermeyecek şekilde teşkil edilebilmektedir. Ayrıca mikro kazık imalatı sırasında ses ve titreşimlerin az olmasından dolayı temelin alttan desteklenmesi durumlarında, özel delgi ekipmanları ile mevcut bodrum katlarında mikro kazık uygulamaları yapılabilmektedir. Mikro kazık makine ve ekipmanlarının küçük olması fore kazık makinalarının girişinin zor olduğu kısıtlı alanlarda mikro kazık imalatlarının yapılabilmesini kolay kılmıştır. Mikro kazık makinası, gerekli ve güvenli çalışma koşullarının sağlandığı durumlarda mevcut temel ya da duvar yanında mobilize edilebilmekte ve bu şekilde mikro kazık imalatı kolaylıkla yapılabilmektedir [7].

1.1. Tezin Kapsamı ve Amacı

Yapının inşa edildiği veya mevcut bir yapının üstünde yeni katlar inşa edilecek zemin profilinin mühendislik özelliklerinin yetersiz kaldığı durumlarda çözüm önerisi olarak son zamanlarda mikro kazıklarla zemin güçlendirilmesi yöntemi de tercih edilmeye başlanmıştır. Mikro kazıkların maliyeti her ne kadar fore kazıklar kadar fazla olmasa da çoğunlukla çelik malzemesi kullanılacağından dolayı kazık sayısı arttıkça proje maliyetleri de artmaktadır. Bu nedenle, minimum sayıda mikro kazıkların kullanılması ile maksimum zemin güçlendirmesinin sağlanması projelerin maliyeti açısından çok önem taşımaktadır. Literatürde, mikro kazıkların kullanımında optimum değerlere ulaşmak için farklı tasarımlar esas alınarak yapılmış olan birçok deneysel ve nümerik çalışma bulunmaktadır. Mikro kazıklarla güçlendirilmiş radye temel sistemlerinde kazık sayısı ve kazıklar arası mesafenin değişimlerinin farklı rölatif zemin sıklıkları için deneysel ve nümerik olarak incelenmesi sonucunda elde edilen taşıma gücü ve oturma değerlerinin kazıklar arası mesafe değiştiğinde farklı değerler vereceği bilinmektedir. Bu tez çalışmasında, tüm bu hususlar göz önüne alınarak farklı kazık sayısı, kazıklar arası mesafenin optimum değerinin bulunması ve radye temelin farklı kenarlarında mikro kazıklar çakılarak bu uygulamaların taşıma gücü ve oturmalar üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, laboratuvar ortamında düşey yüklemeler yapan bir deney sistemi kullanılarak statik düşey yükleme deneyleri yapılmıştır. Mikro kazıklar, %10, %40 ve %65 olmak üzere üç farklı rölatif sıklıkta kum zemine yerleştirilip düşey yük uygulanarak yük-oturma değerleri hesaplanmıştır. Çalışmaların sonucunda, farklı kazık sayıları ve kazıklar arası farklı mesafelerin taşıma gücü ve oturmalar üzerindeki etkileri bulunmuştur.

Yapılan deneysel çalışmalar, PLAXIS 3D sonlu elemanlar programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiş olup farklı kazık kombinasyonlarının nihai taşıma kapasiteleri ve oturma değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmanın sonuçları sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak PLAXIS 3D programının benzer durumlarda kullanımının uygunluğu ve güvenilirliği araştırılmıştır.

Tez çalışması 8 bölümden meydana gelmektedir.

- Bölüm 1, tez çalışmasının giriş bölümü olup tezin konusu, amacı, içeriği, yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar hakkında genel bilgiler verilmiştir.
- Bölüm 2’de, temeller, kazık çeşitleri, temel ve kazık sınıflandırılması ile ilgili özet bilgi verilmiştir.
- Bölüm 3’te, mikro kazıkların tarihçesi, çeşitleri, sınıflandırılması, fonksiyonları, kullanım amaçları ve yük aktarma mekanizmaları ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.
- Bölüm 4’te, mikro kazıklar ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir.
- Bölüm 5’te, deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar, deney sistemi ve malzemeler ile ilgili detaylı bilgi verilmiş olup deney sonuçları verilmiş ve karşılaştırılmıştır.
- Bölüm 6’da, sonlu elemanlar metodu ve PLAXIS 3D programı hakkında bilgiler verilmiş, yapılan nümerik modelleme ve sonuçlar belirtilmiştir.
- Bölüm 7’de, deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.
- Bölüm 8’de, tez çalışmaları sonucunda bulunan sonuçlar ve önerilere yer verilmiş ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalar için tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. TEMELLER VE KAZIK ÇEŞİTLERİ

Yapıdan kaynaklanan bütün yükleri zemine kabul edilebilir gerilmelere indirgeyerek ve yeterli güvenlikle aktaran elemanlara “temel” adı verilmektedir.

Temel, yapıdan gelen yükleri güvenlikle alt zemin tabakalarına aktarmasını sağladığı için bütün mühendislik yapıların önemli bir parçası sayılmaktadır. Bu nedenle, temellerin tasarım ve yapımına çok önem arzetmektedir. Perde ve kolonlar gibi üst yapı elemanları zemine doğrudan inşa edilememektedir. Kolon ve perdelerin kesit alanlarının az olması sebebiyle oturduğu zemine dayanımının üstünde gerilmeler aktarmaktadır. Üst yapıdan gelen yüklerin daha fazla alana yayılması ve dolayısıyla oluşacak gerilmelerin azalması için kolon ve perdeler ile zemin arasına kesit alanları daha büyük olan ve “temel” adı verilen elemanlar yapılır. Temellerin önemli amaçlarından biri de, zeminde oluşacak oturmaları güvenli kabul edilen değerlerde tutmak ve farklı oturmaları önlemektir.

Temellerin, taşıma kapasitesi şartı ve oturma şartı gibi sağlaması gereken iki şart mevcuttur [8]. Taşıma kapasitesi şartı tasarım yükünün, temeli oluşturan malzemelerin ve temel zeminin taşıma kapasitesini aşmaması gerektiğini belirtmektedir. Oturma şartı ise, yapının kullanım ömrü boyunca yapıda oluşacak farklı oturmaların belirlenen sınırlar içinde kalması gerektiğini ifade etmektedir. Temeller, aşağıdaki amaçların yerine getirilmesi için inşa edilir.

- Yapı yükünü oldukça geniş bir alana yayması,
- Farklı oturmaların önlenmesi için gelen yükleri zemin yüzeyine eşit bir şekilde yayması,
- Temel tarafından taşınan tüm yapı elemanlarının yana doğru hareketlerini engellenmesi,
- Tüm yapının stabilitesini sağlamak için yapılır [9].

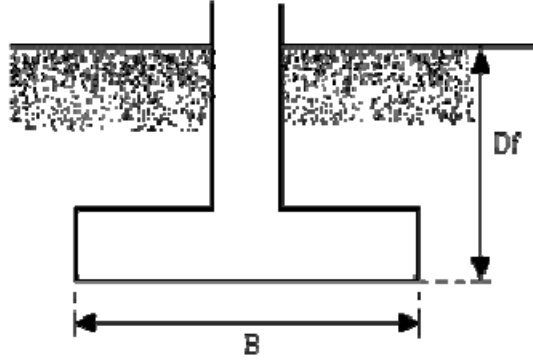
2.1. Temel Tipleri ve Genel Özellikleri

Günümüzde temelleri, “yüzeysel” ve “derin” temeller olarak ayrılmakta olup tasarım ve uygulamalar bu iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmektedir [10].

- Yüzeysel (sığ) temeller (tekil temel, birleşik temel ve yayılı temel)
- Derin temeller (kazıklar, ayaklar ve kesonlar/kutular)

2.1.1. Yüzeysel Temeller

Derinliği genişliğinden ($D_f < B$) daha az olan temeller yüzeysel temel olarak adlandırılmaktadır. Yüzeysel temeller, sağlam zemin tabakaların yüzeye yakın olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Derin temellere kıyasla yapımları daha ekonomik ve kolaydır. Şekil 2.1’de yüzeysel bir temelin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.1. Yüzeysel temel [11]

Burada;

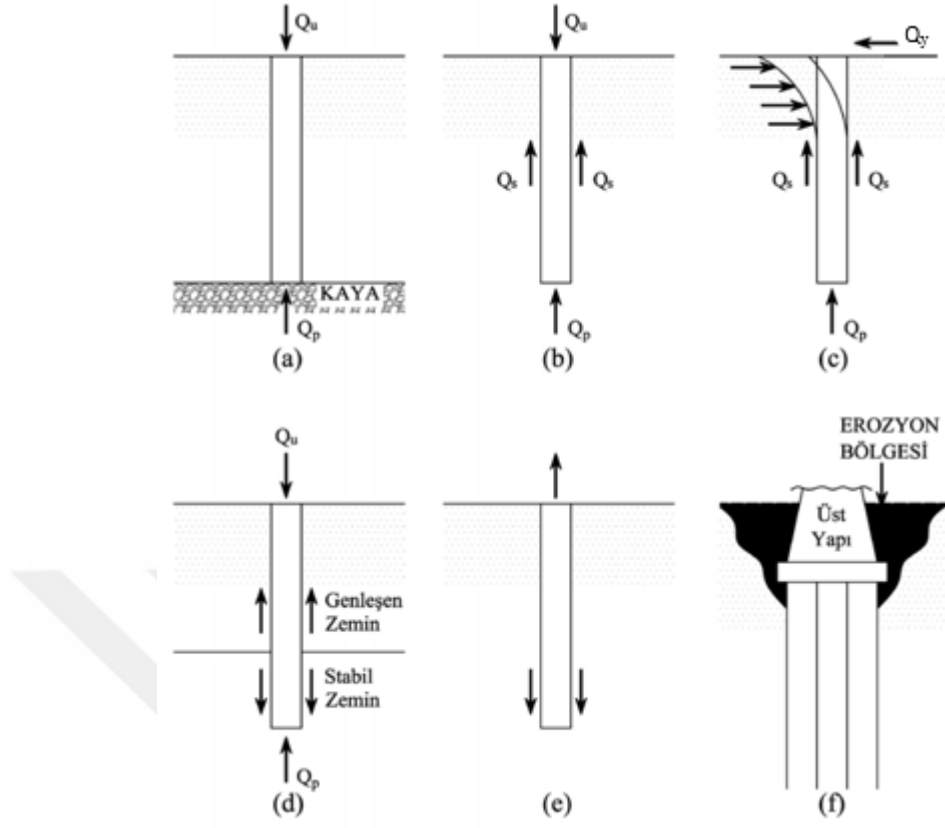
- D_f : Temel derinliğini,
- B : Temel genişliğini göstermektedir.

2.1.2. Derin Temeller

Temel derinliğinin genişliğinden daha büyük olduğu ($D_f > B$) temeller, derin temel olarak adlandırılmaktadır. Derin temeller için derinliğinin temel genişliğine oranı (D_f/B) genellikle 4-5 kat olarak kabul edilmektedir. Yüzeysel temellerin aksine derin temeller, üst yapının yükünü kayaya veya zemin yüzeyinin derinlerinde bulunan sağlam katmanlara aktarır. Derin temeller, yapıdan gelen yüklerin yüzeysel temeller tarafından taşınmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi derin temeller kazıklar, ayaklar ve kesonlar olmak üzere farklı kategorilere ayrılmaktadır.

Kazık Temeller

Kazıklar, kazıklı temellerin inşasında kullanılan ahşap, beton, çelik ve kompozit malzemelerden imal edilen yapı elemanlarıdır. Çapı, derinliğine kıyasla çok daha küçük olduğundan dolayı kazıklar derin temel olarak kabul edilmektedir. Yüzeysel temellere göre maliyeti yüksek olmasına rağmen bazı durumlarda yapı güvenliğinin sağlanması için kullanılması bir gereklilik haline gelebilmektedir [12]. Şekil 2.2'de kazıklı temellerin kullanılmasını gerektiren bazı durumlar tanımlanmıştır [13].



Şekil 2.2. Kazıklı temellerin gerekli olduğu durumlar [13]

Kazık Temel Çeşitleri

İmalatında kullanılan hammadenin cinsine bağlı olarak kazıklar; ahşap, beton, çelik ve kompozit (karmaşık) olmak üzere dört ana grupta irdelenebilmektedir [14].

1. Ahşap kazıklar
2. Betonarme Kazıklar
 - a) Çakma betonarme kazıklar
 - b) Yerinde dökme kazıklar
 - c) Yerinde dökme betonarme çakma kazıklar
- d) Fore kazıklar
- e) Mini kazıklar
- f) Mikro kazıklar
3. Çelik kazıklar
4. Kompozit kazıklar

3. MİKRO KAZIKLAR

Mikro kazıklar, 1950'lerden beri tarihi yapıların güçlendirilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [15]. Son yıllarda, saha testleri, fiziksel modelleme ve sonlu elemanlar analizi yoluyla mikro kazıkların farklı zeminlerdeki performansının değerlendirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapısal ve geoteknik bakış açısından, mikro kazıklarla güçlendirilmiş temellerin performansı, genellikle diğer kazık türleri ile güçlendirilmiş temellerin performansına benzemektedir. Kazıklı radye ve diğer temellerin performansı geniş çapta araştırılırken, mikro kazıklı radye ve mikro kazıklarla güçlendirilmiş temellerin performansı nadiren araştırılmıştır. Geometri, kapasite ve performans özellikleri açısından diğer kazık çeşitleri ile mikro kazıklar arasındaki dikkate değer farklılıklar nedeniyle, kazıklı radye ve diğer kazıklı temellerin analiz ve tasarımı için geliştirilen yöntemler mikro kazıklara doğrudan uygulanamayabilmektedir. Bu nedenle, dünyanın farklı ülkelerinde düzenlenen yönetmeliklerde mikro kazıkların tasarım ve uygulamaları ile ilgili ayrı bölümlere yer verilmiştir. Mikro kazıkların tasarım ve uygulamalarını en kapsamlı şekilde ele alan yönetmeliklerden biri, Amerika Birleşik Devletleri'nin Federal Karayolu İdaresi (FHWA) tarafından 2005 yılında yayınlanan Mikro Kazık Tasarımı ve Yapımı (Micropile Design and Construction) yönetmeliğidir.

Bu bölümde, araştırmanın kapsamına giren konularla ilgili kapsamlı bilgiler sunulmaktadır. Mikro kazıkların geoteknik ve yapısal tasarımı, taşıma kapasitesi ve davranışıyla ilgili ayrıntılı bilgiler verilecektir. Farklı zemin koşullarında ve çeşitli yükleme türlerinde (düşey ve yatay) mikro kazıkların performansı ile ilgili detaylı bilgiler sunulacaktır. FHWA'nın mikro kazıkların tasarım, yapım, yöntem ve tekniklerine ilişkin önerdiği ilkelerle ilgili detaylı bilgi verilecektir.

3.1. Mikro Kazık Tanımı

Mikro kazıklar, Federal Karayolu İdaresi (FHWA) tarafından çapı 300 mm'ye eşit veya daha küçük olan içi boş kazıklar olarak tanımlanmaktadır. Doğaları gereği narindirler, küçük çap/uzunluk oranına sahiptirler ve dolayısıyla yükün büyük kısmını yüzey sürtünmesi yoluyla zemine aktarırlar. Mikro kazıklar genel olarak donatı ve enjeksiyon (proje koşullarına göre beton) olmak üzere iki elemandan oluşmaktadır. Mikro kazıklar, delgi ekipmanlarıyla sondaj kuyusunun açılması, yapılan delgi içerisine çelik boru, çelik çubuk, donatı veya özel bir takviye çeliği yerleştirildikten sonra enjeksiyonlanması sırasıyla imal edilmektedir. Çoğu zaman mikro kazık imalatı, sondaj delgilerin çökmesinin önlenmesi için geçici veya kalıcı muhafaza boruları kullanılarak yapılmaktadır. Mikro kazıklar, hem basınç hem de çekme yüklerini taşıyabilmektedir. Mikro kazıklar, sistemin genel yük taşıma kapasitesini artırmak için bir kazık başlığı veya hasır ile bağlanan gruplar halinde

tasarlanabilmektedir. Mikro kazıklar aynı zamanda mini kazık ve sürtünme kazığı olarak da adlandırılmaktadır [16].

3.2. Mikro Kazıkların Tarihi

Mikro kazıklar, esas olarak tarihi veya hassas yapıları güçlendirmek için ilk olarak Avrupa'da kullanılmıştır. Mikro kazıkların kullanımının ilk olarak İtalya'da 1950'lerde Fernando Lizzi tarafından başladığı kabul edilmektedir [17]. O zamandan beri, mikro kazık tasarımı ve inşası alanında çok sayıda araştırma yapılmıştır. Günümüzde mikro kazıklar, kazık desteği, çevre ve zemin iyileştirme, kazı ve şev stabilitesi dahil olmak üzere çeşitli alanlarda etkin ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Eskiye ve tarihi yapıların, çevre ve yapıdan gelen sürekli yüklere karşı koyması için güçlendirilmesi gerekmektedir. Mikro kazıkların çok yönlülüğü birçok eski yapının etkili bir şekilde güçlendirilmesine olanak sağlamıştır. Mikro kazıklar, Avrupa'daki anıt ve yapıların restorasyonunun ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir [15]. Hassas tarihi yapıları ciddi sismik olaylardan korumaya yönelik yapılan çalışmalar mikro kazık uygulamalarının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Sondaj ekipmanlarındaki teknolojik gelişme ve yenilikler, mikro kazıkların hemen hemen her zemin ve saha koşulunda inşa edilebilmesine olanak vermiştir. Özel sondaj makineleri ve üretilen yeni malzemeler, mikro kazıkların yük taşıma kapasitesinin 500 kN'un üzerine çıkmasını mümkün kılmıştır [17]. Mikro kazıklar, farklı açılarda, minimum titreşimin gerekli olduğu ve sınırlı alana sahip olan yerlerde kolaylıkla inşa edilebilmektedir.

Tasarım hususları büyük ölçüde mevcut zemin türüne bağlıdır. Mikro kazıkların kapasitesi, yüzey sürtünmesi, uç taşıma direnci ve yapısal kapasitenin bir kombinasyonudur. Kil, kum ve kayadaki zemin özellikleri değişkenlik gösterdiğinden ötürü, tasarım yüklerini güvenli sınırlar içinde tutmak için mikro kazık tasarımında farklı varsayımların yapılması gerekli olmaktadır.

3.3. Mikro Kazıkların Yapımı

Son yıllarda güçlü sondaj ekipmanlarının gelişmesi ile farklı açılarda, her türlü zemin koşullarında, minimum gürültü, titreşim ve rahatsızlık ile mikro kazıkların uygulanması mümkün olmuştur. Ayrıca, uygulamalarda kullanılan bu güçlü ekipmanlar, çapı 300 mm'ye ve derinliği 60 m'ye kadar olan mikro kazıkların inşasına olanak vermektedir. Ek olarak, bu ekipmanların diğer kazık ekipmanlarına nazaran daha küçük olması, kısıtlı alanlarda bile çalışma imkanı sağlamakta ve mevcut temellerin güçlendirmesini mümkün kılmaktadır [18].

Mikro kazıklar, uygulanması planlan zeminde istenen derinliğe kadar sondaj delgisi açılarak inşa edilmektedir. Seçilen sondaj yöntemi, mikro kazıkların derinliğine, boyutuna ve zemin koşullarına bağlıdır. Delme işlemi sırasında, açılan delgi içerisine istenmeyen materyallerin düşmemesi için

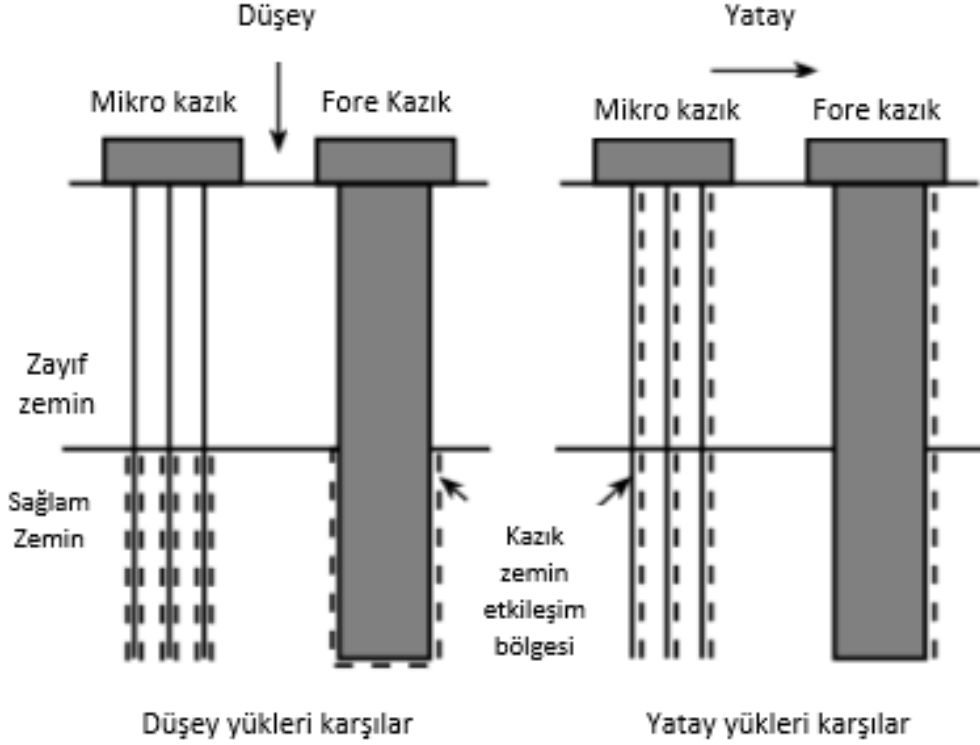
çelik borular kullanılmaktadır. Delme işlemi sonrası, genellikle çelik çubuklar veya çelik borulardan oluşan ve tüm hacmin yaklaşık %5 ile %8'ini oluşturan çelik takviye elemanı yerleştirilmektedir. Daha sonra, açılan delgiye enjeksiyon yapılmaktadır. Zeminle sürtünmenin artması ve enjeksiyonun çevredeki zeminin içine sızabilmesi için geçici muhafaz boruları belli yüksekliklerle yukarı kaldırılarak enjeksiyonlama işlemi basınç verilerek yapılmaktadır. Bazı durumlarda mikro kazıkların yanal rijitliğinin artması için geçici muhafaza boruları tamamen çıkarılmamaktadır [19].

3.4. Mikro Kazıkların Sınıflandırılması

Mikro kazıklar, inşaat ve çevre mühendisliği gibi birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Mikro kazıklar, şev stabilitesinden yeni temel projelerine kadar çeşitli şekillerde ve farklı yerlerde kullanılabilir. Tasarımları ise zemin ve mikro kazıkların taşıması beklenen yüklerin türüne bağlıdır. Tasarımlarda genellikle donatılı mikro kazıklar kullanılmaktadır. Bazen, koşullara göre düşük taşıma kapasiteli mikro kazıklar herhangi bir yapısal çelik olmaksızın yalnızca beton kullanılarak tasarlanıp uygulanabilmektedir. Yapısal çelikler tipik olarak boru, H-profil, ve içi boş çelik çubuklardır. Mikro kazıklar hem sahada hem de laboratuvar ve fabrikalarda imal edilebilmektedir. Tasarımda kullanılan enjeksiyon mukavemeti su/çimento oranına bağlıdır [19]. Büyük çaplı delgiler doldurulurken daha iri daneli agrega kullanılabilir. Mikro kazıklar genellikle tasarım amaçlarına, yapısal bileşenlerine, karşılaşılan zemin katmanlarına ve yapılış yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır.

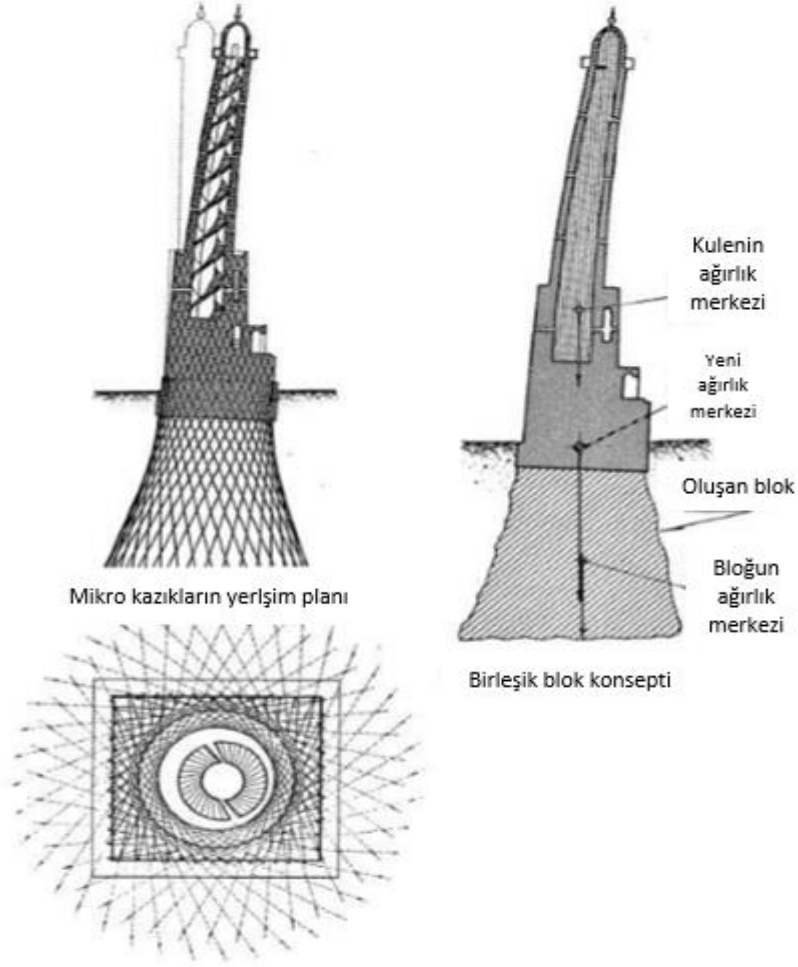
Federal Karayolu İdaresi (FHWA, 2005) [16], iki kritere göre bir sınıflandırma şeması ortaya koymaktadır. FHWA mikro kazıkları, sayı (CASE 1, CASE 2) ile sembolize edilen davranış veya amacına göre ve enjeksiyon-zemin aderans kapasitesini tanımlayan ve harflerle (Type A, Type B, Type C, Type D) gösterilen enjeksiyonlama yöntemine göre sınıflandırmaktadır. Amaca göre sınıflandırmasında mikro kazıklar, durum 1 (CASE 1) mikro kazık ve durum 2 (CASE 2) mikro kazık olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmada, yükün zemine aktarılış biçimi esas alınmaktadır. Durum 1'deki mikro kazıklar doğrudan yüklenen kazıklar olarak tanımlanmaktadır. Bu kategorideki mikro kazıklar doğrudan ana temel sistemi olarak yüklenmekte, uygulanan yükün çoğunu taşımakta, eksenel ve/veya yanal yönde yüklenen yükü enjeksiyon-zemin arasındaki aderans ve yüzey sürtünmesi yoluyla doğrudan uygun tabakaya aktarmakta ve çevreleyen zemin tarafından desteklenmektedir. Bu tür mikro kazıklar tekil veya gruplar halinde tasarlanabilmektedir. Dünya çapında kullanılan mikro kazıkların %90'ı durum 1 mikro kazık olarak tanımlanmaktadır [16]. Durum 1 mikro kazıkların yük taşıma ve uygulanan yüklerin zemine aktarma mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. Durum 2'deki mikro kazıklar ise mevcut bir temel sisteminin taşıma kapasitesini artırmak, şevleri stabilize etmek veya oturumları azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, uygulanan yükü doğrudan taşımadığı ve sadece zemin

iyileştirmesinde kullanıldığı için durum 2'deki mikro kazıkların imalatında durum 1'e kıyasla daha az miktarda çelik çubuğu veya diğer çelik takviye elemanları kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Durum 1 mikro kazıklar, yatay ve düşey yükleri doğrudan uygun zemin tabakaya aktarma mekanizmasının şematik gösterimi [17]

Durum 2 mikro kazıklar Dr. Fernando Lizzy tarafından geliştirilmiştir. Bu mikro kazıklar tüm uzunluk boyunca birbirine bağlanarak üç boyutlu bir ağ oluşturmak için tasarlanmıştır [15]. Mikro kazıklar iç içe geçecek şekilde yerleştirilerek yapının altında kompozit bir blok oluşturulmaktadır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi oluşan bu blok, yapının ağırlık merkezini daha aşağı bir noktaya taşımakta ve yapının devrilmesini önlemektedir. Durum 2 mikro kazık sistemi, mikro kazıklar ve zeminin bir araya gelip bileşik bir blok oluşturarak gelen yükü zemine aktarır [17]. Bu tür mikro kazıklar genellikle çelik takviyeli değildir ve sadece merkezlerinde çelik bir çubuk yerleştirilir [16].



Şekil 3.2. Durum 2 mikro kazık sisteminin mikro kazıklar ve zeminin bir araya gelerek oluşturduğu bileşik bir bloğun gösterimi [17]

Enjeksiyonlama yöntemine göre sınıflandırmasında mikro kazıklar, A Tipi, B Tipi, C Tipi ve D Tipi olmak üzere dört farklı kategoriye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmada, enjeksiyonun yerleştirilme yöntemi esas alınmaktadır. Mikro kazıkların imalatında kullanılan enjeksiyon, su ve çimento karışımından oluşmaktadır. Toplam maliyetin azaltılması amacıyla ve tasarımın gereksinimlerine göre enjeksiyona kum eklenebilmektedir [16].

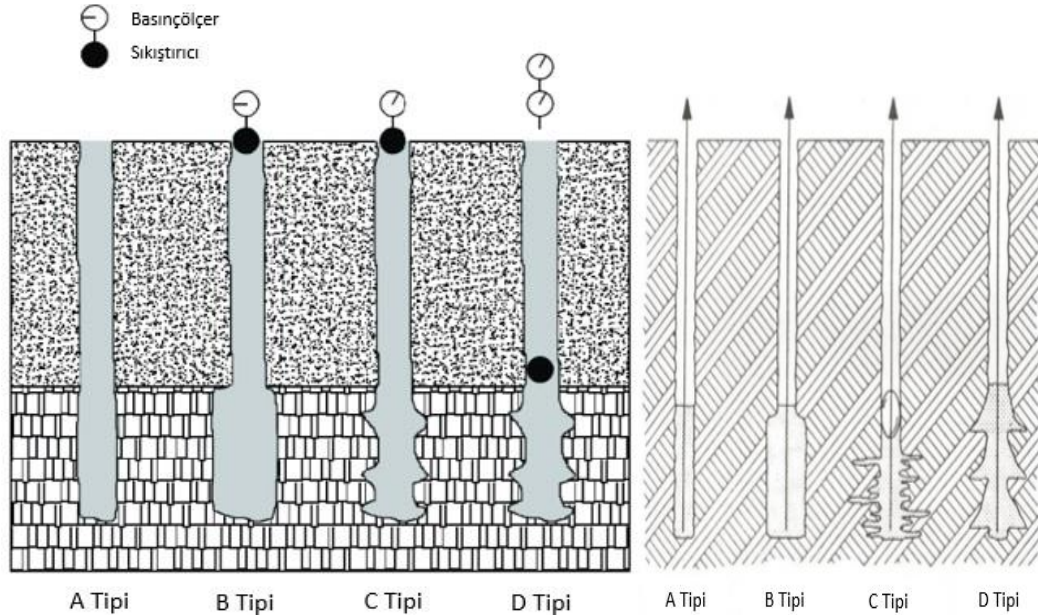
A Tipi enjeksiyonlamada açılan delgi, ekstra basınç kullanılmadan yukarıdan beton dökülerek doldurulmaktadır. Bu yöntem geçmişte yaygın bir şekilde kullanılırken günümüzde daha az uygulanmaktadır. Uygulamalarda saf çimento veya kum-çimento enjeksiyonu kullanılmaktadır. Bu tip mikro kazıkların davranışı, diğer basınçlı enjeksiyon tiplerine kıyasla daha düşük yüzey sürtünmesi ile karakterize edilen fore kazık sistemine benzemektedir.

B Tipi enjeksiyonlama yönteminde enjeksiyon, yaklaşık 0,5 ila 1 MPa basınç uygulanarak yerleştirilmektedir. Enjeksiyonlama işlemi sırasında enjeksiyonun sondaj kuyusunun etrafındaki zemine karışabilmesi için muhafaza borusu yukarı çekilmektedir. Bu tip mikro kazıklarda

enjeksiyonun basınç etkisi altında zeminin gözeneklerine nüfuz etmesinden dolayı yüzey sürtünme değeri yüksek olmaktadır.

C Tipi mikro kazık enjeksiyonlama işlemi iki aşamada yapılmaktadır. İlk aşamada, A Tipi enjeksiyonlamaya benzer şekilde açılan delgiye enjeksiyon uygulaması yapılır. Ardından enjeksiyon sertleşmeden, 15-25 dakika sonra özel bir manşonlu enjeksiyon borusu kullanılarak en az 1 MPa basınç uygulanıp enjeksiyonlama işleminin ikinci aşaması tamamlanmaktadır. B tipi mikro kazıklara benzer şekilde, enjeksiyonun zemine nüfuz ederek zemin-çimento karışımı (soilcrete) oluşturmamasından dolayı yüzey sürtünme değeri yüksek olmaktadır. C Tipi mikro kazıklar Fransa ve Avrupa'nın bazı bölgelerinde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır [19].

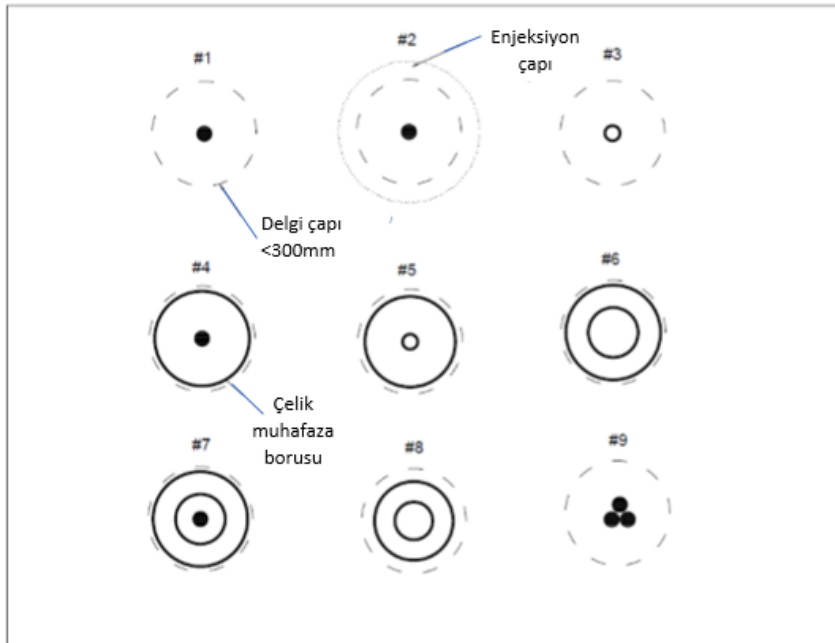
D Tipi, C Tipi mikro kazıklara benzer şekilde iki aşamalı bir enjeksiyon işlemi ile yapılmaktadır. Bu yöntemde, A Tipi enjeksiyonlamaya benzer şekilde açılan delgiye enjeksiyon yerleştirilmekte ve sertleşene kadar ikinci aşamaya geçilmemektedir. Yerleştirilen enjeksiyon sertleştikten sonra, manşonlu enjeksiyon borusu aracılığıyla 2-8 MPa basınç ile ilave enjeksiyon enjekte edilmektedir. Enjeksiyonlama işleminin her aşamasının tamamlanmasından sonra şekil 3.3'te gösterilen geometrinin elde edilmesi için sıkıştırıcı makineler kullanılmaktadır. Bu kazık tipi dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tipte, birden daha fazla yerde yüksek basınçla enjeksiyon uygulandığından dolayı yüzey sürtünme değeri B ve C tiplerinden daha yüksek olmaktadır. Enjeksiyon-zemin aderans değeri A Tipi mikro kazıklardan yaklaşık %63 daha yüksektir [16]. Şekil 3.3'te farklı şekilde enjeksiyonlama yöntemlerinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.3. Mikro kazıkların enjeksiyonlama yöntemlerine göre sınıflandırmanın şematik gösterimleri [19-20]

1983'te dişli ve içi boş çubuklar halinde olan, matkap ucuna bağlanıp hava veya su basıncı kullanılarak zemine yerleştirilen yeni nesil mikro kazıklar tasarlanmıştır. Daha sonra enjeksiyon, 1,0-1,5 MPa bir basıncı ile matkap ucundaki deliklerden geçecek şekilde içi boş çubuğun içerisine enjekte edilmektedir. Bazı araştırmalarda içi boş çubuk mikro kazıklar, B Tipi mikro kazıklar olarak kategorize edilmektedir. Diğer yandan bu kazık tipini E Tipi (FHWA tarafından belirtilen A'dan D'ye dört tipin tamamlayıcısı) mikro kazık olarak tanımlamışlardır [21]. Ek olarak, Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Derneği'nde içi boş çubuk kazıkları E Tipi mikro kazık olarak tanımlamıştır [22]. İçi boş çubuk mikro kazıkların, delginin açılmasından sonra elik takviye elemanın yerleştirilmesi ve enjeksiyonlama işlemi aynı anda yapılabilmekte ve tek adımda imal edilebilmektedir. Uygulanan basıncıdan dolayı enjeksiyonun çapı delginin çapından daha büyük olmaktadır. Bu koşullar altında, E Tipi mikro kazıklar, çekme ve basıncı yükü altında iyi performans göstermekte ancak küçük çapları nedeniyle yanal yüke karşı çok etkili olamamaktadır [23].

Mikro kazıklar, karstik alanlarda, pekleşen kil ve kireçtaşı gibi her türlü zeminde uygulanabilmektedir. Mikro kazıklar, 5 ila 50m arasında değişen derinliklerde hemen hemen her uygun zemin tabakasına yerleştirilebilmektedir. Mikro kazıklar, mevcut zeminin değişen özellikleri göz önünde bulundurulurken tasarlanır. Tasarımda kum, kil ve kaya olmak üzere dikkate alınan üç ana zemin türü mevcuttur. Silt, akıl, akan kumlar, büyük boşluklar ve diğer jeolojik özelliklere sahip olan zeminler için hibrit tasarım yöntemleri (Hybrid Design Methodology) kullanılmaktadır [24]. Projelerde kullanılan mikro kazıkların kesit şekli, zemin türüne ve uygulanan yük çeşit ve kombinasyonlarına bağlıdır. Mikro kazıkların tasarımında kullanılan farklı kesitler şekil 3.4'te gösterilmektedir.



şekil 3.4. Tipik mikro kazık kesitleri [25]

3.5. Mikro Kazık Uygulamaları

Mikro kazık uygulamaları çoğunlukla zor delme koşullarında, dar alanlarda ve büyük kesonların veya kazık çakmanın gerekli olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. 1980'li yıllarda kullanımı yaygınlaştığından bu yana köprüler, ticari yapılar, konut yapıları, rüzgar türbinleri ve anten kuleleri gibi birçok yeni inşaat projesinde uygulanmıştır. Kazıkların rahat bir şekilde çakılmasını veya büyük çaplı fore kazıkların inşasını engelleyen kayalık zeminlerin olduğu yerlerde mikro kazıklar kullanılmaktadır [19]. Mikro kazık sondaj makineleri, şekil 3.5'te gösterildiği gibi diğer tipik inşaat ekipmanlarından boyutça daha küçük olduğundan dolayı daha dar alanlara kolaylıkla yerleştirilebilmektedir.



Şekil 3.5. Hütte HBR 202 E ve Beretta T45 mikro kazık sondaj makineleri [26]

Mikro kazıklar ilk olarak mevcut yapıları güçlendirmek, oturmaları azaltmak ve temelin altındaki zeminin taşıma kapasitesini artırmak amacıyla kullanılmıştır. 4G ağların ve teknolojinin gelişmesiyle ek ekipman eklenen mevcut anten ve elektrik kuleleri, mikro kazık tasarım ve inşasını gelişen bir işlem haline getirmiştir. Mikro kazıklar genellikle oturmaların oluştuğunun fark edildiği yerlerde kullanılmaktadır. Bu tür projelerin çalışma alanları genellikle dar olmakta ve dolayısıyla büyük makinelerin girmesi her zaman mümkün olamamaktadır. Mikro kazıklar, yüzeysel temellerin oturması, tekil temellerin zemine batma veya yapıya gelen güçlü bir yer hareketi durumunda devrilmenin beklendiği yerlerde uygulanarak mevcut yapıya ek stabilite sağlamaktadır. Doğası gereği ince ve uygulanırken yapıya zarar verecek derecede titreşim üretmediğinden dolayı eski ve hasas temel bileşenlerine sahip olan tarihi yapıları güçlendirmek ve yapının ömrünü uzatmak için mikro kazıklar tercih edilmektedir.

Mikro kazıkların kolayca işlenebilirliği mühendislere zor koşullarda hızlı ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu özelliğinden ötürü, şevler, kaldırımlar, yollar, şev stabilitesi ve tünel açma gibi projeler için mikro kazıkların kullanımına duyulan ilgi her geçen gün artmaktadır. Mikro kazıkların kullanımı, yukarıda bahsedilen projelerde başarılı sonuçlar vermiş ve bu tür yapıların ayrılmaz parçası haline gelmiştir.

FHWA, mikro kazıklar için genel bir tasarım sürecini aşağıda belirtilen adımlar ile özetlemektedir:

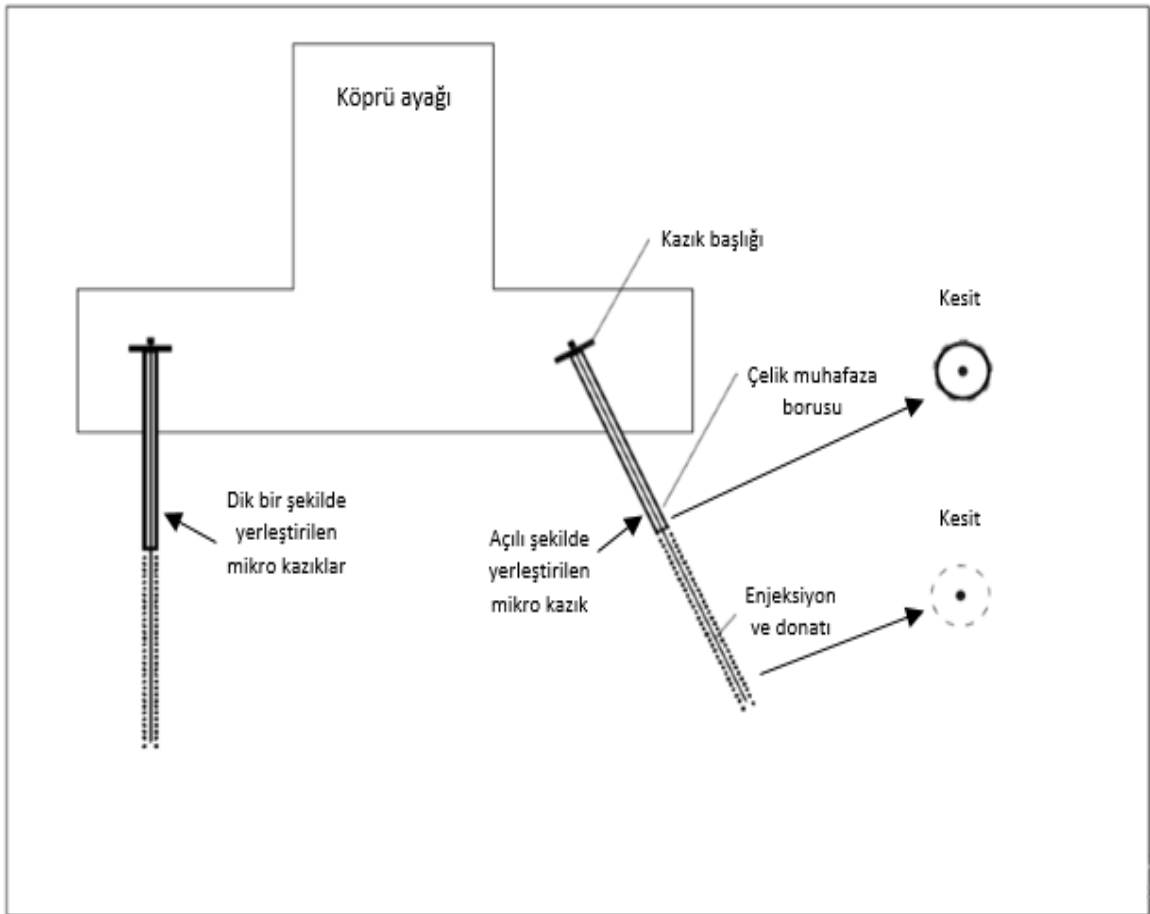
1. Proje gereksinimleri belirlenir ve mikro kazıkların uygulanabilirliği değerlendirilir.
2. Mevcut geoteknik veriler, tasarım parametreleri ve zeminin jeolojik profili incelenir.
3. Mikro kazıklara gelen yükler ve yük kombinasyonları belirlenir.
4. Mikro kazıkların uzunluğu, kazıklar arası mesafe, konum ve kesit şekli belirlenir.
5. Mikro kazık tipi ve yapım süreci belirlenir.
6. Kullanılacak yapısal çelik tipi seçilir.
7. Muhafaza borusunun kullanıldığı uzunluğunun izin verilebilir maksimum yapısal kapasitesi değerlendirilir.
8. Muhafaza borusunun kullanılmadığı uzunluğunun izin verilebilir maksimum yapısal kapasitesi değerlendirilir.
9. Mikro kazığın geoteknik kapasitesi değerlendirilir.
10. Enjeksiyon-zemin veya çelik-zemin arayüzey sürtünme değerleri bulunur.
11. Gömme derinliği ve aderans boyu bulunur.
12. Burkulma, bükülme, patlama, eğimli yükleme ve zımbalama kesmesi kontrol edilir.
13. Kazık-yapı bağlantı bileşenleri tasarlanır.
14. Yükleme deneyleri yapılır.
15. Bütün detayları açık bir şekilde ortaya koyan teknik çizimler hazırlanır.
16. Mikro kazıklar için yeterli korozyon korumasının planı tasarlanır.

3.5.1. Yeni Temel Yapımında Mikro Kazık Kullanımı

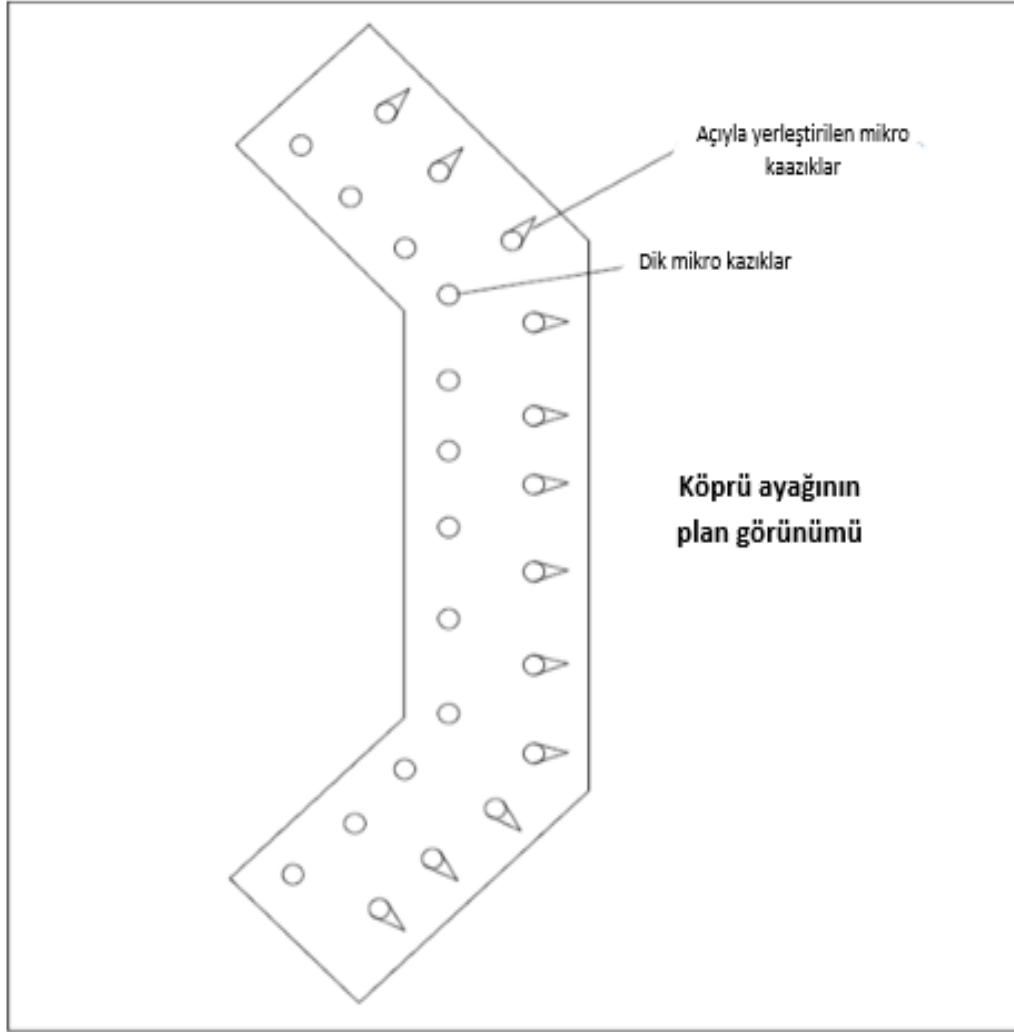
Nüfusun artmasıyla birlikte yeni yapıların inşasına ve eskiyen yapıların güçlendirilmesine duyulan ihtiyaç artmaktadır. Yapılacak yeni yapıların daha ekonomik ve dayanıklı olması için mikro kazıklar uygun çözümler sunmaktadır. Bunun yanı sıra, yeni yolların yapılmasıyla köprülerin inşasına gereksinim artmakta veya mevcut köprü ayaklarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Köprü temellerinin güçlendirilmesinde mikro kazıkların uygulanması gün geçtikçe artmakta ve tutarlı sonuçlar elde edilmektedir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de bir köprü ayağı için mikro kazıklı temel tasarımı gösterilmektedir. Tasarımda bir köprü ayağını kayaya sabitlemek için hem dikey hem de açılı şekilde yerleştirilen mikro kazıklar kullanılmıştır. Bu tür sistemlerde muhafaza borusunun kullanımı, mikro kazıkların burkulmasını önleyerek sisteme ek yanal dayanım kazandırmaktadır

[27]. Bu tür uygulamalarda köprü ayağı doğrudan mikro kazıklar üzerine inşa edilmekte ve hibrit temel sistemi (hybrid foundation system) olarak adlandırılmaktadır [28].

Köprülerde mikro kazıklar genellikle köprü temellerinin altında bulunan kaya tabakasının çok derinlerde olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Mikro kazıkların kullanılmasıyla, temel ayakları sağlam kaya tabakasına oturtulmakta ve oturmaların önlenmesi sağlanmaktadır. Makine ve diğer ekipmanlarının kolay kurulumu, küçük olmaları ve kaya zeminde de rahatlıkla işlenebilirliğinden dolayı mikro kazıklar, kesonlar veya diğer çakma kazıkların kullanımından daha popüler ve hale gelmiştir [29]. Köprü inşaatında kullanılacak mikro kazıkların yükleme deneylerinin yapılması gerekmektedir [30].

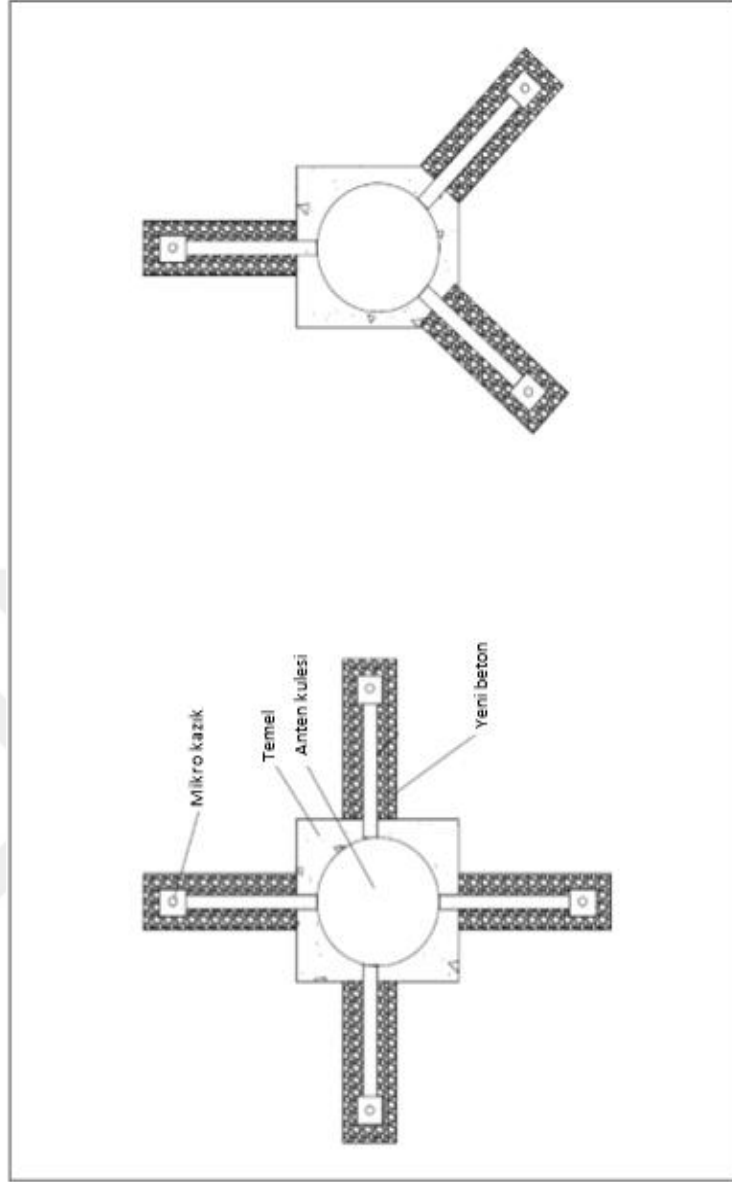


Şekil 3.6. Köprü ayağında kullanılan mikro kazık kesiti [31]



Şekil 3.7. Köprü ayağında kullanılan mikro kazık plan görünümü [31]

Cep telefonları popüler hale geldiğinden bu yana iletişim endüstrisi çok hızlı bir gelişme sağlamış ve dolayısıyla anten kulelerinin inşasında büyük bir artış meydana gelmiştir. Son yıllarda, akıllı telefonların gelişmesiyle birlikte mevcut anten kulelerine ilave antenler, cihaz ve donanımlar eklenmektedir. Yeni eklenen cihazlar kulelerin temeline gelen yüklerde bir artışa sebep olmakta ve yapının güvenliğini tehdit etmektedir. Mikro kazıklar, mevcut anten kulelerin yük taşıma kapasitesini artırmak ve stabilite eklemek için tercih edilen bir temel teknolojisi olarak ortaya çıkmaktadır [32]. Şekil 3.8'de, mevcut bir anten kulesi için mikro kazık tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.8. 3 ve 4 ayaklı mikro kazıkla güçlendirilmiş anten kulesinin plan görünümü [32]

Bağlantı detaylarının bu tür projelerin ayrılmaz bir parçası olduğu, bu detayların tasarlanmasının ve inşa edilmesinin bazen zor ve karmaşık olabileceği unutulmamalıdır. Bu çeşit tasarımlarda, mikro kazıklar kaya tabakasının içine çakıldığı için bazen kaya ankrajı olarak da bilinmektedir [16]. Tasarımlarda, bu tür sistemlerin hem çekme hem de basınç yüklerine karşı dayanıklılık özelliğinden yararlanılmaktadır.

Anten kulelerin güçlendirme işlemi sırasında karşılaşılan zorluklardan biri de mevcut temelin kasası veya diğer elemanlarının delinerek çalışmak zorunda kalınmasıdır [17]. Bazen planda tasarlanan donatıların yeri ile uygulamada yerleştirilen donatı yerleri birbiriyle uyumsuz ve temelin pabucu delinirken donatılar zarar görebilmektedir. Dolayısıyla temelin güvenliği tehlikeye girmekte, ekonomik açıdan ekstra bir maliyet oluşmakta ve işlem süresi uzamaktadır. Anten

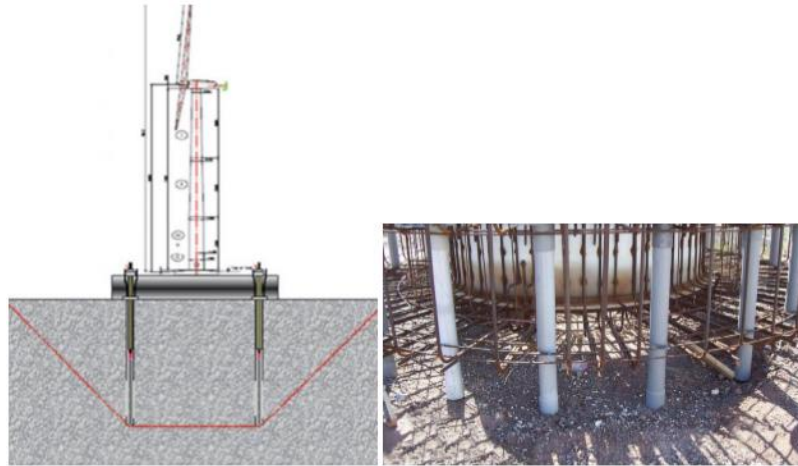
kulelerin güçlendirilmesinde kule temeliniň şekline göre etrafında eşit aralıklarla 3 veya 4 mikro kazık kullanılır [32].

Mikro kazıkların kullanımı, küçük ve orta ölçekli rüzgar türbinlerinin (1 kW ila 100 kW) gerek yeni temel inşasında gerekse de Şekil 3.9'da gösterildiği gibi devrilmesinin önlenmesi için mevcut temelini güçlendirilmesinde oldukça yaygınlaşmıştır. Bu tür uygulamalarda, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi genellikle temelin etrafına mikro kazıklar çakılarak bir mikro kazık halkası oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu mikro kazık halkası rüzgar türbinlerin devrilmesini önlemekte ve gerekli temel boyutunu küçültmektedir. Bu tür temel sistemlerinde mikro kazıkların kullanımı, temel alanında %75'e kadar, beton tüketiminde %40'a kadar ve donatı kullanımında %70'e kadar bir azaltma sağlayabilmektedir [25].



Şekil 3.9. Devrilmiş bir rüzgar türbininin yüzeysel temeli [25]

Büyük rüzgar türbinlerinin (1 MW'tan daha büyük) temel sistemlerinde mikro kazıkların kullanıldığına daha rastlanmamıştır [25].

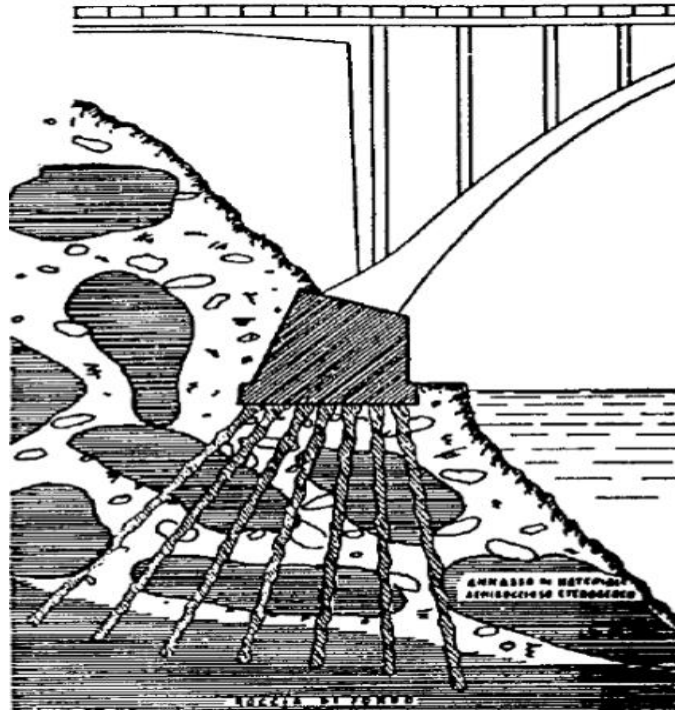


Şekil 3.10. Bir rüzgar türbini için mikro kazık tasarımı ve yapımı [25]

Yukarıdaki şekiller, rüzgar türbinin temelini yapım biçim ve sürecini göstermektedir. Bu tür temeller inşa edilirken ilk önce beton, yerleştirilen polivinilklorür (PVC) borunun etrafına dökülmekte ve ardından belirli bir basınçla boş alan doldurulmaktadır [25]. Mikro kazıkların kullanım alanları her geçen gün genişlemektedir. Kurulumunun kolaylığı ve üzerinde yapılan deneylerin maliyetli olmaması nedeniyle özellikle geoteknik mühendisliği alanında mikro kazıkların kullanımı giderek artmaktadır. Tasarım ve uygulama yöntemleri ve yapımında kullanılan malzemeler gelişmeye devam ettikçe, yeni temel inşaatı için mikro kazıkların kullanımı da artmaya devam edecektir.

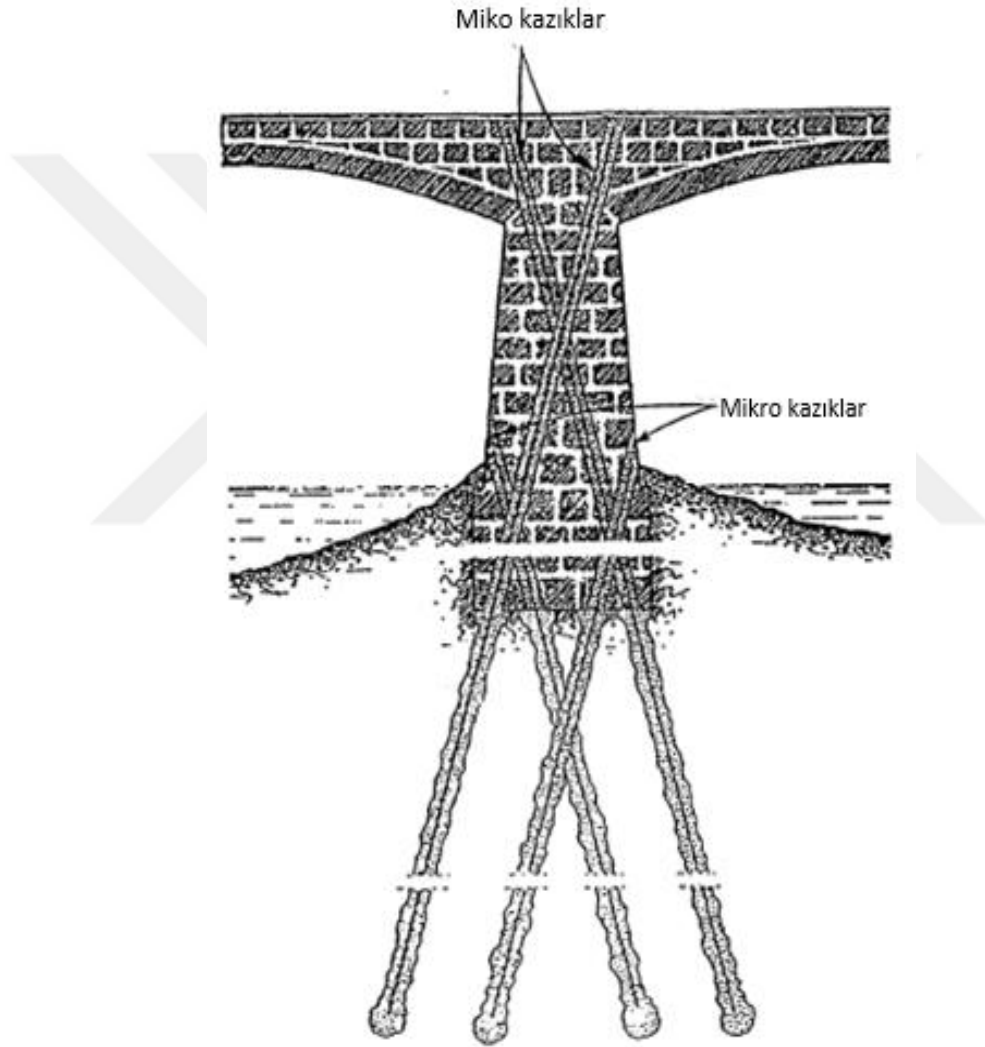
3.5.2. Mevcut Temellerin Güçlendirmesinde Mikro Kazık Kullanımı

Mikro kazıklar ilk olarak, Fernando Lizzi tarafından geliştirilen bir konseptle tarihi yapıların temelinde alttan destekleyici eleman olarak kullanılmıştır. Öngörülemeyen yükler, yanlış tasarımlar, savaşılar ve diğer faktörler nedeniyle temellerinin taşıma gücü azalmış tarihi yapıların görebileceği ek yapısal hasarların önlenmesi için güçlendirilmesi gerekmektedir. Mikro kazıklar, mevcut yapının bütünlüğünü ve tarihi yapısını bozmadan dar alanlarda da çalışma imkanı ve ekonomik çözümler sunmaktadır. Ekipmanları rahatsız edecek derecede çok titreşim ve gürültü üretmez; geniş bir çalışma alanına ihtiyaç duyulmaz ve çoğu zaman uygulama biter bitmez yük taşımaya ve yapının güvenliğini sağlamaya başlar. Mikro kazıklarla güçlendirilen yapılar, uygulama sırasında açık tutulabilmekte ve hizmet vermeye devam edebilme imkanı bulmaktadır.

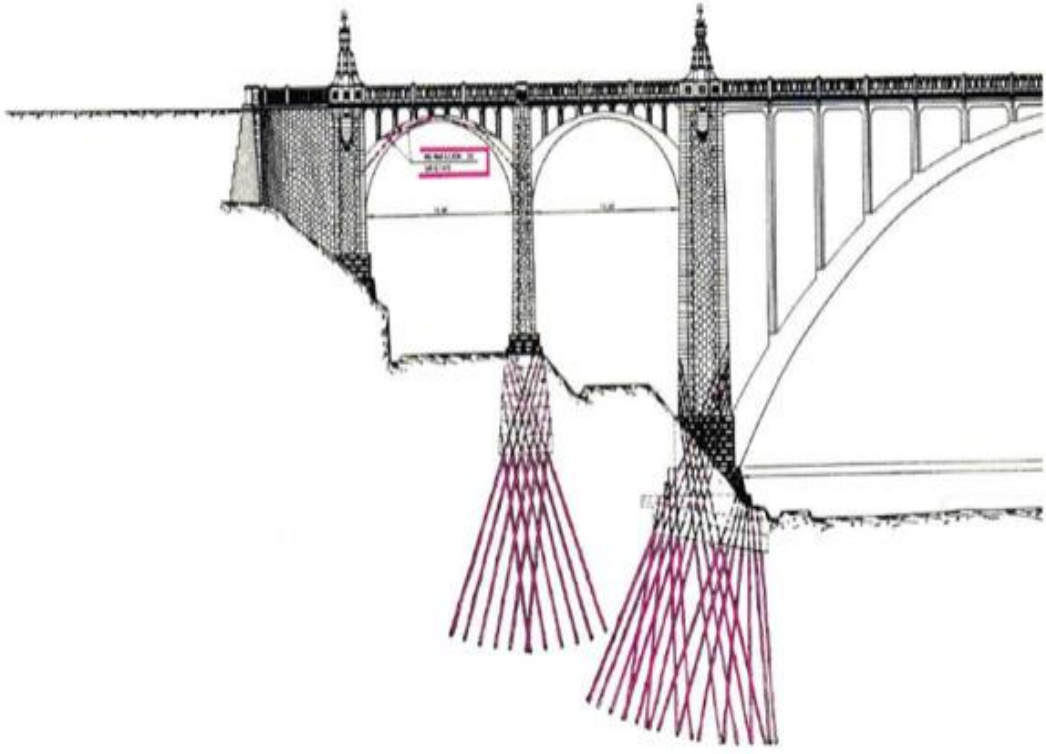


Şekil 3.11. İtalya'da, Milan ve Bergamo arasındaki otoyolun genişletilmesi [15]

Şekil 3.11'da Lizzi'nin İtalya'da, tabliyesi genişletilen bir köprü ayağının yük taşıma kapasitesini arttırmak için kullandığı mikro kazık sistemin şematik gösterimi görülmektedir [15]. Köprü payandasının desteklenmesi ve viyadük güçlendirmesinde mikro kazıkların farklı uygulamaları Şekil 3.12- Şekil 3.14 arasında verilmiştir. Mevcut yapıyı bozmadan küçük çaplı boşluklar açarak yapıya büyük dayanım kazandırdığı için mikro kazıklar Lizzi'nin güçlendirme uygulamalarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Lizzi, toplam yük taşıma kapasitesinin azalabileceğini düşündüğü için mikro kazıkları uygulamadan önce yüklememiş ve bu uygulamayı önermemiştir.



Şekil 3.12. İtalya'da bir köprü payandasının mikro kazıklarla desteklenmesi [15]



Şekil 3.13. Mikro kazıkların viyadük güçlendirmesinde kullanım planları [15]



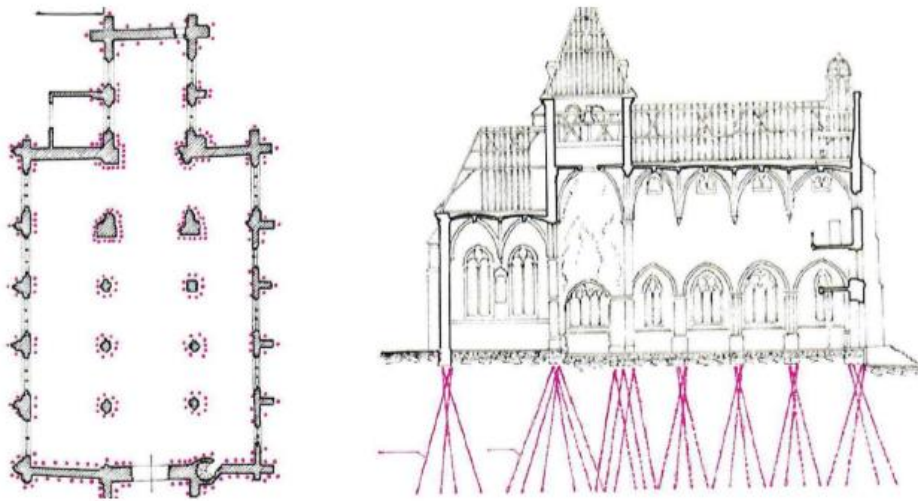
Şekil 3.14. İspanya'nın Teruel şehrinde yapılan viyadükte mikro kazık uygulaması [15]

Fernando Lizzi tarafından yaklaşık 10 tonluk yükleri taşıyan yapı temelini güçlendirmek amacıyla kullanılan küçük çaplı mikro kazıklar geliştirilmiştir. Uygulamaların başlandığı ilk zamanlarda, küçük çaplı bir bileşenin bu derecede büyük yükleri taşıyabileceği düşünülmemekteydi. Ancak Lizzi, uyguladığı yük testleri sonucunda mikro kazıkların 2-3 mm oturmayla 10 ton'a kadar yük

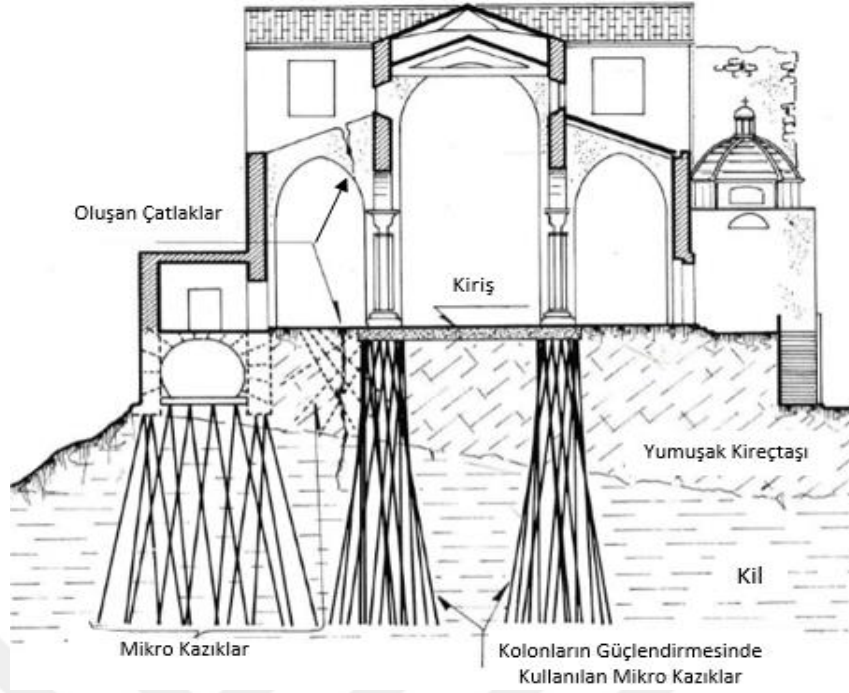
taşıyabileceğini kanıtlamıştır. Lizzi'nin başarılı uygulamalarından kısa bir süre sonra tüm Avrupa'daki yıkılmaya yüz tutmuş yapıların güçlendirilmesinde mikro kazıkların kullanımına başlanmıştır. Mikro kazık kullanımının diğer yöntemlere göre daha çok tercih edilmesinin nedeni, uygulanırken yapı temelinin oturmaları ve görebileceği hasarları en aza indirmesi, yapının estetiğini bozmaması, yapının temel ve bütünlüğünde tamamlayıcı bir işlev görmesi olmuştur. Mikro kazıklar, yapı temeliyle bir bütün olarak çalışması nedeni ile yapının temelinde oturmaların meydana geldiği yerlerde alttan destekleyici eleman olarak çalışıp gelen yükleri taşırlar. Yapıda oturmaların oluşması, mikro kazıkları karşı koymaya daha hazır hale getirip kazıkların ekstra yük taşımasını sağlar. Bütün yapı tamamen mikro kazıklara oturana kadar yapıdan gelen yükleri almaya devam eder [15].

Mikro kazıklar için kullanılan sondaj ekipmanların ürettiği titreşimlerin minimum düzeyde olması, kurulum ve uygulama sırasında yapıda ek hasarların meydana gelmesini önlemektedir. Tarihi yapıların restorasyon ve güçlendirmesi sırasında ilgili mühendisler ve diğer çalışanların büyük özen ve titizlikle çalışmaları gerekmektedir. Büyük ve hasas temel restorasyon projeleri, çeşitli aşamalarda gerçekleştirilip mevcut yapıların ve temele etki eden kuvvetlerin kapsamlı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

Mikro kazıkların temel taşıma gücünü artırmak üzere yapı temellerinin kenarlarına yerleştirilmesinin iki farklı uygulama örneği Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilmiştir. Agrigento Katedrali, killi zemin tabakası üstünde bulunan yumuşak bir kireçtaşı tabakası üzerine inşa edilmiştir. Zamanla kilisede oturmalar meydana gelip tabanı boyunca büyük bir çatlak oluşmuştur. Oluşan çatlak, farklı oturma ve kilin sıkışabilirliği ile temel altında bulunan zemin tabakasının zamanla eğimli tarafa kaymasından kaynaklanmıştır.



Şekil 3.15. Fransa'da bulunan Tourny Kilisesi'nin temellerinin güçlendirme planı [15]



Şekil 3.16. Agrigento Katedral'in güçlendirmesinde kullanılan mikro kazık planı [15]

İlk başta, kilisenin eğimli arazisinin yanında bulunan bölümünün altında, zemin kaymasının önlenmesi için mikro kazıklar yerleştirilmiştir. Hareketlenme ve oturmalarda azalma görüldükten sonra kilise kolonlarının altında daha fazla mikro kazık yerleştirilmesi planlanmıştır. Mikro kazıkların tümü basınç altında enjeksiyonlanmıştır. Kilisenin temel sistemi yeni kurulan kazık sistemine güvenli bir şekilde bağlaması için ek bir kiriş yapılmıştır [15].

İyileştirme projelerinde, mevcut temelin bütünlüğünü riske atmamak için büyük özen gösterilmelidir. Çevredeki zemini iyileştirmek ve uygulama sırasında oturmaları önlemek için basınçlı enjeksiyon tercih edilmelidir. Mikro kazığı mevcut temele bağlamak için plakalar, donatılar, dübeller ve ek beton dahil olmak üzere çeşitli bağlantı seçenekleri kullanılabilir [17].

3.6. Mikro Kazıkların Tasarımı

Mikro kazıkların tasarımı için farklı kılavuzlar bulunmaktadır. Dünyanın çeşitli ülkelerinde hazırlanan yönetmelikler mikro kazıkların tasarımıyla ilgili bölümler içermektedir. Tasarımlar, yapısal tasarım ve geoteknik tasarım olarak iki yönden incelenmektedir. Federal Karayolu İdaresi, 12 adımdan oluşan kapsamlı bir tasarım yaklaşımı önermiştir [16].

Bu bölümde, FHWA (2005) yönetmeliğine göre, basınç ve çekme yüklemesi altındaki mikro kazıkların yapısal ve geoteknik tasarımı ile ilgili bilgiler verilecektir.

3.6.1. Yapısal Tasarım

Geleneksel kazıklı temeller, büyük kazık kesiti nedeniyle yüksek yapısal kapasiteye ve rijitliğe sahiptir; bu nedenle tasarımlar genellikle geoteknik kapasiteye (uç taşıma kapasitesi ve yüzey sürtünmesi) göre yapılmaktadır. Mikro kazıkların tasarımında hem yapısal hem de geoteknik yönler dikkate alınmaktadır. Mikro kazıkların nispeten küçük kesitleri ile yüksek geoteknik yük taşıma kapasitesi basınçlı enjeksiyondan dolayı oluşan yüksek enjeksiyon-zemin yüzey sürtünmesinden kaynaklanmaktadır [16].

Bu bölümde, FHWA (2005) göre basınç ve çekme yükleme koşulları için izin verilebilir eksenel kuvvetlerin değerlendirilmesinde kullanılan yöntem ile ilgili bilgiler sunulmaktadır. FHWA (2005), mikro kazıkların tasarımı için kabul edilebilir gerilme tabanlı tasarım yöntemlerini (allowable stress design method, ASDM) kullanmaktadır. Basınç ve çekme yüklemelerinde eksenel kuvvet, aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

Mikro Kazıkların Çelik Muhafaza Borusunun Kullanıldığı Bölgenin Yapısal Tasarımı

Muhafaza borusunun kullanıldığı bölge için izin verilebilir basınç yükünün hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır:

$$P_{ke-b} = [0.4f'_{b-enj} \times A_{enj} + 0.47F_{y-çelik} \times (A_{çç} + A_{çb})] \quad (3.1)$$

Burada;

- P_{ke-b} = Kabul edilebilir basınç yükünü,
- f'_{b-enj} = Enjeksiyonun serbest basınç dayanımını,
- A_{enj} = Mikro kazık kesitindeki enjeksiyon alanını,
- $F_{y-çelik}$ = Çeliğin akma dayanımı,
- $A_{çç}$ = Çelik çubuğunun kesit alanını,
- $A_{çb}$ = Çelik borusunun alanını göstermektedir.

Basınç yüklemesi altında olan mikro kazıkları oluşturan bileşenler arasında gerinim uyumluluğunun sağlanması gerekmektedir. Belirtilen şartın sağlanması için çelik muhafaza borusu, çelik takviye çubuğu ve enjeksiyon gibi mikro kazık bileşenlerin her biri için izin verilebilir basınç gerilmelerin minimum değerle sınırlandırılması gerekmektedir. Bu nedenle, Denklem 3.1'de kullanılacak çeliğin maksimum akma gerilmesinin ($F_{y-çelik}$) değeri olarak, çelik muhafaza borusunun akma gerilmesi, çelik takviye çubuğunun akma gerilmesi ve enjeksiyonun kırılma anındaki maksimum basınç gerilmesi değerlerinden en küçüğü seçilecektir. Betonda kullanılabilir maksimum gerinim (strain) değeri 0,003'e eşittir [22]. Bu nedenle, mikro kazıklarda kullanılan çelik bileşenlerin gerinim değerleri bu değerle sınırlandırılmalıdır. Bu gerinim değerine karşılık gelen çelikteki gerilme değeri, çeliğin elastisite modülü ile gerinim değerinin (0,003) çarpımına eşittir.

Elastisite modülü 200.000 MPa olan bir çelik için, izin verilebilir maksimum akma gerilmesinin değeri ($200.000 \text{ MPa} \times 0,003 = 600 \text{ MPa}$) olarak kabul edilmektedir. Başka bir deyişle, enjeksiyon için belirlenen bu basınç gerinim değerinin korunması için mikro kazıkların özellikle muhafaza borusu ile kaplı olmayan kısımlarında, çelik takviye elemanın akma gerilmesinin 600 MPa'yı aşmaması gerekmektedir [16].

Örneğin, çelik muhafaza borusunun akma mukavemeti 241 MPa, çelik takviye çubuğunun akma mukavemeti 520 MPa ve enjeksiyonun kırılma anındaki maksimum basınç gerilmesi 600 MPa gibi farklı değerlere sahip olan bileşenlerle tasarlanacak bir mikro kazık için Denklem 3.1'de $F_{y\text{-çelik}}$ terimi için verilen üç değerden en küçüğü olan 241 MPa değeri kullanılır.

Muhafaza borusunun kullanıldığı bölge için izin verilebilir çekme yükünün hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır:

$$P_{ke-\zeta} = 0.55F_{y\text{-çelik}} \times (A_{\zeta\zeta} + A_{\zeta b}) \quad (3.2)$$

Burada;

- $P_{ke-\zeta}$ = Kabul edilebilir maksimum çekme yükünü,
- $F_{y\text{-çelik}}$: Çeliğin akma gerilmesini,
- $A_{\zeta\zeta}$: Çelik takviye çubuğunun kesit alanını,
- $A_{\zeta b}$: Çelik muhafaza borusunun alanını göstermektedir.

Birleşik Eksenel Basınç Gerilmesi ve Muhafaza Borusunun Kullanıldığı Bölgenin Eğilmesinin Değerlendirilmesi

Zemin yüzeyinde uygulanan yanal yükler veya üst yapıdan dolayı oluşan devrilme momentleri mikro kazıklarda eğilme gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu eğilme gerilmeleri mikro kazıklarda ek basınç gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Mikro kazıkların muhafaza borusunun kullanıldığı bölge boyunca izin verilebilir gerilmelerin elde edilmesi için birleşik gerilme hesabı yapılmaktadır.

Yanal yüklere ve/veya devrilme momentlerine maruz kalan diğer derin temel elemanların hesaplanmasına benzer şekilde kazıktaki eğilme momentleri, LPILE gibi yanal yükleme altında kazık analiz programları kullanılarak hesaplanmaktadır [33]. Bu analizler yardımı ile kazıktaki maksimum eğilme momenti (M_{\max}) hesaplanarak birleşik gerilme değerlendirmesinde kullanılmaktadır.

Birleşik gerilme değerlendirilmesi, yapısal çelik kesitler için AASHTO bölüm 10.36'da açıklanan yöntemle göre yapılmaktadır [34]. Birleşik gerilme altında mikro kazıkların tasarım kontrolü aşağıdaki ifade ile yapılmaktadır:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right)F_b} \leq 1.0 \quad (3.3)$$

Burada;

- f_a : Eksenel gerilmeyi ($f_a = P_b/A_{\text{çç}}$),
- f_b : Eğilme gerilmesini ($f_b = M_{\text{maks}}/S_{\text{çb}}$) burada ise $S_{\text{çb}}$, çelik muhafaza borusunun elastisite modülüdür,
- F_a : Sadece eksenel kuvvet varsa ($F_a = 0,47 F_{y\text{-çb}}$) kabul edilebilir eksenel gerilmesini,
- F_b : Sadece eğilme momenti varsa ($F_b = 0,55 F_{y\text{-çb}}$) kabul edilebilir eğilme gerilmesini,
- F_e : Euler burkulma gerilmesini göstermektedir.

Mikro kazıklarda kullanılan donatı veya çelik çubukların eğilme mukavemetine katkısı çelik borusuna kıyasla çok azdır, dolayısıyla denklem 3.3'te eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi dikkate alınmamaktadır. Denklem 3.3'te, maksimum eksenel basınç yükü (P_c) yalnızca çelik muhafaza borusu tarafından taşındığı varsayılmakta ve hesaplamalarda çelik borusunun akma gerilmesi kullanılmaktadır.

Analiz için gerekli kesit özellikleri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$A_{\text{çb}} = \frac{\pi}{4} (OD^2 + ID^2) \quad (3.4a)$$

$$S_{\text{çb}} = \frac{I_{\text{çb}}}{(OD/2)} \quad (3.4b)$$

$$I_{\text{çb}} = \frac{\pi}{64} (OD^4 + ID^4) \quad (3.4c)$$

Euler burkulma gerilmesi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F_e' = \frac{\pi^2 E_{\text{çb}}}{FS(KL/r)^2} \quad (3.5)$$

Burada;

- E: Çelik muhafaza borusunun elastisite modülünü (genelde 200.000 MPa olduğu varsayılır),
- FS: Güvenlik katsayısını (2,12),
- K: Etkin uzunluk katsayısını (1,0 varsayılır),
- L: mikro kazığın desteklenmeyen bölgesini (boşluktaki veya zayıf zemin tabakası boyunca mikro kazığın uzunluğu),
- r: Çelik muhafaza borusunun dönme yarıçapını $\left[r = \left(I_{\text{çb}}/A_{\text{çb}} \right)^{1/2} \right]$ göstermektedir.

Etkin uzunluk katsayısı (K), mikro kazık ucunun dönmemesini ve yapacağı yanal hareketinin engellenmesini sağlayayan mevcut araçlara bağlıdır. Mikro kazık tasarımları için bu değer genellikle 1,0'e eşit olduğu varsayılır.

Tüm aksenal yükün sadece çelik muhafaz borusu tarafından taşındığı varsayımı ve diğer bileşenlerin katkısının tamamen yok sayılması çok doğru bir yaklaşım değildir. Mikro kazık kesitinde mevcut olan enjeksiyonun aksenal yükün taşınmasına katkısı ihmal edilmemelidir. Richards ve Rothbauer, gövde içindeki enjeksiyonun basınç kapasitesine katkısını hesaba katan birleşik bir gerilme kontrolü önermiştir [35]. Bu yöntem, burkulma ihtimalinin ihmal edilebilir olduğunu varsaymaktadır. Richards ve Rothbauer'un önerdiği birleşik gerilme kontrolü aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{P_b}{P_{ke-b}} + \frac{M_{maks}}{M_{ke}} \leq 1.0 \quad (3.6)$$

Burada;

- P_b : Maksimum aksenal basınç yükünü,
- P_{ke-b} : denklem 3.1'den elde edilir,
- M_{maks} : mikro kazıktaki maksimum eğilme momentini,
- M_{ke} : Kabul edilebilir maksimum moment değerini ($M_{ke} = F_b \times S_{cb}$) göstermektedir.

Eksenal yüklerin taşınmasında çelik muhafaza borusu ve enjeksiyon gibi mikro kazıkların farklı bileşenlerinin katkısını dikkate alan daha gelişmiş yöntemler de kullanılabilir.

Mikro Kazıkların Çelik Muhafaza Borusunun Kullanılmadığı Bölgenin Yapısal Tasarımı

Muhafaza borusunun kullanılmadığı bölge için kabul edilebilir basınç yükünün hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır:

$$P_{ke-b} = (0.4f'_{b-enj} \times A_{enj} + 0.47F_{y-çç} \times A_{çç}) \quad (3.7)$$

Burada;

- P_{ke-b} = Kabul edilebilir maksimum basınç kuvvetini,
- f'_{b-enj} = Enjeksiyonun serbest basınç dayanımını,
- A_{enj} = Mikro kazık kesitindeki enjeksiyon alanını,
- $F_{y-çç}$ = Çelik çubuğunun akma gerilmesini,
- $A_{çç}$ = Çelik çubuğunun kesit alanının ifade etmektedir.

Basınç yüklemesinin hesaplamasında, kazığın muhafaza borusunun kullanılmadığı bölge boyunca yerleştirilen donatının akma gerilmesinin 600 MPa değerini geçmemesi gerekmektedir.

Muhafaza borusunun kullanılmadığı bölge için izin verilebilir çekme yükünün hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır:

$$P_{ke-ç} = 0.55F_{y-çç} \times A_{çç} \quad (3.8)$$

Burada;

- $P_{ke-ç}$: Kabul edilebilir çekme yükünü,
- $f_{y-çç}$ = Çelik çubuğunun akma gerilmesini,
- $A_{çç}$ = Çelik çubuğunun kesit alanını göstermektedir.

Denklem 3.8’de çelik çubuğunun gerçek akma gerilme değeri kullanılmaktadır.

3.6.2. Geoteknik Tasarım

Mikro kazıklara uygulanan maksimum basınç ve çekme yükleri, mikro kazığın belirli bir uzunluğu boyunca enjeksiyon-zemin arasındaki aderans mukavemeti ile (bond strength) taşınmaktadır. Bu uzunluk aderans bölgesi, aderans uzunluğu veya aderans boyu olarak bilinmektedir. Aderans boyu, çoğu zemin ve kaya tabakalarında oluşturulabilmektedir. Oluşan aderans mukavemetini, mikro kazıkların uygulandığı zemin türüne bağlıdır. Geoteknik tasarımın amacı, önceden belirlenmiş bir güvenlik katsayısı ile uygulanan çekme ve basınç yüklerine direnmek için gerekli olan aderans boyunun bulunmasıdır.

Doğru bir tasarımın yapılması için, mikro kazıkların aderans boyu için uygun tabakaları ve yeraltı koşullarındaki önemli değişiklikleri belirlemek üzere sondaj ile alınan tüm numunelerin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir. Organik zeminler, ortalama sıvılaşma endeksi (liquidity index) 0,2’den büyük olan kohezyonlu zeminler, ortalama likit limiti 50’den büyük olan kohezyonlu zeminler ve ortalama plastik indeksi (plastic index) 20’den büyük olan kohezyonlu zeminler gibi zemin türleri mikro kazık aderans boyu için genellikle uygun zeminler olarak sayılmamaktadır. Bahsedilen zemin türlerinde mikro kazıkların uygulandığı durumlarda, kapsamlı deneylerin yapılması ve geoteknik kapasite için daha yüksek güvenlik katsayısının kullanılması gerekmektedir [16]. Mikro kazıkların çapı küçük olduğundan ötürü uç taşıma kapasitesi ihmal edilebilir düzeydedir [36].

Aderans Kuvveti ve Aderans Boyunun Hesaplanması

İzin verilebilir maksimum aderans kuvveti (P_{ke-ak}) olarak adlandırılmaktadır. P_{iv-ak} , esas olarak enjeksiyon-zemin aderans mukavemetine (bond strength) bağlıdır. İzin verilebilir maksimum aderans kuvveti aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmaktadır [16].

$$P_{ke-ak} = \frac{\alpha_{aderans}}{FS} \times \pi \times D_{mk} \times L_a \quad (3.9)$$

Burada;

- P_{ke-ak} = Kabul edilebilir aderans kuvvetini,
- $\alpha_{aderans}$ = Enjeksiyon-zemin nihai aderans mukavemetini,
- FS = Güvenlik katsayısını (2-3),
- D_{mk} = Mikro kazık çapını,
- L_a = Aderans boyunu göstermektedir.

Aderans boyu aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$L_a = \frac{P_{iv-ak} \times FS}{\alpha_{aderans} \times \pi \times D_{mk}} \quad (3.10)$$

Enjeksiyon-zemin arasındaki maksimum aderans kuvvetinin elde edilmesi için Tablo 3.1'den yararlanır. Verilen enjeksiyon-zemin nihai aderans mukavemetinin ($\alpha_{aderans}$) değerleri enjeksiyonlama türüne ve zemin ortamına bağlıdır [16]. Tablo 3.1, enjeksiyonlama işlemi sırasında verilen basıncının (B Tipi, C Tipi ve D Tipi) aderans mukavemetinin üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Bununla birlikte, daneli zeminlerde A Tipi mikro kazıklara kıyasla $\alpha_{aderans}$ değerlerinin özellikle üst sınırının önemli ölçüde arttığını göstermektedir.

Tablo 3.1. Enjeksiyon-zemin nihai aderans mukavemeti [16]

Zemin	$\alpha_{aderans}$ (kPa)			
	Mikro Kazık Tipleri (enjeksiyonlama yöntemine göre)			
	A Tipi	B Tipi	C Tipi	D Tipi
Silt ve kil (bazı kumlar) (yumuşak, orta plastik)	35-70	35-95	50-120	50-145
Silt ve K-kil (bazı kumlar) (sert, sıkı-çok sıkı)	50-120	70-190	95-190	95-190
Kum (bazı siltler) (ince, gevşek-orta sıkı)	70-145	70-190	95-190	95-240
Kum (bazı siltler ve çakıl) (ince-kaba, orta-çok sıkı)	95-215	120-360	145-360	145-385
Çakıl (bazı kumlar) (orta-çok sıkı)	95-265	120-360	145-360	145-385
Buzul tili (silt, kum, çakıl) (orta-çok sıkı, çimentolanmış)	95-190	95-310	120-310	120-335

Mikro kazık kapasitesinin hesaplanması için, diğer kazık çeşitlerin nihai kapasitesinin değerlendirmesinde kullanılan toplam gerilme (α yöntemi) ve efektif gerilme (β yöntemi) yöntemlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir [16].

3.6.3. Eksenel Yük Altında Grup Mikro Kazıkların Geoteknik Tasarımı

Genellikle, eksenel basınç kapasitesi, kaldırma kapasitesi ve yanal kapasite açısından tasarım gereksinimlerini karşılamak veya belirli bir oturma seviyesini korumak için mikro kazıklar gruplar halinde yerleştirilmektedir. Bir mikro kazık grubunun yük taşıma kapasitesi, diğer kazık gruplarının yük taşıma kapasitesinin değerlendirmesinde kullanılan yaklaşıma benzer şekilde, bir grup tesir yüzdesi (azaltma katsayısı, η_g) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Grup tesir yüzdesi kazıklar arası mesafe ve zemin türüne bağlıdır.

Kohezyonlu Zeminlerde Mikro Kazık Grupları

Kohezyonlu zeminlere yerleştirilen bir mikro kazık grubunun verimliliği, mikro kazıkların merkezden merkeze olan mesafesinin (s) ve mikro kazık temel başlığının alt kısmı ile zemin yüzeyine temas durumunun bir fonksiyonudur. Kohezyonlu zeminlerin durumuna göre grup tesir yüzdesi değerleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Kohezyonlu zeminlerde mikro kazık grupları için grup tesir yüzdesi [16]

Durum	Grup tesir yüzdesi (η_g)
Kazık başlığı zeminle sıkı bir şekilde temas halindeyse	1,0
Kazık başlığı zeminle sıkı temas halinde değilse ve zemin sertse (yani zeminin drenajsız kayma mukavemeti 95 kPa'dan büyükse)	1,0
Kazık başlığı zeminle sıkı temas halinde değilse ve zemin nispeten yumuşaksa (yani zeminin drenajsız kayma mukavemeti 95 kPa'dan azsa) veya zemin örşelenmişse	
s = 2,5 D _{mk}	0,67
s = 3,0 D _{mk}	0,70
s = 6,0 D _{mk}	1,0
3,0 D _{mk} < s < 6,0 D _{mk}	0,70 - 1,0

Bununla birlikte, küçük mikro kazık aralıklarında, mikro kazık grubunun bir "blok" olarak göçme potansiyeli değerlendirilmelidir. Genişliği B_g, uzunluğu L_g ve derinliği D olan (Şekil 3.17'de gösterildiği gibi) bir mikro kazık grubunun nihai taşıma gücü (Q_g) aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır.

$$Q_g = (2B_g + 2L_g)D \times s'_u + B_g L_g \times N_c s_u \quad (3.11)$$

Burada;

- s'_u: Mikro kazıkların çakma derinliği (kazığın gömülü boyu) boyunca ortalama drenajsız kayma mukavemetini,
- s_u: Mikro kazık grubunun tabanındaki drenajsız kayma mukavemetini göstermektedir.

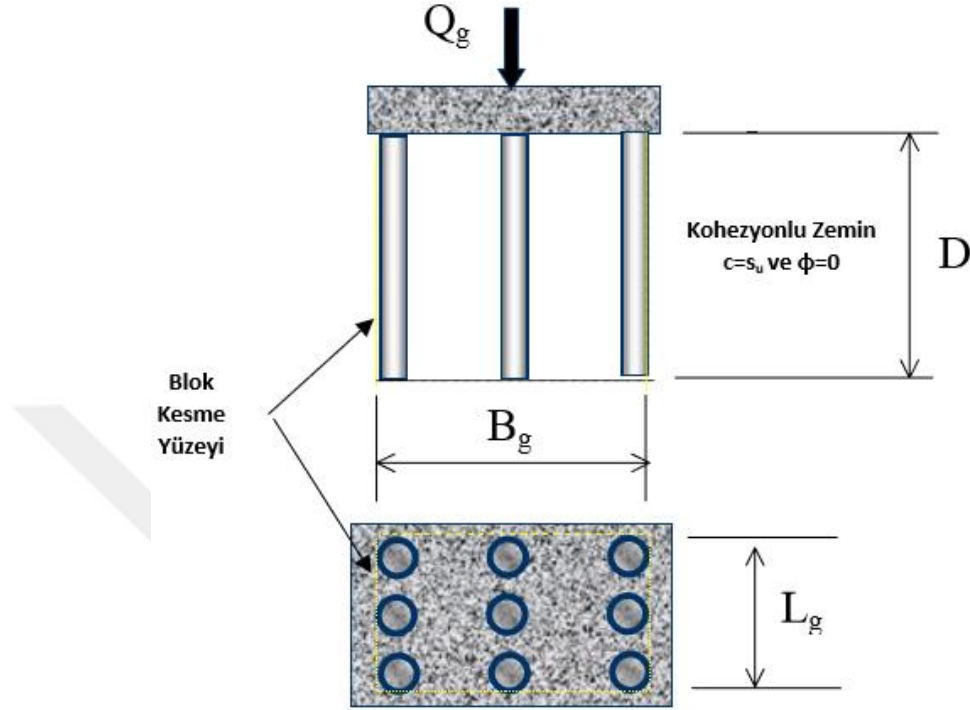
Denklemden kullanılan taşıma kapasitesi katsayısı (N_c) aşağıdaki bağıntıdan elde edilmektedir:

$$\frac{D}{B_g} \leq 2.5 \text{ durumu için:}$$

$$N_c = 5 \left(1 + \frac{0.2B_g}{L_g} \right) \left(1 + \frac{0.2D}{B_g} \right) \quad (3.12)$$

$$\frac{D}{L_g} > 2.5 \text{ durumu için:}$$

$$N_c = 7.5 \left(1 + \frac{0.2B_g}{L_g} \right) \quad (3.13)$$



Şekil 3.17. Başlığı zeminle temas halinde olan kohezyonlu zemindeki mikro kazık grubu için blok göçme modeli [16]

Tasarım için kullanılacak grup kapasitesi aşağıdaki adımlar kullanılarak hesaplanmaktadır.

1. Nihai grup kapasitesi hesaplanır:

$$Q_g = (\alpha_{aderans} \times \pi \times D_{mk} \times L_a) \times \eta \times N \quad (3.14)$$

Burada: N, gruptaki mikro kazık sayısını ve D_{mk} , mikro kazık çapını göstermektedir. η_g değeri Tablo 3.2'den alınır.

2. Nihai grup kapasitesi Denklem 3.14'e göre hesaplandıktan sonra tasarımda güvenli tarafta kalmak için elde edilen değerden daha düşük bir değer kullanılmalıdır.
3. İzin verilebilir grup kapasitesinin hesaplanması için FS değeri 2.0 alınmaktadır. Denklem 3.14 yardımıyla bulunan Q_g değeri FS değerine bölünmektedir.

Kohezyonsuz Zeminlerde Mikro Kazık Grupları

Bir gruptaki mikro kazıkların merkezden merkeze olan mesafesi mikro kazıkların enjeksiyonlanmış gövde çapının üç katından daha büyük olduğu durumlarda ($s > 3D_{mk}$), kohezyonsuz zeminlerdeki bir mikro kazık grubunun kapasitesi gruptaki tüm mikro kazıkların kapasitesinin toplamıdır. Bu değer, Denklem 3.14'te $\eta_g = 1,0$ alınarak hesaplanır. ($s > 3D_{mk}$) durumu için kohezyonsuz zeminlere basınçla

enjeksiyonlanıp yerleştirilen mikro kazıkların toplam kapasitesinde, grup etkisinden dolayı herhangi bir azalma yaşanmamaktadır.

Zayıf ve sağlam zemin tabakalarından oluşan farklı katmanlı zeminlerdeki mikro kazık gruplarının durumu

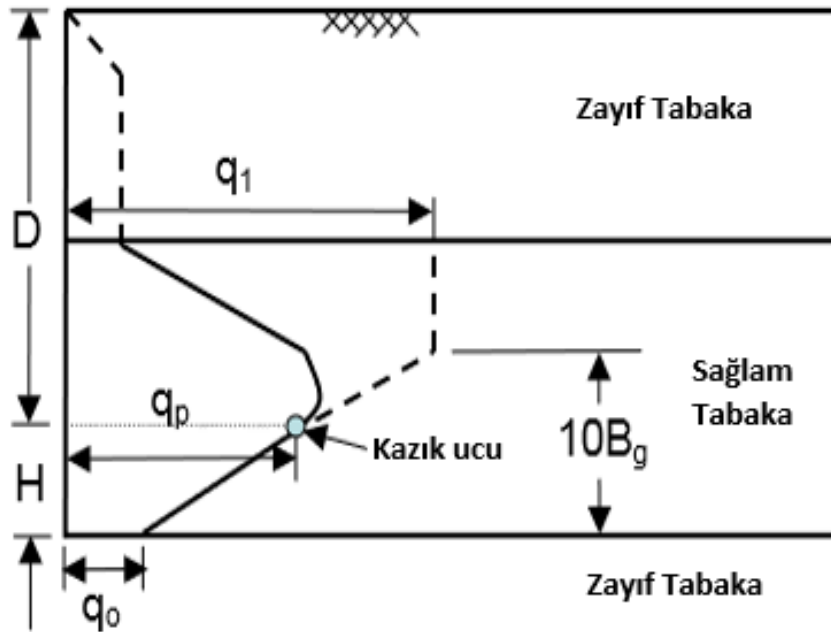
Bir mikro kazık grubu, daha zayıf bir zemin tabakasının üstünde bulunan sağlam bir tabakaya yerleştirildiği durumlarda tasarım sırasında zımbalama kırılması etkisi dikkate alınmalıdır (Şekil 3.18). Mikro kazık gruplarının zımbalama kırılması potansiyelinin değerlendirilmesinde diğer kazık grupları için geliştirilmiş yöntemler kullanılmaktadır. Bir mikro kazık bloğunun, zımbalama kırılmasına karşı güvenliğinin sağlanması için aşağıdaki koşulun karşılanması gerekmektedir.

$$\frac{Q_g}{B_g L_g} = q_p \leq q_o + \frac{H}{10B_g} [q_1 - q_o] \leq q_1 \quad (3.15)$$

Burada;

- Q_g , B_g ve L_g , Şekil 3.17'de tanımlandığı gibidir,
- q_o , alt tabakanın (daha zayıf zeminin) tepesindeki maksimum birim taban direncidir,
- q_1 , üst tabakanın (daha güçlü zeminin) tepesindeki maksimum birim taban direncidir,
- q_p , mikro kazıkların uçlarındaki nihai birim taban direncidir,
- H , mikro kazıkların uç kısmından daha zayıf olan alt zemin tabakasına olan mesafedir.

B_g ve L_g değerleri kazık grubunun plan alanına göre alınmalıdır.



Şekil 3.18. Katmanlı zeminlerdeki kazıkların uç taşıma direnci [37]

3.6.4. Yanal Yüklü Mikro Kazıkların Tasarımı

Yanal yüklere ve/veya devrilme momentine maruz kalan tekil mikro kazığın analiz yöntemi çakma ve fore kazık analiz yöntemi ile aynıdır. Bu bölümde, yanal yüklü bir mikro kazık için (p-y analizi kapsamında) genel tasarım yöntemi ile ilgili bilgi verilmektedir.

Yanal Yüklü Tekil Mikro Kazık için Analiz Adımları

1. Mikro kazık için aşağıdaki temel parametreler belirlenir:
 - Mikro kazık uzunluğu
 - Enjeksiyon, çelik çubuğu ve çelik muhafaz borusunun elastisite modülü
 - Mikro kazığın üst noktasından zemin yüzeyine olan mesafesi
 - Zemin yüzeyinin eğimi.
2. Mikro kazık uzunluğu boyunca eşit kesit özelliklerine sahip parçalara bölünür. Her parça için mikro kazıkların çapı, atalet momenti ve kazık alanı belirlenir.

Yanal yüklere ve/veya devrilme momentlerine maruz kalan mikro kazıkların üst kısmında çelik muhafaza borusu kullanılmaktadır. Mikro kazıkların tüm uzunluğu boyunca çelik takviye çubuğu kullanılabilen ancak çelik çubukların yanal yüklere karşı sağladığı direnç ihmal edilebilir düzeyde olmaktadır. Zemin yüzeyinde uygulanan yanal yükler ve devrilme momentleri genellikle mikro kazıkların, zemin yüzeyinden mikro kazık çapının 20 katı bir derinliğe kadarki uzunluğu tarafından taşınmaktadır. Belirtilen bu derinliğin altında oluşan eğilme moment değerleri dikkate alınmayacak kadar az olmaktadır. Analiz edilecek mikro kazıkların boyu, alt ucunda oluşacak eğilme momentlerin, kesme kuvvetlerin ve yanal kazık hareketlerin ihmal edilebilir düzeyde olmasını sağlayacak kadar uzun olmalıdır. Bu uzunluk, mikro kazıklarda uygulanan çelik muhafaz borusunun uzunluğunu seçmek için kullanılmaktadır.

3. Zemin/kaya profili, uygulanacak mikro kazıkların beklenen maksimum derinliği boyunca katmanlara ayrılır.
4. Her katman için gerekli zemin girdi parametreleri belirlenir. Kohezyonlu zemin tabakaları için zeminin efektif birim ağırlığı (effective unit weight) ve drenajsız kayma dayanımı analiz için gerekli iken kohezyonsuz zeminler için efektif birim ağırlığı ve drenajlı sürtünme açısı (drained friction angle) gereklidir.

Analizler için iki parametrenin elde edilmesi gerekmektedir. Malzemenin kayma mukavemetinin $\frac{1}{2}$ 'sine eşit bir kayma gerilmesine karşılık gelen aksel gerinim (axial strain) olan ϵ_{50} değer (bu parametre yalnızca killer için kullanılır) ve zemin direncinin, yanal elastik eğrisine (lateral deflection curve) karşı eğiminin (k) bulunması gerekmektedir. Bu parametreler Tablo 3.3- Tablo 3.6 arasında verilen değerler kullanılarak zemin tipine göre seçilmektedir [16].

Ancak LPILE gibi programlar ile yapılan analizlerde genellikle programlarda bulunan p-y eğrileri kullanılır. Bu p-y eğrileri, nispeten küçük çaplı mikro kazıklar için özel olarak geliştirilmemiştir.

Belirtilen eğriler oldukça doğru sonuçlar sağlayabilmektedir. Ayrıca, zemin profilinin üst 5m'sindeki kayma mukavemeti gibi zemin özelliklerinin iyice araştırılması, analizlerde kullanılan p-y eğrilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir [35]. Saha çalışması ve saha deneyleri yapılarak dayanım verileri elde edilmelidir.

Tablo 3.3. Örselenmemiş killer için ϵ_{50} değerleri [33]

Kil Kıvamı	ϵ_{50}
Yumuşak	0,020
Orta	0,010
Sert	0,005

Tablo 3.4. Sert killer için ϵ_{50} değerleri [33]

Drenajsız Kesme Dayanımı (kPa)	ϵ_{50}
50-100	0,007
100-200	0,005
300-400	0,004

Tablo 3.5. Kumlar için zemin modülü (k) parametresinin değerleri [33]

Sıklık	Gevşek (kPa/m)	Orta Sıkı (kPa/m)	Sıkı (kPa/m)
Yeraltı su seviyesinin altındaki kum	5430	16300	33900
Yeraltı su seviyesinin üstündeki kum	6790	24430	61000

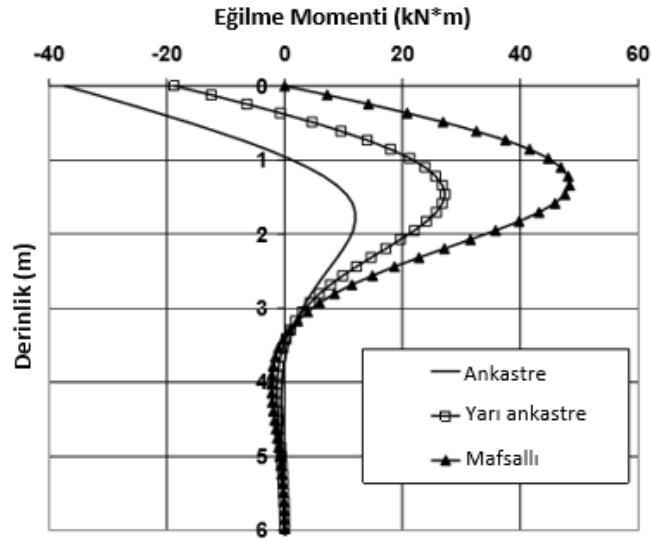
Tablo 3.6. Killer için zemin modülü (k) parametresinin değerleri [33]

Kil Kıvamı	Drenajsız Kesme Dyanımı (kPa/m)	K (kPa/m)
Yumuşak	12-24	8140
Orta sert	24-48	27150
Sert	48-96	136000
Çok sert	96-192	271000
Katı	192-383	543000

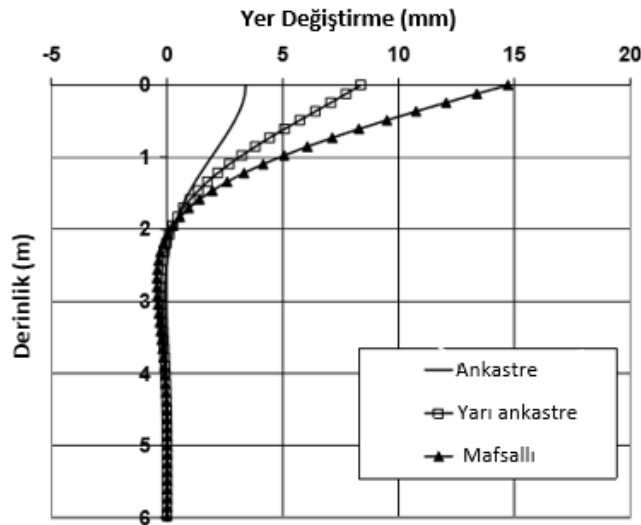
5. Analiz edilecek kritik yükleme kombinasyonları ve sınır koşulları belirlenir.

Her yükleme kombinasyonu için, analiz edilecek zemin yüzeyinde etki edecek eksenel yük, yanıl yük ve devrilme momenti belirlenir. Analizlerde, zemin yüzeyindeki sınır koşulların belirlenmesi çok önemlidir. Yapılan analizlerde, kazık başlığı ile ilgili mafsallı, yarı ankastre ve tam ankastre

olmak üzere üç varsayım dikkate alınmaktadır. Genel olarak, kazık başının ankastre olarak kabul edilme varsayımı, kazığın en üst noktasında hesaplanan büyük negatif eğilme momentleri ve zemin yüzeyinde küçük yanal yer değiştirmeler ile sonuçlanmaktadır. Aksine, bir mafsallı kazık başlığı bağlantısının varsayımı, zemin yüzeyinin altında hesaplanan en büyük eğilme momenti ve zemin yüzeyinde nispeten büyük yer değiştirmeler ile sonuçlanmaktadır. Analizlerde farklı durumlar dikkate alınarak maksimum eğilme momentleri ve yer değiştirme değerleri bulunmaktadır. Hesaplanan değerlere göre mikro kazıkların yapısal kapasitesi belirlenmektedir. Bütün bu analizler LPILE program ile yapılabilmekte ve tutarlı sonuçlar elde edilebilmektedir [16]. Yukarıda bahsedilen farklı serbestlik (%0, %50 ve %100) durumları için LPILE program ile yapılan analizlerin grafiksel gösterimi Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de görülmektedir.



Şekil 3.19. Eğilme momenti için LPILE analiz sonucu [16]



Şekil 3.20. Mikro kazıkların yanal yer değiştirmesi için LPILE analiz sonucu [16]

6. Kritik yükleme durumları (eksenel ve yanal yükler) için mikro kazıkların yapısal kapasitesi değerlendirilir.

Denklem 3.3 veya Denklem 3.6'nın karşılanmadığı durumlarda mikro kazıkların yanal yüklemeye karşı kapasitesinin artırılması gerekmektedir. İstenen kapasitenin elde edilmesi için aşağıdaki adımlar izlenebilir [16].

- Eğilme moment etkisinin yüksek olduğu mikro kazıkların üst kısmına kalın çelik muhafaz borusu yerleştirilebilir.
- Eğilme momentlerin yüksek olduğu mikro kazıkların üst kısmının çapı artırılabilir.
- Pasif direncin artması için kazık başlığı zemin yüzeyinin daha derinine gömülebilir.

Yanal Yüklü Mikro Kazık Grubunun Taşıma Gücü

Diğer kazık türlerine benzer şekilde grup mikro kazıkların davranışı, kazıklar arası mesafe ile değişmektedir. Bir kazık grubunun yanal yükleme altında yaptığı yer değiştirme, aynı yük altında yüklenen tekil bir mikro kazığın yer değiştirmesinden 2-3 kat daha büyük olabilmektedir. Mikro kazık gruplarının arka sıralarındaki kazıkların yanal yüke karşı ön sıradaki kazıklara göre önemli ölçüde daha az dirence sahipler ve bu nedenle daha büyük yer değiştirme yaparlar [38-39]. Bu durum, kazık-zemin-kazık etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Kazık-zemin-kazık etkileşimi, bir kazık grubunun yanal kapasitesinin, grubu oluşturan tekil kazıkların yanal kapasitelerinin toplamından daha az olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, yanal yükleme altında olan kazık gruplarının grup tesir yüzdesi 1'den azdır. FOREVER Ulusal Projesinin bir parçası olarak yatay yüklemeye tabi tutulan mikro kazık grupları üzerinde yapılan deneylere dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır [40].

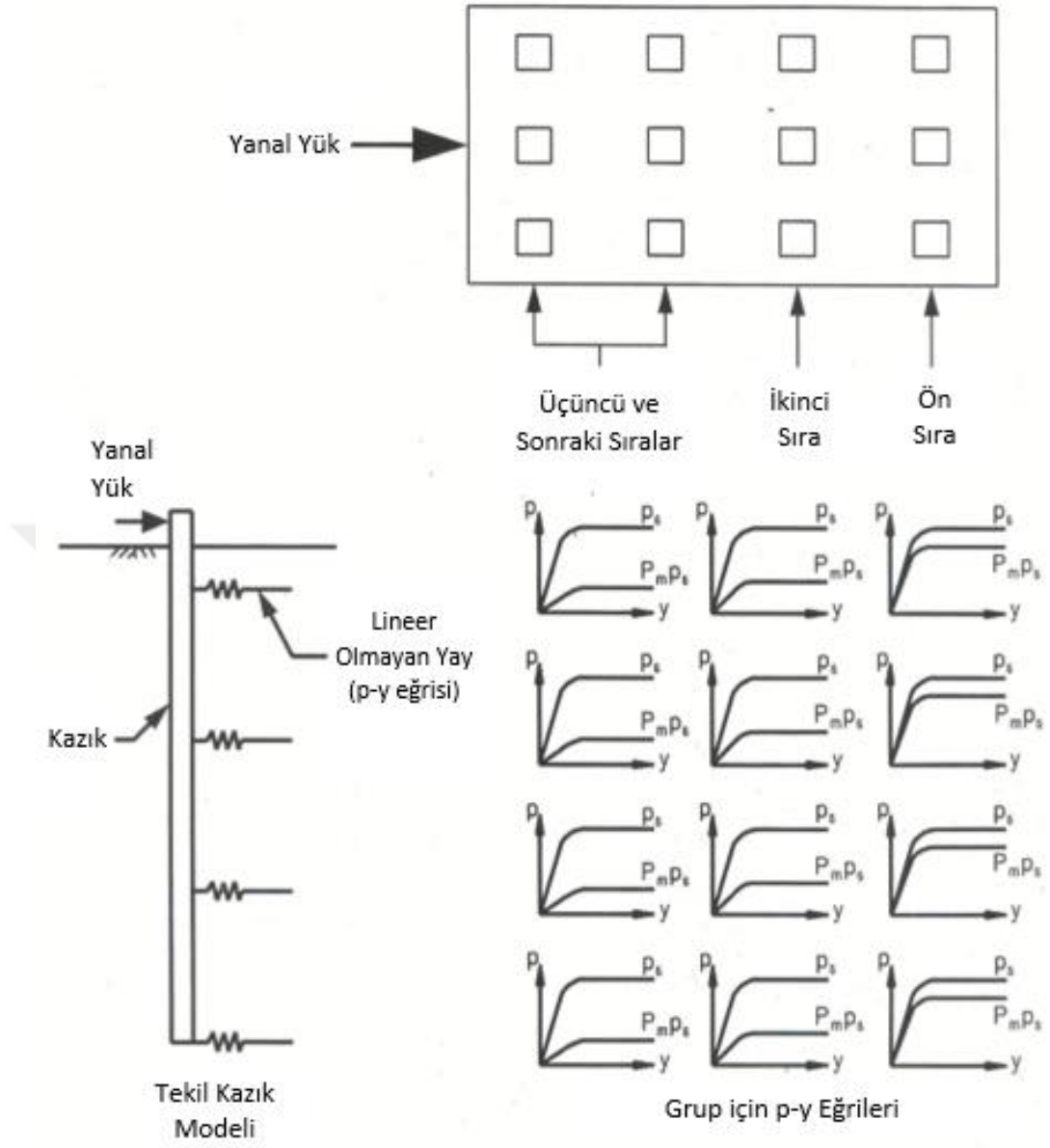
- Mikro kazıklar arasında mesafenin mikro kazık çapının 6-7 katı olduğu durumlarda grup etkisi ihmal edilebilir.
- Yükleme yönüne dik bir sıra halinde yerleştirilmiş mikro kazıklar için, kazıklar arası mesafenin mikro kazık çapının 3 katında daha büyük olduğu durumlarda grup etkisi ihmal edilebilir

Bir kazık grubundaki tek bir kazığın yanal kapasitesi, grup içindeki konumunun ve merkezden merkeze kazıklar arası mesafeye bağlıdır. Kazık gruplarının arka sıralarındaki kazıklar, ön sıradaki kazıklara göre yanal yüke karşı daha az dirence sahiptir ve bu nedenle daha büyük yer değiştirme yaparlar. Brown vd., tasarım ve analizlerde kazık-zemin-kazık etkileşimini hesaba katmak için kazık sırası ve sıradaki konumuna dayalı tekil kazıkların p-y eğrisini değiştirmek için bir p-çarpanı olan P_m 'yi önermiştir [41]. p-çarpanı kavramının bir örneği Şekil 3.21'da sunulmaktadır. Belirli bir sıradaki kazıklar için, kazık boyunca tüm p-y eğrilerine aynı P_m değeri uygulanmaktadır. Brown vd., sıkı kum zeminde kurulan belirli bir merkezden merkeze kazık arası mesafe ile 3x3 kazık grubu

üzerine yanal yükleme deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda, ön, orta ve arka sıralardaki kazıkların P_m değerleri sırasıyla 0,8, 0,4 ve 0,3 olarak bulunmuştur [41].

Brown'un yanal yüklü mikro kazık gruplarının tasarımı için önerdiği p-çarpan yönteminin uygulama adımları aşağıda sırayla açıklanmıştır [41].

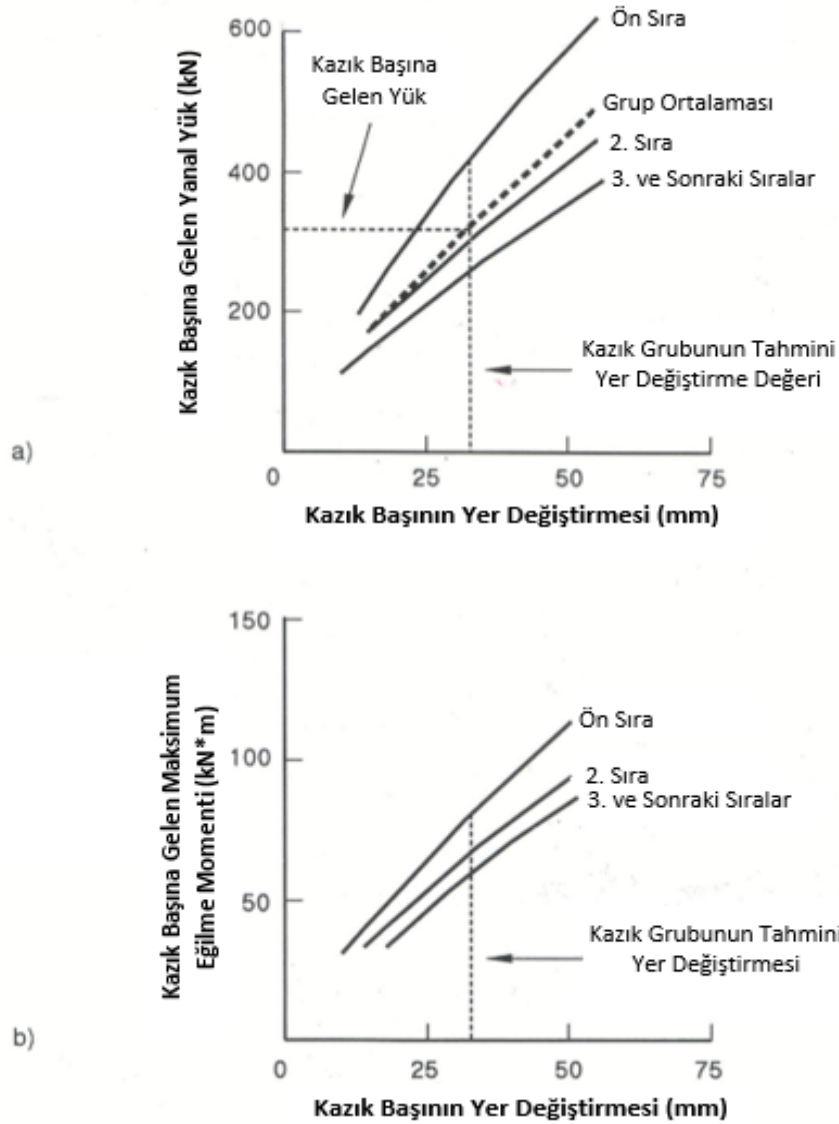
1. Tekil kazık için p-y eğrileri oluşturulur.
2. LPILE analizleri gerçekleştirilir.
 - a) Yük-yer değiştirme ve yük-moment verilerinin bulunması için kazıkların sıra konumuna göre P_m değerleri kullanılarak LPILE analizleri gerçekleştirilir.
 - b) Yapılan nümerik ve deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre ön sıra için 0,8, ikinci sıra için 0,4, üçüncü ve sonraki sıralar için 0,3 P_m değerlerinin kullanılması önerilmektedir. Önerilen bu değerler, merkezden merkeze kazıklar arası mesafenin kazık çapının 3 katı ve zemin yüzeyinde kazık ucunun yaptığı yer değiştirme değerlerin mikro kazık çapının yüzde 10 ila 15'i arasında olduğu durumlarda geçerli sayılmaktadır.
 - c) Farklı sıralardaki kazıkların kesme kuvvetine (zemin yüzeyinde) karşı yer değiştirme (deflection) davranışı belirlenir. Şekil 3.22.(a)'da gösterildiği gibi yüke karşı kazık başlığının yaptığı yer değiştirme değeri bulunur. Benzer şekilde, bir kesme yükü seti seçilerek ve her bir kesme yüküne karşı yer değiştirme değerlerinin bulunması için LPILE programı kullanılarak farklı sıralar için grafikler geliştirilebilmektedir.
3. Yanal yük altında grup yer değiştirmesi tahmin edilir.
 - a) Şekil 3.22.(a)'da gösterildiği gibi, kazık grubunu oluşturan her bir kazığa gelen yanal yük değeri bulunarak grubun ortalama yük çizgisi çizilir. Daha sonra, belli bir yer değiştirme değeri seçilerek grubun ortalama yük çizgisinden bu değere karşı gelen yanal yük değeri bulunur. Bulunan değer kazık grubunun alacağı ortalama yük değerini gösterir.
 - b) Her bir kazık tarafından karşılanacak ortalama yanal yükün belirlenmesi için bulunan kazık grubunun ortalama yanal yük değeri gruptaki kazık sayısına bölünür.
4. Kazıkların yapısal kabul edilebilirliği değerlendirilir.
 - a) Şekil 3.22.(b)'de gösterildiği gibi, her bir kazık sırası için LPILE programıyla yapılan analizlerden elde edilen maksimum eğilme moment değerine karşılık gelen yer değiştirme değerleri bulunur.
 - b) Farklı sıralardaki her bir kazığa etkileyen maksimum eğilme momentinin belirlenmesi için kazık başına yanal yük altındaki tahmini grup yer değiştirme değeri kullanılır. Kazıkların yapısal kapasitesi Denklem 3.3 veya Denklem 3.6'ya göre hesaplanır. Bu denklemlerde kullanılan M_{max} değeri tahmini grup yer değiştirme değerine karşılık gelen maksimum eğilme moment değeridir.
5. Üst yapı ve alt yapı etkileşimini dikkate alan çalışma ve analizler yapılır.



p_s = Tekil Mikro Kazık için p-y Eğrisi

$P_m p_s$ = Grup içindeki Mikro Kazıklar için p-y Eğrisi

Şekil 3.21. Yanal yükleme altında olan mikro kazık grup analizi için P-çarpanı kavramının şematik gösterimi [42]



Şekil 3.22. Yanal yükleme altında olan kazık grubunun analizi için yük-yer değiştirme ve eğilme momenti-yer değiştirme grafiklerinin gösterimi [42]

3.6.5. Mikro Kazıklar için Burkulma Hususları

Mikro kazıklar genellikle nispeten sağlam kayaya veya sıkı/sert zemine yerleştirilmektedir. Bu nedenle, mikro kazıkların kapasitesi genellikle mikro kazıkları oluşturan enjeksiyon ile çevredeki zemin arasında gelişen yanıl sürtünme direncinden ziyade elemanın yapısal dayanımı tarafından belirlenmektedir. Burkulmanın oluşma ihtimali, yerleştirilen mikro kazıkları çevreleyen zemin tarafından sağlanan yanıl destek ile azalmaktadır. Ancak, yumuşak veya zayıf zeminler (çok yumuşak tortul yatakları) ve büyük boşlukları olan araziler (karstik araziler) gibi zeminlere yerleştirilen mikro kazıklar, burkulma problemine maruz kalmakta ve tasarımda mikro kazıkların yük taşıma kapasitesini etkileyen bu husus göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle,

mikro kazıkların yerleştirileceği derinliğin iyice araştırılması, boşluklar ve zayıf tabakların kalınlık ve derinliklerinin belirlenmesi yapının güvenliği için hayati önem taşımaktadır.

Çok Zayıf veya Sıvılaştırılabilir Zeminle Çevrelenmiş Mikro Kazıklar

Burkulma potansiyelini değerlendirmek amacıyla, sadece SPT-N değeri gibi parametreler kullanılarak zayıf veya sıvılaştırılabilir zeminlerin tanımlanması her zaman mümkün olamamaktadır. Bunun yerine FHWA, mikro kazığın burkulma ihtimalini değerlendirmek için bir zemin modülü parametresini kullanan basit bir analiz sunmaktadır. Analizlerde, eksenel yük altında olan bir mikro kazık için kritik burkulma yükü (P_{kr}) ile mikro kazığın maksimum eksenel kapasitesi karşılaştırılır. Bu analizlerde sadece çelik muhafaza borusunun burkulmaya karşı direnci dikkate alınmakta ve enjeksiyonun katkısı hesaba katılmamaktadır. Kritik burkulma yükünün hesaplanması için Denklem 3.16 kullanılmaktadır:

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 E_{cb} I_{mk}}{l_{mk}^2} + \frac{E_s l_{mk}^2}{\pi^2} \quad (3.16)$$

Burada;

- P_{kr} : Kritik burkulma yükünü,
- E_{cb} : Çelik muhafaz borusunun elastisite modülünü,
- I_{mk} : Mikro kazığın atalet momentini,
- l_{mk} : Zayıf veya sıvılaştırılabilir zemin tabkasında bulunan mikro kazık uzunluğunu,
- E_s : Mikro kazığı çevreleyen zayıf veya sıvılaştırılabilir zeminin yanal reaksiyon modülünü (lateral reaction modulus of the soil) göstermektedir.

Burkulma durumu için zeminin limit yanal reaksiyon modülü (E_s^{limit}) aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$E_s^{limit} = \frac{l}{\left[\left(\frac{4l}{A^2} \right) \left(\frac{E_{cb}}{F^2_{y-çelik}} \right) \right]} \quad (3.17)$$

Denklemde parantez içindeki iki terimden birincisi kazığın geometrik özelliklerini, ikinci terim ise malzeme özelliklerini temsil etmektedir. Bu iki terimin kombinasyonu kazık faktörü olarak bilinmekte ve birimi ($gerilme^{-1}$) olarak verilmektedir.

Denklem 3.17’de, zeminin limit yanal reaksiyon modülü (E_s^{limit}) değeri ölçülen veya varsayılan zeminin elastisite modülünden (E_s) küçük olduğu durumlarda, mikro kazığın geoteknik ve yapısal dayanımı mikro kazık kapasitesini belirlemekte ve burkulma hesabının yapılmasına gerek kalmamaktadır. Eğer E_s^{limit} değeri E_s değerinden büyükse burkulma hesabı yapılmalıdır. Tablo 3.7 ve Tablo 3.8’de farklı zemin türleri için E_s değerleri verilmiştir.

Tablo 3.7. Farklı zemin türlerine göre E_s değerleri [16]

Zemin Türü	E_s (kPa)
Kil, Lös, Silt	
Hassas Yumuşak Killer	2400-14400
Orta Sert Killer	14400-48000
Çok Sert Killer	48000-96000
Lös	14400-57500
Silt	1900-19000
İnce Kum	
Gevşek	7600-11500
Orta Sıkı	11500-19000
Sıkı	19000-29000
Kum	
Gevşek	9600-29000
Orta Sıkı	29000-48000
Sıkı	48000-76000
Çakıl	
Gevşek	29000-76000
Orta Sıkı	76000-96000
Sıkı	96000-192000

Tablo 3.8. SPT-N Değerine göre çeşitli zemin türlerinin E_s değerleri [16]

Zemin Türü	E_s (kPa)
Siltler, kumlu siltler, az kohezyonlu karışımlar	400 $(N_1)_{60}$
Temiz ince ve orta ince kumlar, az siltli kumlar	700 $(N_1)_{60}$
Kaba kumlar ve az çakıllı kumlar	1000 $(N_1)_{60}$
Kumlu çakıllar	1200 $(N_1)_{60}$

Yapılan analizler burkulma tehlikesini ($E_s^{limit} > E_s$) gösteriyorsa, mikro kazığın çelik muhafaza borusuyla çevrelendiği bölümü için izin verilebilir maksimum basınç yükü hesaplanmalıdır. Denklem 3.1, burkulmanın da dikkate alınması için aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$P_{iv-b} = [0.4f'_{c-enj} \times A_{enj} + 0.47f_{y-çelik} \times (A_{çç} + A_{çb})] \times \frac{F_a}{0.47F_{y-çelik}} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'de izin verilebilir gerilme (F_a) aşağıdaki durumlara göre hesaplanmaktadır.

$$\text{Eğer } 0 < \frac{Kl_{mk}}{r_t} \leq C_c \text{ ise}$$

$$F_a = \frac{F_{y-\text{çelik}}}{FS} \times \left[1 - \frac{\left(\frac{KL}{r_t}\right)^2}{2C_c^2} \right] \quad (3.19)$$

Eğer $\frac{KL}{r_t} > C_c$ ise

$$F_a = \frac{\pi^2 E_{çb}}{FS \left[\frac{KL}{r_t} \right]^2} \quad (3.20)$$

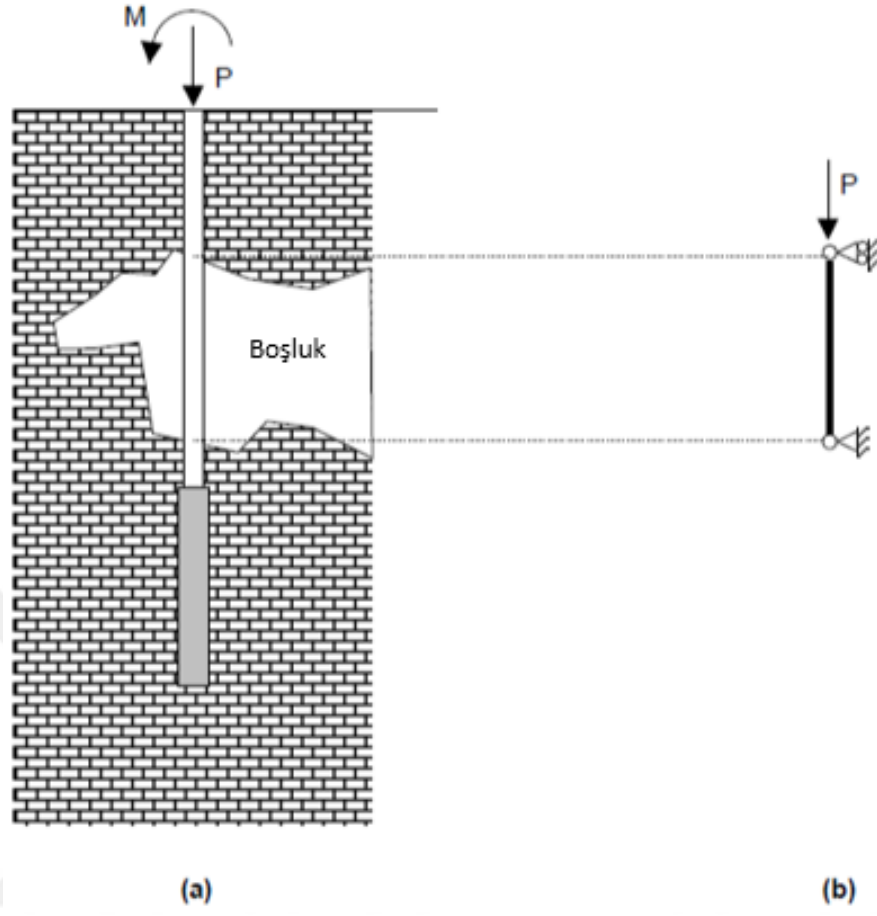
Burada, $C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_{çb}}{F_{y-\text{çelik}}}}$

- K : Etkin uzunluk katsayısını (1,0'e eşit olduğu varsayılır),
- L : Mikro kazığın desteklenmeyen (çelik muhafaza borusunun kullanılmadığı uzunluk) uzunluğunu,
- r_t : Çelik kesitinin atalet yarıçapını (radius of gyration) $\left[r_t = \left(\frac{I}{A} \right)^{1/2} \right]$, (I , atalet momenti, A , kesit alanı),
- FS : Güvenlik katsayısını [$FS = 2.12$ (bkz. Tablo 10.32.1.A, AASHTO)] [34],
- C_c : Narinlik oranını,
- $F_{y-\text{çelik}}$: Çelik muhafaza borusunun akma gerilmesini göstermektedir.

Birleşik eksenel ve eğilme gerilmelerinin mevcut olduğu ve burkulmanın kontrol edilmesi gerektiği durumlarda Denklem 3.3 kullanılmalıdır.

Boşluklu Zeminlere Yerleştirilen Mikro Kazıklar

Boşlukları olan veya sıvılaşabilen zeminlere yerleştirilen mikro kazıklar statik veya dinamik yükler altında burkulabilmektedir. Burkulma çoğunlukla karstik arazi veya sıvılaşmış zeminlerde meydana gelmektedir. Yapısal tasarım sırasında, herhangi bir boşluk veya zayıf zemin tabakası mevcutsa, iki sert ortam arasındaki serbest uzunluk için burkulma hesabı yapılmalıdır [43]. Belirtilen zeminlere yerleştirilen mikro kazıkların yapısal kapasitesi Denklem 3.18 kullanılarak hesaplanmaktadır. Mikro kazık uygulaması için izlenen prosedüre bağlı olarak, kazığın boşluktan geçen kısmı mafsallı-mafsallı, mafsallı-ankastre veya ankastre-ankastre kolon olarak analiz edilebilmekte ve k değeri belirtilen mesnet durumlarına göre seçilmektedir. Şekil 3.23'te, boşluğu olan karstik araziye yerleştirilmiş bir mikro kazık durumu görülmektedir. Mikro kazık, üstten uygulanan bir P yüküne tabi tutulmuştur. Bu durum her iki uçtan hareketi engellenmiş bir kolon olarak kabul edilmekte ve analizlerde $k = 1,0$ olarak alınmaktadır. Mikro kazık tasarımı sırasında geoteknik ve yapı mühendislerin işbirliği ve iletişim içinde olmaları gerekmektedir [16].



Şekil 3.23. Karstik arazide boşlukların arasına yerleştirilen mikro kazık; (a) gerçek durum modeli, (b) yapısal kapasitenin hesaplanması için kullanılan model [44]

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Mikro kazıkların eksenel yük altındaki davranışı zemin türüne ve enjeksiyonlama yöntemine göre değişmektedir. Mikro kazıkların yanal davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biri narinlik oranıdır. Mikro kazıklar, yüksek narinlik oranları ve küçük eğilme rijitlikleri (EI) nedeniyle düşük yanal dayanımına sahiptir. Uygulamalarda, bu sınırlamanın üstesinden gelmek ve eğilme rijitliğini artırmak için mikro kazıkların üst kısmına çelik muhafaz borusu yerleştirilmelidir. Mikro kazıkların yanal yükler altındaki davranışı, çakma veya diğer kazıkların davranışına benzemektedir. Yanal yükler, mikro kazık çapının 15 ila 20 katına eşdeğer uzunluktaki mikro kazıkların üst kısmı tarafından taşınmaktadır. Bu uzunluğun (15-20 D_{mk}) ötesinde mikro kazıklar, zemin seviyesinde uygulanan yanal yüklerden dolayı oluşacak belirgin herhangi bir eğilme momentine maruz kalmamaktadır. Bu nedenle, minimum mikro kazık muhafaza borusunun uzunluğu 20 D_{mk} kadar olması tavsiye edilmektedir. Ayrıca, mikro kazıkların merkezine yerleştirilen çelik donatılar yanal dayanıma çok fazla katkı sağlamamaktadır [16].

Yanal yük taşıma kapasitesinin, eğilme momentinin ve mikro kazıkların üst kısmında oluşan dönmenin hesaplanması için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Mikro kazıkların yanal kapasitesinin hesaplanması için Brom yöntemi (1964a ve 1964b) ve presiyometre yöntemi (Meyerhof ve Sastry) kullanılabilir [45-47]. Mikro kazıkların dönmesi ve iç kuvvetlerinin değerlendirilmesi için elastik süreklilik yöntemi [48] ve doğrusal olmayan analizi olan p-y eğrileri yaklaşımı [49-50] kullanılabilir.

FHWA yönergeleri, LPILE paket programını kullanarak yanal kapasitenin, eğilme momentlerinin ve mikro kazıkların dönme değerlerinin hesaplanması için yedi aşamalı bir çözüm yöntemi sunmaktadır.

Mikro kazık grubunun performansı diğer kazık tiplerine benzemekte, mikro kazıklar arasındaki mesafe ve zemin tipinden etkilenmektedir. Normalde, kazık grubu yer değiştirmesi, grup içindeki kazık başına ortalama yüke eşit yanal yük altında tekil mikro kazığın yer değiştirmesinden 2 ila 3 kat daha fazladır. Ayrıca, ön sıradaki kazıkların (yük yönü boyunca) yanal direnci, sonraki sıralardaki kazıkların direncinden önemli ölçüde daha yüksek olmaktadır. Bu davranış, birbirini takip eden iki kazık arasındaki zeminin, gölgeleme etkisi (Shadowing Effect) olarak bilinen ön sıradaki kazıkların hareketinden dolayı mukavemetinin bir kısmının kaybetmesi nedeniyle oluşmaktadır. Analizlerde p-y eğrisi yaklaşımı kullanılarak grup içindeki her bir tekil kazığın p-y eğrileri, p-çarpanı (P_m) yardımıyla değiştirilerek grup etkisi belirlenir. P_m , kazık-zemin-kazık etkileşimini hesaba katmak için grup içindeki kazığın konumuna bağlıdır [39].

Bu bölümde, farklı zemin türlerinde ve farklı enjeksiyon yöntemleri kullanılarak inşa edilen tekil ve mikro kazık gruplarının eksenel ve yatay performansını değerlendiren bazı çalışmalar sunulmaktadır. Bununla birlikte, mikro kazıkların performansını etkileyen narinlik oranı, optimum

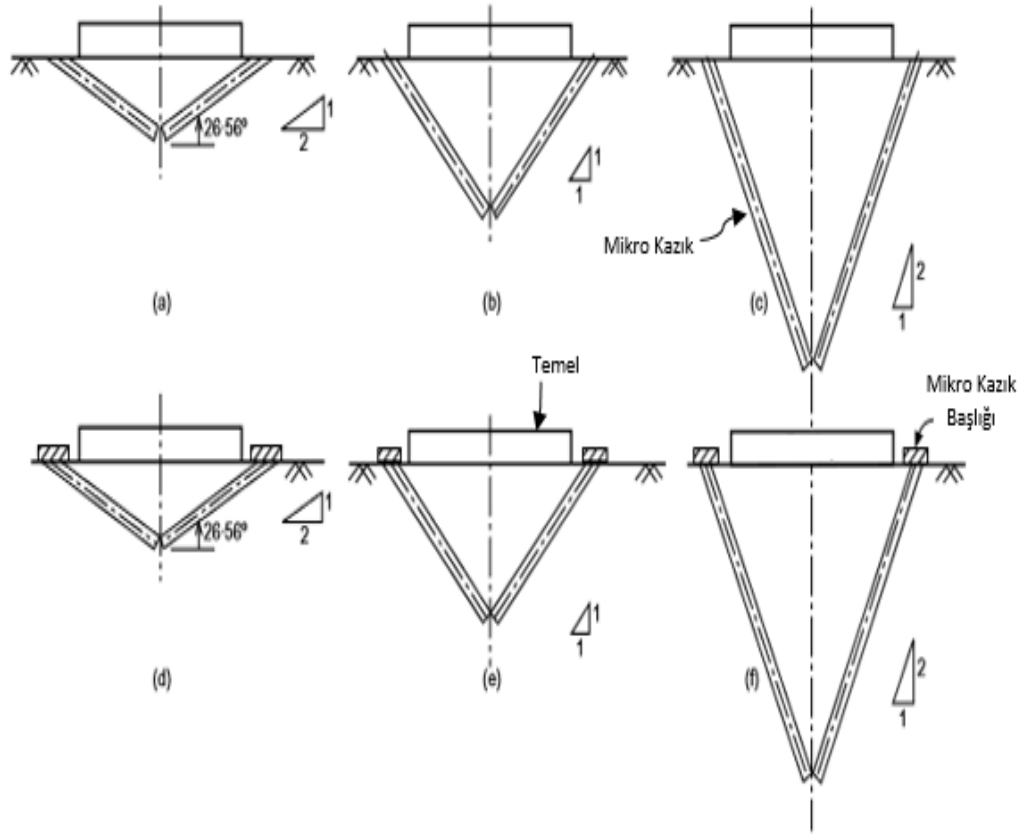
uzunluk, zemine yerleştirilen mikro kazıkların temel kenarına olan en ideal mesafe, zemine yerleştirme açısı ve buna benzer hususları nümerik ve deneysel olarak araştıran çalışmalar ile ilgili özet bilgi verilmektedir.

Bruce vd. yaptıkları çalışmada mikro kazıkların tarihsel gelişimi, sınıflandırılması, kullanım amaçları ve uygulama alanlarıyla ilgili detaylı bilgiler sunmuştur [6].

Jeon ve Kulhawy, çapları 15 ile 19 cm arasında ve uzunlukları 9 ile 30 m arasında değişen mikro kazıklar üzerinde 21 adet saha deneylerin sonuçlarını incelemiştir. Mikro kazıkların sekiz tanesi kohezyonlu ve 13 mikro kazık ise kohezyonsuz zemine yerleştirilmiştir. B, C ve D Tipleri dahil olmak üzere farklı enjeksiyonlama tipleri kullanılmıştır. Analizler sonucunda, enjeksiyon basıncının zemindeki gerilme durumunu büyük ölçüde etkilediği ve dolayısıyla mikro kazığın yük taşıma kapasitesinin basınçsız duruma nazaran önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Ayrıca, basınçlı enjeksiyonlama yöntemiyle yapılan mikro kazıkların yük taşıma kapasitesi, 100'den daha küçük uzunluk/çap oranına sahip ve çapı mikro kazıklara kıyasla daha büyük olan kazıklardan daha yüksek olabilmektedir. Taşıma kapasitesindeki bu artış zemin tipine bağlıdır. Kum zemin için mikro kazıkların taşıma kapasitesi, basınç kullanılmadan oluşturulan mikro kazıkların taşıma kapasitesinin 1,5 ila 2,5, kil zeminde ise 1,5 katı olmaktadır. Taşıma kapasitesindeki bu artışlar, mikro kazığın etkin çapını gerçek delgi çapına nazaran daha genişleten yüksek basınçlı enjeksiyona atfedilmiştir [51].

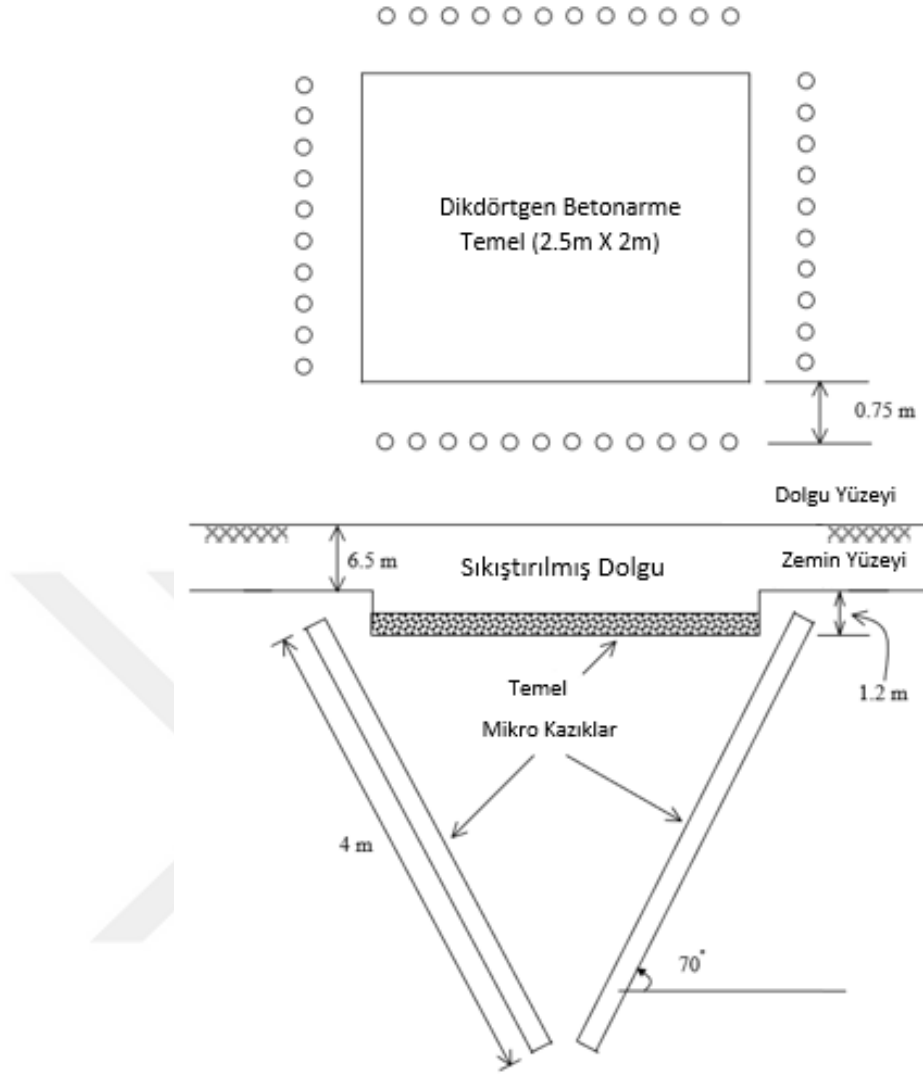
Sagara vd., Japonya'da yüksek kapasiteli bir mikro kazıklı temel üzerine saha deneyleri gerçekleştirmiştir. Kullanılan mikro kazıklar 205 mm çapında ve 8 m uzunluğunda seçilmiştir. Mikro kazıklar, çapı 51 mm olan çelik donatı çubukları ile birlikte kalınlığı 12,7 mm ve dış çapı 177,8 mm olan çelik muhafaza boruları kullanılarak güçlendirilmiştir. Aderans bölgenin uzunluğu yaklaşık 4 m olarak seçilmiştir. Deneyler sonucunda 60 mm düşey oturma değerrine karşılık 4100 kN'luk nihai taşıma gücüne ulaşıldığı görülmüştür [52].

Mevcut bir yapının etrafına çakılan mikro kazıkların eğiminin zeminin taşıma kapasitesi üzerine etkisi araştırıldığında, eğimim artması temelin taşıma kapasitesinde önemli derecede bir artış sağladığı görülmüştür. Murthy vd. yaptıkları nümerik çalışmada, mikro kazıkların eğimi arttığında temelin taşıma kapasitesinin arttığını göstermişlerdir. Sonuçlar, mikro kazıkların çakılmasıyla %30-45'lik bir taşıma kapasite iyileşmesinin sağladığını göstermektedir. Mikro kazıkların ucunun temel seviyesinde sabitlenmesiyle taşıma kapasitesinde önemli ölçüde artış sağlandığı görülmüştür [53]. Nümerik çalışmalarda kullanılan modelin şematik gösterimi Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Temel etrafına yerleştirilen mikro kazıkların gösterimi [53]

Babu vd. yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmada, temelin altında bulunan zeminin taşıma kapasitesini artırmak amacıyla 100 mm çapında ve 4 m uzunluğunda mikro kazıkları 70 derecelik bir açıyla yapı temel sisteminin etrafına yerleştirip deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sahada gerçekleştirilmiş bu çalışmanın verileri, sonlu elemanlar analizi yapan PLAXIS 2D paket programı kullanılarak nümerik olarak analiz edildikten sonra sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının birbirine benzer olduğu görülmüştür. Sonuçlar, mikro kazıklar kullanılmadan önce zeminin 20cm oturmaya karşılık taşıma kapasitesi 260 kPa iken mikro kazıkların kullanılmasıyla bu değer, aynı oturma değerine karşılık, 735 kPa'a çıktığını göstermiştir [54]. Deneysel ve nümerik çalışmada kullanılan modelin şematik gösterimi Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Dikdörtgen temel ve mikro kazıkların plan ve kesit görünümü [54]

Richards ve Rothbauer, dikey mikro kazıklar üzerinde 20 adet yanal yükleme deneyi gerçekleştirmiştir. Tüm mikro kazıkların uzunluk/çap oranları 20'den büyük seçilmiş ve çelik muhafaza borularla kaplanmıştır. Çapları 197 mm ile 381 mm arasında değişmektedir. Deneylerde kullanılan çelik muhafaza boruların akma dayanımı 552 MPa ve enjeksiyonun serbest basınç dayanımı 34,5 MPa'dır. Yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar, LPILE programı, NAVFAC yöntemi [55] ve karakteristik yük yöntemi (CLM) [56] dahil olmak üzere farklı analitik yöntemlerin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. 6,25 mm dönmeye karşılık gelen yük değeri esas alındığında, nihai yanal yük 40 kN ile 120 kN arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, farklı yöntemler kullanılarak hesaplanan nihai yüklerin deneysel sonuçlarına kıyasla biraz daha fazla olduğu ve hesaplanan tepkilerin yanal yükleme deneyleri sırasında gözlemlenen tepkilerden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Nümerik ve teorik

sonuçların deneysel sonuçlara nazaran biraz daha fazla çıkması güvenli tarafta kalmamızı sağlar [35].

Long ve ark., kalınlığı 13,8 mm ve dış çapı 244 mm olan çelik muhafaz borusu ile çevrelenen ve 15,2 m uzunluğunda olan 10 adet mikro kazık üzerinde yanal yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. Yükleme deneylerin sonuçları ile LPILE yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın olduğu görülmüş ve aralarındaki farkın maksimum $\pm\%10$ olarak tespit edilmiştir [57].

Han ve Ye, mikro kazıklı radye temel üzerine saha çalışması yürütmüşlerdir. 150 mm çapında ve $5D_{mk}$ aralıklı dört mikro kazıkla desteklenen kare (1,5 m x 1,5 m) bir radye temelden oluşan mikro kazıklı temel sistemi üzerinde yük testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, mikro kazıklarla desteklendikten sonra radyeye uygulanan ek yükün yaklaşık %70 ila %86'sının mikro kazıklar tarafından taşındığı görülmüştür. Fakat radyenin esnekliği, radye-zemin etkileşimi, radye ve mikro kazıklar arasındaki yük paylaşımı ve farklı oturma üzerindeki etkileri araştırılmamıştır [58].

Tsukada vd., mikro kazıklarla güçlendirildikten sonra radye bir temelin taşıma kapasitesindeki artışı araştırmışlardır. Deneyler, temel ve mikro kazıkları temsil eden küçük modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Farklı malzemelerden ve farklı rijitlik derecelerinde üç grup model yapılmıştır: (1) mikro kazıksız dairesel temeller, (2) tek mikro kazıklı dairesel temeller ve (3) mikro kazıklı dairesel temeller ($n_{mk}=2-8$). Deneylerde kullanılacak zemin olarak farklı rölatif sıkılık değerlerine sahip olan kum seçilmiştir [59]. Yapılan çalışmada, mikro kazıklar farklı eğim açıları ile ($\alpha_i = 0^\circ-60^\circ$) yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

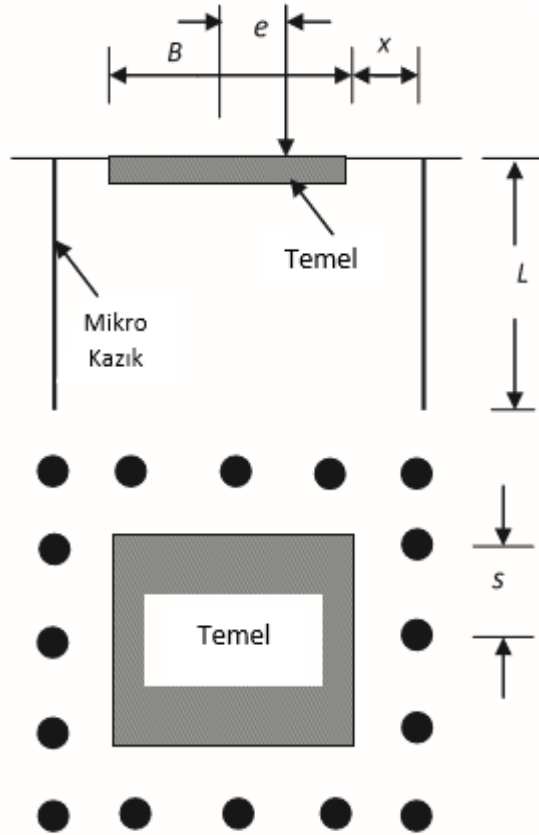
1. Sıkı kumda dilatasyon, gevşek ve orta sıkı kuma kıyasla taşıma kapasitesinin artmasında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
2. Mikro kazık grubuyla güçlendirilmiş radye temelin taşıma kapasitesi, radye temeli ve mikro kazıkların yük taşıma kapasitesinin toplamının iki katı olduğu görülmüştür.
3. Mikro kazıkların aksenal rijitliği ve yüzey sürtünmesi, çevredeki zeminin sıkılaşması ve temel ile mikro kazık grubu arasındaki etkileşimin artması nedeniyle sistemin taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [59].

Thomson vd., aksenal basınç, aksenal çekme ve yanal yükler altındaki mikro kazıklar üzerinde saha araştırması yapmışlardır. Yapılan araştırma ile FHWA'nın sunduğu mikro kazık tasarımının doğrulanması amaçlanmıştır. Aksenal basınç yüklemesi altında 2, aksenal çekme yüklemesi altında 2 ve yanal yükleme altında 4 olmak üzere 8 adet deney gerçekleştirilmiştir. Tüm mikro kazıklar, kalınlığı 13 mm ve dış çapı 273 mm olan dış çelik muhafaza borular ile kalınlığı 9,5 mm ve dış çapı 168 mm olan iç çelik muhafaza borulardan oluşmuş ve bütün uzunlukları boyunca 20 mm'lik çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Kullanılan enjeksiyonun yedi gün sonraki dayanım değeri 25 MPa ve 28 gün sonra 35 Mpa olarak ölçülmüştür. Mikro kazıkların gömülü uzunlukları 16,8 m ile 27,5

m arasında ve muhafaz boruların uzunlukları 7,3 m ile 12 m arasında değişmektedir [60]. Yapılan mikro kazık yük deneylerine dayanarak aşağıdaki gözlemler yapılmıştır.

1. FHWA'ya göre mikro kazık tasarım ilkeleriyle bulunan sonuçlar ile sahada yapılan deneysel çalışmanın sonuçları birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.
2. Deneylerde kullanılan enjeksiyon hacminin delginin geometrik hacminden önemli ölçüde daha yüksek olması, enjeksiyonun zemin içine nüfuz ettiğini ve dolayısıyla mikro kazık çapının arttığını göstermiştir.
3. Saha deneylerinden gözlemlenen yanal tepkiler, tahmin edilen davranışa kıyasla daha rijit olduğu gözlemlenmiştir [60].

Bhattacharjee vd., yaptıkları deneysel çalışmada mikro kazıklar ile desteklenen kare temel davranışını, mikro kazık çapının, uzunluğunun ve mikro kazıkların temel kenarından olan uzaklığının sistemin taşıma kapasitesi üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada kullanılan modelin şematik gösterimi Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda, mikro kazıkların çapı ve uzunluğu arttığında ve mikro kazıkların temel kenarından olan mesafesi azaldığında sistemin taşıma kapasitesinde önemli derecede bir artış görülmüştür [61].



Şekil 4.3. Kare temel ve mikro kazıkların plan ve kesit görünümü [61]

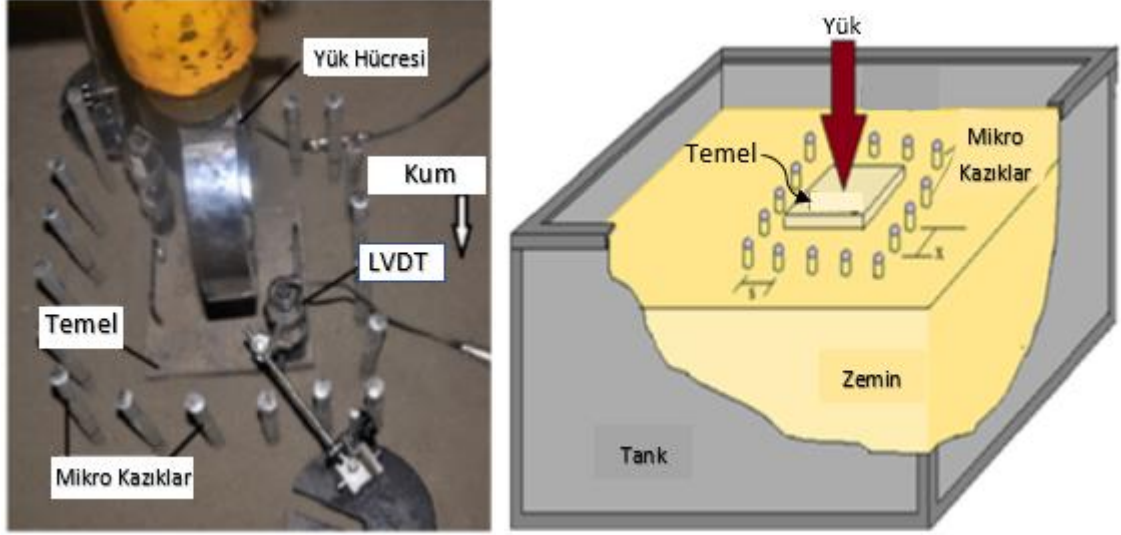
Elsaied, şevli sıkı kum zemin üzerine yerleştirilen temelin tek kenarına uygulanan mikro kazık uzunluğunun temelin taşıma kapasitesi ve şev stabilitesi üzerine etkisini araştırmak amacıyla farklı modeller tasarlayıp deneysel çalışma yapmıştır. Deneysel 5 farklı mikro kazık uzunluğu incelenmiş ve deney yapıldıktan sonra modeller arasında karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, mikro kazık uzunluğunun artmasıyla tek taraflı mikro kazıklı temelin taşıma kapasitesinde ve şev stabilitesinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Mikro kazıklı temelin taşıma kapasitesinin mikro kazıksız temelin taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak 7-9 katına ulaştığı görülmüştür [62].

Mittal ve Babu, Hindistanda Kalküta Yüksek Mahkemesi binasının güçlendirmesi için deneysel ve nümerik çalışma yapmıştır. Kalküta Yüksek Mahkemesi binası, Kalküta şehrinin sembolü mahiyetinde olan ve İnşaat çalışmaları 1872 yılında tamamlanmış bir binedir. Yumuşak zemin üzerine yapılmış olmasından dolayı 2014 yılında, temellerin oturması nedeniyle farklı yerlerde üst yapıda çatlaklar oluşmaya ve binaya ciddi zarar vermeye başlamıştır. Bu sorunları çözmek için sondaj çalışmaları yapıp zeminin özellikleri belirlendikten sonra PLAXIS 2D paket programı kullanılarak zemin koşulları ve bina modellenip analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında, güçlendirme yapılmadan önce 240 kPa gerilmeye karşı temelde 23 cm oturma meydana geldikten sonra zemin göçmekte olup mikro kazıklarla güçlendirme yapıldıktan sonra 400 kPa gerilmeye karşılık sadece 3,6 cm oturma meydana geldiği ve temelin çok rahatlıkla daha da fazla yük taşıyabileceği görülmüştür [63].

Gör, kazık malzemesi olarak çelik yerine farklı malzemelerin kullanılabilmesini ve kullanıldığı takdirde kazıklı radye temel sisteminin yük-oturma değerleri üzerindeki etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve nümerik analizlerinde cam takviyeli plastik (Fiber-Reinforced Plastic-FRP) ve çelik malzemelerinden imal edilmiş kazık gruplarının statik yükler etkisi altındaki davranışlarını incelemiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar, FRP ile imal edilmiş kazıkların çelik kazıklardan daha fazla yük taşıdığını ve bu kazık gruplarında oturma değerlerinin daha az olduğunu göstermiştir [64].

Malik vd. ve Singh vd., yaptıkları deneysel çalışmalarda, radye temelin çevresine, temel kenarından farklı uzaklıklarda mikro kazıklar yerleştirerek narinlik oranını, optimum uzunluğu ve çapını, mikro kazıkların temelden olan optimum uzaklığı ve mikro kazıkların zeminin oturma ve yük taşıma kapasitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, mikro kazıkların zeminin oturma özellikleri ve yük taşıma kapasitesi üzerinde çok etkili olduğunu ve iyileştirmenin %76'ya kadar çıktığını göstermektedir. Zeminin taşıma kapasitesi, mikro kazıkların çapı ve uzunluğunun artması ve temelin kenarından olan uzaklığının azalmasıyla arttığı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda, zeminin yük taşıma kapasitesi değerinin maksimuma ulaşmasını sağlayan farklı parametrelerin optimum değerleri; kazık uzunluğunun temel genişliğine oranı ($L/B=2$), mikro kazığın çapı ($D_{mk}=20$ mm), mikro kazıkların temelden olan optimum uzaklık oranı ($E_D/B=0,3$) ve

mikro kazıkların narinlik oranı ($L/D_{mk}=20$) olarak belirlenmiştir [65-67]. Yapılan farklı deneysel çalışmalarda kullanılan modelin gerçek ve şematik gösterimi Şekil 4.4’de gösterilmektedir



Şekil 4.4. Deneysel sistemi ve şematik gösterimi [65-67]

Davidow vd., yumuşak killi zeminlerde inşa edilen elektrik iletim kulelerin temelinin altında destekleyici eleman olarak uygulanabileceğini [68], Shah vd., mikro kazıkların uçucu kül takviyeli zeminlerde kullanılması durumlarda zeminin yük taşıma kapasitesini %340’a kadar arttırdığını [69], ve daha farklı alanlarda ve amaçlarla kullanılabilmesini gösteren çok sayıda deneysel ve nümerik çalışma bulunmaktadır [70-76].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, genel olarak mikro kazık boyu, çapı, mikro kazıklar arası mesafe, mikro kazık malzemesi, kazık-zemin etkileşimi, zemin etkileri gibi parametrelerin değişimi konuları incelenerek mikro kazıklı temellerin ve mikro kazıklar ile güçlendirilmiş temellerin yük taşıma ve oturma mekanizmalarının daha fazla anlaşılması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmalar, hem deneysel hem de bilgisayar programları yardımı ile nümerik olarak yapılmıştır. Deneysel olarak bazı uygulamaların incelenmesi büyük uğraşlar ve ekonomi gerektirmektedir. Ayrıca deneysel olarak büyük ölçeklerde bu çalışmaların yapılması oldukça zor olabilmektedir. Bu sebeple mikro kazık tasarımına etki eden parametrelerin laboratuvar ortamında daha küçük modellerle deneysel olarak veya geliştirilen bilgisayar yazılımlarıyla nümerik olarak incelenmesi daha çok tercih edilmektedir.

5. MATERYAL VE METOT

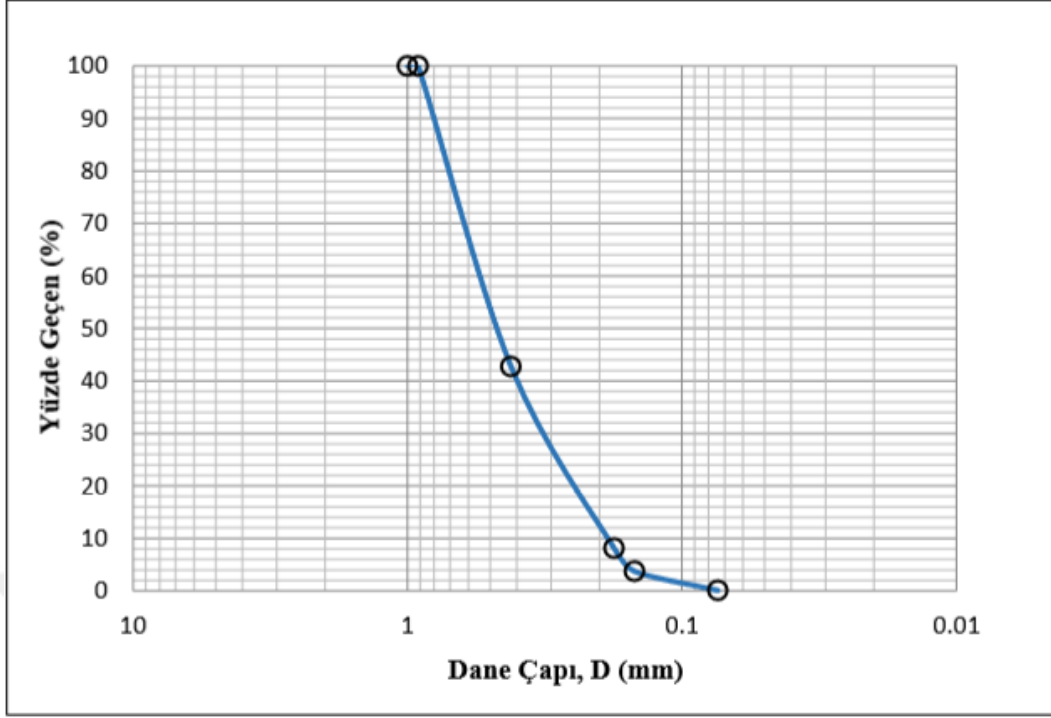
5.1. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, kum zemin ile doldurulmuş yükleme tankının içerisinde farklı kazık sayıları ve farklı kazıklar arası mesafe ile bir radye temelin etrafına mikro kazıklar çakılarak düşey olarak yüklenmesini içermektedir. Tank içerisine yerleştirilen kum zemin, üç farklı rölatif sıklıkta ($D_r = \%10$, $\%40$ ve $\%65$) hazırlanmıştır. Oluşturulan modeller üzerinde yapılan düşey yükleme deneyleri bu üç farklı sıklık ve farklı kazık kombinasyonlarında ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Kazık ve temel malzemesi olarak çelik seçilmiştir. Deneylerde, farklı rölatif zemin sıklıkları kullanılarak bir radye temelin etrafına farklı kombinasyonlarda yerleştirilen mikro kazıkların zeminin taşıma gücü ve oturma değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu bölümde, yapılan deneylerde kullanılan deney düzeneği, kazıklar, radye ve kum zemin özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Deneysel çalışmalarda izlenen yol hakkında detaylar verilerek deney sonuçları tablo ve grafikler şeklinde sunulmuştur.

5.2. Kum Zemin

Literatür incelendiğinde, temelin yük-oturma davranışını incelemek için laboratuvarlarda yapılan modelleme deneylerinin çoğunda (kazık modelleri, ankraj modelleri, temel modelleri vs.) kullanılan kohezyonsuz kum zemin dane boyutu 1,0 mm'den daha küçük seçilmiş olduğu görülmektedir [77-80]. Deneylerde, Elazığ ilinde bulunan Murat Nehri'nden getirilen ve dane boyutu 0,074mm (No.200) ile 1,0mm (No.18) arasında olan dere kumu kullanılmıştır. Kum zemine ait granülometri eğrisi elek analizleri yapılarak elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan zemin üzerinde, ASTM D854-14, ASTM D422-63(2007)e2 ve ASTM C127-15 [81-83] standartlarına uygun olarak yapılan elek analizi, piknometre ve rölatif sıklık deneyleri sonucunda zeminin endeks özellikleri elde edilmiştir. USCS sistemine göre kum zemin modeli SP'dir (kötü derecelenmiş kum). Deneylerde kullanılan zemine ait granülometri eğrisi Şekil 5.1'de ve endeks özellikleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan zemine ait granülometri eğrisi [64]

Tablo 5.1. Kum malzemesinin endeks özellikleri [64]

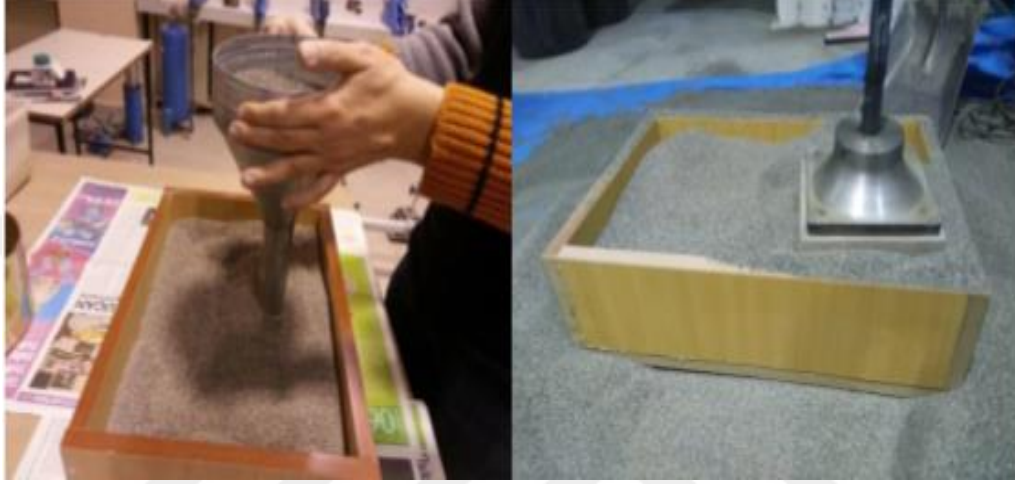
D10 (mm)	0,18
D50 (mm)	0,45
Özgül Birim Hacim Ağırlığı, G_s	2,77
Minimum Kuru Birim Hac. Ağ. (kN/m^3)	14,30
Maksimum Kuru Birim Hac. Ağ. (kN/m^3)	17,50
Maksimum – Minimum Dane Boyutu, $D_{max}-D_{min}$ (mm)	1 - 0,074
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0,553
Maksimum Boşluk Oranı, e_{max}	0,903

5.3. Rölatif Sıklık Deneyleri

Uygun bir rölatif sıklığa ulaşmak için çeşitli ve çok sayıda deneme deneyleri yapılmıştır. Farklı yüksekliklerden yağmurlama yöntemi ile bir kap içerisine dökülen zeminin sıklık değerleri ölçülmüştür. Daha sıkı zemin numunelerinin hazırlanması için titreşim cihazı (el kompaktörü) kullanılmıştır. Zeminin istenen sıklık değerlerine ulaşması ve gerekli olan titreşim süresinin belirlenmesi için çok sayıda deney yapılmıştır. Titreşim cihazı ve yağmurlama yöntemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda zeminin istenen sıklık değerleri olan D_r =%10, %40 ve %65 bulunmuş (Şekil 5.2) ve farklı deneyler için farklı sıklıklardaki kum zemin numuneleri deney tankına yerleştirilmiştir. Rölatif sıklıklar için uygulanan yöntemler Tablo 5.2 de görülmektedir.

Tablo 5.2. Kum malzemesinin rölatif sıklık ve sıkıştırma yöntemi arasındaki ilişkileri [64]

Sıkıştırma Yöntemi	Ortalama Kuru Birim Hac. Ağ. ($\gamma_{kört}$), (kN/m ³)	Boşluk Oranı (e)	Rölatif Sıklık (Dr, %)
Sadece yağmurlama	14,55	0,869	10
10 cm'den yağmurlama sonrasında 1sn titreşim cihazı uygulaması	15,41	0,763	40
10 cm'den yağmurlama sonrasında 3sn titreşim cihazı uygulaması	16,22	0,676	65



Şekil 5.2. Rölatif sıklık deneyleri [64]

5.4. Deney Tankı, Kum Bunker ve Kovalı Elevatör

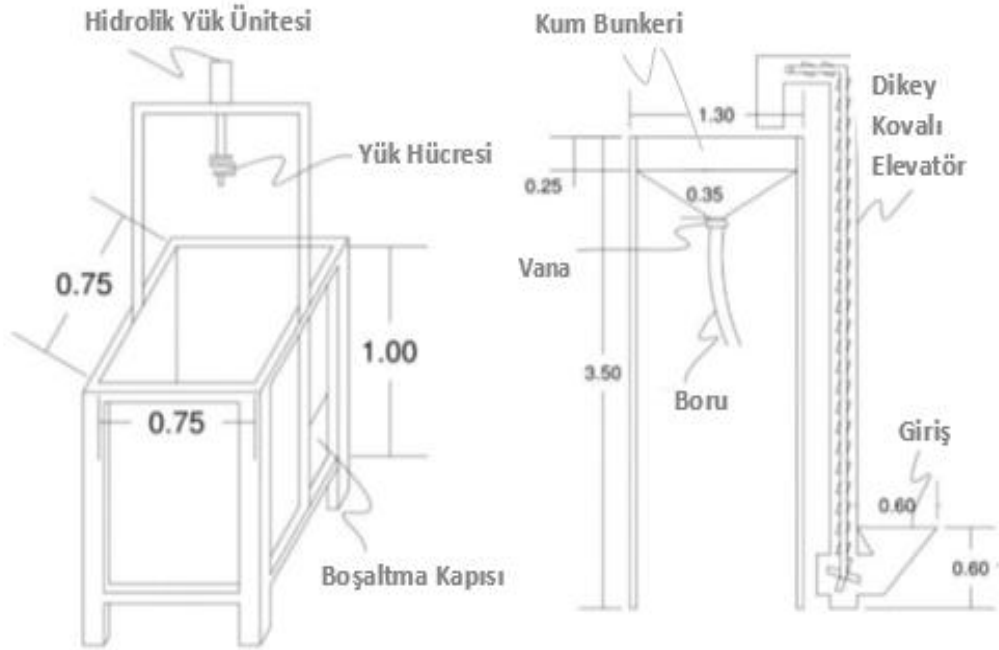
İçerisine kum zemin konularak üzerinde planlanan yükleme deneylerinin yapılması için 750x750x1000mm boyutlarına sahip olan bir deney tankı kullanılmıştır. Deney yapılırken kum zeminin içindeki hareketlerin rahatlıkla gözlemlenebilmesi için deney tankının iki yüzeyi kalınlığı 10mm olan ve ölçülendirilmiş kırılmaz camdan yapılmıştır. Planlanan deneylerin yapılması için, zemin yüzeyinden 60 cm yukarıda bulunan orta büyüklükte bir kovanın içine kum dökülmüştür. Deney tankına kum aktarmak için 340cm yüksekliğinde bir kum bunkerine mevcuttur. Yapılan deneylerde kullanılan kum zemin 340cm yüksekliğinde bulunan bunkere bir dikey kovalı elevatör yardımıyla çıkartılmıştır. Kum bunkerine gerekli miktarda kum çıkartıldıktan sonra esnek bir plastik boru ile bu kum deney tankına dökülmüştür. Deneyler için boyutları 150x150mm olan radye temel seçilmiştir. Deney sistemi kurularak yükleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler tamamlandıktan sonra model tankın alt kısmında bulunan çıkış kullanılarak tanktaki kum boşaltılmış ve bu işlemler her deney için tekrarlanmıştır.

Sınır etkilerinin (boundary effect) minimum olması gerektiği dikkate alınarak tank ve radye boyutları belirlenmiştir. Literatür tarandığında, kare temel kenarının tank boyutlarına oranı 1/5 olması yarı sonsuz ortamın oluşması için yeterli olacağı görülmektedir [84 - 86]. Deney tankı,

kovalı elevatör, kum bunkeri ve deney sisteminin detayları Şekil 5.3'te ve deney sistemi ise Şekil 5.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Deney tankı, kum bunkeri ve kovalı elevatör



Şekil 5.4. Deney sisteminin şematik gösterimi [87]

5.5. Radye Plaka

Radye plakanın boyutları 150x150x25mm olup St37 çelik malzemesinden milimetre hassasiyetinde imal edilmiştir. Radye plaka, paslanmasının önlenmesi için galvanizle kaplanmış olup detayları Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Radye plaka, bilye ve özel yük başlığı

5.6. Kılavuz Başlık ve Çakma Aparatı

Deney tankının ortasına radye plakanın konulmasından sonra radye temelin tek kenarında, farklı iki kenarında, üç kenarında ve radye temelin tüm çevresinde, farklı kazık sayıları ve kazıklar arası mesafeler ile mikro kazıklar yerleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda mikro kazıkların temel kenarına olan optimum mesafesi ($\frac{E_k}{B} = 0,3$) olarak bulunmuştur [65]. Verilen bağıntı kullanılarak bütün kazık kombinasyonlarında kazık ve temel arasındaki mesafe 4,5cm olarak seçilmiştir. Kazıklar temel etrafına yerleştirilirken, aynı doğrultu ve mesafede olması ve kazık merkezinden radye temelin kenarına olan mesafenin bütün deneylerde eşit olması için sert kartondan hazırlanan milimetrik başlıklar ve özel olarak imal edilmiş kılavuz başlıkları kullanılmıştır (Şekil 5.6). Kullanılan kazıkların uzunluğu 38cm seçilmiş olup bütün kazıklar 8cm dışarıda kalacak şekilde zemine yerleştirilmiştir. Kazıkların 10cm yüksekliği olan kılavuz başlıklar ile sadece 30cm'sinin zemine yerleştirilmesi ve bütün doğrultularda yerleştirilen kazıkların boylarının eşit olması için özel bir çakma aparatı kullanılmıştır. Kazıklar yerleştirildikten sonra su

terazisiyle terazide olması sağlanmış ve oluşturulan modelin hatasız olması için yapılan bütün işlemler özen ve hassasiyet gösterilerek yapılmıştır.



Şekil 5.6. Kılavuz başlık ve çakma aparatı kullanımı

5.7. Model Kazıklar

Literatür incelendiği zaman, kazıklı temeller ve benzeri çalışmaların laboratuvar ortamında modellenmesi için çoğunlukla metal kazıkların kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, önceki çalışmalara uygun olacak şekilde çelik kazıklar kullanılmıştır. Deneylede kullanılan kazıkların uzunluğu (L) 380mm ve çapı (D) 10 mm'dir. Kazıklar, deney tankına yerleştirilen temelin etrafına hazırlanan kılavuzlar yardımıyla 30cm'ye kadar zemine çakılmıştır. Farklı kombinasyonların oluşturulmasında belirlenen mesafelerin değişmemesi ve kazıkların tamamen dik bir şekilde zemine çakılması için hassas bir şekilde çalışılıp gereken özen gösterilmiştir. Temelin etrafına yerleştirilen kazıkların en alt ucundan deney tankının tabanına kadar 600 mm'lik bir kum tabakası bırakılarak yarı sonsuz ortamın oluşması planlanmıştır. Literatüre bakıldığında, altta kalan zemin tabakasının kalınlığı kazık boyunun iki katı olması halinde bu şartın sağlandığı kabul edilmiştir [88-90]. Bu çalışmada kullanılan model kazıklar Şekil 5.7'de ve kazıkların özellikleri Tablo 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Deneylerde kullanılan çelik kazıklar

Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan çelik kazıkların özellikleri [64]

Özellikler	Çelik (St37)
Çekme Dayanımı (MPa)	360
Basınç Dayanımı (MPa)	240
Elastisite Modülü (GPa)	210
Yoğunluk (gr/cm ³)	7,85

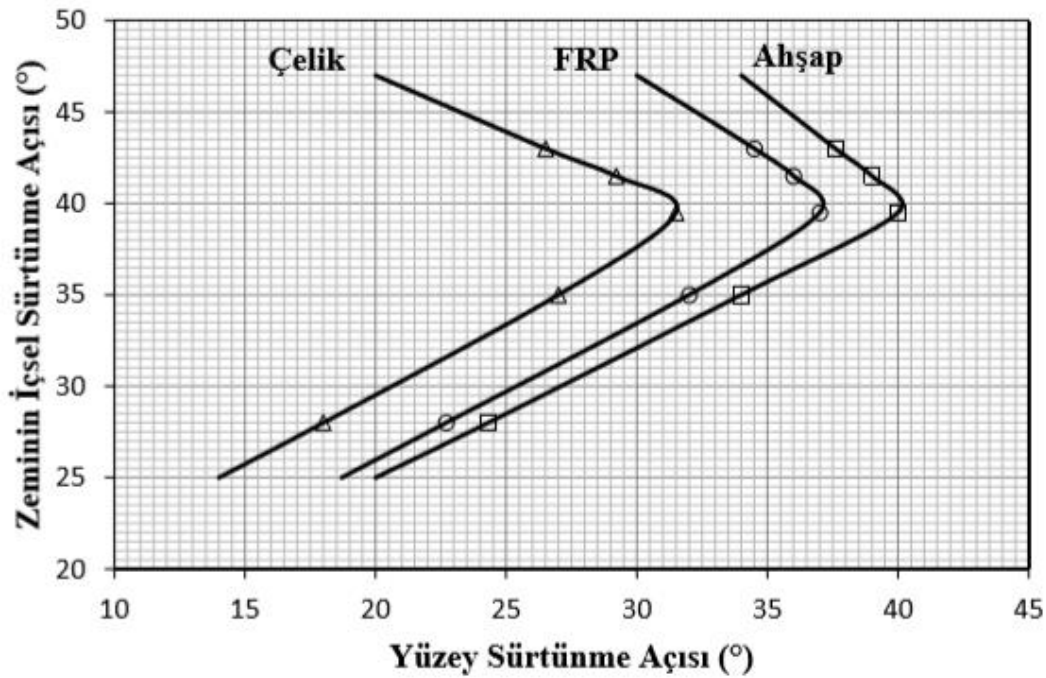
5.8. Farklı Kazık Malzemeleri ile Zemin Arasındaki Yüzey Sürtünme Açılarının Tespiti ve Taşıma Gücü Üzerindeki Etkisi

Yapı elemanları ile zemin arasındaki sürtünme kuvvetleri temel mühendisliğinde büyük bir öneme sahiptir. 20. yüzyılın ilk yarısından bu yana zemin-yapı etkileşiminin daha iyi anlaşılması için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda farklı yöntemler, denklemler, bağıntı ve abaklar önerilmiştir. Önerilen bu yöntemlerin kullanılmasıyla zemin ve yapı elemanlarının farklı özelliklerinin daha iyi anlaşılması, zemin-yapı etkileşiminin daha gerçekçi modellenmesi, kazık gibi yapı elemanlarının taşıma kapasitesi ve zemin taşıma gücünün daha doğru bir şekilde hesaplanması ve dolayısıyla daha güvenli yapıların inşa edilmesi sağlanmaktadır.

Zemin-yapı etkileşimini etkileyen en büyük faktörler yüzey ve içsel sürtünme açılarıdır. Zemin ve kazık malzemelerin yüzey sürtünme ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişkinin belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde farklı malzemelerden yapılan kazıklarla farklı içsel sürtünmelerine sahip olan zemine kesme kutusu deneyleri yapılarak yüzey sürtünme

açısı değerlerini veren farklı abaklar oluşturulmuştur. Farklı içsel sürtünme açılarına sahip zeminler ile farklı kazık malzemeleri arasındaki yüzey sürtünme açısı değerlerinin tespiti için oluşturulmuş bir abak Şekil 5.8'de görülmektedir [91].

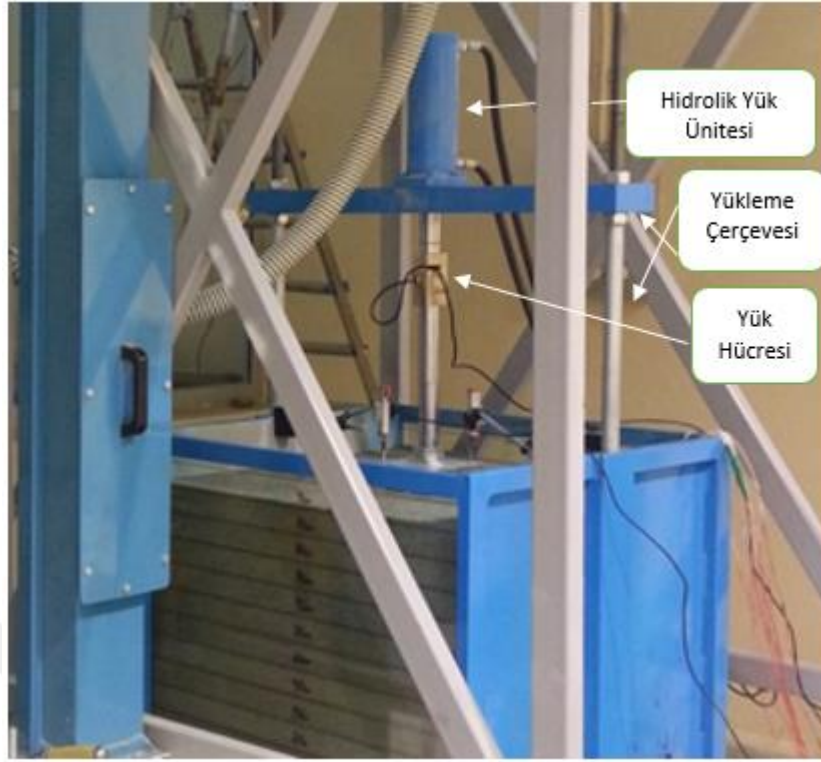
Zemin sıklığı değişince içsel sürtünme açıları da değişmektedir. Kum zeminin rölatif sıklığı $D_r = \%10$, $\%40$ ve $\%65$ olan üç farklı durumu için kesme kutusu deneyleri yapıp içsel sürtünme açıları sırasıyla $\phi_{10} = 42,5^\circ$, $\phi_{40} = 45,4^\circ$, $\phi_{65} = 48,9^\circ$ olarak elde edilmiştir. Böylece bu abak ile kazık malzemeleri olarak kullanılan çeliğin rölatif sıklığı, $D_r = \%10$, $\%40$, $\%65$ olan kum zemin ile yaptığı yüzey sürtünme açıları $\delta_{10} = 27,5^\circ$, $\delta_{40} = 22,5^\circ$ ve $\delta_{65} = 17,0^\circ$ olarak elde edilmiştir [64]. Deneysel çalışmalar ve nümerik analizlerde bu değerler kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Yüzey sürtünme açısı abağı [64]

5.9. Yükleme Düzenegi

Deneysel çalışmalarda kapasitesi 50 kN olan bir hidrolik yükleme ünitesi kullanılmıştır. Deney sistemini iki çelik kolon tarafından desteklenen hidrolik kontrol ünitesi ve yükleme çerçevesinden oluşmaktadır (Şekil 5.9). Yükleme hızı manuel olarak kullanıcı tarafından ayarlanabilmektedir. Yük zaman değeri ve grafiği deney sisteminin bilgisayar ekranında gösterilmekte ve kullanıcı tarafından değişimler izlenebilmektedir. Yükleme işlemi başladıktan sonra alıcılardan gelen veriler otomatik olarak bilgisayarda kayıt edilmektedir. Yükleme ünitesi ile farklı hızlarda yüklemeler yapılabilmektedir. Yapılan deneme deneylerden sonra yükleme hızı 2,0 mm/dk olarak kabul edilmiş ve deneyler yapılmıştır.



Şekil 5.9. Yükleme düzeneği

5.10. Yük Hücresi

Deney yapılırken uygulanan düşey yük değerinin okunması için kapasitesi 5,0 ton olan ve önceki çalışmalarda tutarlı sonuçlar veren S tipi elektronik yük hücresi seçilmiştir (Şekil 5.10). Yük hücresinin aldığı veriler direkt olarak veri kayıt cihazına aktarılmaktadır.



Şekil 5.10. S tipi 5 ton kapasiteli yük hücresi

5.11. Veri Toplama Cihazı (Datalogger)

Tüm deneyler ve yüklemeler sırasında yük hücresinde oluşan değerler ve LVDT'lerde meydana gelen deplasman değerleri 8 kanallı Testbox 1001 veri toplama cihazına aktararak bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 5.11). Kaydedilen veriler excel programına aktarılıp deneylerin yük oturma grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 5.11. Veri toplama cihazı

5.12. Titreşim Cihazı (El Kompaktörü)

İstenilen sıklıklardaki zemin tabakasının hazırlanması için deney tankına kum zemini yerleştirilmiştir. Deney kasasının iki cam yüzeyine aralarında 5,0 cm mesafe kalacak şekilde yatay çizgiler çizilerek ölçeklendirilmiştir. Kum tabakalarının istenen sıklıklarda hazırlanması için titreşim cihazı kullanılmıştır. Kullanılan titreşim cihazının ucu 14cm x 14cm boyurlarında ve 2,5cm kalınlığındadır. Dağılımın üniform olması ve kum danelerin sıkıştırma işlemi sırasında kırılmaması için titreşim cihazının ucuna malzemesi derlin olan bir plaka eklenmiştir. Deneylerde kullanılan titreşim cihazının Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Titreşim cihazı ve kullanımı

5.13. Deplasman Ölçerler (LVDT)

Yapılan deneylerde düşey yer değiştirmesinin hesaplanması için iki SLSP kablolu tip lineer deplasman ölçerler (potansiyometreler) kullanılmıştır. Potansiyometreler, 0,00-50,00mm arasında deplasmanları hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Uygulanan düşey yükten dolayı radye temelde oluşan oturma değerleri deney boyunca potansiyometreler tarafından ölçülüp veri kaydetme ünitesine aktarılmıştır. Tüm deneylerde, radye plakanın karşı kenarlarının çapraz köşelerine iki adet potansiyometre yerleştirilip manyetik tutucularla deney tankının iç kenarlarına sabitlenmiştir (Şekil 5.13). Deney bittiğinde deplasman ölçerlerden gelen verilerin ortalaması alınarak yük oturma grafikleri oluşturulmuştur. Böylece yükleme deneyi boyunca herhangi bir zaman aralığında veya herhangi bir yük değerinde radye temelin oturma değerleri belirlenebilmektedir.



Şekil 5.13. Deplasman ölçerler (LVDT) ve radye plak üzerine yerleşimleri

Veri toplama cihazından gelen verilerin kaydedilme aralığı saniyede iki değer olması, deneyin herhangi bir zaman aralığındaki değerlerinin veya istenilen herhangi bir yük değerine karşılık gelen oturma değerinin rahatlıkla okunabilmesini ve deney boyunca bütün değişimlerin grafiksel olarak daha gerçekçi çizilebilmesini sağlamıştır.

5.14. Zemin Yüzeyinin Oluşturulması

Bu işlemin yapılması için önceden hazırlanan kum, dikey kovalı elevatör yardımıyla kum bunkerine çıkarılmıştır. Deneylerde kullanılacak kum zemin, $D_r = \%10, \%40, \%65$ olmak üzere üç

farklı rölâtif sıklıkta hazırlanmıştır. Deney tankının yüksekliği 100 cm'dir. $D_r = \%10$ olan gevşek zeminin hazırlanması için bunkerde mevcut olan kum, plastik boru yardımıyla 10cm yükseklikten deney tankına dökülmüş olup herhangi bir titreşim cihazı kullanılmamıştır. $D_r = \%40 - \%65$ olan zemin tabakasının hazırlanması için öncelikle yüksekliği 11-12'şer cm olan kum tabakaları serilmiştir. Sonra, kum zeminin bütün yüzeyine 1-3sn olacak şekilde titreşim cihazı uygulanarak istenen rölâtif sıklıklara sahip ve yüksekliği 10cm olan tabakalar oluşturulmuştur. Böylelikle istenen sıklıklarda ve yüksekliklerde zemin tabakaları hazırlanmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Farklı rölâtif sıklıklardaki zemin tabakalarının oluşturulması

5.15. Laboratuvarda Düşey Yükleme Deneylerinin Yapılması

Deneylerde kullanılan kum Şekil 5.15'te gösterildiği gibi dikey kovalı elevatöre aktarılmıştır. Dikey kovalı elevatör yardımıyla bunkere alınan kum, 10 ila 13cm yükseklikten esnek bir plastik boru yardımıyla deney tankına tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Kalınlığı 11-12 cm olan tabakalar sıkıştırma sonrası yüksekliği 10 cm'ye kadar düşmektedir. Tank içerisine yerleştirilen kum zemin üç farklı rölatif sıklıkta ($D_r=10\%$, 40% ve 65%) hazırlanmıştır. Deney tankına yerleştirilen kum zeminin yüksekliği 90 cm'dir. Deneylerdeki en gevşek durum olan ($D_r=10\%$), 10 ila 13cm yükseklikten esnek bir plastik boru ile yağmurlama yaparak elde edilmiştir. Orta sıkı ($D_r=40\%$) ve sıkı ($D_r=65\%$) durumlar için, deney tankına kum yerleştirildikten sonra bütün yüzeye sırasıyla 1sn ve 3sn olacak şekilde titreşim cihazıyla sıkıştırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 5.16). En üst kum zemin yüzeyi su terazisi kullanılarak hassas bir şekilde düzleştirilmiştir. Daha sonra deney tankının orta kısmına radye plaka yerleştirilerek uygun teraziye getirilmiştir. Temelin etrafına yerleştirilen kazıkların aynı hizada ve temelin kenarından eşit uzaklıkta olması için sert kartondan hazırlanan kılavuzlar kullanılmıştır. Kılavuzda açılan dairesel kazık yerlerin merkezinden temelin kenarına olan mesafesi 4,5 cm'dir. Kazıklar arası mesafenin değişmemesi ve zemin yüzeyine kazıkların dik bir şekilde çakılması için yüksekliği 10cm olan kılavuz başlıkları ve özel çakma aparatı kullanılmıştır (Şekil 5.17). İstenen bütün kazık kombinasyonları oluşturulduktan sonra radye plağın karşılıklı çapraz köşelerine iki adet deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 5.18). Daha sonra, deney öncesi oluşan oturma ve yük değerleri programda sıfırlanıp düşey yükleme başlatılarak yük-oturma eğrileri elde edilmiştir. Düşey yükleme deneyleri radye başlığı 35mm oturma yaptığında kesilmiştir. Deney esnasında oluşan bütün veriler veri kaydetme cihazı aracılığı ile bilgisayara aktarıldıktan sonra kaydedilmiştir (Şekil 5.19).

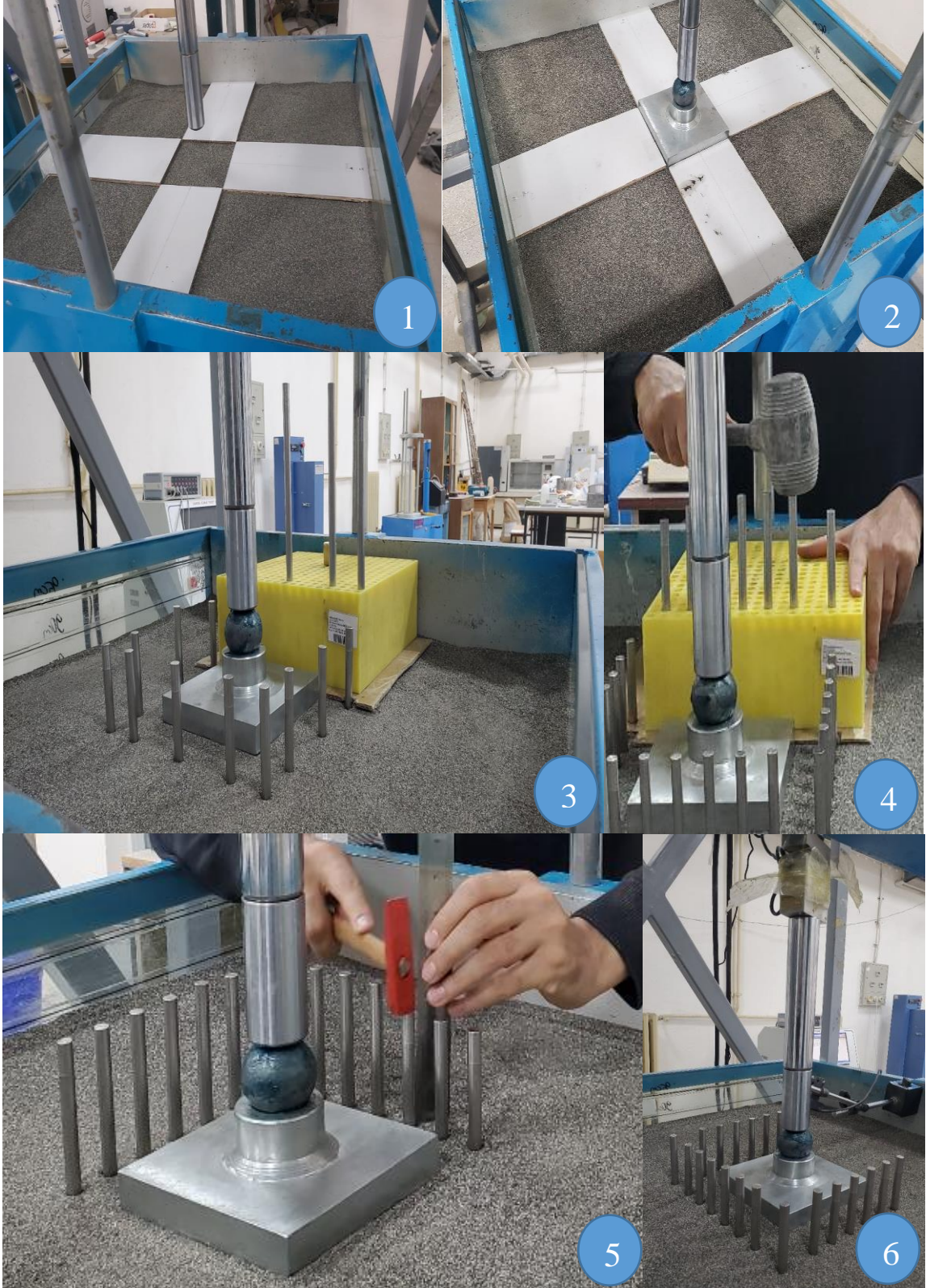
Yapılan deneyler bütün kombinasyonlar için tekrarlanmış ve her deney ayrı ayrı yapılmıştır. Her deneyde tank içerisine yerleştirilen kum tabakaları tank boyunca aynı sıklıkta hazırlanmıştır. Bu çalışmada farklı rölatif sıklıklarındaki ($D_r=10\%$, 40% ve 65%) zemin profilinin üzerinde ilk önce radye (kazık yok) üzerine üç deney yapıлып sonra radye temelin tek kenarında, farklı iki kenarında, üç kenarında ve radye temelin tüm çevresinde, farklı kazık sayıları ve kazıklar arası mesafe ($S=3\text{cm}$, $S=5\text{cm}$ ve $S=7,5\text{cm}$) değişimleri göz önüne alınarak ve mikro kazıklar yerleştirilerek toplamda 48 deney yapılmıştır. Deneyler sonucunda, farklı rölatif zemin sıklıklarında bir radye temelin etrafına farklı kombinasyonlarda yerleştirilen mikro kazıkların zeminin taşıma gücü ve oturma değerleri üzerindeki etkisi incelenmiş, kazık sayısı, kazıklar arası optimum mesafe ve en ekonomik değerleri verecek kombinasyonlar araştırılmıştır.



Şekil 5.15. Dikey kovalı elavatöre kum aktarımı



Şekil 5.16. Titreşim cihazının kullanımı



Şekil 5.17. (1) Deney tankının orta noktasının belirlenmesi, (2) rayde temelin yerleştirilmesi, (3) kılavuz başlıkların kullanılması, (4) kazıkların çakılması, (5) kum zemine yerleştirilen kazık uzunluğunun kontrolü, (6) kazık kombinasyonların oluşturulması



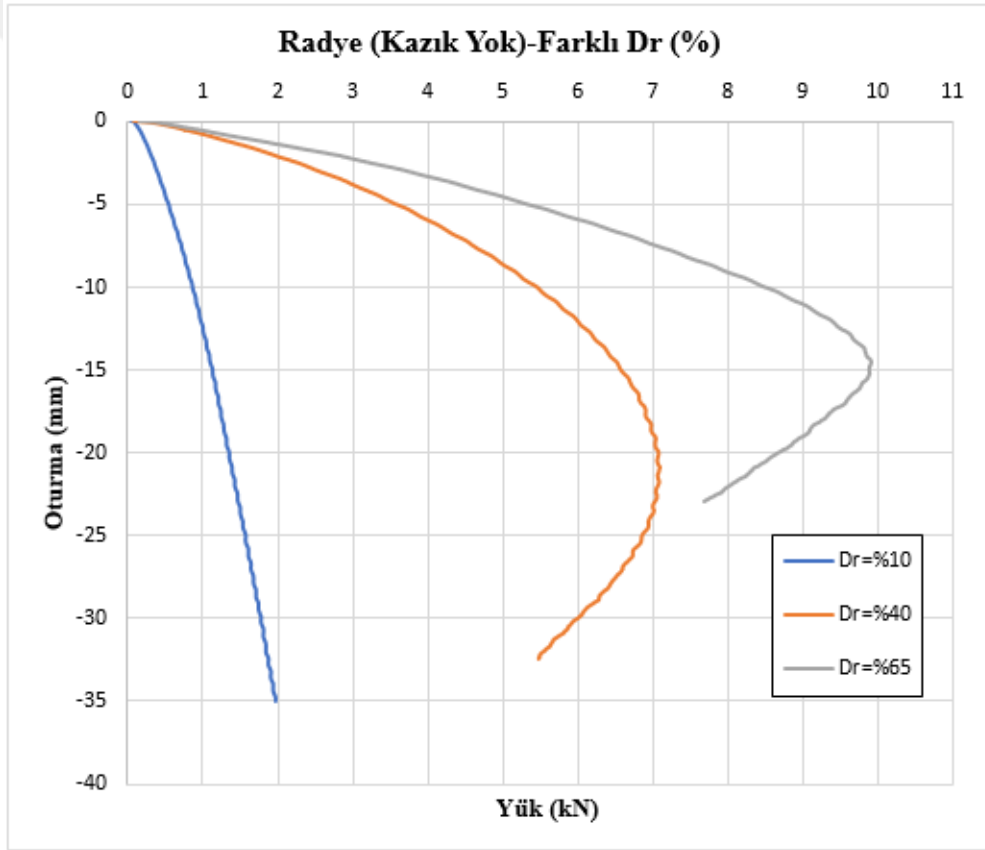
Şekil 5.18. Deplasman ölçerlerin yerleştirilmesi



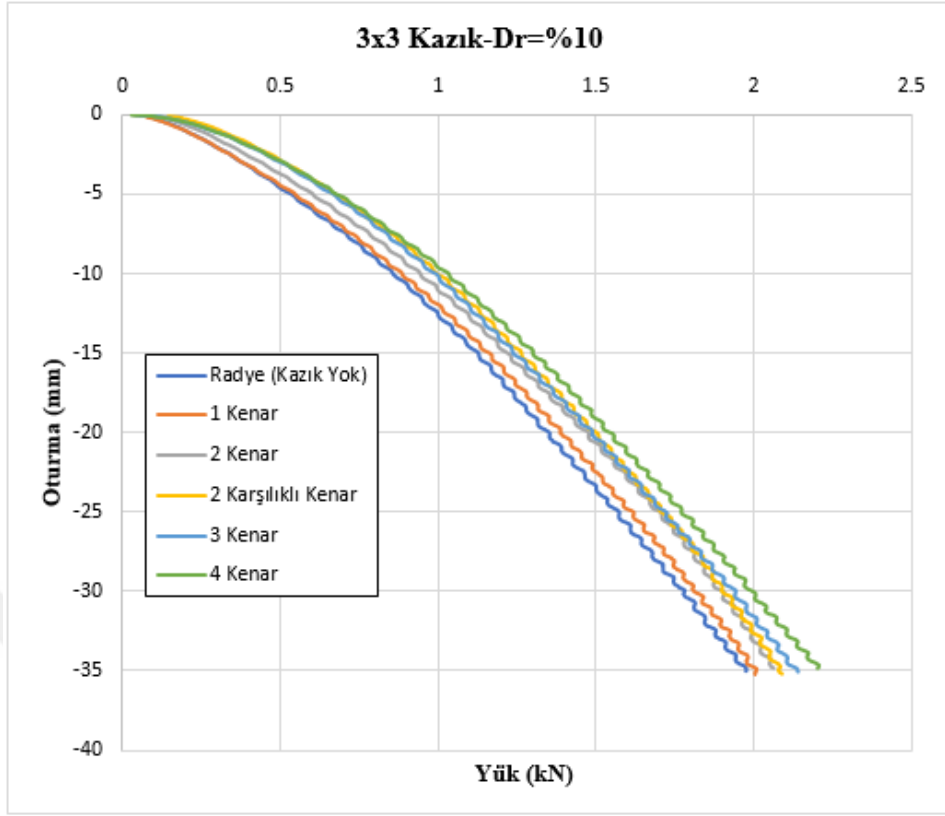
Şekil 5.19. (1) Deney sisteminin düşey yüklemeye hazır hale getirilmesi, (2) yük hücresinden gelen verilerin ekranda gösterilmesi, (3) belirlenen oturma değerine ulaşıldıktan sonra deneyin sonlandırılması

5.16. Deneysel Sonuçlar

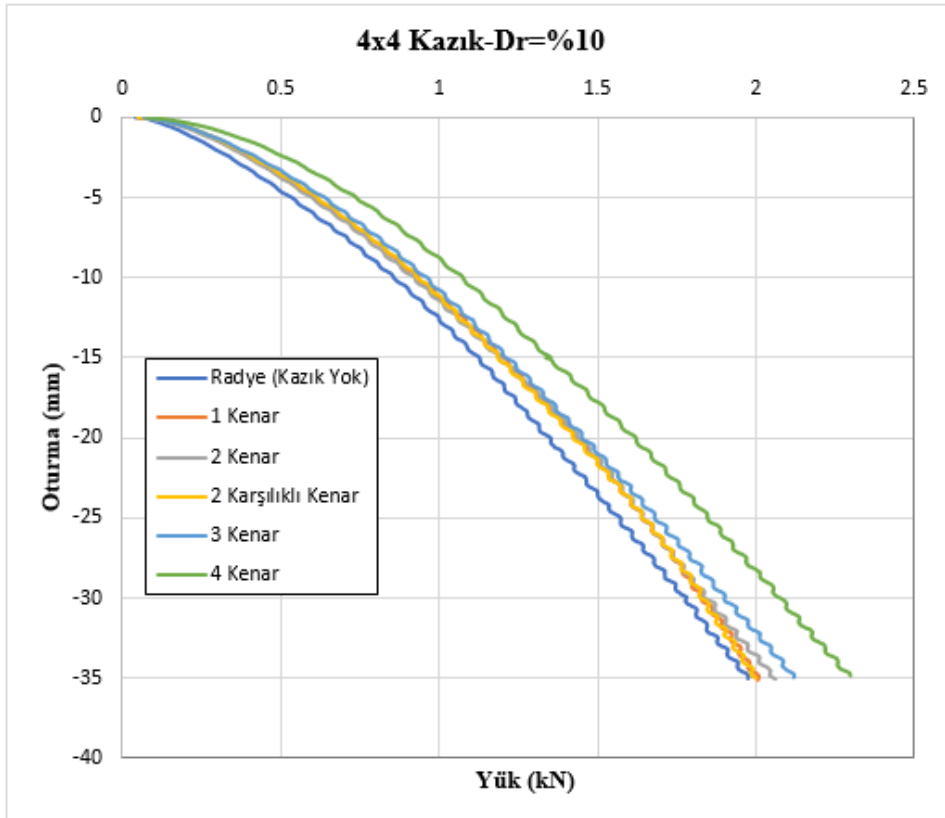
Düşey yükleme deneyleri, üç kazıksız ve çelikten yapılmış radye temelin farklı yanlarına 4,5 cm'lik mesafe ile yerleştirilerek oluşturulan kazık kombinasyonları üzerinde $Dr=10\%$, 40% ve 65% kum zemini sıklıklarında toplamda 48 farklı deney olarak yapılmıştır. Düşey yükleme deneyleri radye plaka 35mm oturma yapınca sonlandırılmıştır. Yapılan düşey yükleme deneyleri sonucunda farklı kazık sayısı, kazıklar arası mesafe değişimi ve farklı kazık kombinasyonlarının zemin güçlendirmesi ve temelin taşıma gücüne etkisi belirlenmiştir. Şekil 5.20- Şekil 5.29 arasında yapılan düşey yükleme deneyleri neticesinde bulunan taşıma gücü değerleri verilmiştir. Deneyler sonucunda kazıklar arası mesafe azaldıkça, zemin sıklığı, kazık sayısı ve kazık çakılan cephelerin sayısı arttıkça taşıma gücünün arttığı görülmüştür.



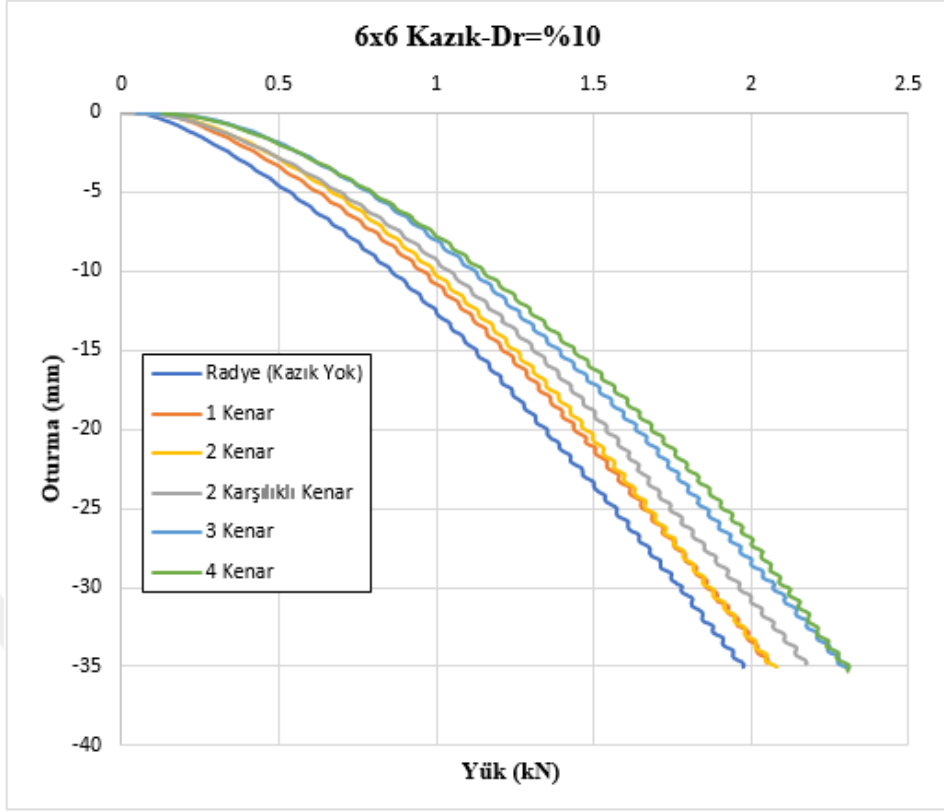
Şekil 5.20. Farklı Dr değerleri için kazıksız radye temelinin yük-oturma eğrileri



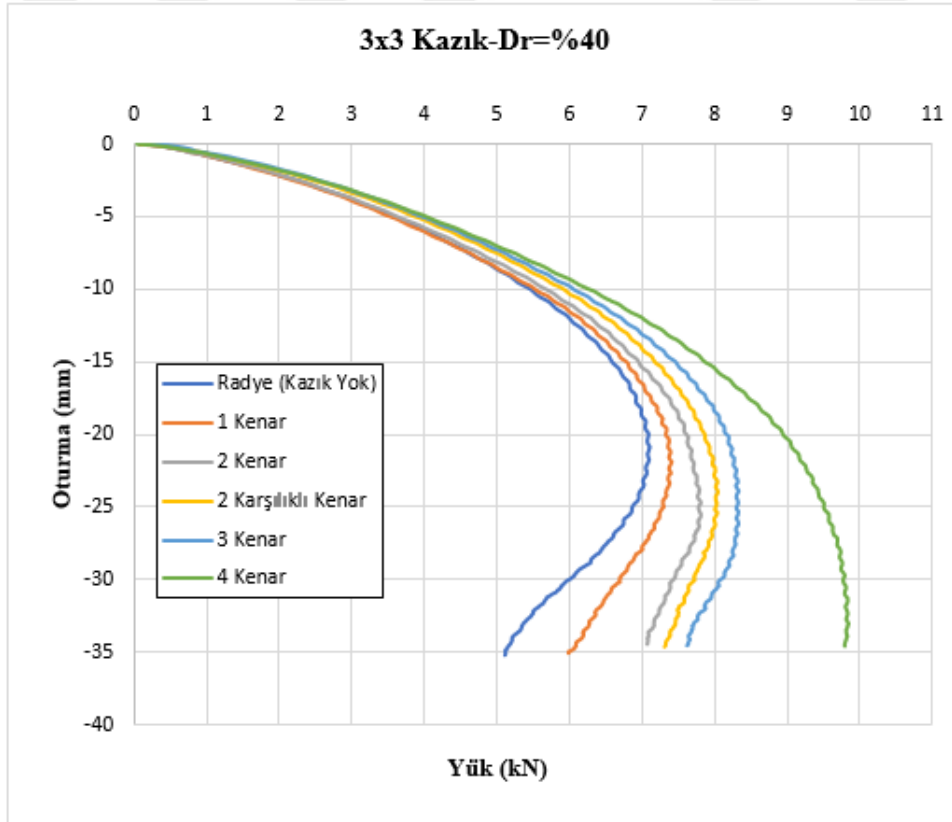
Şekil 5.21. 3x3 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%10)



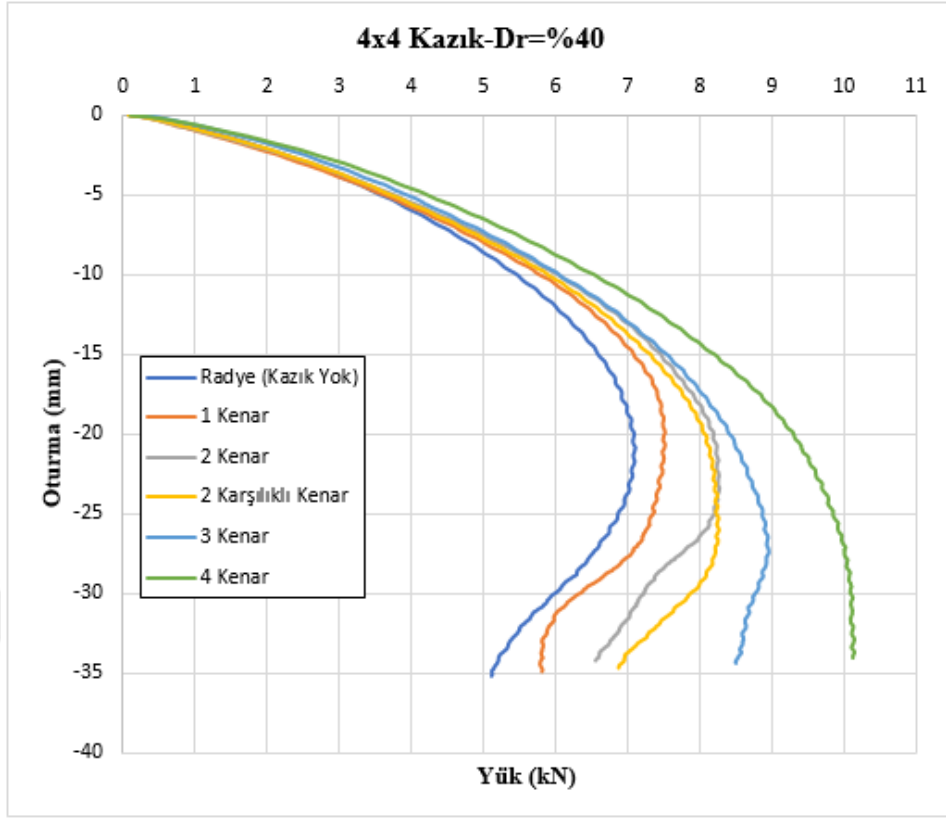
Şekil 5.22. 4x4 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%10)



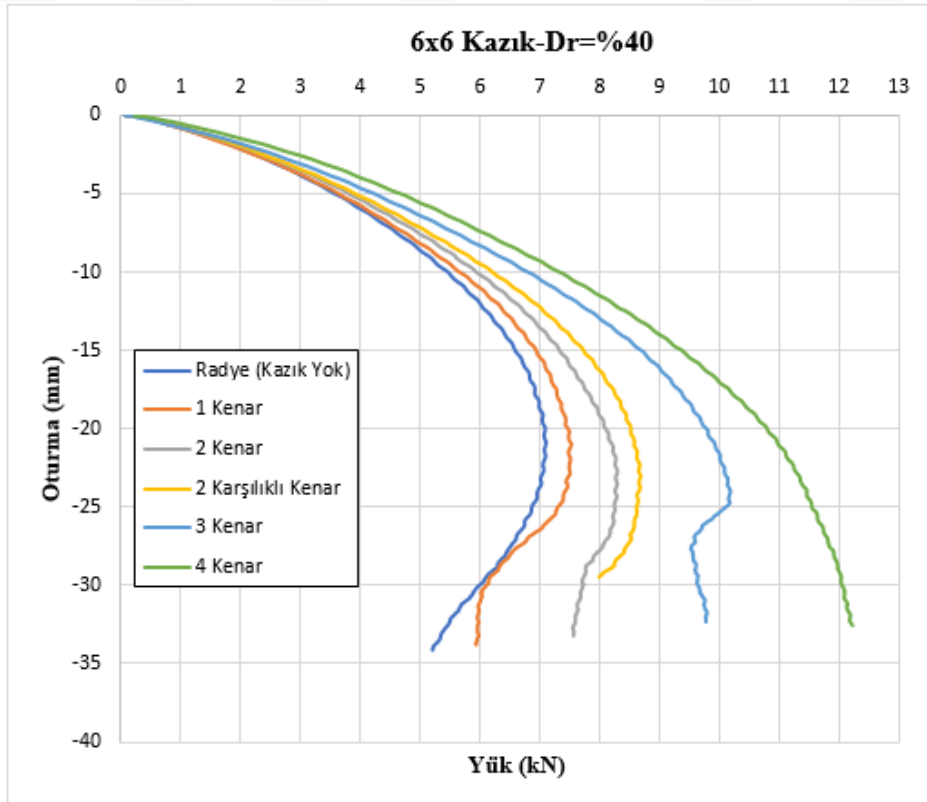
Şekil 5.23. 6x6 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%10)



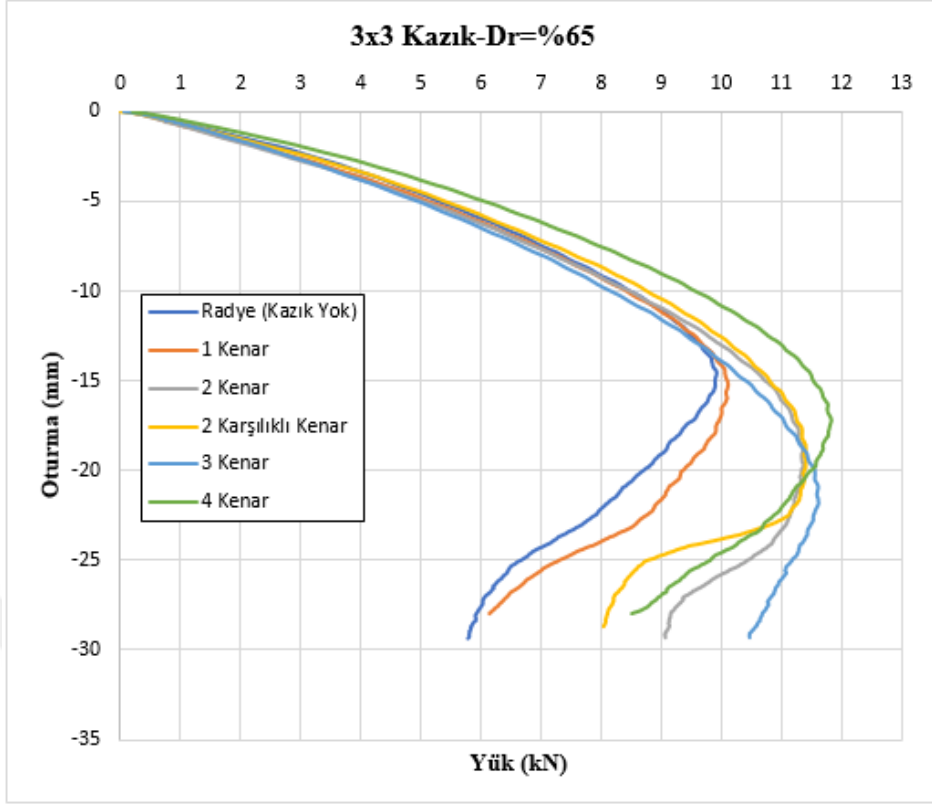
Şekil 5.24. 3x3 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%40)



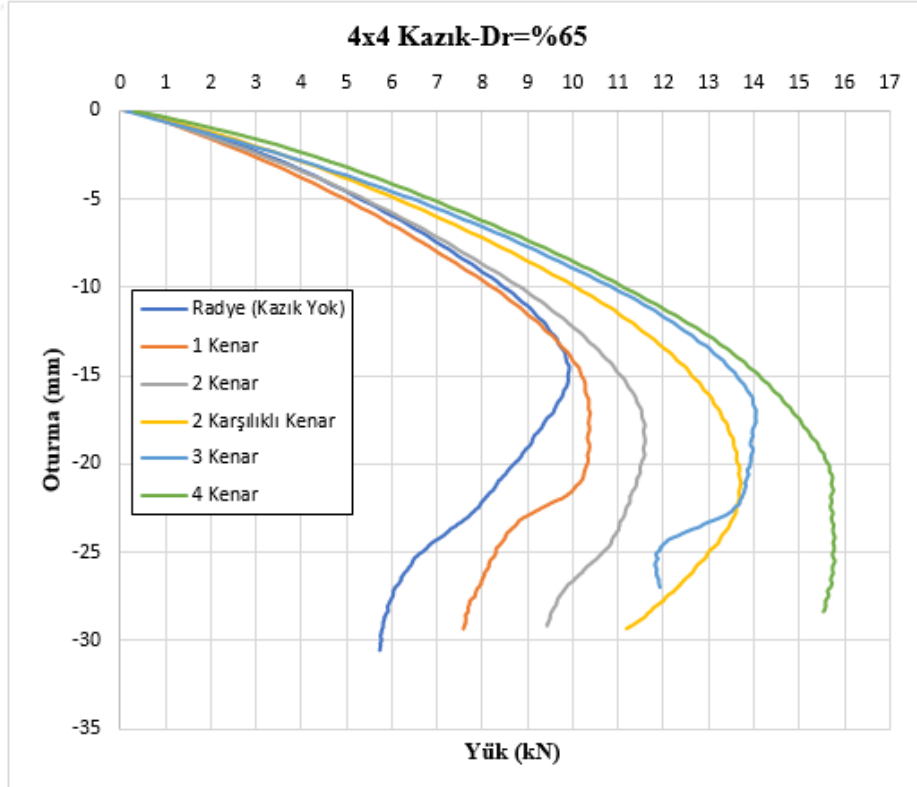
Şekil 5.25. 4x4 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%40)



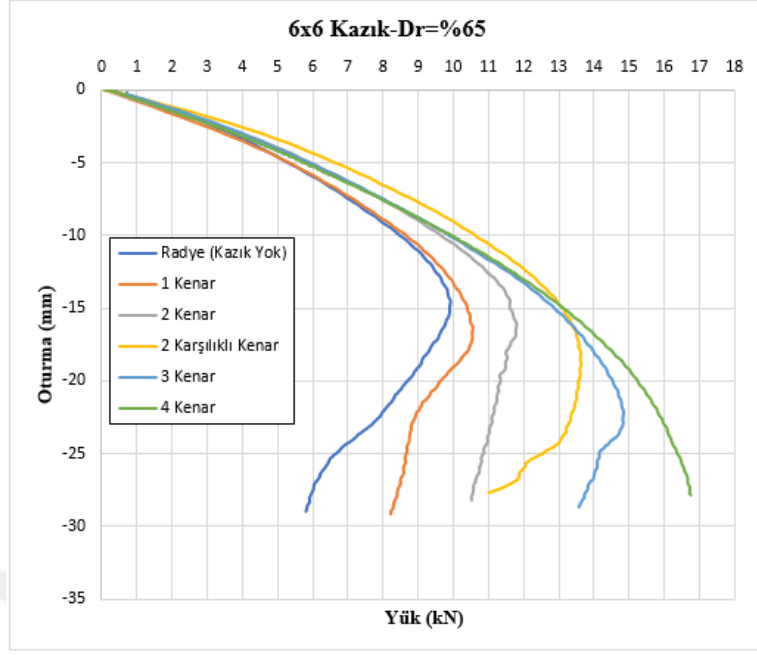
Şekil 5.26. 6x6 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%40)



Şekil 5.27. 3x3 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%65)



Şekil 5.28. 4x4 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%65)



Şekil 5.29. 6x6 kazık kombinasyonlarının yük-oturma eğrileri (Dr=%65)

5.17. Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Farklı zemin sıklıklarında farklı mikro kazık kombinasyonları oluşturulduktan sonra düşey yüklemeler yapılarak elde edilen toplam kazık taşıma gücü değerleri, göçme anındaki oturma değerleri ve 10mm oturma anında farklı kazık kombinasyonlarında oluşan taşıma gücü değerleri Tablo 5.4- Tablo 5.12 arasında verilmiştir. Tablolardaki veriler kullanılarak farklı mikro kazık kombinasyonları ve farklı sıklıklardaki taşıma gücü değerleri Şekil 5.30- Şekil 5.32 arasında, kazıklar arası mesafenin (s) farklı değerlerine karşılık oluşan taşıma gücü değerleri Şekil 5.33- Şekil 5.35, göçme anındaki oturma değerleri Şekil 5.36- Şekil 5.38, 10mm oturma anında farklı kazık kombinasyonlarında oluşan taşıma gücü değerleri Şekil 5.39- Şekil 5.41 ve farklı kazık kombinasyonlarının yüklemeden dolayı oluşan kabarma ve etkilenen bölgelerin küçülmesine etkisi Şekil 5.42- Şekil 5.46 arasında verilmiştir. Deneysel sonuçları incelendiğinde, zeminin sıklığı arttıkça aynı kazık sayısında, kazık sayısı ve kazık çakılan kenarların sayısı arttıkça aynı zemin sıklığında taşıma gücünün arttığı belirlenmiştir.

Tablo 5.4. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri

Deney Sonuçlarına Göre Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	1,32	1,40	1,59	1,65	1,70	1,78
40	7,10	7,41	7,80	8,03	8,32	9,82
65	9,92	10,11	11,37	11,40	11,62	11,82

Tablo 5.5. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri

Deney Sonuçlarına Göre Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	1,32	1,54	1,60	1,68	1,75	1,83
40	7,10	7,52	8,25	8,26	8,96	10,12
65	9,92	10,34	11,59	13,57	14,04	15,74

Tablo 5.6. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri

Deney Sonuçlarına Göre Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	1,32	1,62	1,70	1,72	1,91	1,97
40	7,10	7,53	8,29	8,68	10,19	12,42
65	9,92	10,54	11,79	13,63	14,84	16,8

Tablo 5.7. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri

Deney Sonuçlarına Göre Göçme Anındaki Oturma Değerleri (mm)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	19,62	20,38	22,47	23,45	24,77	24,47
40	21,14	21,88	24,77	22,94	24,93	26,80
65	14,52	15,17	19,62	17,08	21,80	19,84

Tablo 5.8. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri

Deney Sonuçlarına Göre Göçme Anındaki Oturma Değerleri (mm)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	19,62	22,62	23,75	24,48	26,28	25,22
40	21,14	19,85	22,36	23,16	27,52	28,12
65	14,52	16,99	17,85	19,10	17,52	21,50

Tablo 5.9. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri

Deney Sonuçlarına Göre Göçme Anındaki Oturma Değerleri (mm)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	19,62	24,20	25,87	25,92	26,42	26,08
40	21,14	20,95	22,90	23,20	27,80	30,16
65	14,52	17,00	16,40	19,90	23,00	28,20

Tablo 5.10. 3x3 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri

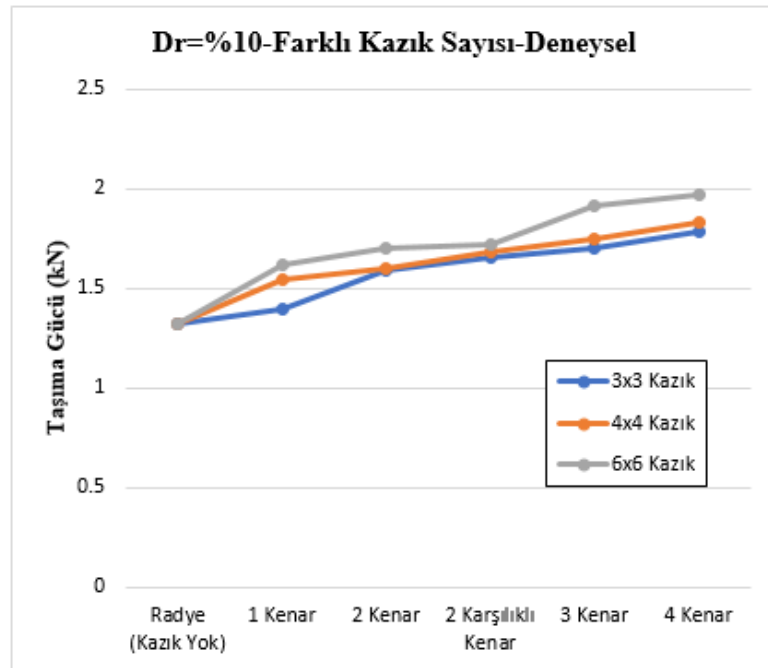
Sabit Bir Oturma Anında (10mm için) Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	0,86	0,87	0,92	0,93	0,96	1,03
40	5,46	5,52	5,67	5,92	6,01	6,35
65	8,01	8,42	8,47	8,75	8,15	9,50

Tablo 5.11. 4x4 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri

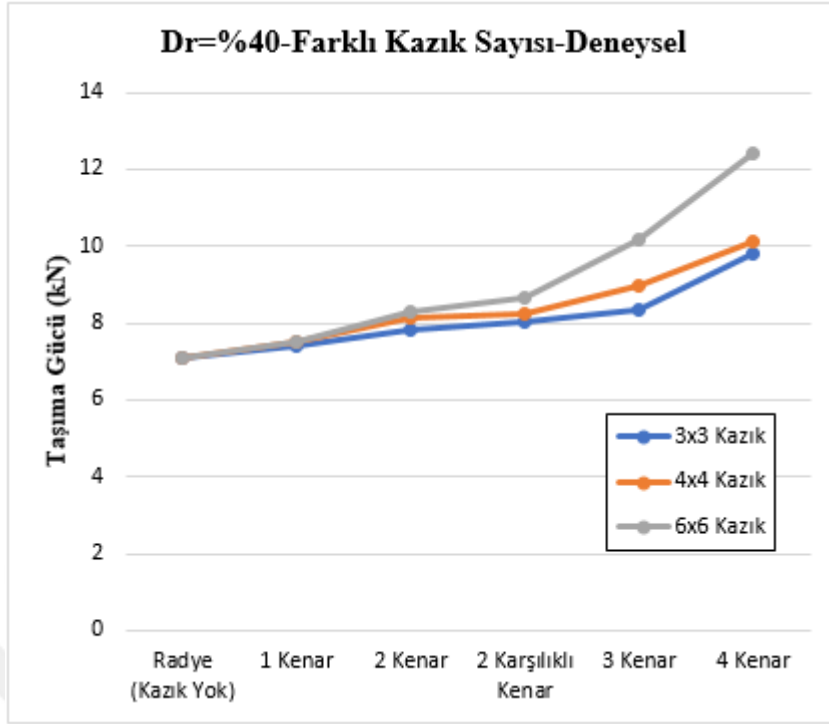
Sabit Bir Oturma Anında (10mm için) Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	0,85	0,94	0,94	0,99	1,00	1,07
40	5,46	5,77	5,89	6,03	6,05	6,54
65	8,01	8,22	8,85	10,06	10,87	11,12

Tablo 5.12. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri

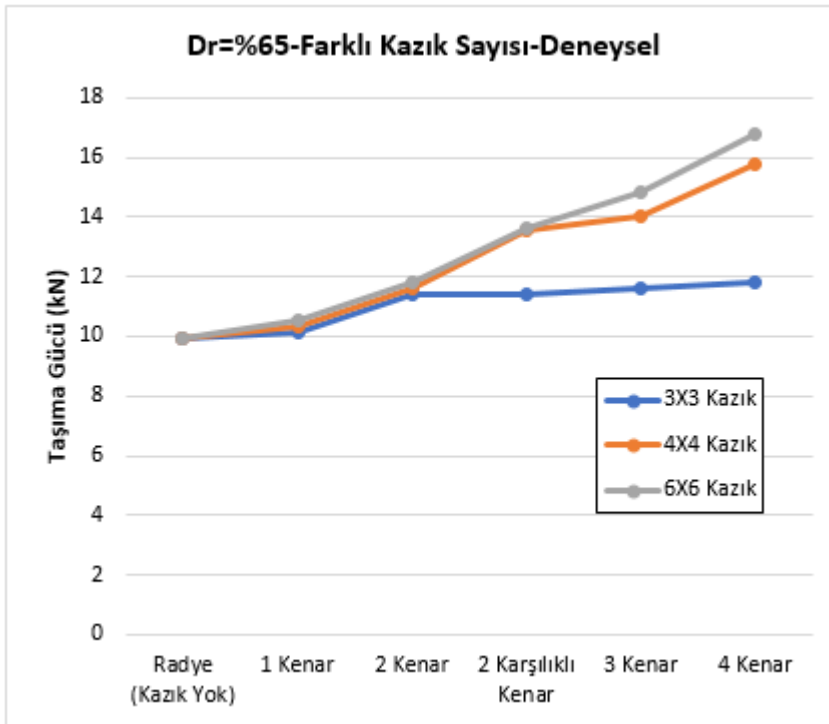
Sabit Bir Oturma Anında (10mm için) Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	0,85	0,96	0,99	1,04	1,12	1,15
40	5,46	5,65	5,94	6,21	6,80	7,32
65	8,01	8,66	9,65	10,62	9,87	9,57



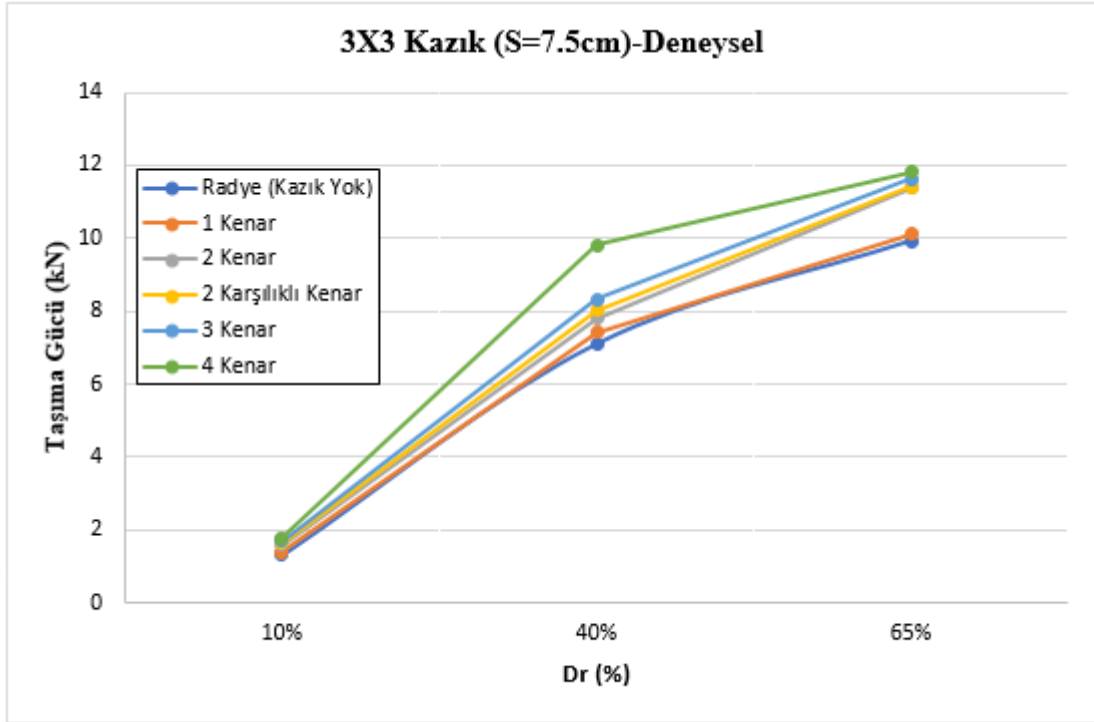
Şekil 5.30. Farklı kazık kombinasyonlarının Dr=%10 sıklıktaki taşıma gücü değerleri



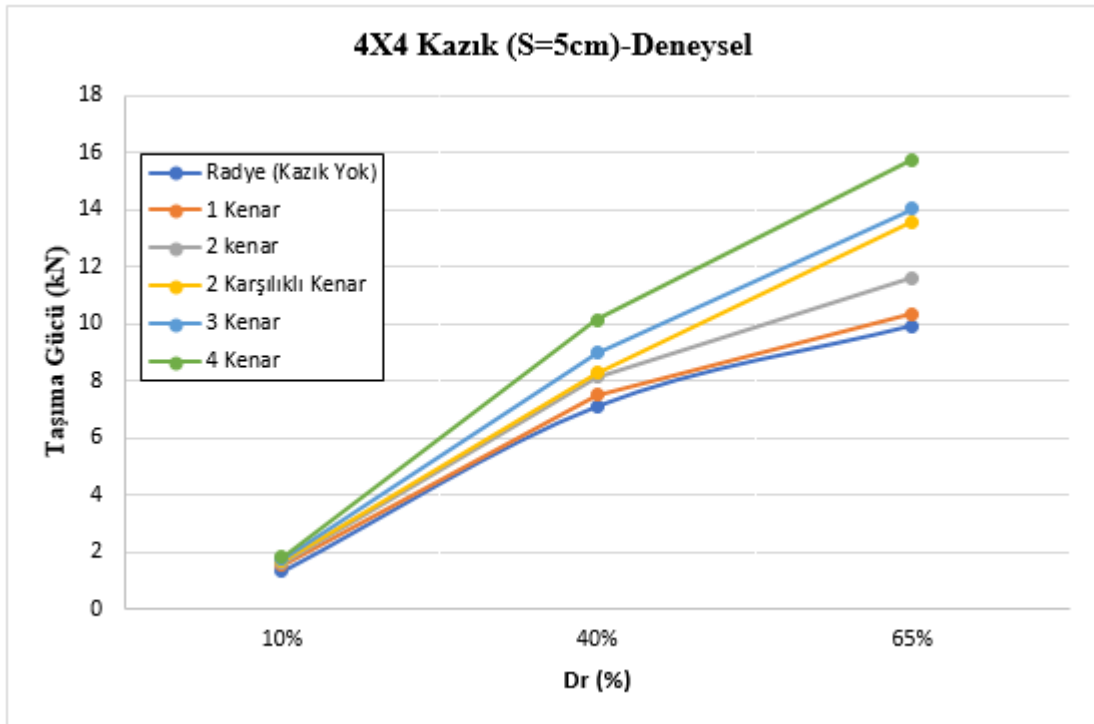
Şekil 5.31. Farklı kazık kombinasyonlarının Dr=%40 sıklıktaki taşıma gücü değerleri



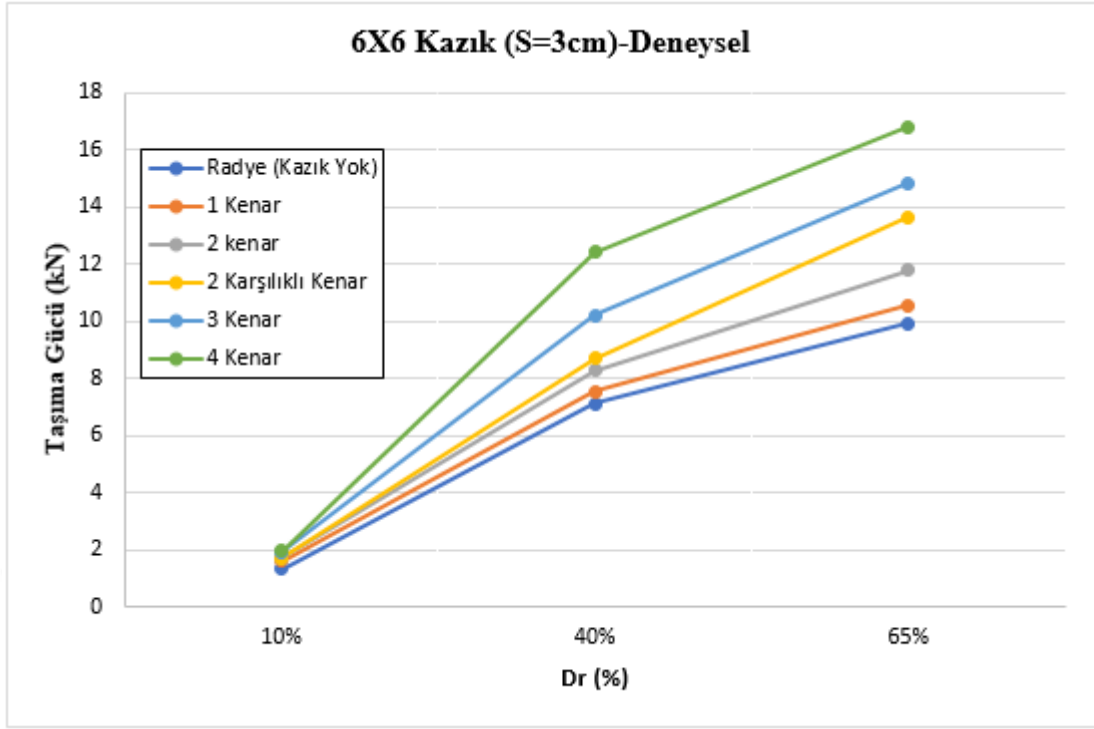
Şekil 5.32. Farklı kazık kombinasyonlarının Dr=%65 sıklıktaki taşıma gücü değerleri



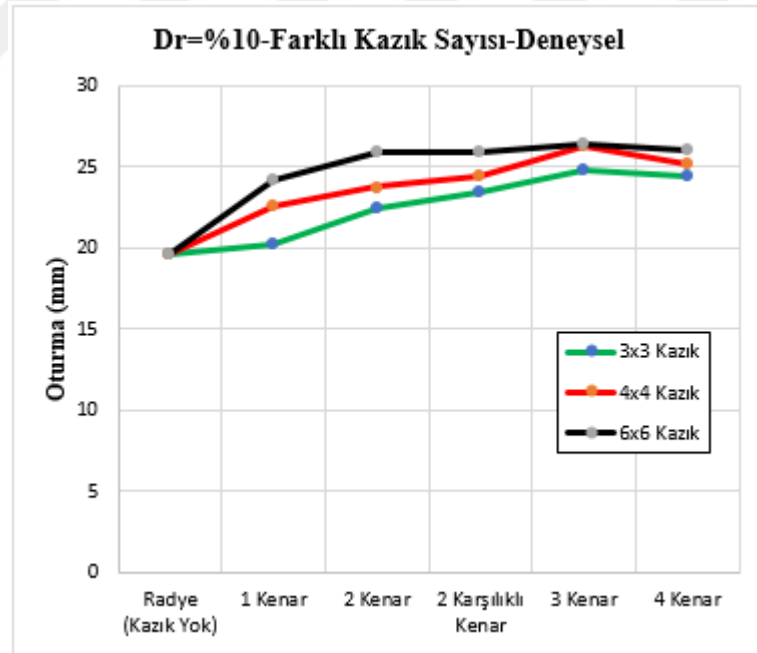
Şekil 5.33. 3x3 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri



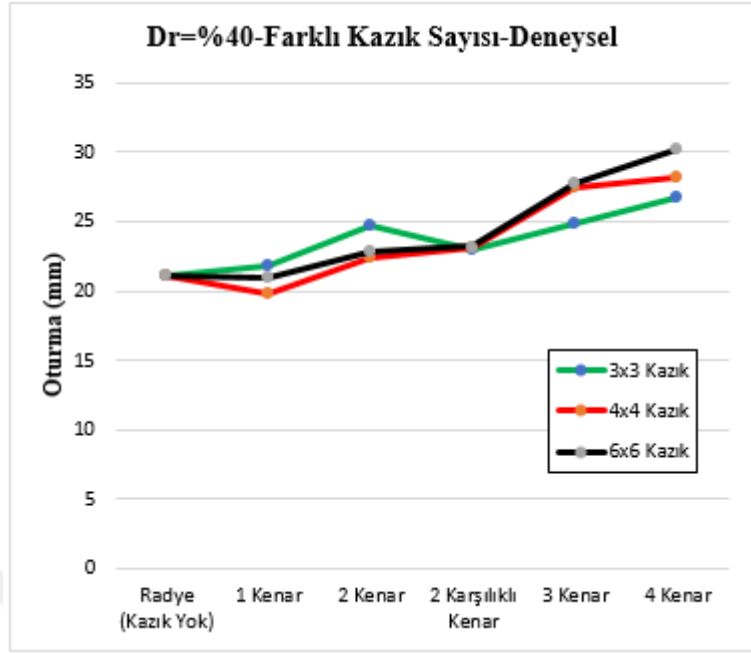
Şekil 5.34. 4x4 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri



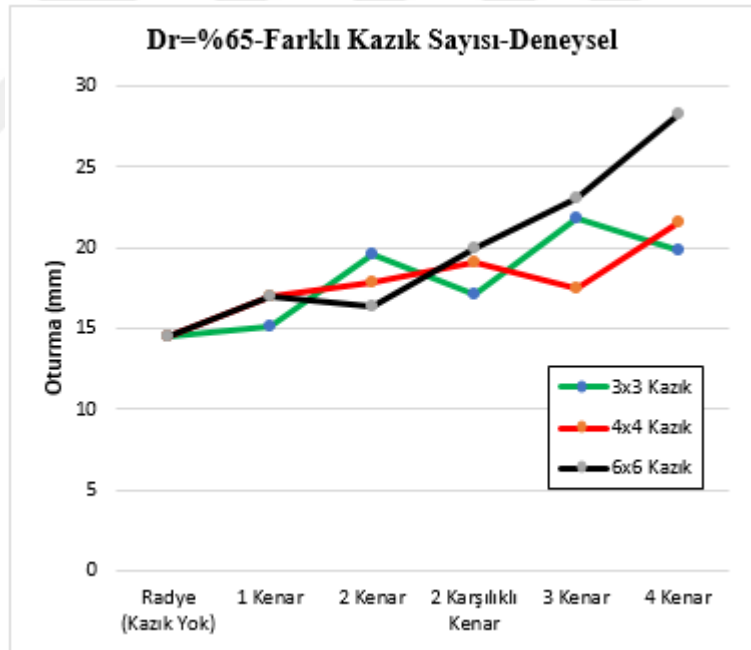
Şekil 5.35. 6x6 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri



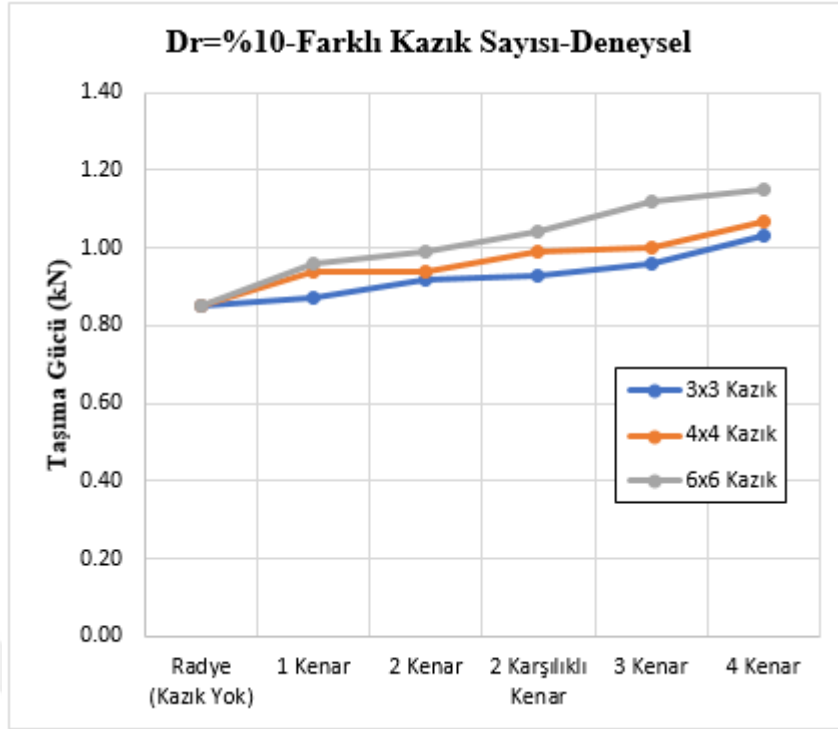
Şekil 5.36. Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları (Dr=%10)



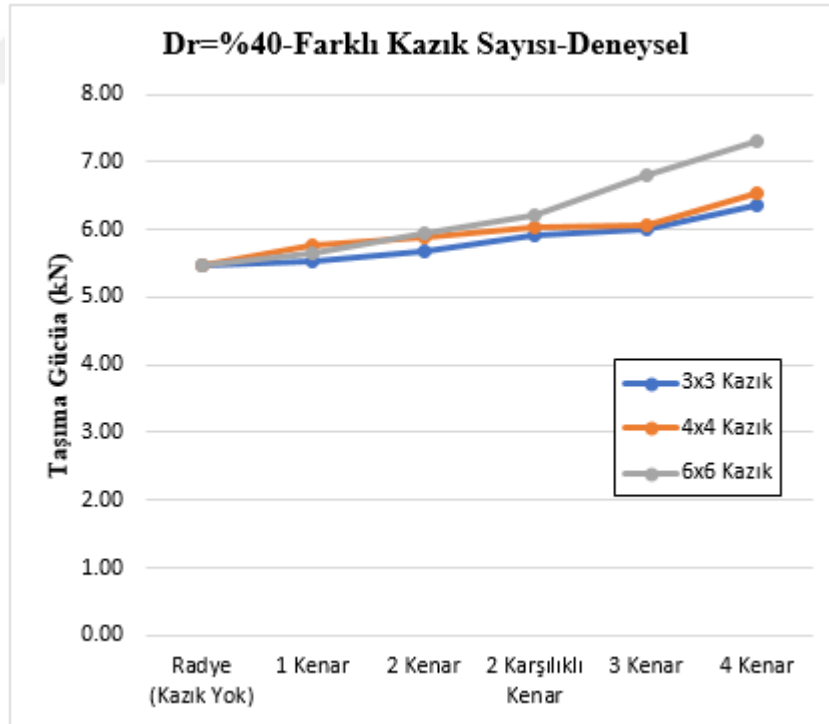
Şekil 5.37. Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları (Dr=%40)



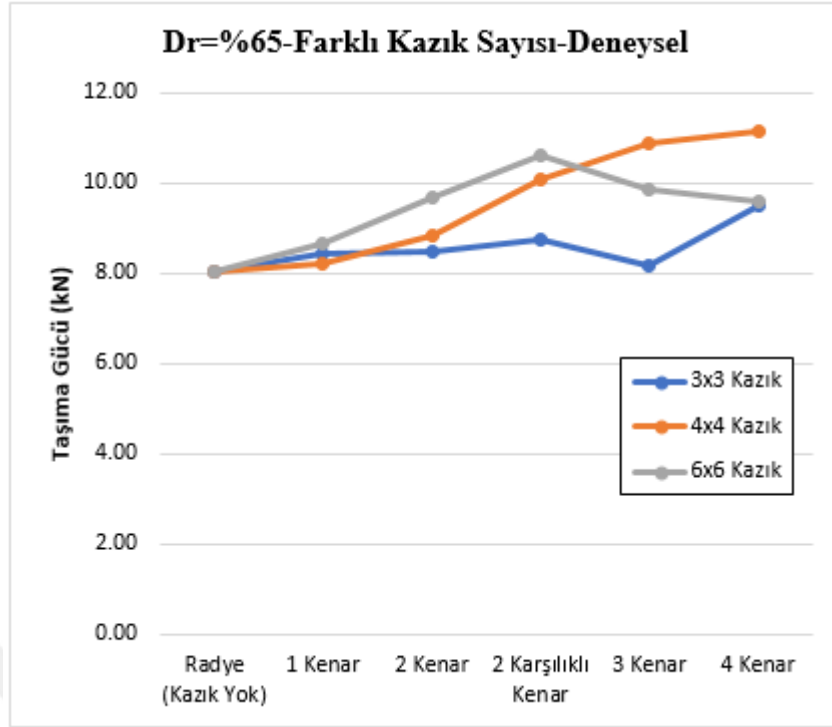
Şekil 5.38. Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları (Dr=%65)



Şekil 5.39. Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri (Dr=%10)



Şekil 5.40. Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri (Dr=%40)



Şekil 5.41. Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri (Dr=%65)



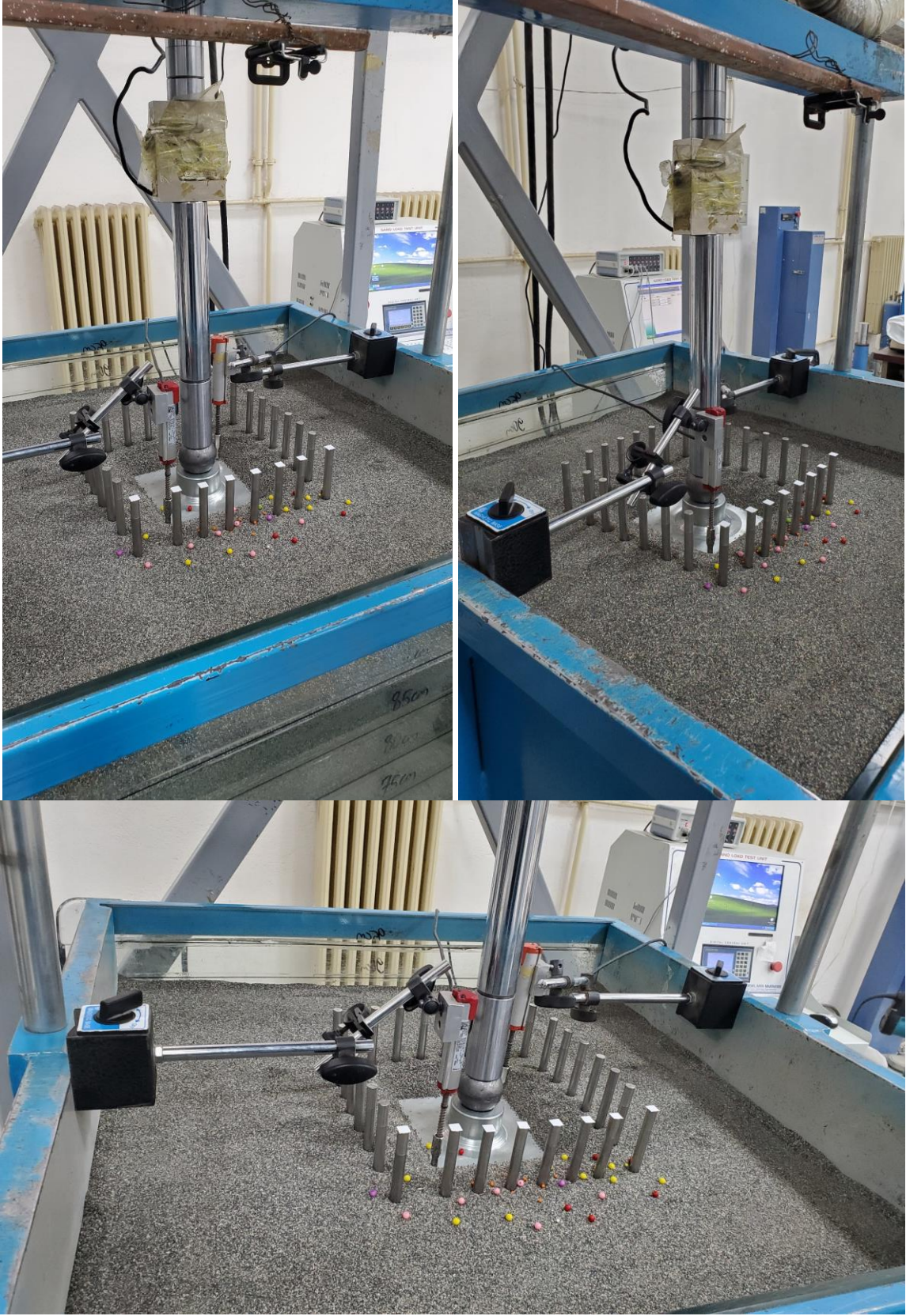
Şekil 5.42. Dr=%65 zemin sıkılığında ve kazısız modelde yükleden dolayı oluşan kabarma ve yayılmalar



Şekil 5.43. $D_r=65$ zemin sıkılığında yüklemeye dolaylı zeminde oluşan kabarma ve yayılmaların önlenmesine 3x3 kazık kombinasyonunun etkisi



Şekil 5.44. $D_r=65\%$ zemin sıkılığında yüklemeye dolaylı zeminde oluşan kabarma ve yayılmaların önlenmesine 4x4 kazık kombinasyonunun etkisi



Şekil 5.45. $D_r=65\%$ zemin sıklığında yüklemeye bağlı olarak zeminde oluşan kabarma ve yayılmaların önlenmesine 6x6 kazık kombinasyonunun etkisi



Şekil 5.46. Temel kenarlarına yerleştirilen kazıkların kum yayılmasının önlenmesine etkisi

6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Genellikle, geoteknik mühendislik problemleri sınır koşulları nedeniyle zor ve karmaşık olabilmektedir. Ancak, araştırmacılar tarafından geliştirilen bazı basitleştirilmiş teoriler bu tür sorunları çözmek için kullanılabilir. Zemin değişkenliği nedeniyle bu problemler daha karmaşık hale gelebilmekte ve bu durumlarda sayısal analiz çok faydalı bir çözüm yolu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sayısal modelleme analizi istinat duvarları, temeller, barajlar vb. geoteknik yapıların analiz ve tasarımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dünyada çok büyük ve önemli projeler sayısal modelleme analizi ile analiz edilmekte ve zemin-yapı etkileşiminin analizinde de oldukça etkili olduğu bilinmektedir.

Sonlu elemanlar analizi tekniğinde, analizi yapılacak sistemin geometrisi yüzlerce veya binlerce basit geometrik şekillere sahip olan küçük parçalara bölünmektedir. Sonlu elemanlar adı verilen bu küçük bölgelerin, kenarlarındaki düğümlerle birbirine bağlanıp bir araya gelmesiyle sonlu elemanlar ağı (mesh) oluşmaktadır. Sonlu elemanlar ağını oluşturan elemanlara uygun sınır koşulları, Mohr-Coulomb ve Doğrusal Elastik gibi uygun zemin modeller uygulanarak düğüm denklemleri oluşturulur. Oluşturulan denklemler çözülerek düğümlerdeki tüm değişkenler bulunur. PLAXIS, GEO-SLOPE gibi geoteknik mühendislerinin sıklıkla kullandığı popüler sayısal sonlu elemanlar programları bulunmaktadır. Ayrıca ABAQUS ve ANSYS gibi daha güçlü yazılımlar da bulunmaktadır. Bu programlar malzeme, yapı, beton gibi birçok mühendislik alanında kullanılabilir gibi geoteknik mühendisliği problemlerinin analizinde de kullanılabilir.

6.1. PLAXIS 3D Programı

PLAXIS 3D, sonlu elemanlar analizine dayanan ve geoteknik mühendisleri tarafından özellikle temel, istinat duvarları, zemin şev stabilitesi vb. gibi zemin-yapı etkileşiminin modelleme ve analizinde sıklıkla kullanılan en popüler geoteknik programlardan biridir. PLAXIS programı, her türlü zemin-yapı etkileşim probleminin kolaylıkla modellenebileceği ve yapının yükleme altındaki davranışının incelenebileceği şekilde tasarlanmıştır.

Araştırmacılar genellikle zemin-yapı etkileşimi problemlerini analiz etmek ve incelemek için sonlu elemanlar tekniğini kullanmaktadır. Bu çalışmada PLAXIS 3D paket programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analizlerde, yapılan deneysel çalışmanın koşulları modellenip düşey yük uygulanmıştır. Oturma ve taşıma kapasitesi açısından sonuçlar elde edilerek sonlu elemanlar sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylece PLAXIS 3D sonlu eleman analizleri ile yapılan deneysel çalışmalara benzer uygulamalarda uygulanabilirliği incelenmiştir.

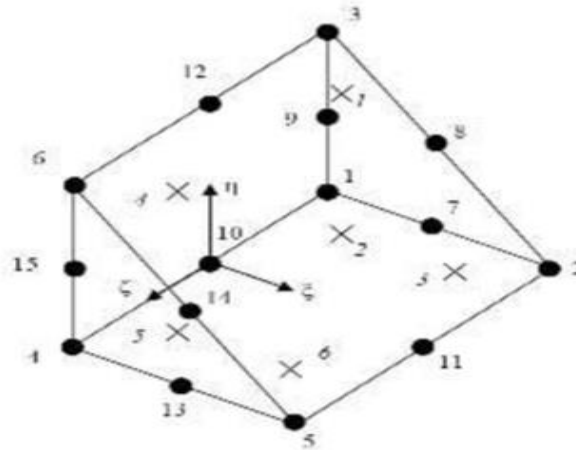
Laboratuvarında oluşturulan bütün deney kombinasyonlarının sayısal analizleri yapılmıştır. Üç kazıksız ve 45 kazıklı analiz olmak üzere toplamda 48 nümerik analiz gerçekleştirilmiştir.

6.2. Model Kazık Analizi

Bu çalışmada modellenen farklı kazık kombinasyonlarının analizi için sayısal sonlu elemanlar yazılımı, PLAXIS 3D kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmek için Mohr-Coulomb kırılma kriterleri kullanılmış ve model kum zemin için kuru durum dikkate alınmıştır. Analizlerde, üç farklı sıklık oranlarındaki ($D_r = \%10, \%40$ ve $\%65$) zeminde üç kazıksız ve 45 kazıklı olmak üzere toplamda 48 farklı model tasarlanmış olup taşıma güçleri belirlenmiştir.

6.2.1. Sınır Koşulları

Sınır koşulları olarak, PLAXIS'te mevcut standart sınır koşulları uygulanmıştır. Üç boyutlu analizlerde genellikle 15 düğümlü üçgen elemanları kullanılmaktadır. Bu tez çalışmanın kapsamında yapılan analizlerde zemin ortamının daha hasas ve gerçekçi modellenmesi için 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmıştır. Analizde kullanılan 15 düğümlü elemanların şematik gösterimi Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Şekil 6.1'de (●) düğüm noktalarını ve (x) gerilme noktalarını göstermektedir.



Şekil 6.1. 3D Analizde Düğüm Elemanları [92]

6.3. Malzeme Özellikleri

6.3.1. Model Zemin

Analizlerde, kum zeminin drenajlı davranışı Mohr-Coulomb (MC) modeli ile modellenmiştir. Zemin analizlerinde MC zemin modeli en yaygın kullanılan malzeme modellerinden biridir [93 -

104]. MC zemin modeli elasto-plastik bir zemin modeli olup bu modelde elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) olarak 5 farklı parametre ile farklı zemin türleri modellenip analiz edilmektedir. MC zemin modelinde kullanılan 5 farklı parametreler serbest basınç ve direkt kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilerek elde edilmektedir.

Nümerik çalışmada kullanılan MC model parametreleri, elastisite modülü hariç başka bütün değerler literatürden alınmıştır [64]. Model zeminler (D_r =% 10-40-65) için MC parametreleri Tablo 6.1- Tablo 6.3 arasında verilmiştir.

Tablo 6.1. Model zemin için MC model parametreleri (D_r =% 10)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Kohezyon	c	kN/m ²	0,20
Birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m ³	1,5
Kayma mukavemet açısı	ϕ	(°)	42,5
Dilatasyon açısı	ψ	(°)	12,5
Elastisite modülü	E	kN/m ²	550
Poisson oranı	ν	-	0,25

Tablo 6.2. Model zemin için MC model parametreleri (D_r =% 40)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Kohezyon	c	kN/m ²	0,50
Birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m ³	15,4
Kayma mukavemet açısı	ϕ	(°)	45,4
Dilatasyon açısı	ψ	(°)	15,4
Elastisite modülü	E	kN/m ²	3000
Poisson oranı	ν	-	0,25

Tablo 6.3. Model zemin için MC model parametreleri (D_r =% 65)

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Kohezyon	c	kN/m ²	0,50
Birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m ³	16,2
Kayma mukavemet açısı	ϕ	(°)	48,9
Dilatasyon açısı	ψ	(°)	18,9
Elastisite modülü	E	kN/m ²	5000
Poisson oranı	ν	-	0,25

6.3.2. Model Temel

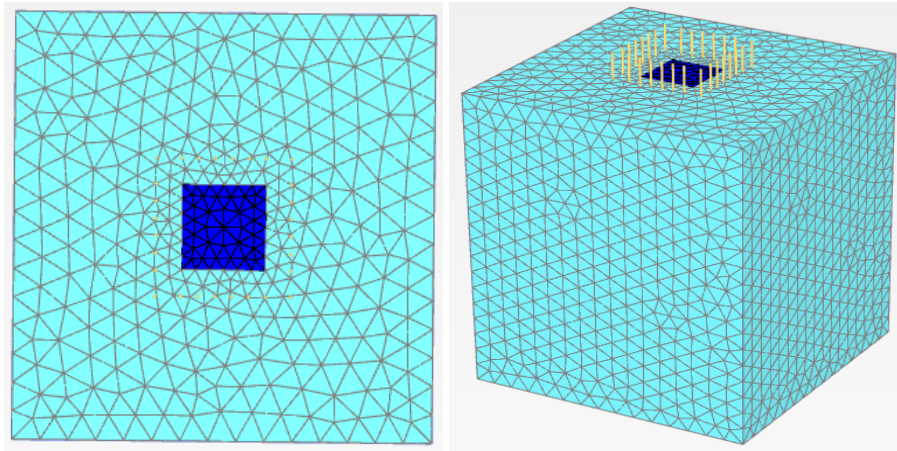
Analizlerde kullanılan model temel plakası, plaka (plate) eleman ile modellenmiştir. Plaka elemanın boyutları (150x150x25mm) olup deneylerde kullanılan model temel boyutları ile aynı seçilmiştir. Analizlerde model temel için çelik malzemenin elastisite modülü kullanılmıştır ($E=200$ GPa).

6.3.3. Model Kazıklar

Analizlerde kullanılan model kazıklar gömülü kiriş (embedded beam) eleman ile modellenmiştir. Gömülü kiriş elemanın özelliği olarak çelik ($E=200$ GPa) değeri girilmiştir. Kazık elemanların çapı (10 mm) olup deneylerde kullanılan model kazık çapı ile aynı seçilmiştir. Analizlerde çelik malzeme için ara yüzey eleman (interface) kullanılmış ve değer olarak PLAXIS tarafından önerilen $R_{inter}=2/3$ değeri kullanılmıştır.

6.3.4. Sonlu Elemanlar Ağı

PLAXIS'te oluşturulan modelin sonlu elemanlara bölünmesi program tarafından otomatik olarak yapılmakta ayrıca daha hasas ve gerçekçi sonuçlara ulaşmak için manuel olarak istenen bölgelerin ağ sıklığı artırılabilir. PLAXIS paket programında çok kaba (very coarse), kaba (coarse), orta (medium), hassas (fine) ve çok hassas (very fine) olmak üzere 5 farklı sonlu eleman ağ yapısı mevcuttur. Analizlerde, oldukça doğru sonuçlar veren hassas (fine) sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır. PLAXIS 3D'de öncelikle iki boyutlu üstten görünüm sonlu eleman ağı daha sonra yazılımın standart prosedürü ile üç boyutlu sonlu eleman ağ oluşturulmaktadır. Şekil 6.2'de programda oluşturulan iki ve üç boyutlu sonlu eleman ağı gösterilmektedir.



Şekil 6.2. PLAXIS 3D programında oluşturulan 2 ve 3 boyutlu sonlu eleman ağı

6.4. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı Analiz Sonuçları

Yukarıda belirtilen parametreler kullanılarak kum zemin, radye ve model kazıklar PLAXIS 3D'de modellenmiştir. Modellenen kombinasyonlara düşey yük olarak deneysel yük-oturma grafiklerinden elde edilen toplam taşıma kapasitesi değerleri uygulanmıştır. Yapılan nümerik analizlerinden elde edilen toplam kazık taşıma gücü değerleri, göçme anındaki oturma değerleri ve 10mm oturma anında farklı kazık kombinasyonlarında oluşan taşıma gücü değerleri Tablo 6.4- Tablo 6.12 arasında verilmiştir. Farklı mikro kazık kombinasyonları ve farklı sıklıklardaki taşıma gücü değerleri Şekil 6.3- Şekil 6.5 arasında, kazıklar arası mesafenin (s) farklı değerlerine karşılık oluşan taşıma gücü değerleri Şekil 6.6- Şekil 6.8, göçme anındaki oturma değerleri Şekil 6.9- Şekil 6.11, 10mm oturma anında farklı kazık kombinasyonlarında oluşan taşıma gücü değerleri Şekil 6.12- Şekil 6.14 ve farklı kazık kombinasyonlarının yüklemeye dolaylı oluşan kabarma ve etkilenen bölgelerin küçülmesine etkisi Şekil 6.15- Şekil 6.18 arasında verilmiştir. Analizlerden elde edilen veriler incelendiğinde, zemin sıklığı ve kazık sayısı arttıkça ve kazıklar arası mesafe azaldıkça taşıma gücünün arttığı görülmektedir. Tablolardaki S harfi kazıklar arası mesafeyi göstermektedir.

Tablo 6.4. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri (PLAXIS 3D)

Deney Sonuçlarına Göre Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	1,25	1,34	1,52	1,54	1,69	1,73
40	7,05	7,45	7,68	8,03	8,29	9,80
65	9,80	9,90	10,90	10,94	11,25	11,40

Tablo 6.5. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri (PLAXIS 3D)

Deney Sonuçlarına Göre Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	1,25	1,48	1,57	1,60	1,72	1,75
40	7,05	7,49	8,24	8,24	8,64	10,00
65	9,80	10,1	11,12	13,55	13,90	15,73

Tablo 6.6. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun taşıma gücü değerleri (PLAXIS 3D)

Deney Sonuçlarına Göre Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	1,25	1,55	1,66	1,67	1,82	1,90
40	7,05	7,50	8,25	8,68	9,81	12,40
65	9,80	10,13	11,70	13,60	14,67	16,44

Tablo 6.7. 3x3 (S=7,5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri (PLAXIS 3D)

Deney Sonuçlarına Göre Göçme Anındaki Oturma Değerleri (mm)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	19,46	19,46	22,58	22,32	22,14	24,03
40	19,59	19,95	21,56	21,93	22,85	27,15
65	14,37	13,88	16,27	16,42	15,41	16,40

Tablo 6.8. 4x4 (S=5cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri (PLAXIS 3D)

Deney Sonuçlarına Göre Göçme Anındaki Oturma Değerleri (mm)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	19,46	20,40	20,89	22,71	23,70	26,48
40	19,59	20,54	22,25	22,58	23,04	27,61
65	14,37	14,40	15,62	19,80	20,07	22,80

Tablo 6.9. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun göçme anındaki oturma değerleri (PLAXIS 3D)

Deney Sonuçlarına Göre Göçme Anındaki Oturma Değerleri (mm)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	19,46	21,85	22,44	24,08	27,43	28,42
40	19,59	19,74	22,61	23,64	26,75	28,10
65	14,37	14,96	16,80	19,73	21,40	24,10

Tablo 6.10. 3x3 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri

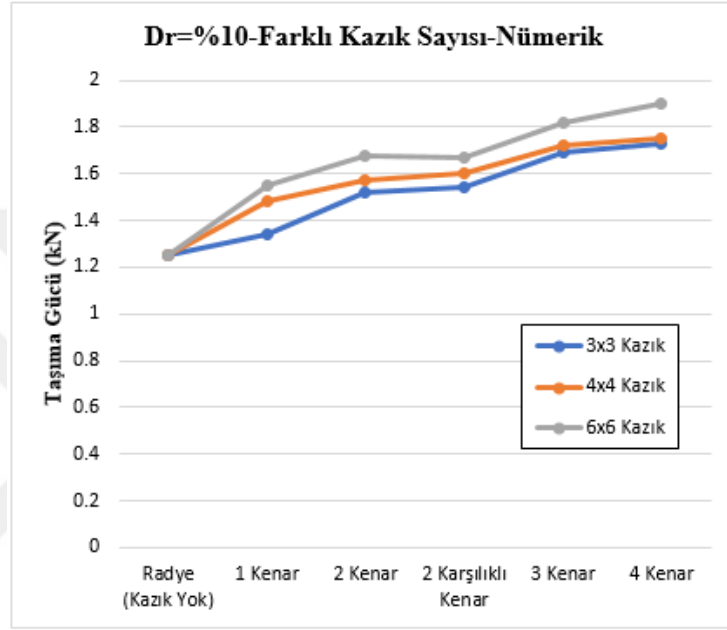
Sabit Bir Oturma Anında (10mm için) Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	0,72	0,74	0,75	0,79	0,80	0,82
40	4,05	4,06	4,10	4,13	4,18	4,19
65	6,95	7,11	7,15	7,20	7,29	7,40

Tablo 6.11. 4x4 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri

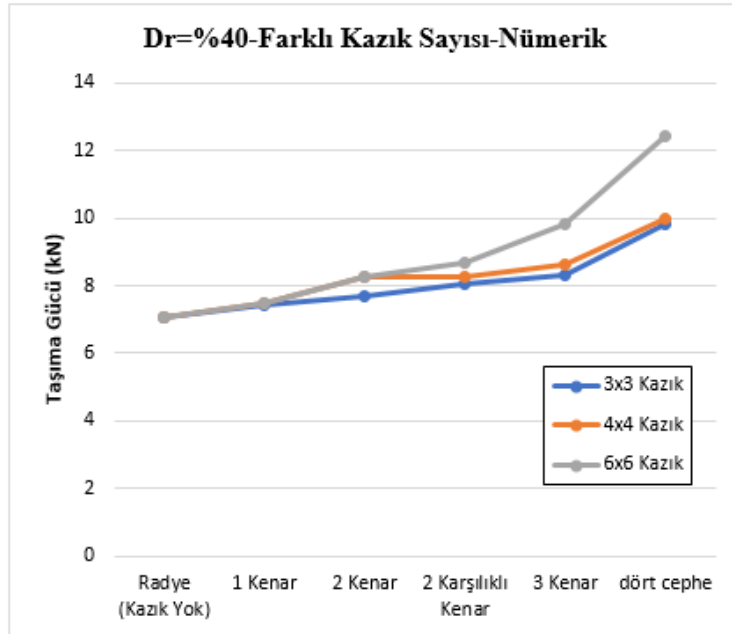
Sabit Bir Oturma Anında (10mm için) Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	0,72	0,77	0,78	0,80	0,82	0,83
40	4,05	4,12	4,12	4,18	4,22	4,33
65	6,95	7,27	7,33	7,35	7,44	7,50

Tablo 6.12. 6x6 (S=3cm) kazık kombinasyonunun 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri

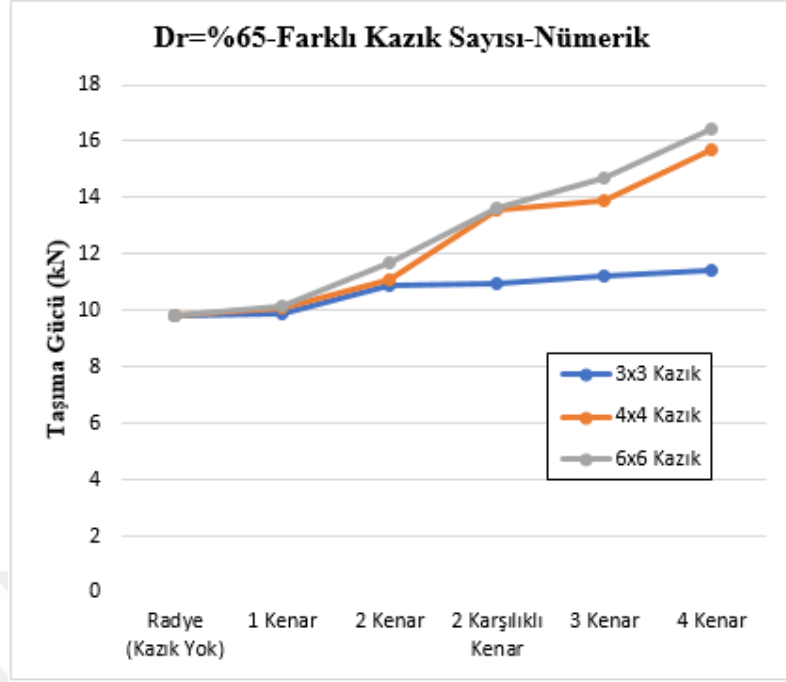
Sabit Bir Oturma Anında (10mm için) Farklı Mikro Kazık Kombinasyonlarının Taşıma Gücü Değerleri (kN)						
Dr (%)	Radye (Kazık Yok)	1 Kenar	2 Kenar	2 Karşılıklı Kenar	3 Kenar	4 Kenar
10	0,72	0,78	0,79	0,80	0,82	0,85
40	4,05	4,18	4,29	4,30	4,31	4,45
65	6,95	7,35	7,40	7,45	7,45	7,64



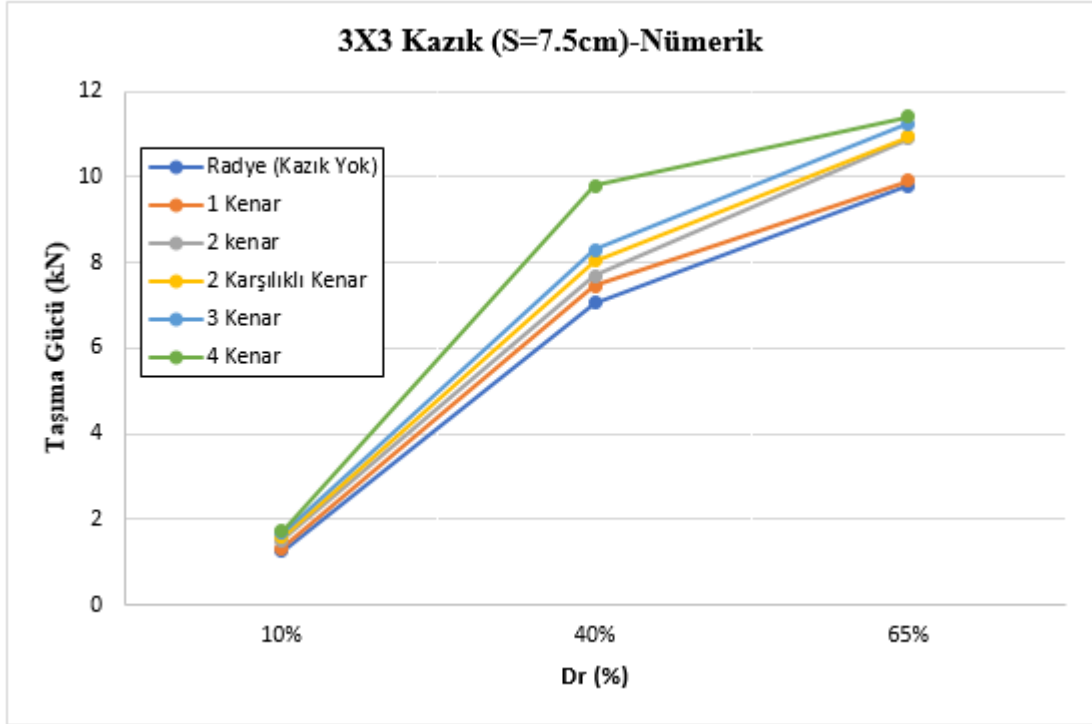
Şekil 6.3. Farklı kazık kombinasyonlarının Dr=%10 sıklıktaki taşıma gücü değerleri



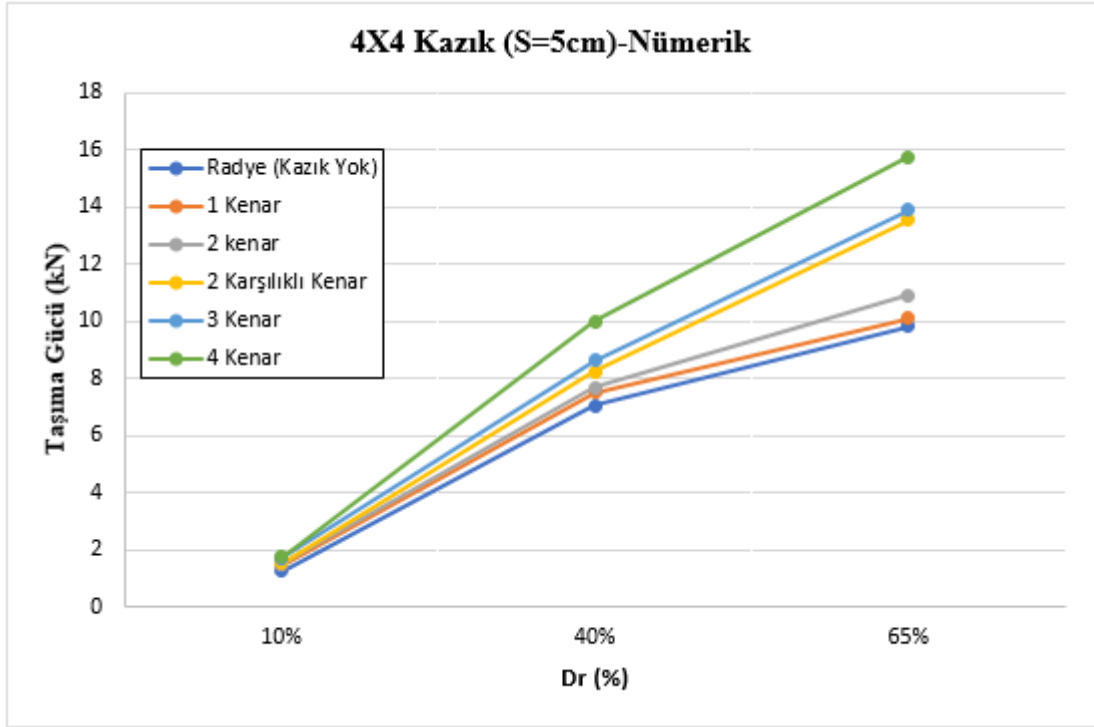
Şekil 6.4. Farklı kazık kombinasyonlarının Dr=%40 sıklıktaki taşıma gücü değerleri



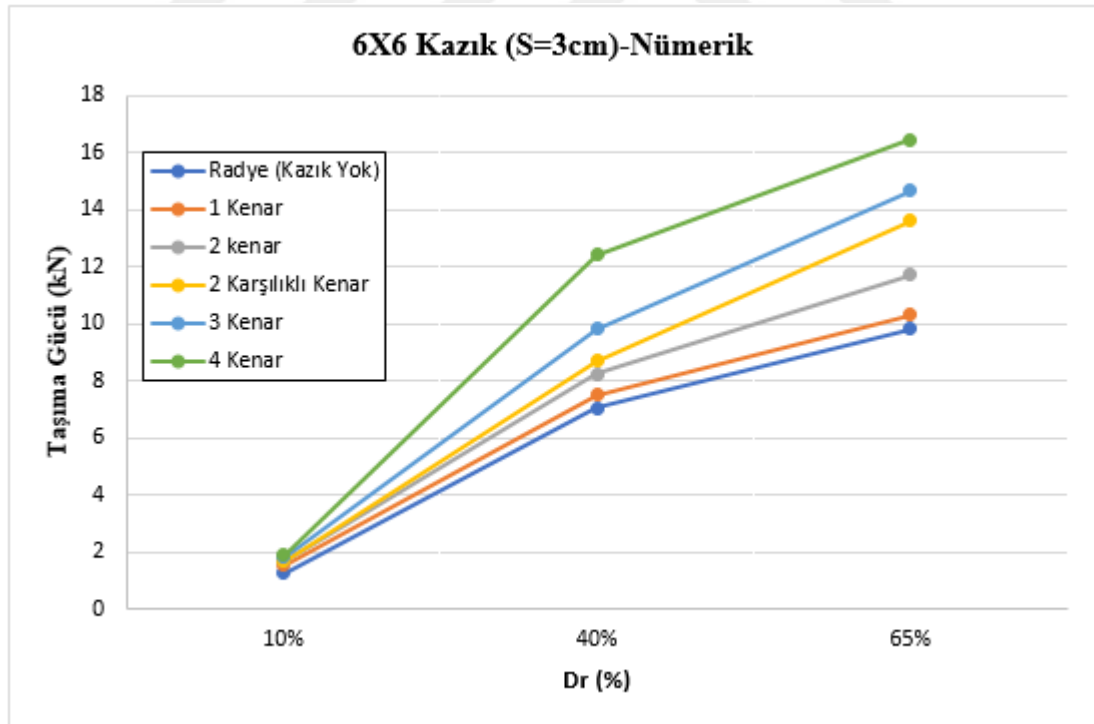
Şekil 6.5. Farklı kazık kombinasyonlarının $D_r=65\%$ sıklıktaki taşıma gücü değerleri



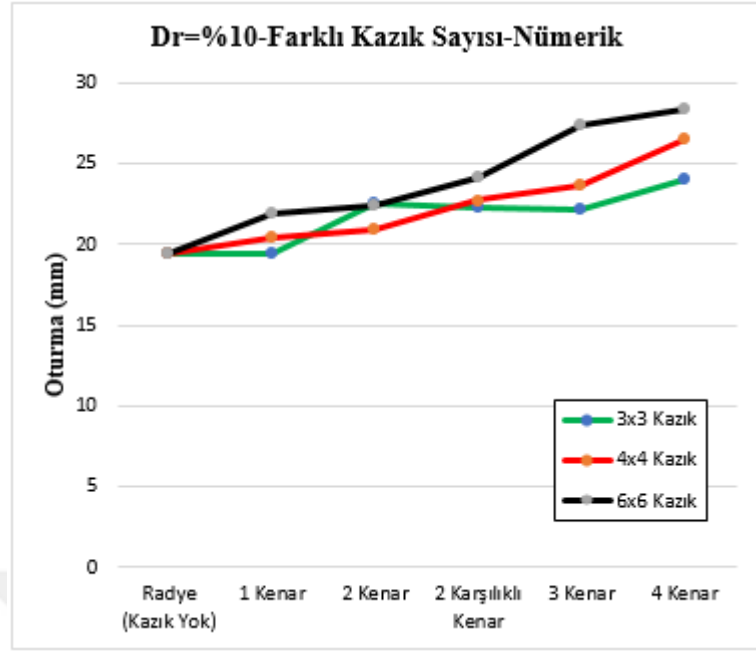
Şekil 6.6. 3x3 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri



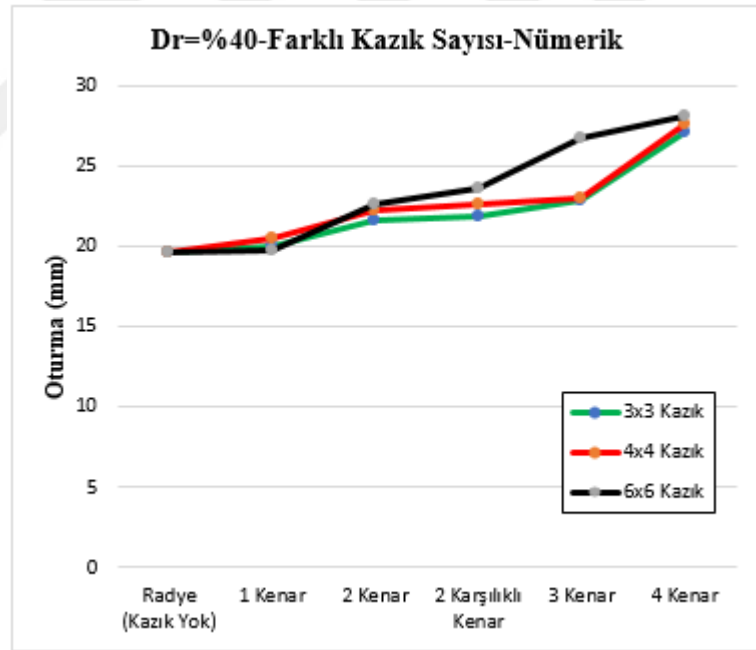
Şekil 6.7. 4x4 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri



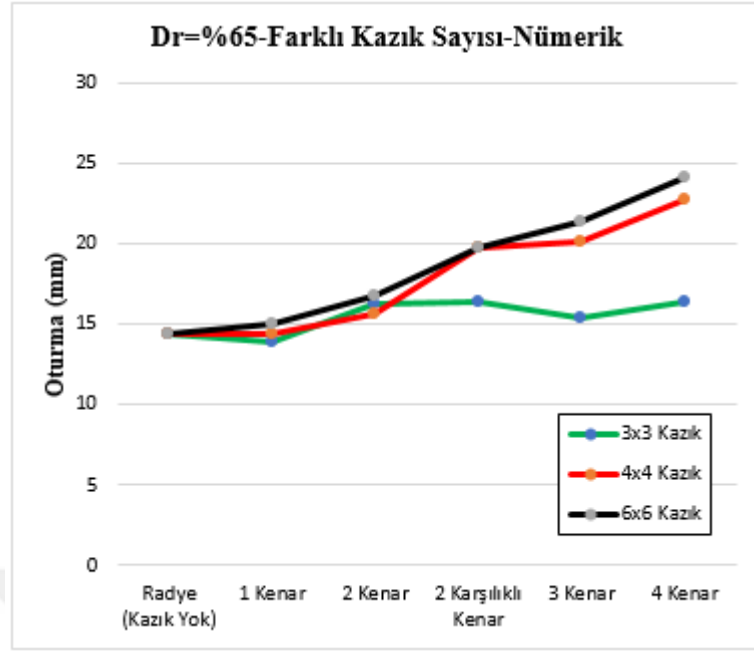
Şekil 6.8. 6x6 kazık kombinasyonlarının farklı sıklıktaki taşıma gücü değerleri



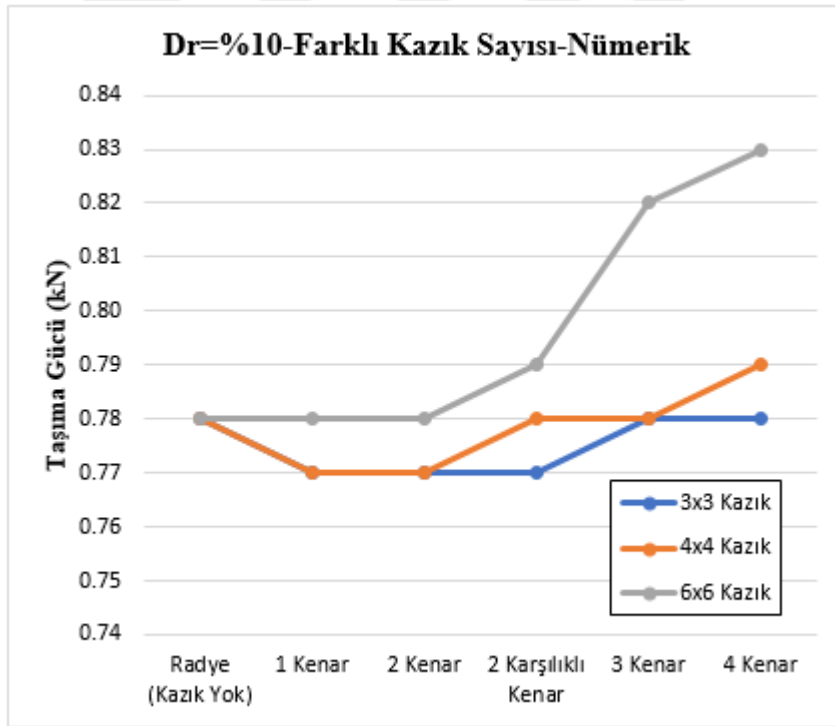
Şekil 6.9. Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları (Dr=%10)



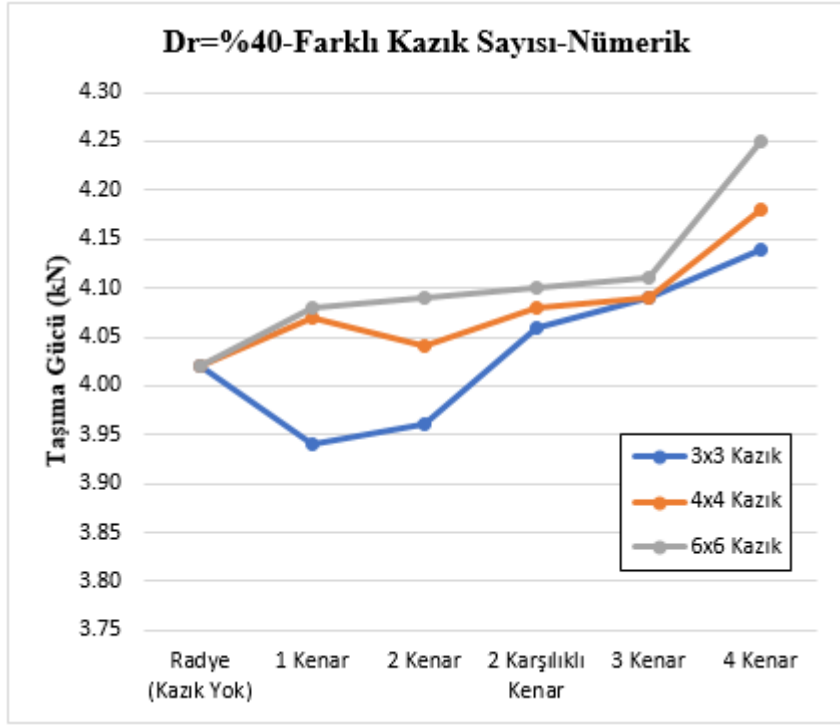
Şekil 6.10. Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları (Dr=%40)



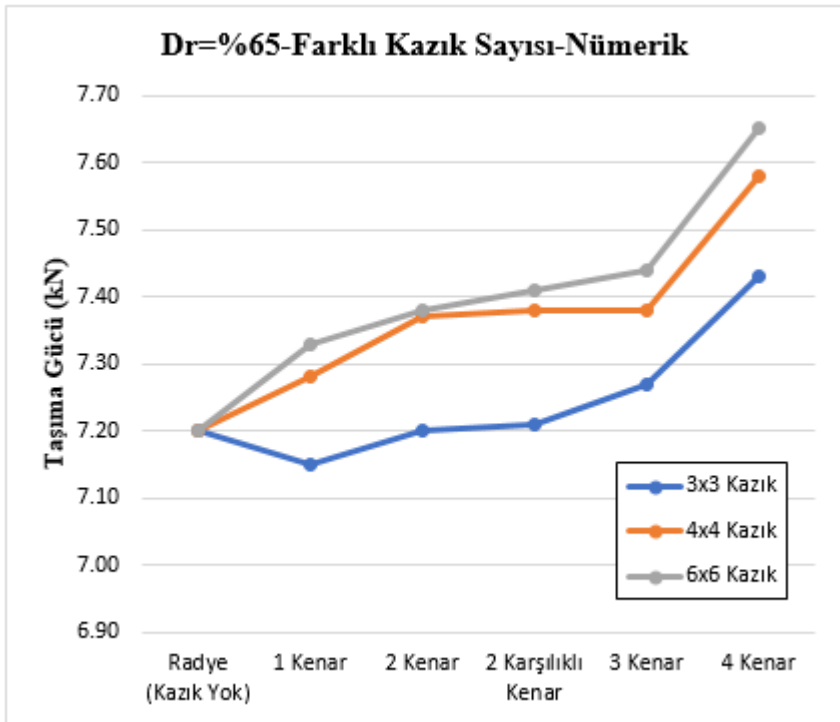
Şekil 6.11. Farklı kazık kombinasyonlarının göçme anındaki oturma miktarları (Dr=%65)



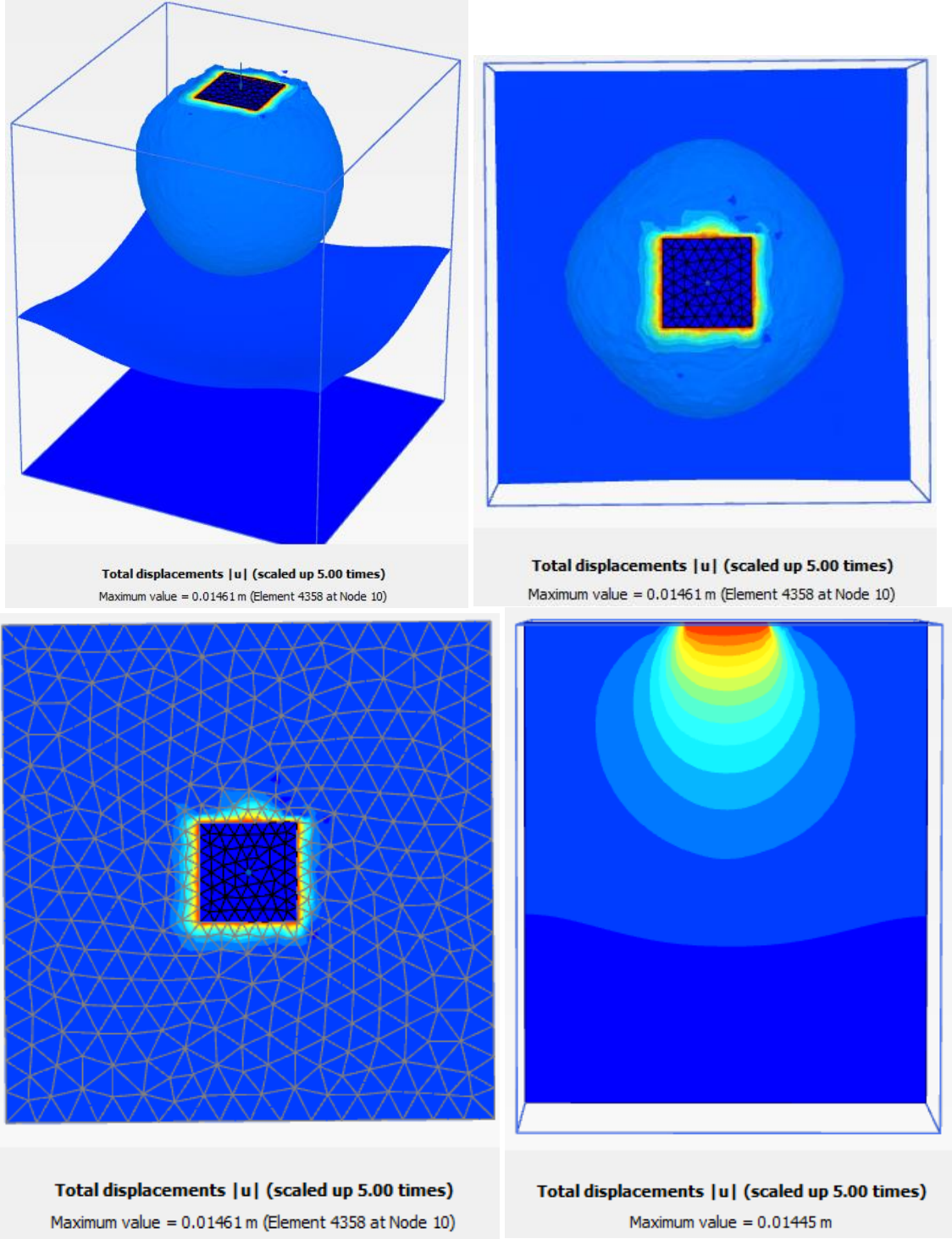
Şekil 6.12. Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri (Dr=%10)



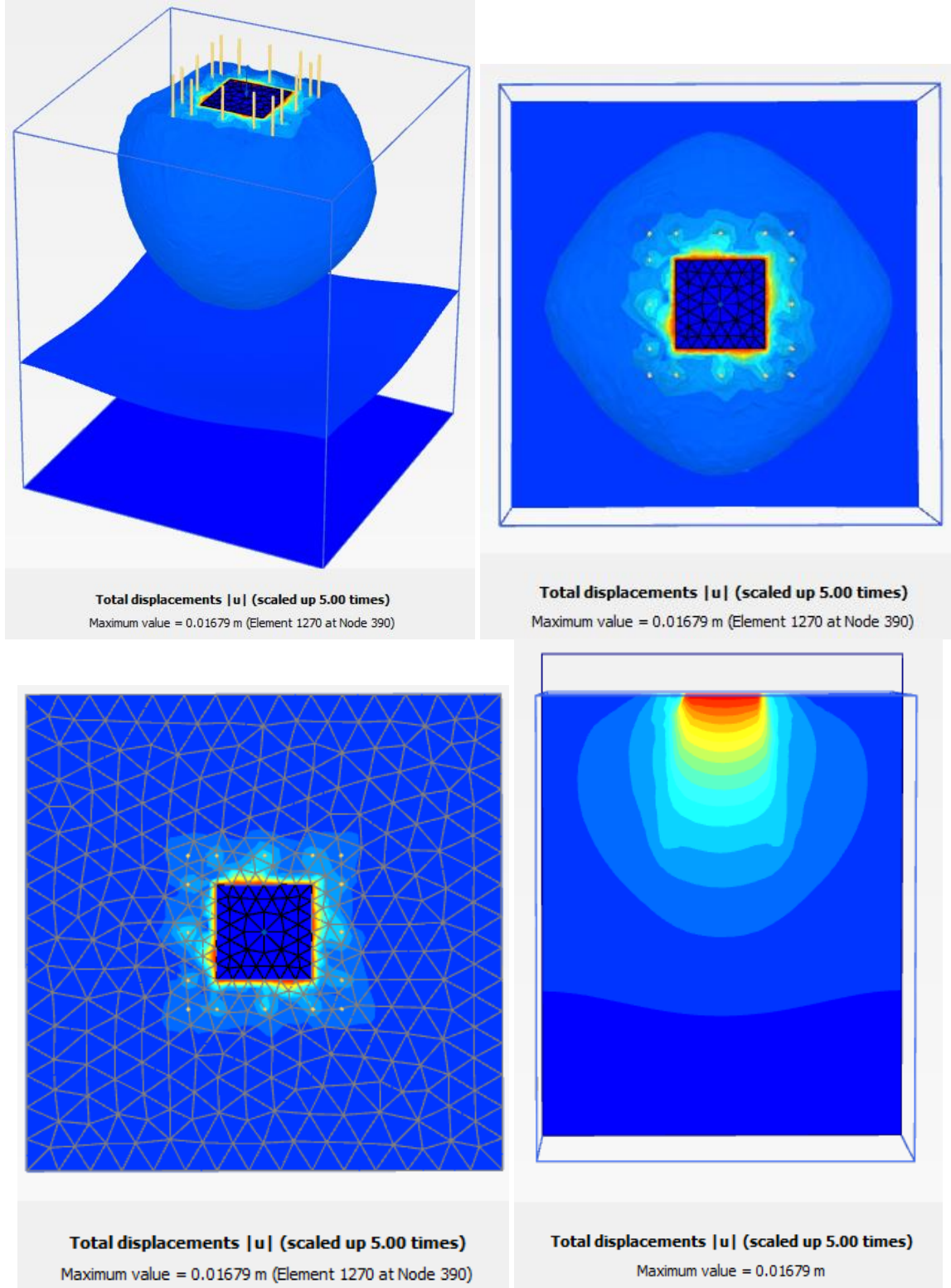
Şekil 6.13. Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri (Dr=%40)



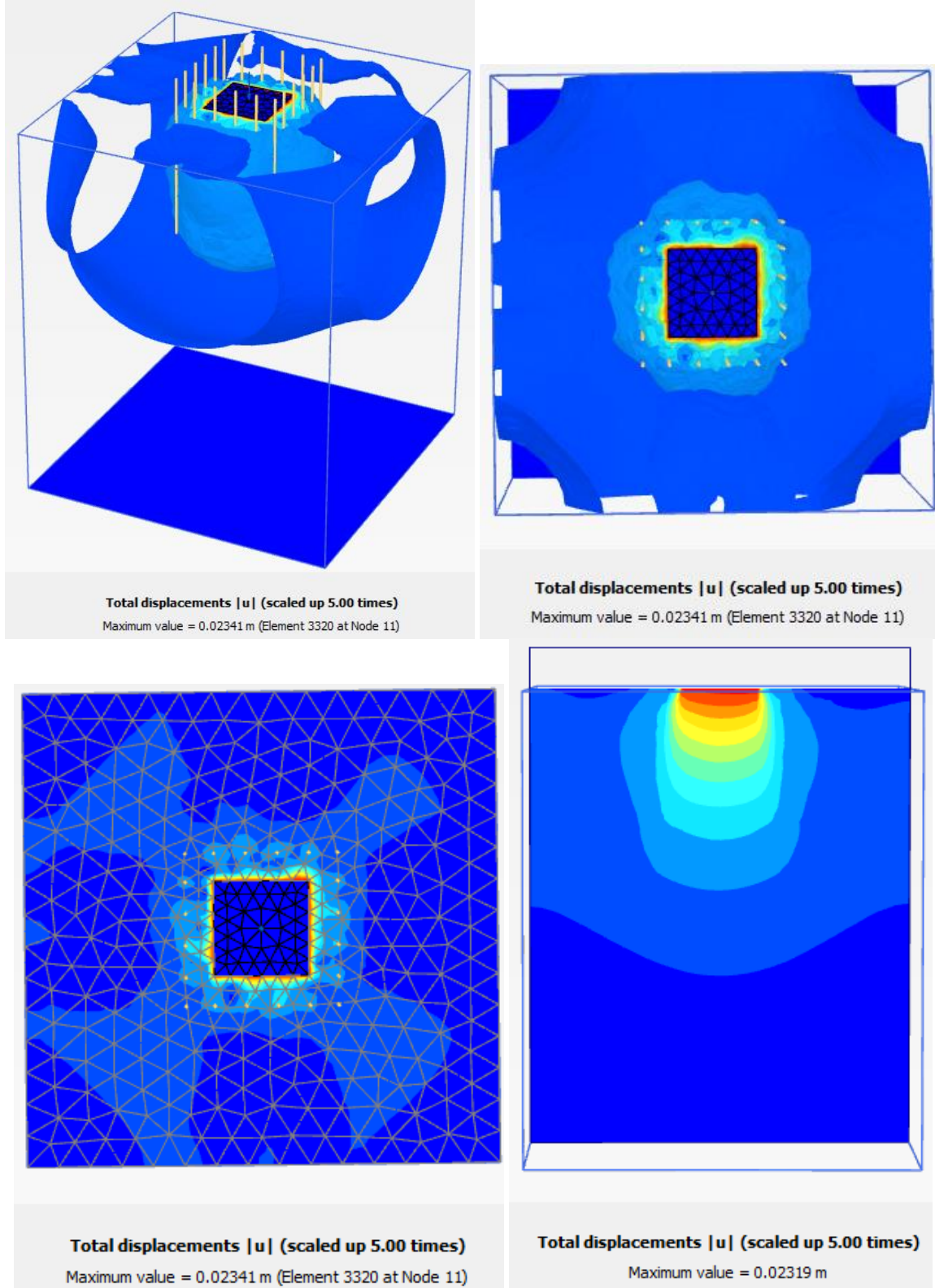
Şekil 6.14. Farklı kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında taşıma gücü değerleri (Dr=%65)



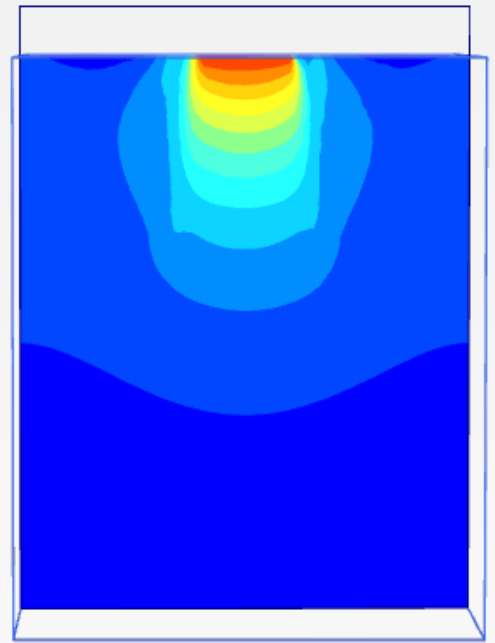
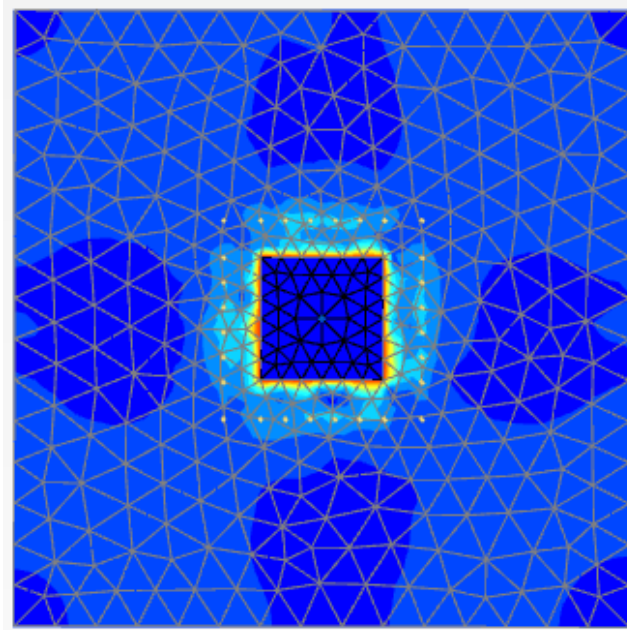
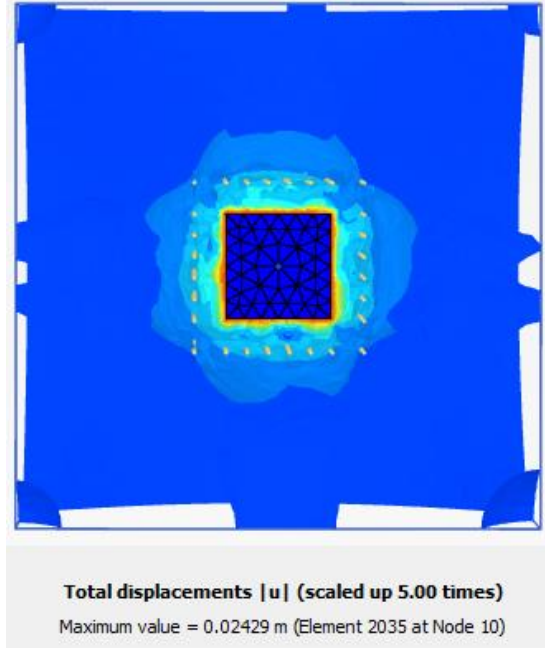
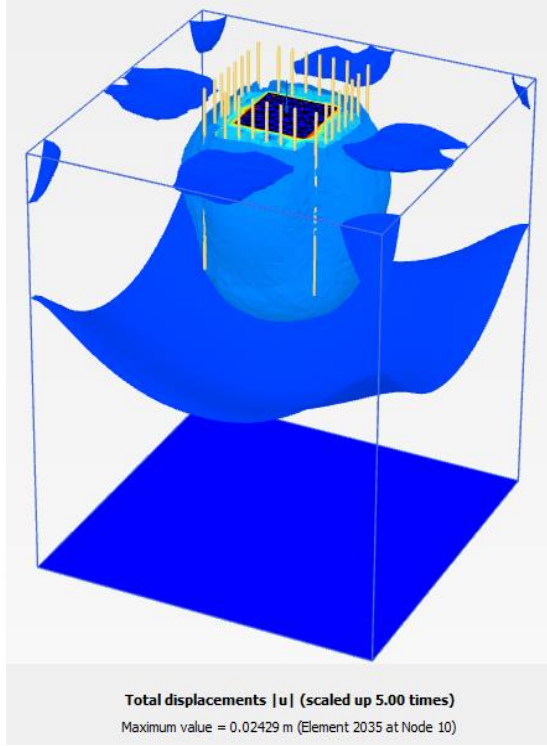
Şekil 6.15. $D_r=65\%$ zemin sıkılığında ve kazıksız modelde yüklemenden dolayı oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgeler (PLAXIS)



Şekil 6.16. $D_r=65$ zemin sıkılığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgelerin küçülmesine 3x3 kazık kombinasyonunun etkisi (PLAXIS)



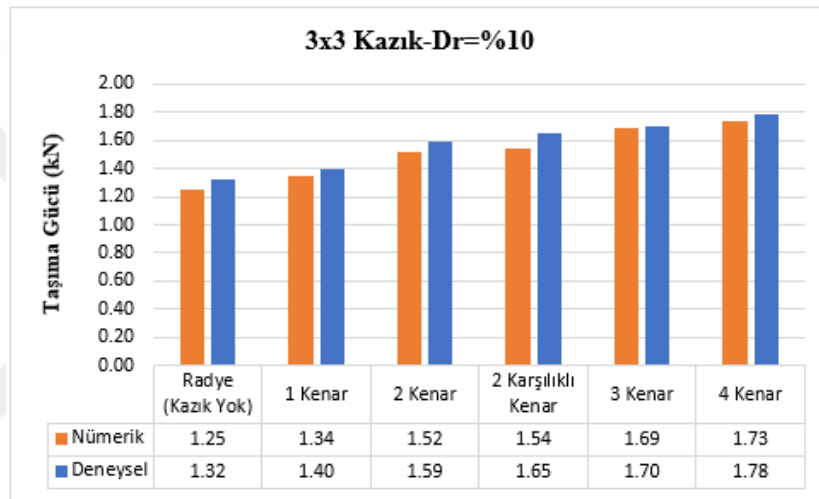
Şekil 6.17. $D_r=65\%$ zemin sıkılığında yüklemeye bağlı olarak zeminde oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgelerin küçülmesine 4x4 kazık kombinasyonunun etkisi (PLAXIS)



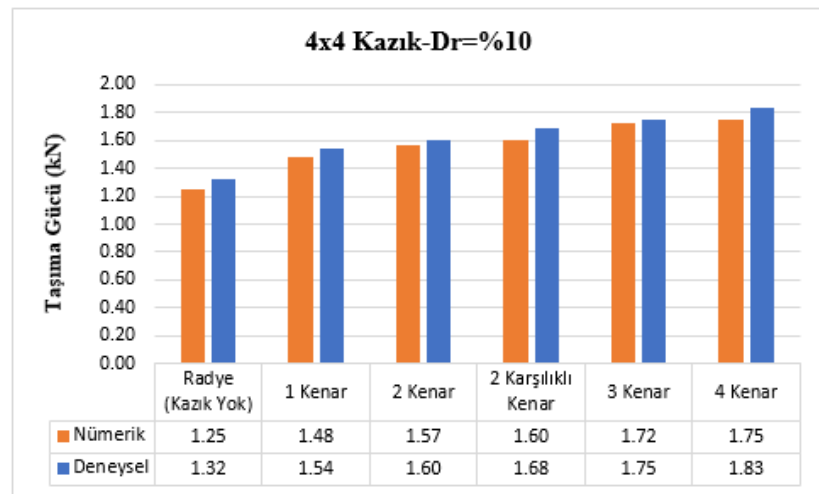
Şekil 6.18. $D_r=65$ zemin sıkılığında yüklemekten dolayı zeminde oluşan kabarmalar ve etkilenen bölgelerin küçülmesine 6x6 kazık kombinasyonunun etkisi (PLAXIS)

7. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

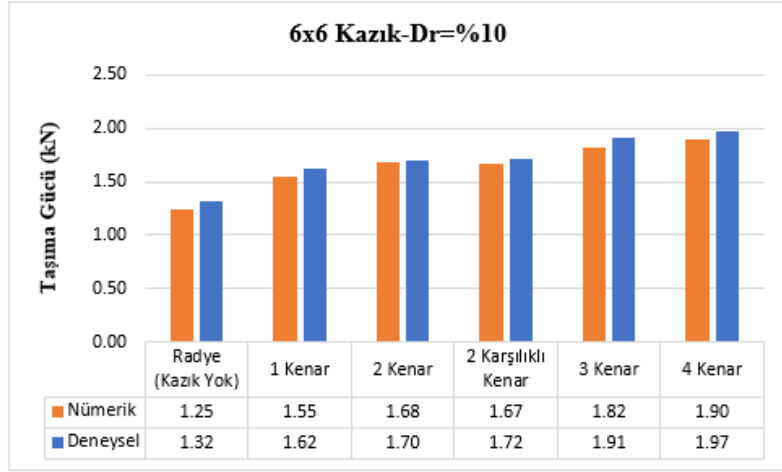
Yapılan bütün düşey yükleme deneyleri neticesinde bulunan taşıma gücü değerlerinin, PLAXIS sonlu elemanlar programı ile modellenmesi sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri, göçme anındaki oturma değerleri ve 10mm oturma anında farklı kazık kombinasyonlarında oluşan taşıma gücü değerlerin karşılaştırılması Şekil 7.1- Şekil 7.27 arasında verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, toplam taşıma gücü değerleri arasındaki farklar $\pm\%2$, göçme anındaki oturma değerleri arasındaki farklar $\pm\%6$ ve 10mm oturma anındaki taşıma gücü değerleri arasındaki farklar ortalama $\pm\%20$ olduğu ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



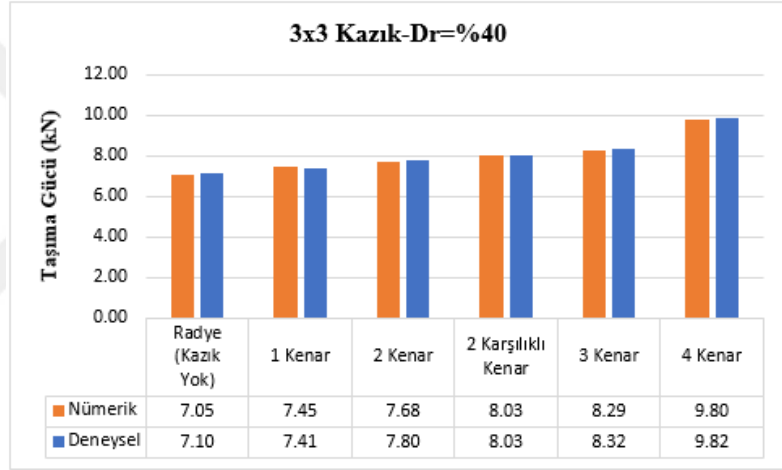
Şekil 7.1. 3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%10)



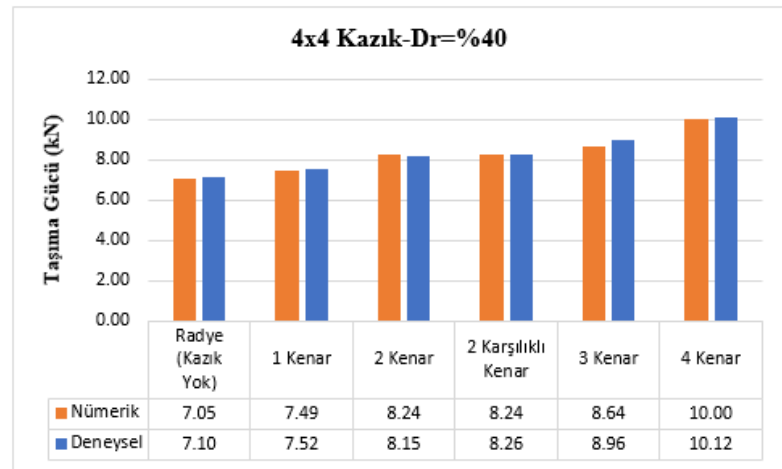
Şekil 7.2. 4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%10)



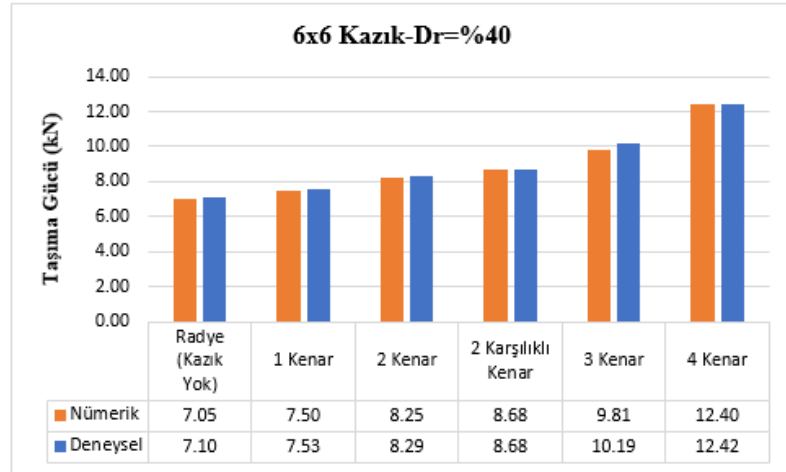
Şekil 7.3. 6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%10)



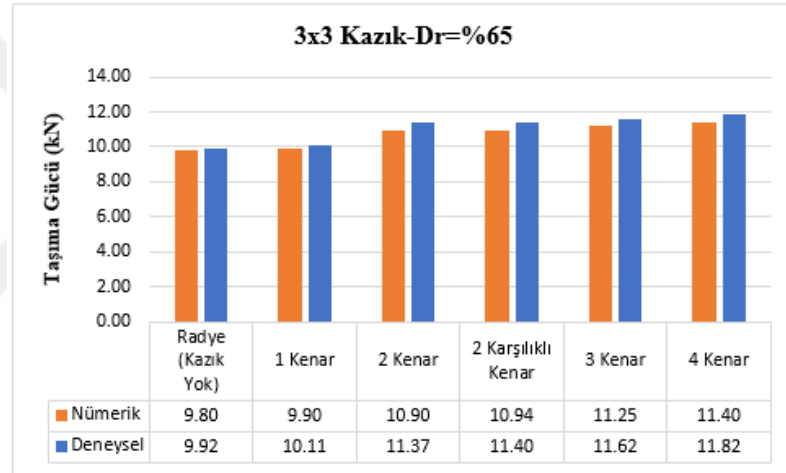
Şekil 7.4. 3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%40)



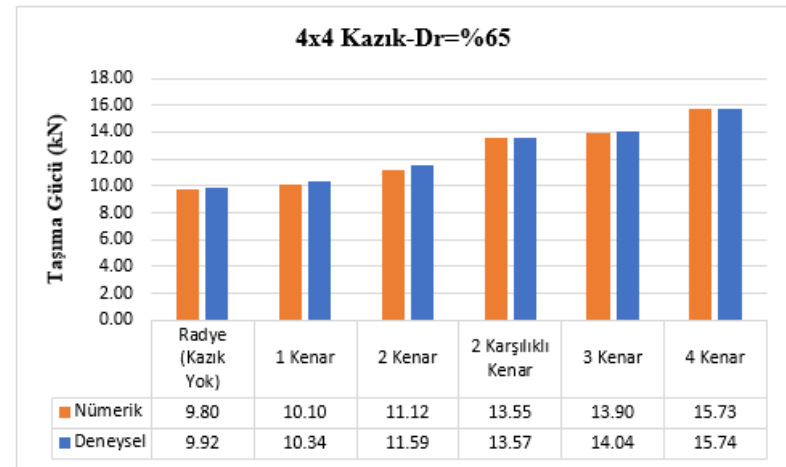
Şekil 7.5. 4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%40)



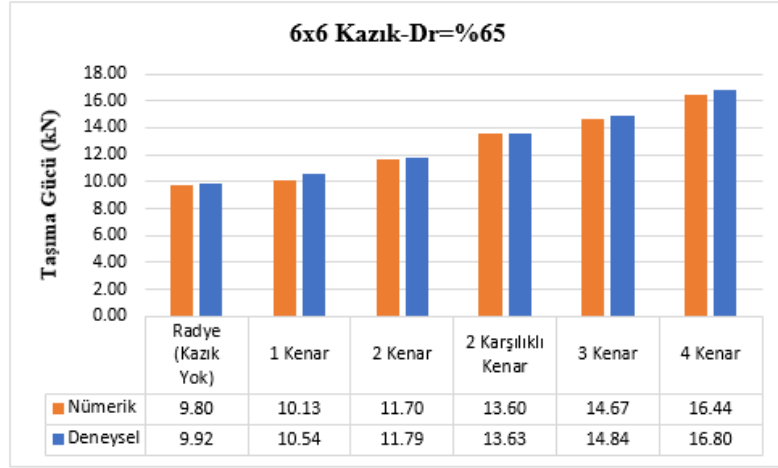
Şekil 7.6. 6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=40\%$)



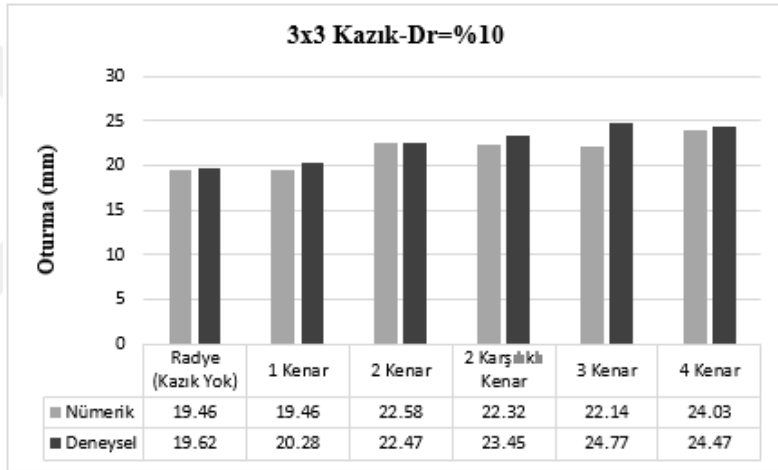
Şekil 7.7. 3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65\%$)



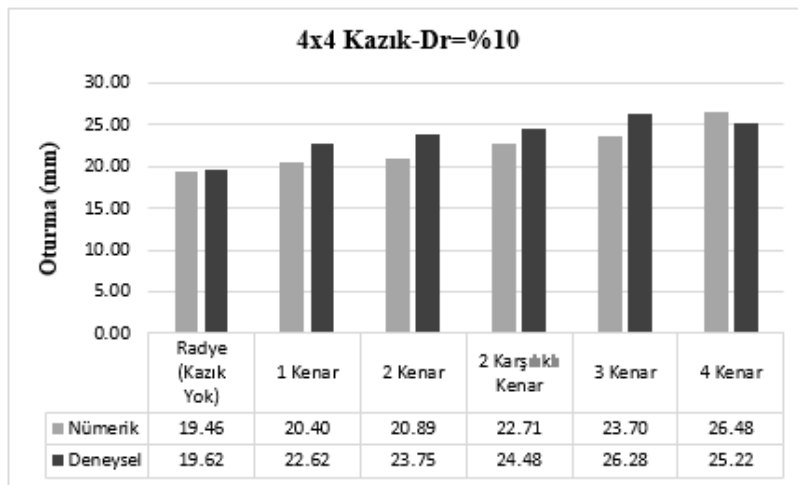
Şekil 7.8. 4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması ($D_r=65\%$)



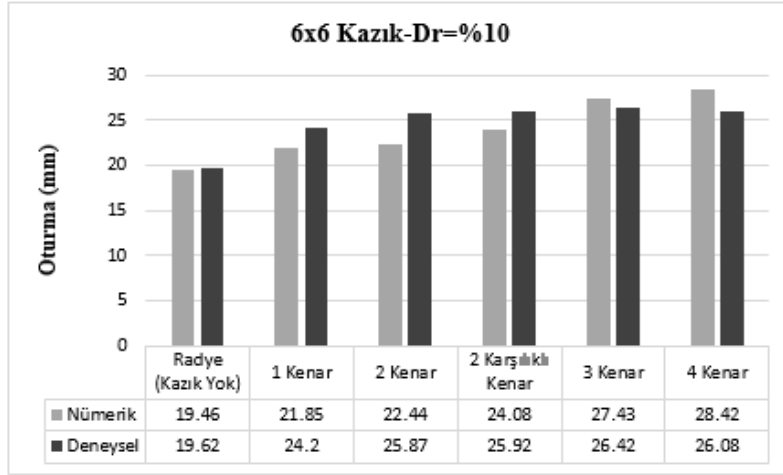
Şekil 7.9. 6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%65)



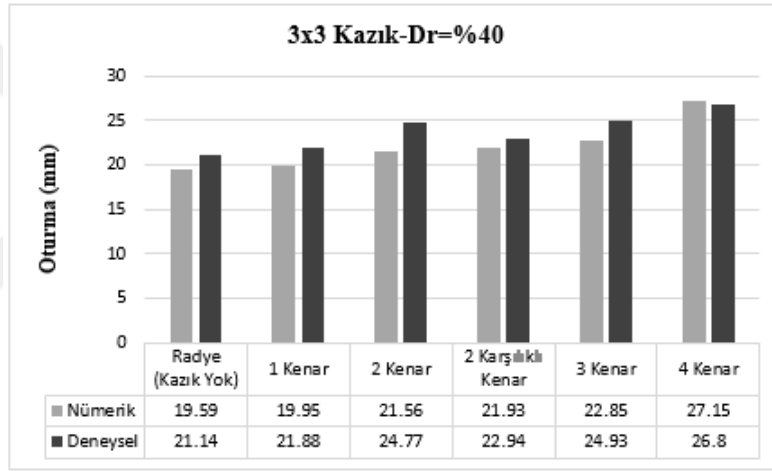
Şekil 7.10. 3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%10)



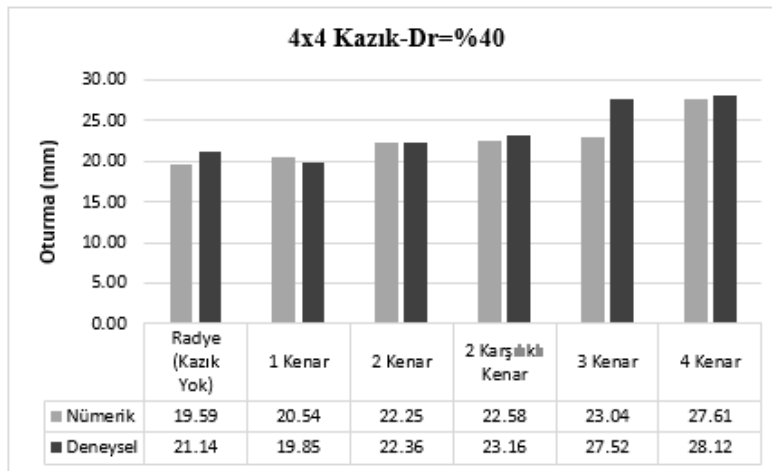
Şekil 7.11. 4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%10)



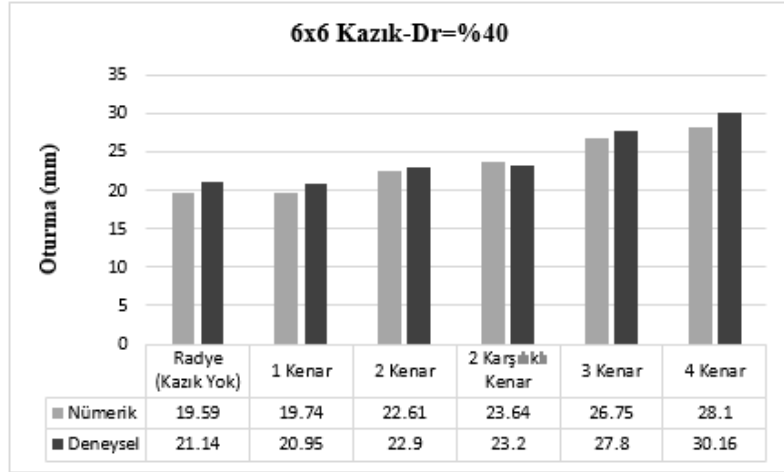
Şekil 7.12. 6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%10)



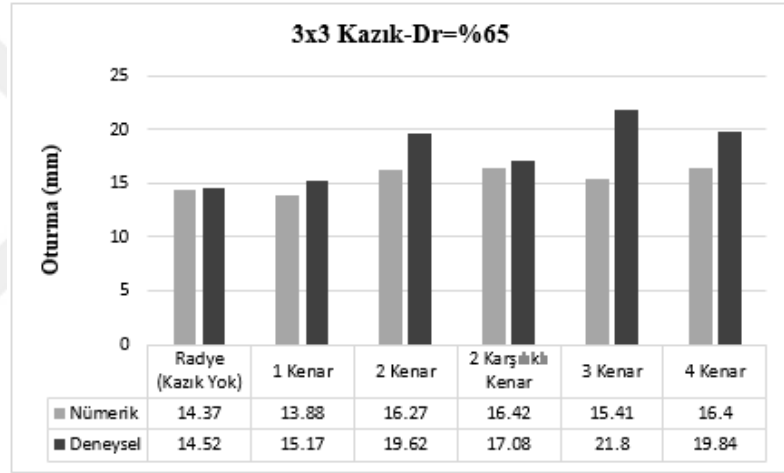
Şekil 7.13. 3x3 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%40)



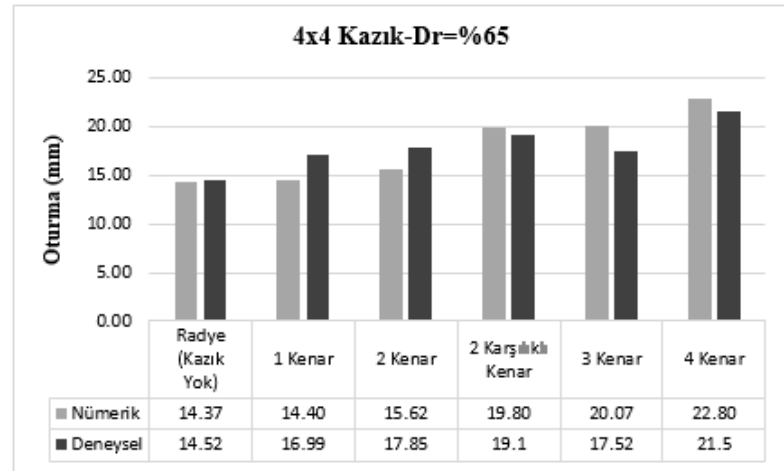
Şekil 7.14. 4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%40)



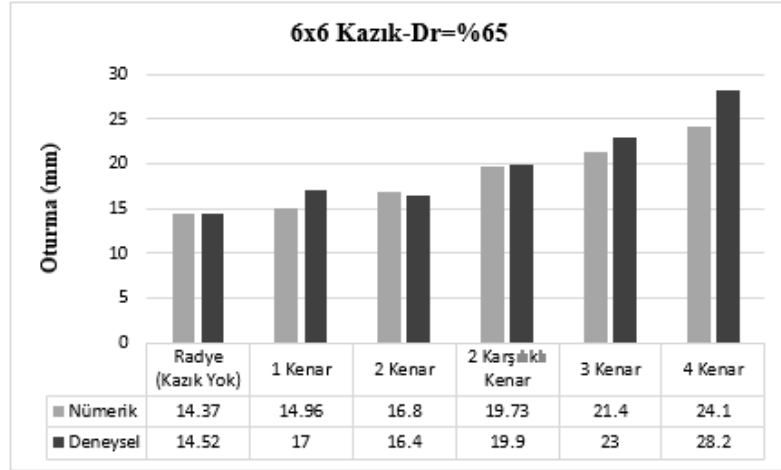
Şekil 7.15. 6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%40)



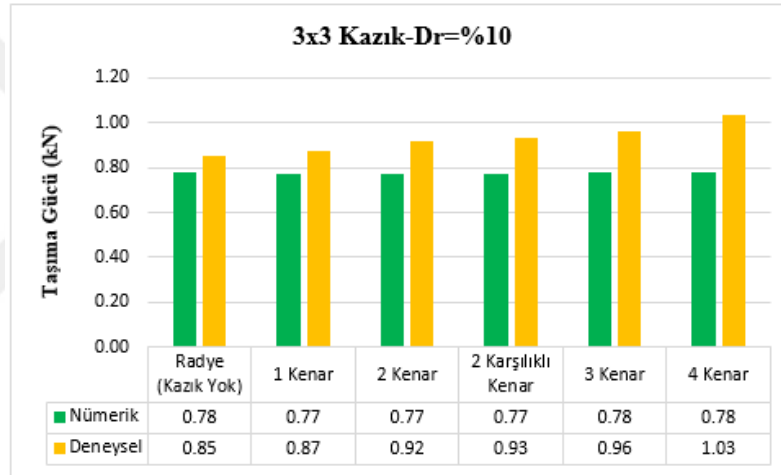
Şekil 7.16. 3x3 kazık kombinasyonu göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%65)



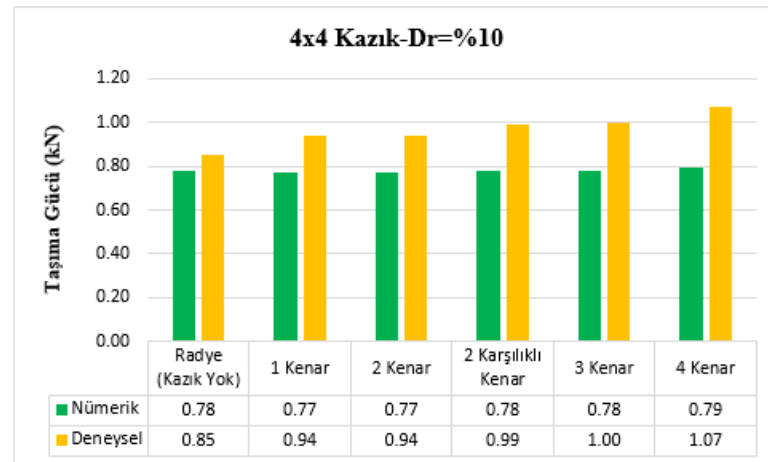
Şekil 7.17. 4x4 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%65)



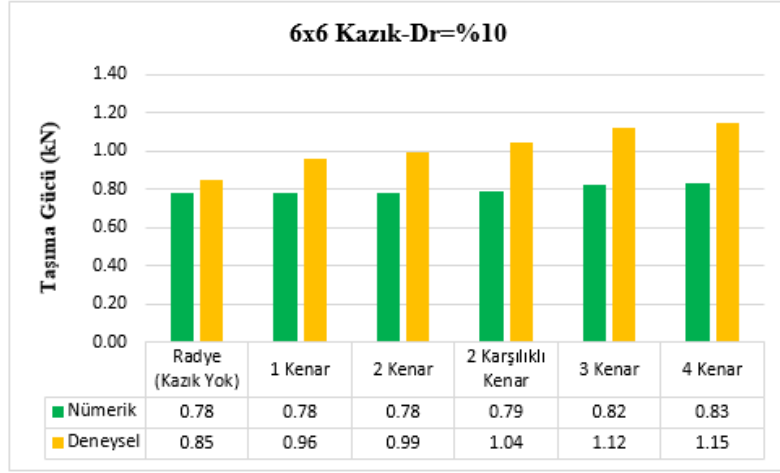
Şekil 7.18. 6x6 kazık kombinasyonu için göçme anındaki deneysel ve nümerik oturma değerlerinin karşılaştırılması (Dr=%65)



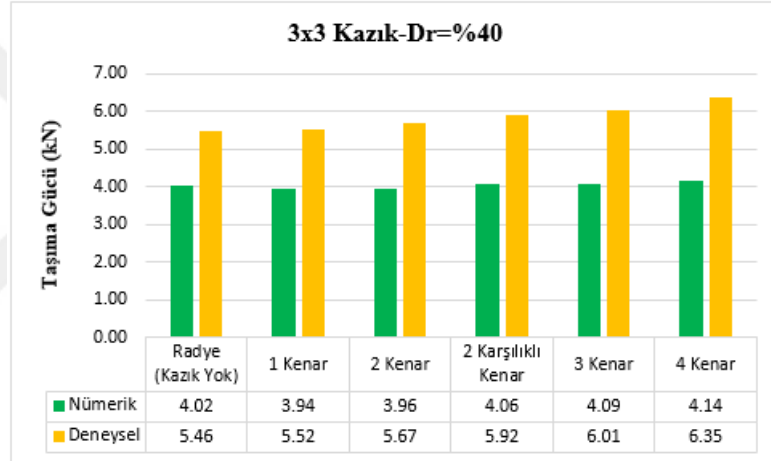
Şekil 7.19. 3x3 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%10)



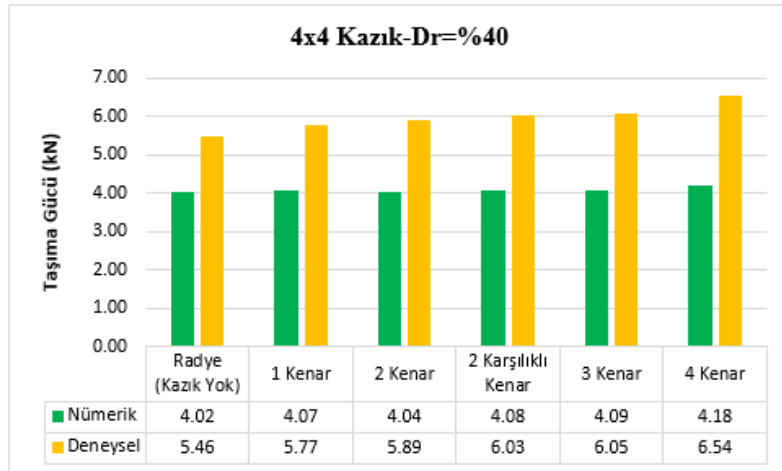
Şekil 7.20. 4x4 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%10)



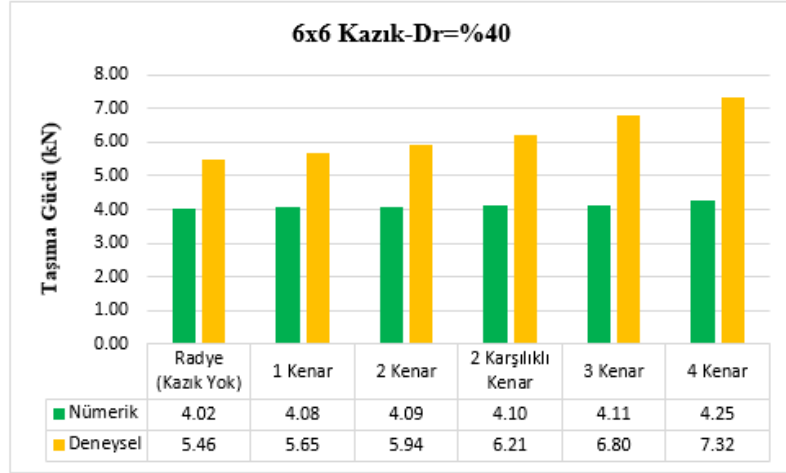
Şekil 7.21. 6x6 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%10)



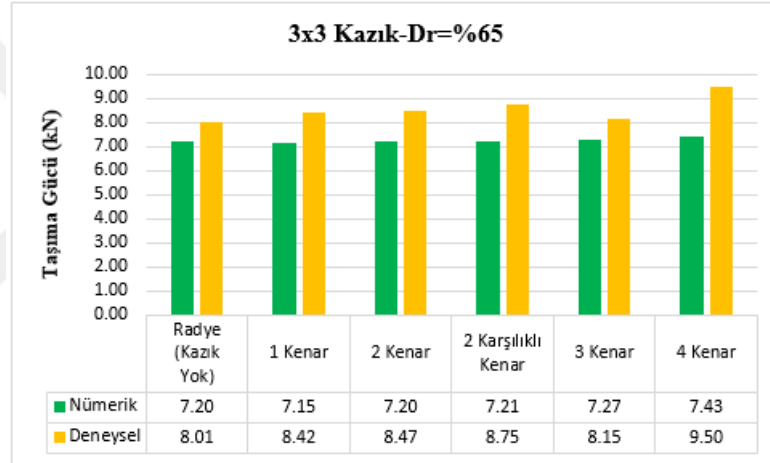
Şekil 7.22. 3x3 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%40)



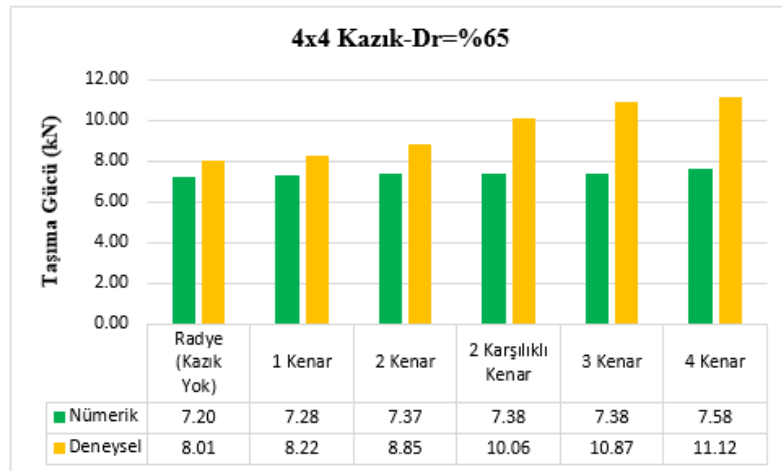
Şekil 7.23. 4x4 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%40)



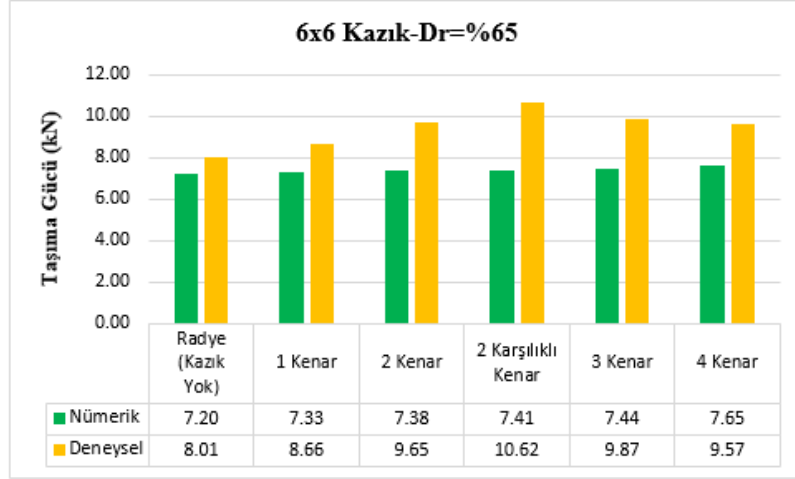
Şekil 7.24. 6x6 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%40)



Şekil 7.25. 3x3 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%65)



Şekil 7.26. 4x4 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%65)



Şekil 7.27. 6x6 kazık kombinasyonları için 10mm oturma anında deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması (Dr=%65)

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Literatür incelendiği zaman genellikle yapılan model deneylerinin kazıklı ve mikro kazıklı temeller üzerinde yapıldığı görülmüştür. Yeni inşa edilen ya da mevcut bir temelin kenarlarına mikro kazıkların uygulanarak bir temelin taşıma kapasitesine etkisini araştıran çalışmaların çok az olduğu, özellikle bir temelin farklı kenarlarına farklı kazıklar arası mesafe ve kazık sayısı ile mikro kazık uygulamasının temelin taşıma gücüne etkisini araştıran herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, mikro kazıklar model temelin bir kenarına, iki kenarına, iki karşı kenarına, üç kenarına ve dört kenarına olacak şekilde uygulanmış olup üç farklı kazıklar arası mesafe ile ($s=7,5\text{cm}$, 5cm ve 3cm) farklı kazık kombinasyonları tasarlanmıştır. Yapılan bu çalışmada, 3 farklı rölatif sıklıktaki ($D_r=\%10$, $\%40$ ve $\%65$) kum zemin kullanılarak etrafında farklı mikro kazık kombinasyonları oluşturulmuş bir radye temel üzerinde düşey yükleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda farklı mikro kazık kombinasyonlarının radye temelin taşıma gücü ve oturma değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Her deney sonucunda taşıma gücü ve oturma değerleri belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, bütün deney kombinasyonlarının bir sonlu elemanlar programı olan PLAXIS 3D kullanılarak eksenel yükleme altındaki davranışı incelenmiş olup deneysel ve nümerik sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan tüm deneyler ve PLAXIS 3D programı ile yapılan sonlu elemanlar analizleri neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Rölatif sıklığın zeminin taşıma gücü üzerinde çok etkili olduğu görülmüştür. Zeminin sıklığı $\%10$ 'dan $\%40$ ulaştığında $D_r=\%10$ 'a kıyasla taşıma kapasitesinde $\%430$ 'a ve $\%65$ 'e ulaştığında ise $\%650$ 'ye kadar varan artışlar gözlemlenmiştir. Taşıma kapasitesindeki bu artışlar ($D_r=\%10$ - $\%40$) arasında $D_r=\%10$ 'un 5,3 katı ve ($D_r=\%40$ - $\%65$) arasında $D_r=\%40$ 'ın yaklaşık 1,4 katı kadar olduğu görülmüştür.
- Rölatif sıklık arttıkça temel kenarlarına yerleştirilen kazıkların işlevselliğinin artmış olduğu gözlemlenmiştir. $D_r=\%10$ zemin sıklığında ve 3×3 , 4×4 ve 6×6 kazık kombinasyonlarında taşıma gücü değerlerinde sırasıyla $0,46\text{kN}$, $0,51\text{kN}$ ve $0,65\text{kN}$, $D_r=\%40$ zemin sıklığında ve 3×3 , 4×4 ve 6×6 kazık kombinasyonlarında taşıma gücü değerlerinde sırasıyla $2,72\text{kN}$, $3,02\text{kN}$ ve $5,32\text{kN}$ ve $D_r=\%65$ zemin sıklığında ve 3×3 , 4×4 ve 6×6 kazık kombinasyonlarında taşıma gücü değerlerinde sırasıyla $1,90\text{kN}$, $5,82\text{kN}$ ve $6,88\text{kN}$ artış meydana geldiği görülmüştür.
- Farklı kazık kombinasyonlarının taşıma gücüne etkisi incelendiğinde maksimum taşıma gücü $D_r=\%65$ zemin sıklığında ve 6×6 kazık kombinasyonunun 4 kenarına kazık yerleştirildiğinde elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, taşıma gücündeki artış yüzdesi incelendiğinde maksimum artışın $D_r=\%40$ zemin sıklığında ve 6×6 kazık kombinasyonunun 4 kenarına kazık yerleştirildiğinde elde edilmiştir. Radye (kazık yok) ve temelin dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin taşıma gücü değerleri karşılaştırıldığında, $D_r=\%10$

zemin sıklığında ve 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında zemin taşıma gücünün ortalama olarak %35, D_r =%40 zemin sıklığında ve 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarındada sırasıyla %38, %42,5 ve %74,9, D_r =%65 zemin sıklığında ve 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %19, %58,7 ve %69,4 oranında arttığı görülmüştür.

- Kazıklar arası farklı mesafe, kazık sayısı ve kazık çakılan kenar sayısı incelendiğinde kazıklar arası mesafe azaldıkça, kazık sayısı ve kazık yerleştirilen kenarların sayısı arttıkça taşıma gücünün arttığı gözlemlenmiştir.
- Düşey yükleme deneyleri sırasında radye temel in altından farklı kenarlarına kumun hareket etmesinin engellenmesi zeminin taşıma gücünü artırır. Deney sırasında 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonları oluşturularak bu kazıkların düşey yüklemeye dolaylı temel kenarlarında oluşacak kabarmalara etkisi gözlemlenmiştir. D_r =%65 zemin sıklığında kumun hareket etmesinden dolayı oluşan bu kabarmalar 3x3 kazık kombinasyonunda göreceli olarak %20, 4x4 kazık kombinasyonunda %70 ve 6x6 kazık kombinasyonunda %98'e kadar azaldığı görülmüştür. Bu husus yapılan nümerik analizlerde de incelenmiştir. PLAXIS 3D programında yapılan yüklemelerden dolayı kum zemininde oluşan kabarma ve zemin kütlesi içerisindeki hareket eden bölgelere 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarının ekisine bakıldığında deneysel sonuçlara benzer şekilde kazık sayısı arttıkça kabarmaların azaldığı ve hareketlenen bölgenin küçüldüğü görülmüştür. Yapılan nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde D_r =%65 zemin sıklığında yüklemeye dolaylı oluşan kabarmaların azalması ve hareketlenen bölgenin küçülmesinde 3x3 kazık kombinasyonunun çok etkili olmadığı ama 4x4 kazık kombinasyonunun göreceli olarak %65 ve 6x6 kazık kombinasyonunun %90'a kadar bu kabarmaları azalttığı görülmüştür.
- Köşe kazıkların sistemin taşıma gücüne etkisinin belirlenmesi için köşeli ve köşesiz kazık kombinasyonları oluşturulup deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda köşe kazıkların sistemin genel taşıma gücüne etkisinin ihmal edilecek düzeyde az olduğu görülmüştür.
- Farklı kazık kombinasyonlarının oturma değerlerine etkisi incelendiğinde, temel in iki karşılıklı kenar ve dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (cephe ve kazıkların simetrik olarak yerleştirilme etkisi). D_r =%65 zemin sıklığında sadece radye (kazık yok), iki karşılıklı kenar ve dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin göçme anındaki oturma değerleri incelendiği zaman radye (kazık yok) modelinin 14,52mm oturma yaptığıında göçmüş olduğu, iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen modellerin 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarının sırasıyla 17,08mm, 19,10mm ve 19,90mm oturma yaptığıında, dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarının sırasıyla 19,84mm, 21,50mm ve 28,20mm oturma

yaptığında göçmüş olduğu görülmüştür. $D_r=40\%$ zemin sıklığında sadece radye (kazık yok), iki karşılıklı kenar ve dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin göçme anındaki oturma değerleri incelendiği zaman radye (kazık yok) modelin 21,14mm oturma yaptığıında göçmüş olduğu, iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen modellerin 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarının sırasıyla 22,94mm, 23,16mm ve 23,20mm oturma yaptığıında, dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarının sırasıyla 26,80mm, 28,12mm ve 30,16mm oturma yaptığıında göçmüş olduğu görülmüştür. $D_r=10\%$ zemin sıklığında sadece radye (kazık yok), iki karşılıklı kenar ve dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin göçme anındaki oturma değerleri incelendiği zaman radye (kazık yok) modelin 19,62mm oturma yaptığıında göçmüş olduğu, iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirilen modellerin 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarının sırasıyla 23,45mm, 24,48mm ve 25,92mm oturma yaptığıında, dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarının sırasıyla 24,47mm, 25,22mm ve 26,08mm oturma yaptığıında göçmüş olduğu görülmüştür.

- Yük-oturma grafiklerinden elde edilen göçme anındaki oturma değerlerine göre radyenin (kazık yok) taşıma gücü ile radyenin iki karşılıklı kenar ve dört kenarına kazık yerleştirilen modellerin taşıma gücü değerleri birbirleriyle karşılaştırıldığında taşıma gücünün, $D_r=65\%$ zemin sıklığında 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında daha fazla arttığı görülmüştür. $D_r=10\%$ zemin sıklığında ve temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirildiğinde taşıma gücünün 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %19,50, %24,80 ve %32,10 arttığı ve temelin dört kenarına kazık yerleştirildiğinde 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %24,70, %28,50 ve %32,90 arttığı görülmüştür. $D_r=40\%$ zemin sıklığında ve temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirildiğinde taşıma gücünün 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %8,50, %9,60 ve %9,70 arttığı ve temelin dört kenarına kazık yerleştirildiğinde, 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %26,80, %33,00 ve %42,70 arttığı belirlenmiştir. $D_r=65\%$ zemin sıklığında ve temelin iki karşılıklı kenarına kazık yerleştirildiğinde taşıma gücünün 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %17,60, %31,54 ve %37,10 arttığı ve temelin dört kenarına kazık yerleştirildiğinde 3x3, 4x4 ve 6x6 kazık kombinasyonlarında sırasıyla %36,60, %48,10 ve %94,20 arttığı görülmüştür.
- Yapılan karşılaştırmalar sonucunda PLAXIS 3D sonlu elemanlar programı ile elde edilen nümerik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması sonucunda, göçme anındaki taşıma gücü değerleri arasındaki farkların ortalama $\pm 2\%$ olduğu, göçme anındaki oturma değerleri arasındaki farkların ortalama $\pm 6\%$ ve 10mm oturma anında farklı kazık kombinasyonlarında oluşan

taşıma gücü değerleri arasındaki farkların ortalama $\pm\%20$ olduğu görülmüştür. 10mm oturma anında farklı kazık kombinasyonlarında oluşan taşıma gücü değerleri arasındaki farkların $\pm\%20$ 'e çıkmasının nedeni deneysel verilerden elde edilen grafiklerin eğriliğinin nümerik değerler kullanılarak çizilen grafiklerin eğriliğinden daha fazla olmasıdır. Nümerik verilerin eğrisi 10mm oturma çizgisini deneysel eğrilerden daha az taşıma gücü ile ve deneysel eğrilere kıyasla daha erken geçmekte ve bu nedenle aralarındaki farkın artmasına sebep olmaktadır. Göçme anında her iki eğri birbirine yaklaşmakta ve böylece aralarındaki farklar azalmaktadır.

Deneysel çalışmalar artırılarak farklı kazık çapları ve temel kenarlarında farklı açılarla mikro kazıklar yerleştirilerek radye veya tekil temellerin taşıma gücü ve zemin iyileştirmesinde mikro kazıkların etkisi birçok yönden daha detaylı incelenebilir. Teknolojik gelişmelerden de yararlanarak üzerinde deney yapılacak modellerin hazırlanmasında insani müdahaleyi en aza indiren daha iyi deney sistemleri ve daha hassas ölçüm aletleri kullanarak daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Elde edilen deneysel sonuçlar, nümerik analiz yapan farklı bilgisayar programları kullanılıp incelenerek analizlerdeki hata payı en aza indirilebilir. Tüm bu çalışmalar neticesinde mikro kazıkların tasarımlarında ve uygulamalarında daha gerçekçi ve ekonomik sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Korkmaz, E. (2019). *Çekme Yükü Altında Çalışan Mikro Kazıklar*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] Nguyen, D. D. C., Jo, S. B., Kim, D. S. (2013). Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects, *Computers and Geotechnics*, 47, ss. 16-27.
- [3] El Kamash, W. ve Han, J. (2017). Numerical analysis of existing foundations underpinned by micropiles, *Int Journal Geomech* cilt 17(6), ss. 1–16.
- [4] Mandal, J.N. ve Manjunath, V.R. (1995). Bearing capacity tests on strip footing resting on reinforced sand subgrades, *Construct Build Mater* 9:35–38.
- [5] Moradi, H. ve Mohsen, M. (2021). Experimental evaluation of the effects of structural parameters, installation methods and soil density on the micropile bearing capacity, *Int Journal Civil Eng*, 5.
- [6] Bruce, D. A., Dimillio, A. F., Juran D. I. (1997). Micropiles: The State of Practice, Part 1: Characteristics, definitions and classifications. *Ground Improvement*, 1, ss. 25–35.
- [7] Malik, B. A., Shah, M. Y., Sawant, V. A. (2021). Plate load tests to analyze the load-settlement response of shallow foundations on sand beds reinforced with micropiles, *Environmental Science and Pollution Research* 28:67657–67666.
- [8] Das. B.M. (1984). “*Principles of Foundation Engineering*” (Ed: Kingman R.) Wadsworth Inc, California, USA.
- [9] Taher, N.R. (2019). *Experimental Study on Behavior of Wood and Steel Single Piles*, Master's Thesis, Firat University, Graduate School of Natural and applied Sciences
- [10] Önalp, A., Sert, S. (2010). *Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri*, Birsen Yayıncılık, ISBN, 978-975.
- [11] Avcı, G. (2008). *Kazıklı Temellere Etki Eden Dinamik Yüklerin Statik Yükler Cinsinden Uygulanabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [12] Vesic, A. S. (1977). *Design of pile foundations*, NCHRP synthesis of highway practice, (42).
- [13] Yeğit, M. (2017). *Farklı Çapta, Derinlikte ve Sayıdaki Kazıkların Grup Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [14] Toğrol, E. ve Tan, O. (2009). *Kazıklı Temeller*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [15] Lizzi, F. (1982). *The Static Restoration of Monuments: Basic Criteria-Case Histories, Strengthening of Buildings Damaged by Earthquakes*, Genova: Sagep Editrice.
- [16] FHWA, (2005). *Micropile Design and Construction Guidelines, Implementation Manual*, National Highway Institute.
- [17] Bruce, D. ve Juran, L. (1997). *Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review*, Volume I-IV. McLean, Virginia: U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration.
- [18] Bruce, D. A., DiMillio, A. F., Juran, I. (1995). Introduction to Micropiles: An International Perspective. Foundation Upgrading and Repair for Infrastructure Improvement, *ASCE, Geotechnical Special Publication*, (50): 1-26.
- [19] Shong, I. L. ve Chung, F. C. (2003). *Design and Construction of Micropiles*, Geotechnical Course for Pile Foundation Design and Construction, IPOH, (29-30 September, 2003).
- [20] Alhajja, A.A. ve Batali, L. (2022). Seismic Behavior of Micropiles and Micropiled Structures Used For Increasing Resilience: A Literature Review, *Urban Sustainability and Resilience of the Built Environments*, 12(5), 2743

- [21] Timothy, M. J., Bean, J. J., Bolton, M. K. (2012). *MiniJET: A New Type of Micropile*. In Proceedings of Grouting and Deep Mixing, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*. New Orleans, Louisiana (15-18 February 2012), pp. 1095-1104.
- [22] AASHTO. (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, *The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Customary U.S. Units, Section 10.
- [23] Bruce, D., Beam, J., Myers, T. (2010). *MiniJET: A New Type of Micropile*. International Workshop on Micropiles, Washington, DC. September 22-25.
- [24] Hussin, J. ve Cook, C. (2010). *Fast-Track Installation of Micropiles to Resupport Settled Florida SR-60 Bridge End Bents*. Transportation Research Record 2202, 5.
- [25] Barron, D. (2016). *Finite Element Modeling of Micropiles and the Influence of Steel Casing on Load Transfer Mechanisms*, Master's Thesis, State University of New York, Graduate School of Natural and applied Sciences
- [26] Hütte HBR 202 E. ve Beretta T45 (2017). *Case Study: HBR 202 E Micropiles*, a Hotel in Dubai, <https://huette-bohrtechnik.com/case-study-hbr-202-e-micropiles-a-hotel-in-dubai/>
- [27] Elaziz, A. Y. A. ve Naggar, M. H. E. (2015). Performance of Hollow Bar Micropiles under Monotonic and Cyclic Lateral Loads. American Society of Civil Engineers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 11.
- [28] Luna, R., Dixon, D., Kershaw, K., Siegel, T. (2015). Monitoring Micropile Foundations of Bridge during Construction IFCEE 2015 (pp. 878-889): *American Society of Civil Engineers*.
- [29] Larsson, K. ve Jog, D. (2014). Performance of Micropiles Used to Underpin Highway Bridges. American Society of Civil Engineers, *Performance of Constructed Facilities* (28), 16.
- [30] Splitstone, D., Stonecheck, S., Dodson, R., Fuller, J. (2010). Birmingham Bridge Emergency Repairs: Micropile Foundation Retrofit. *ASCE (GeoFlorida)*, 9.
- [31] Grove Road Bridge Replacement. (2014). Essex County Department of Public Works: *Schoder River Associates*.
- [32] Monopole Reinforcement and Retrofit Project. (2014). North Smithfield, Rhode Island: Crown Castle.
- [33] Reese, L. C., Wang, S. T., Isenhower, W. M., Arréllaga, J. A., Hendrix, J. (2005). "A Program for Analysis of Single Piles Under lateral Load", Version 5.0.18, Ensoft Inc., Austin, TX.
- [34] AASHTO (2002), "Standard Specifications for Highway Bridges", Association of State Highway and Transportation Officials Publication, Washington, D.C. ISBN: 156051171-0.
- [35] Richards, T.D. ve Rothbauer, M.J. (2004). "Lateral Loads on Pin Piles (Micropiles)," Geotechnical Special Publication "Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems", *ASCE Publication*, No.: 124, pp.158-174.
- [36] Cadden, A., Gomez, J., Bruce, D., Armour, T. (2004). Micropiles: Recent Advances and Future Trends. *ASCE Conference Proceeding: Current Practices and Future Trends in Deep Foundations (GSP 125)*, pp. 140-165.
- [37] Meyerhoff, G.G. (1976). "Bearing Capacity and Settlement of Piled Foundations", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, GT#3, pp. 197-228.
- [38] Holloway, D. M., Moriwaki, Y. Stevens, J. B., Perez, J.Y. (1981). "Response of a Pile Group to Combined Axial and Lateral Loading", Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Boulimia Publishers*, Stockholm, Vol. 2, pp. 731-734.
- [39] Brown, D. A., Morrison, C., Reese, L. C. (1988). "Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 11, pp. 1261-1276.

- [40] FOREVER (2003), “*Synthesis of the Results of the National Project on Micropiles*”, International Center for Ground Improvement, Polytechnic University, Juran, I, Jahir Hasan, Weinstein, G. M, and Sourisseau, L.
- [41] Brown, D. A. ve Bollman, H. T. (1993). “*Pile-Supported Bridge Foundations Designed For Impact Loading*”, Appended Document to the Proceedings of Design of Highway Bridges for Extreme Events, Crystal City, Virginia, pp. 265-281.
- [42] Federal Highway Administration (2005). “*Design and Construction of Driven Pile Foundations*”, Hannigan, P. J., Goble, G. G., Thendean, G., Likins, G. E., and Rausche, F., Publication No. FHWA-NHI-05-042, United States Department of Transportation, December.
- [43] Mosher, R. L. ve Dawkins, W. P. (2000). *Theoretical Manual for Pile Foundations*: US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center
- [44] Cadden, A. ve Gomez, J. (2002). *Buckling of Micropiles: A review of historic research and recent experiences*, ADSC, 19
- [45] Broms, B. B. (1964a). Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(3): 123-158
- [46] Broms, B. B. (1964b). Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, 90(2): 27-64
- [47] Meyerhof, G. G. ve Sastry, V. V. (1987). Full-Displacement Pressuremeter Method for Rigid Piles under Lateral Loads and Moments, *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4): 471-478
- [48] Randolph, M. F. (1981). The Response of Flexible Piles to Lateral Loading, *Géotechnique*, 31(2): 247-59
- [49] Reese, L. C., Cox, W. R., Koop, F. D. (1974). *Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand*, Paper Number OTC 2080, In Proceeding of the Fifth annual offshore technology conference, Dallas, Texas, Vol.2, pp. 473-485
- [50] Reese, L. C. ve Welch, R. C. (1975). Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(7): 633-649
- [51] Jeon, S. S. ve Kulhawy, F. H. (2001). Evaluation of Axial Compression Behaviour of Micropiles, In Proceedings of a specialty conference: *Foundations and Ground Improvement* (GSP 113) (pp. 460-471). Blacksburg, Virginia: ASCE
- [52] Sagara, M., Shito, K., Igase, Y., Ohashi, G., Saito, E., Sasaya, T., Hatano, T. (2002). *In-situ Load Test of High Capacity Micropile Foundation on Mountain Ground*, In Proceedings of the 5th International Workshop on Micropile, Venice, Italy, International Society for Micropiles
- [53] Murthy, B. R. S. Babu, G. L., S. Srinivas, A. (2002). Analysis of bearing capacity improvement using micropiles, *Ground Improvement* 6, No. 3, 121-128
- [54] Babu, G. L. S. Murthy, B. S., Nataraj, M. S. (2004). *Bearing Capacity Improvement Using Micropiles a Case Study*, GeoSupport Conference, Orlando, Florida, United States
- [55] NAVFAC. (1986). *Foundation and Earth Structures*, Design Manual 7.02, Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC)
- [56] Duncan, J. M., Evans, J. L., Ooi, P. S. (1994). Lateral Load Analysis of Single Piles and Drilled Shafts, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(6): 1018-1033
- [57] Long, J., Maniaci, M., Menezes, G., Ball, R. (2004). *Results of Lateral Load Tests on Micropiles*, In Proceedings of sessions of the GeoSupport Conference: Innovation and Cooperation in the Geo-Industry, Orlando, Florida: Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, pp. 122-133

- [58] Han, J. ve Ye, S. (2006). A Field Study on the Behaviour of a Foundation Underpinned by Micropiles, *Canadian Geotechnical Journal*, 43(1): 30-42
- [59] Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., You, G.L. (2006). Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforced With Micropiles, *Soils and Foundations*, 46(3): 367-376
- [60] Thomson, P., Leew, B., Zakeri, A., Becker, D., Bunce, C., Dittrich, P. (2007). *Axial Compression, Axial Tension and Lateral Load Response of Pre-Production Micropiles for the CPR Mile 62.4 Nipigon Subdivision Bridge*, In Proceedings of the 8th International Workshop on Micropiles (IWM), Toronto, ON, Canada: IWM
- [61] Bhattacharjee, A. Mittal, S., Krishna, A. M. (2011). Bearing capacity improvement of square footing by micropiles, *International Journal of Geotechnical Engineering* 5: 113-118
- [62] Elsaied, A. E. (2014). Performance of footing with single side micro-piles adjacent to slopes, *Alexandria Engineering Journal*, 53, 903–910
- [63] Mittal, S. ve Babu, S. (2018). Retrofitting of N–W Corner of Kolkata High Court Heritage Building Through Micropiles and Grouting, *Geotechnics for Natural and Engineered Sustainable Technologies*, pp 329–339
- [64] Gör, M. (2019). *Kazıklı Radye Temellerin Statik Düşey Yükler Etkisi Altında Modellenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [65] Malik, B. A. Shah, M. Y., Sawant, V. A. (2021). *Plate load tests to analyze the load-settlement response of shallow foundations on sand beds reinforced with micropiles*, *Environmental Science and Pollution Research* 28:67657–67666
- [66] Malik, B. A. Shah, M. Y., Sawant, V. A. (2021). *Influence of micropile parameters on bearing capacity of footings*, *Environmental Science and Pollution Research* 28:48274–48283
- [67] Sing, J. ve Sing, S. (2022). Upshots of pin piles retrofitting for existing structures, *Materials Today: Proceedings* 48: 1107–1111
- [68] Davidow, S. A. ve Carr. D. G. (2015). *Micropile Design and Construction in a Limited Access Wetland Habitat Geotechnics*. Electrical Transmission and Substation Structures Conference, Branson, Missouri, United States
- [69] Shah, I. A. Ali, K., Farooqi, M. A. (2021). A Numerical Study on the Bearing Capacity of Fly-Ash Reinforced with Fine Micropiles, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7:4
- [70] Sharma, b. Sarkar, S., Hussain, Z. (2019). A Study of Parameters Influencing Efficiency of Micropile Groups, *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, Springer Nature Singapore.
- [71] Azzam, W. R. ve Basha, A.M. (2018). *Utilization of micro-piles for improving the sub-grade under the existing strip foundation: experimental and numerical study*, *Innovative Infrastructure Solutions*, 3:44
- [72] Borthakur, N. ve Dey. A. K. (2017). Experimental Investigation on Load Carrying Capacity of Micropiles in Soft Clay, *Arabian Journal for Science and Engineering*, volume 43, pages1969–1981
- [73] Wang, C. Han, J. T., Jang, Y. E. (2019). Experimental Investigation of Micropile Stiffness Affecting the Underpinning of an Existing Foundation, *Applied Science* 9(12), 2495
- [74] Alnuaim, A. M. Naggar, M. H., Naggar, H. E. (2016). Numerical investigation of the performance of micropiled rafts in sand, *Computers and Geotechnics*, 77, 91–105
- [75] Alnuaim, A. M. Naggar, M. H., Naggar, H. E. (2018). Performance of micropiled rafts in clay: Numerical investigation, *Computers and Geotechnics*, 99, 42–54

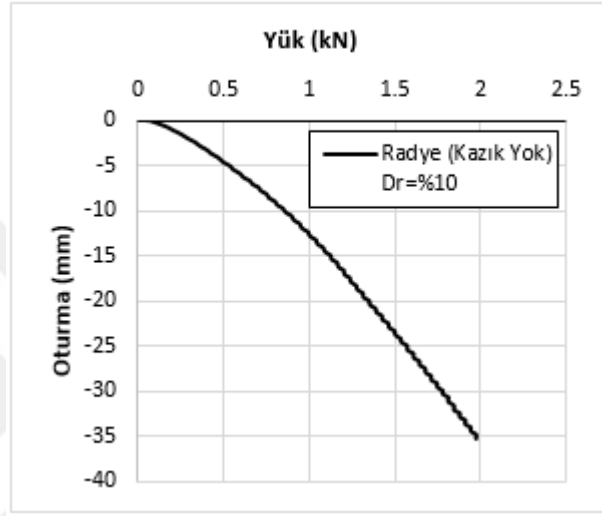
- [76] Kamash, W. E., Naggar, H. E., Sivakugan, N. (2021). The effect of long-term consolidation on foundations underpinned by micropiles in soft clay, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 13, Issue 1
- [77] Terzi, N. U., Kılıç, H., Gültekin, S. (2009). *Yanal Yüklü Bir Model Kazığın Kum Ortamındaki Davranışının Deneysel ve Nümerik Yöntemlerle İncelenmesi*, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:15, Sayı:1, Sayfa: 119127
- [78] Sawwaf, M. E. (2010). Experimental Study of Eccentrically Loaded Raft with Connected and Unconnected Short Piles, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 136:1394-1402
- [79] Bağrıaçık, B. ve Laman, M. (2011). *Investigation of the Size Effect at Different Geometries on Stress Distribution of Sandy Soils*, International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, Paper No 14, 1921 May, EPOKA University, Tirana, ALBANIA
- [80] Kahyaoğlu, M. R., Seçer, M., Kayalar, A.Ş. (2012). *Cam Elyaf Takviyeli Plastik Profilli Pasif Kazık Grup Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi*, İMO Teknik Dergi, 5931-5950. Yazı 377
- [81] ASTM D854-14, (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- [82] ASTM D422-63(2007)e2, (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [83] ASTM C127-15, (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- [84] Sadrekerimi, J. ve Asem, A. (2010). *The Effect of Pile Spacing on Bearing Capacity of Pile Groups*, From Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic, June 2 – 4.
- [85] Yetimoğlu, T. (1998). *Vibrasyonla Sıkıştırılmış Kum Zeminde Oturan Temellerin Taşıma Kapasitesi*, İMO Teknik Dergi, 1587-1600, Yazı: 115
- [86] Gandhi, S. R. ve Selvam, S. (1997). Group Effect on Driven Piles under Lateral Load, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*
- [87] Edan, O.M. (2019). *Bearing capacity of vertically loaded FRP and PVC single pile*, MSc. thesis, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Vol.
- [88] Yılmaz, B. (2010). *An Analytical and Experimental Study on Piled Raft Foundations*, M.Sc. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara
- [89] Uncuoğlu, E. (2009). *Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıkların Yatay ve Moment Etkisi Altındaki Davranışlarının Analizi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- [90] Gök, S. (2007). *Kazıklı Radye Temellerin Tasarımı*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [91] Aksoy, H. S., Gör, M., İnal, E. (2016). A new design chart for estimating friction angle between soil and pile materials, *Geomechanics and Engineering*, 10(3), 315-324
- [92] PLAXIS, (2007). 3D soil elements (15-node), 3D Foundation Tutorial Manual, Delft University of Technology&PLAXIS b.v., The Netherlands
- [93] Potts, D.M. ve Fourie, A.B. (1984). The behavior of a propped retaining wall: results of a numerical experiment. *Geotechnique* 34(3):383–404
- [94] Potts, D.M. ve Fourie, A.B. (1985). The effect of wall stiffness on the behavior of a propped retaining wall, *Geotechnique* ,35(3):347–52

- [95] Grande, L., Soreide, O.K., Tefera, T.H. (2002). *Large scale model testing on the moment distribution and deformation behaviour of a sheet pile wall*, In: 2nd International conference on soil structure interaction in urban civil engineering, Zurich, Switzerland, p. 389–94
- [96] Day, R.A. ve Potts, D.M. (1993). Modelling sheet pile retaining walls, *Comput Geotech*, 15(3):125–43
- [97] Bilgin, Ö. ve Erten, M.B. (2009). *Analysis of anchored sheet pile wall deformations*, In: Contemporary topics in ground modification, problem soils, and geo-support (GSP 187), International foundation congress and equipment expo, Florida; p.137–44
- [98] Tan, Y. ve Paikowsky, S.G. (2008). Performance of sheet pile wall in peat, *ASCE J Geotech Geoenviron Eng*, 134(4):445–58
- [99] Tan, Y. ve Lu, Y. (2009). Parametric studies of DDC-induced deflections of sheet pile walls in soft soils, *Comput Geotech*, 36(5):902–10
- [100] Brinkgreve, R.B.J. et al., editors. (2006). PLAXIS 2D – version 8 users manual, Rotterdam, A.A. Balkema
- [101] Yang, Z. ve Jeremić, B. (2005). Study of soil layering effects on lateral loading behavior of piles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(6), 762-770
- [102] Fan C.C. ve Luo, J.H. (2008). Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes, *Comput Geotech*, 35(4):585–99
- [103] Karthigeyan, S., Ramakrishna, V. V. G. S. T., Rajagopal, K. (2006). Influence of vertical load on the lateral response of piles in sand, *Computers and Geotechnics*, 33(2), 121-131
- [104] Johnson, K., Lemcke, P., Karunasena, W., Sivakugan, N. (2006). Modelling the load–deformation response of deep foundations under oblique loading, *Environmental Modelling & Software*, 21(9), 1375-1380

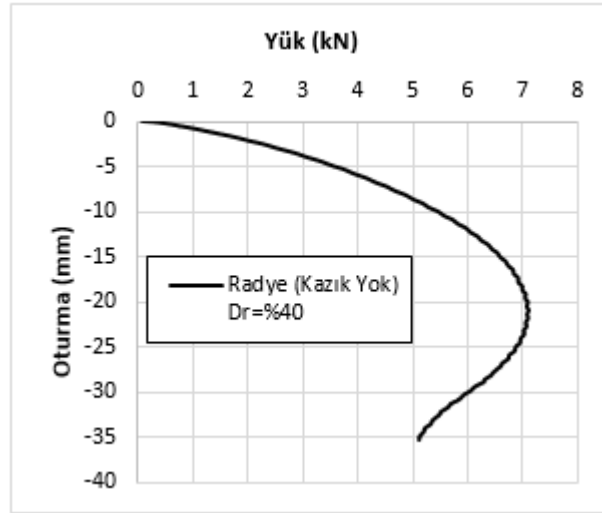
EKLER

EK- 1: FARKLI KAZIK KOMBİNASYONLARININ YÜK-OTURMA EĞRİLERİ

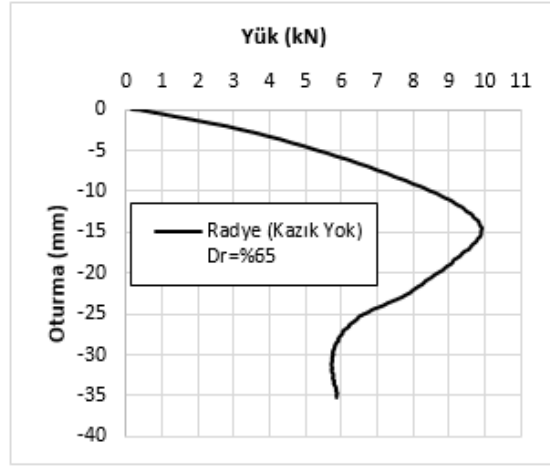
D_r =%10, %40, %65 sıklığında hazırlanan kum zemine 3x3, 4x4, 6x6 olacak şekilde radye temelin farklı kenarlarına yerleştirilen mikro kazık kombinasyonlarından elde edilen yük-oturma eğrileri Ek Şekil 1 ve Ek Şekil 12 arasında verilmiştir.



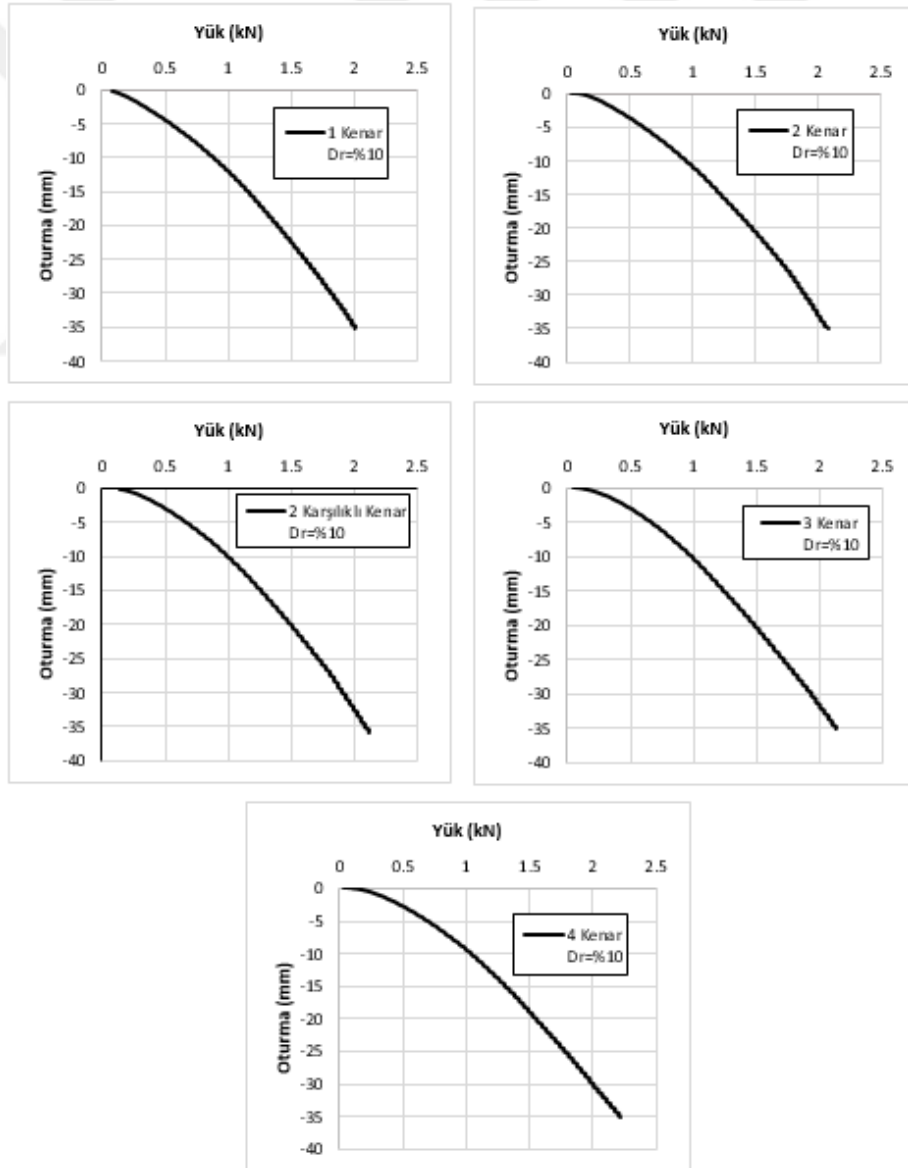
Şekil E1.1. Radye (kazık yok) ve D_r =%10 için yük-oturma eğrisi



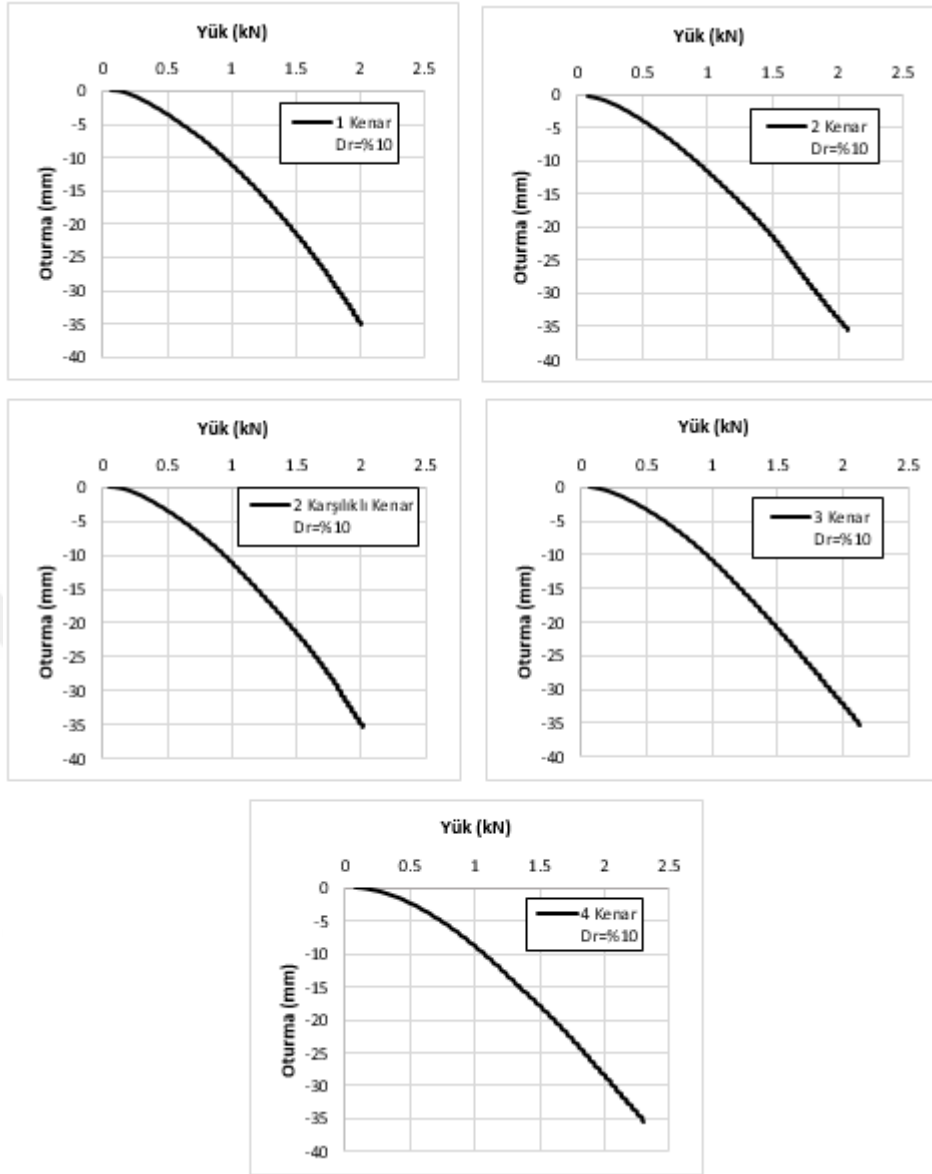
Şekil E1.1. Radye (kazık yok) ve D_r =%40 için yük-oturma eğrisi



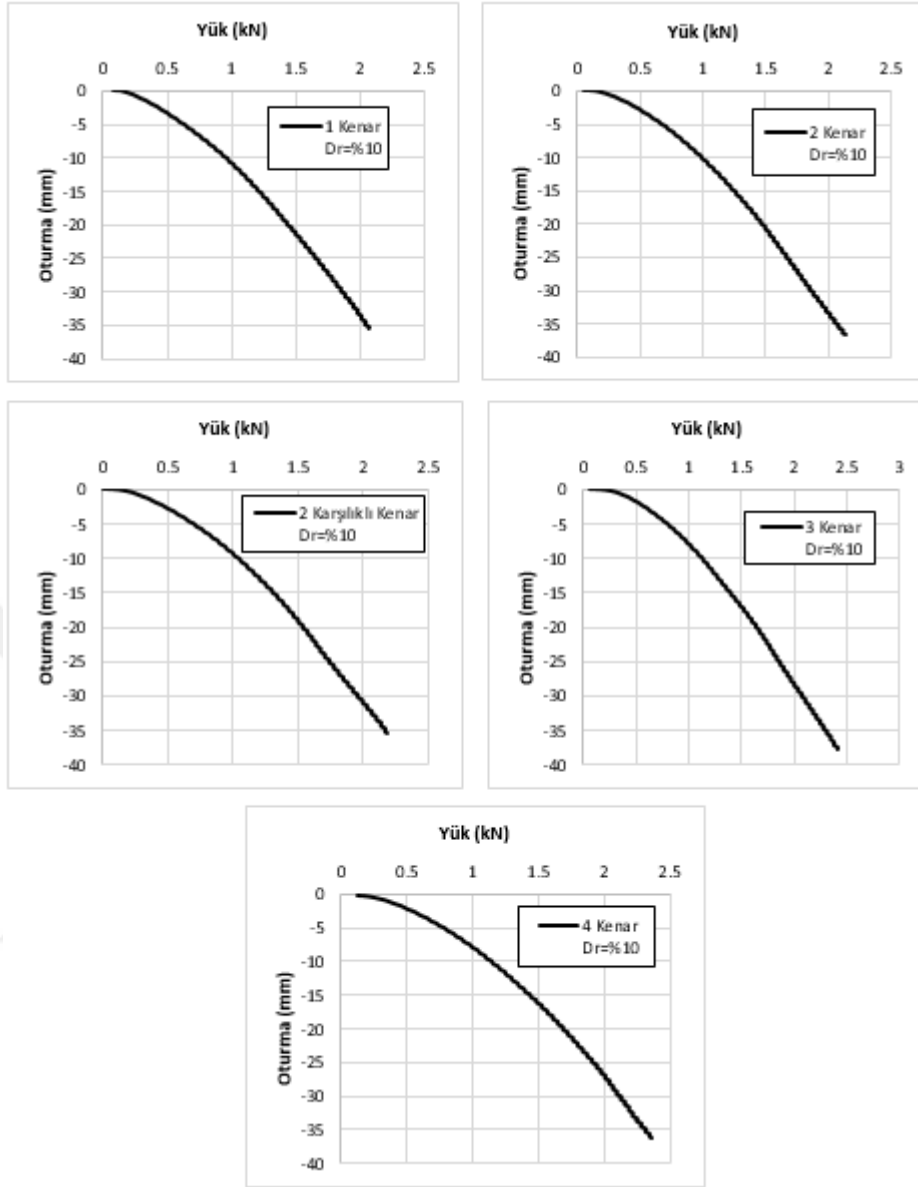
Şekil E1.3. Radye (kazık yok) ve $Dr=65$ için yük-oturma eğrisi



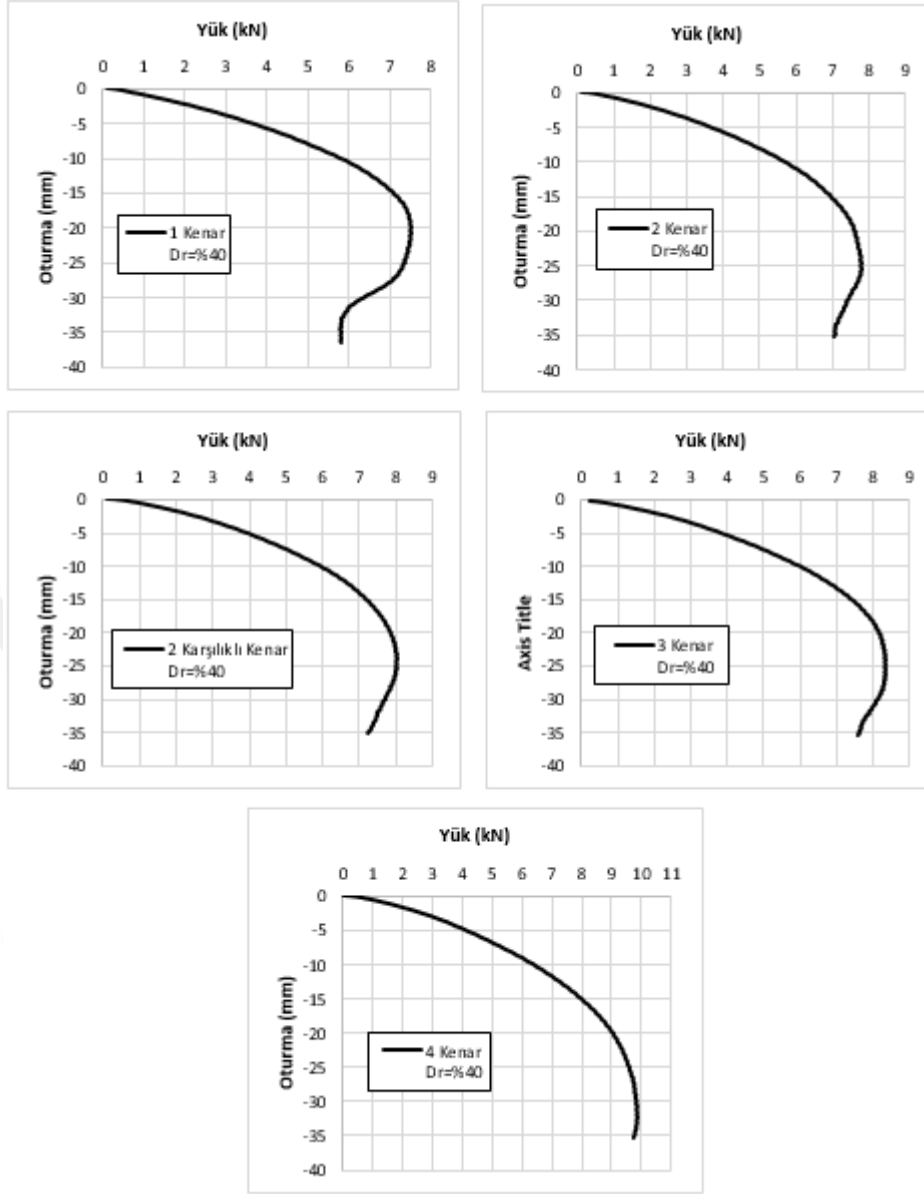
Şekil E1.4. 3x3 kazık kombinasyonları ve $Dr=10$ için yük-oturma eğrileri



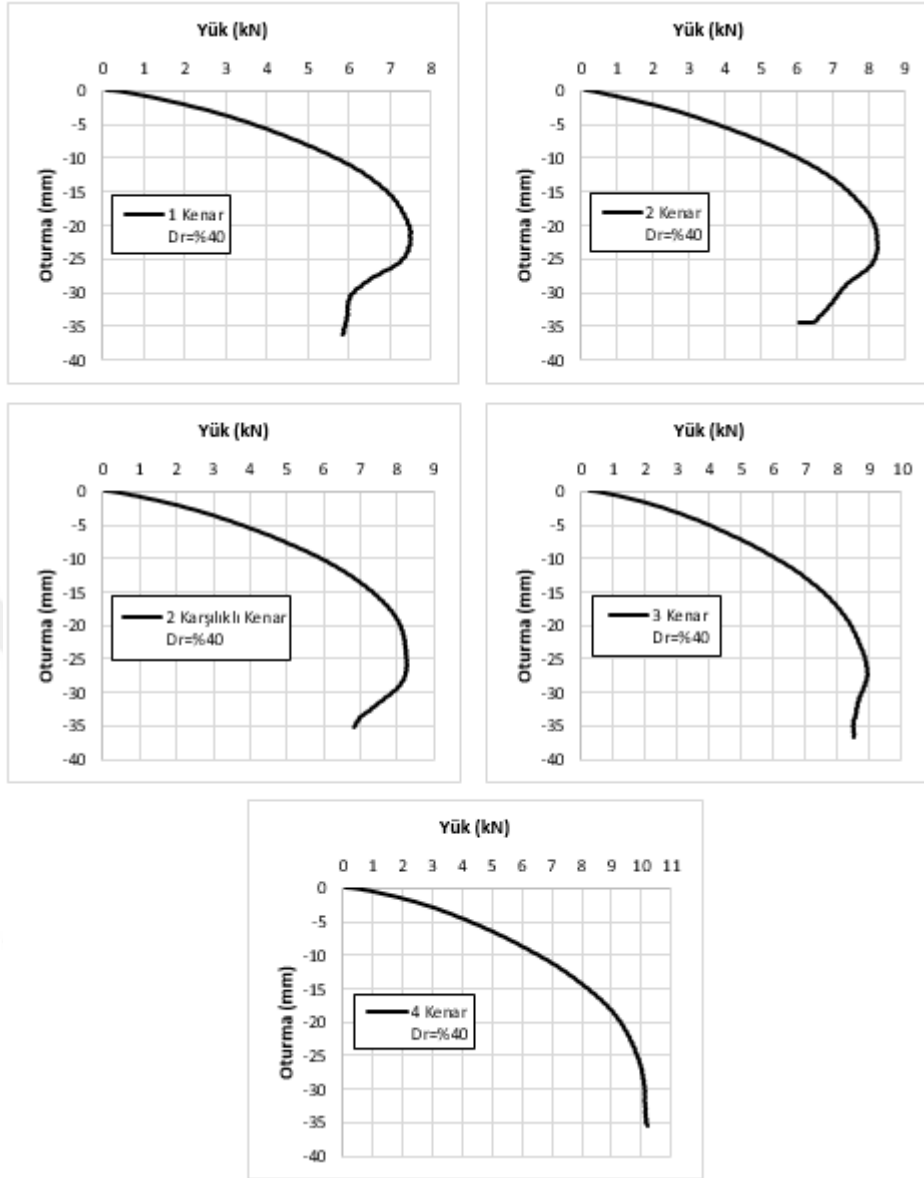
Şekil E1.5. 4x4 kazık kombinasyonları ve $D_r=10\%$ için yük-oturma eğrileri



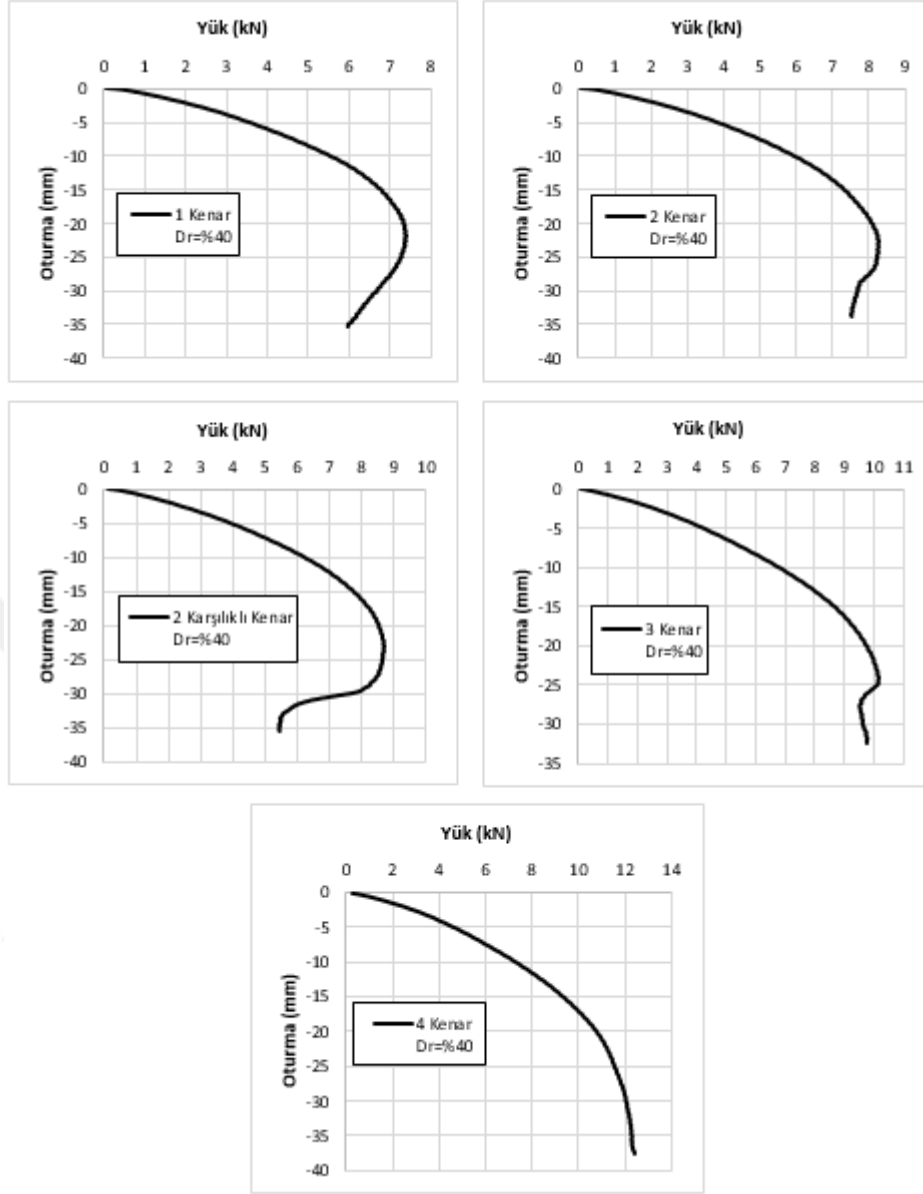
Şekil E1.6. 6x6 kazık kombinasyonları ve $D_r = \%10$ için yük-oturma eğrileri



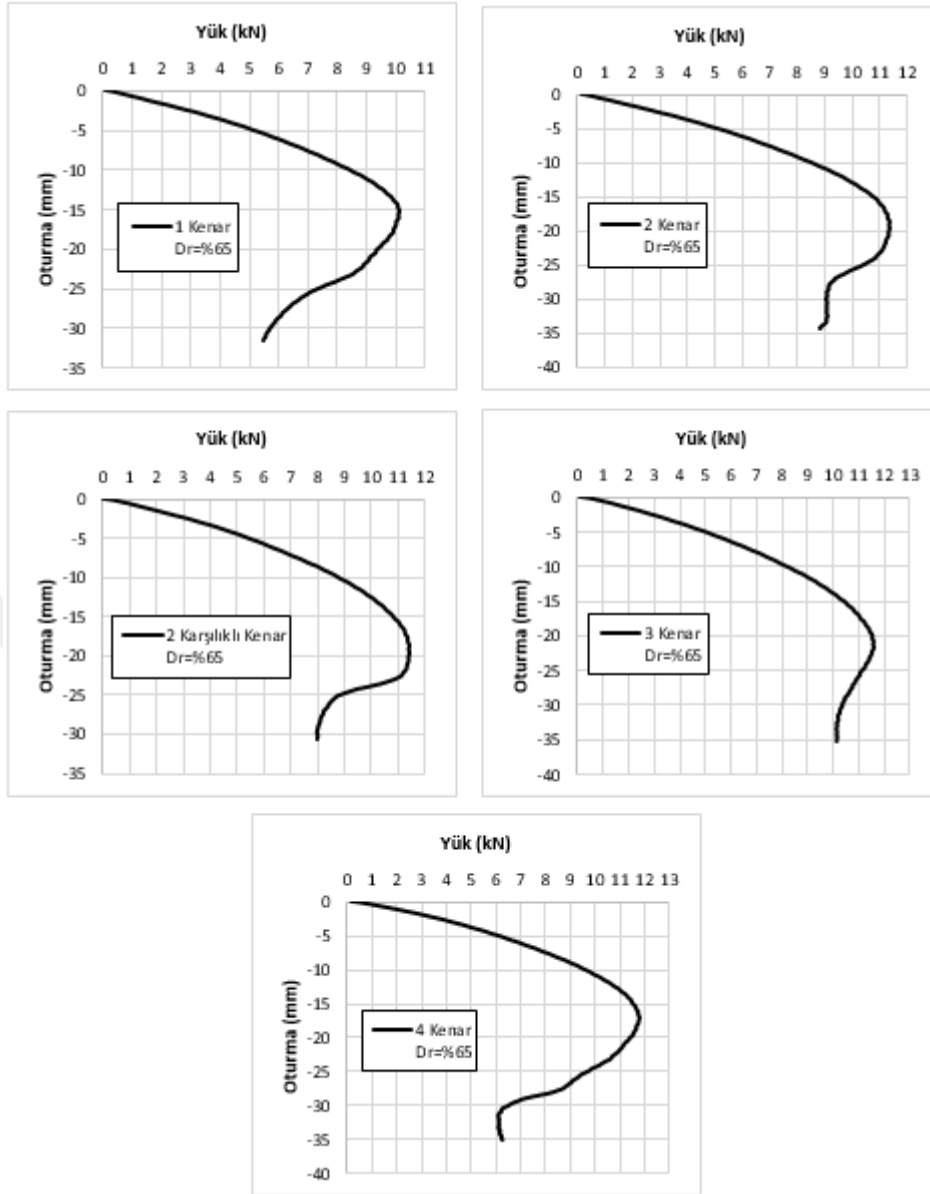
Şekil E1.7. 3x3 kazık kombinasyonları ve $D_r=40$ için yük-oturma eğrileri



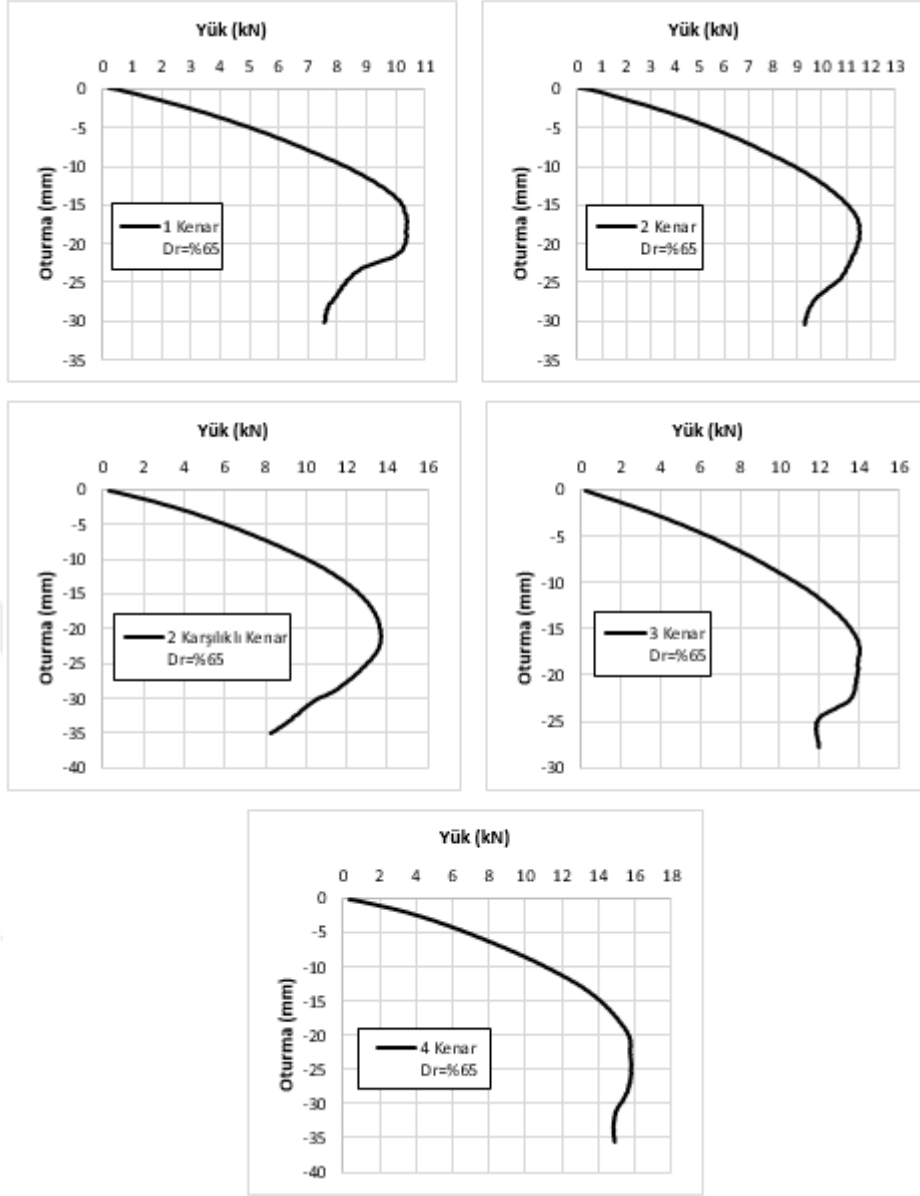
Şekil E1.8. 4x4 kazık kombinasyonları ve $D_r=40$ için yük-oturma eğrileri



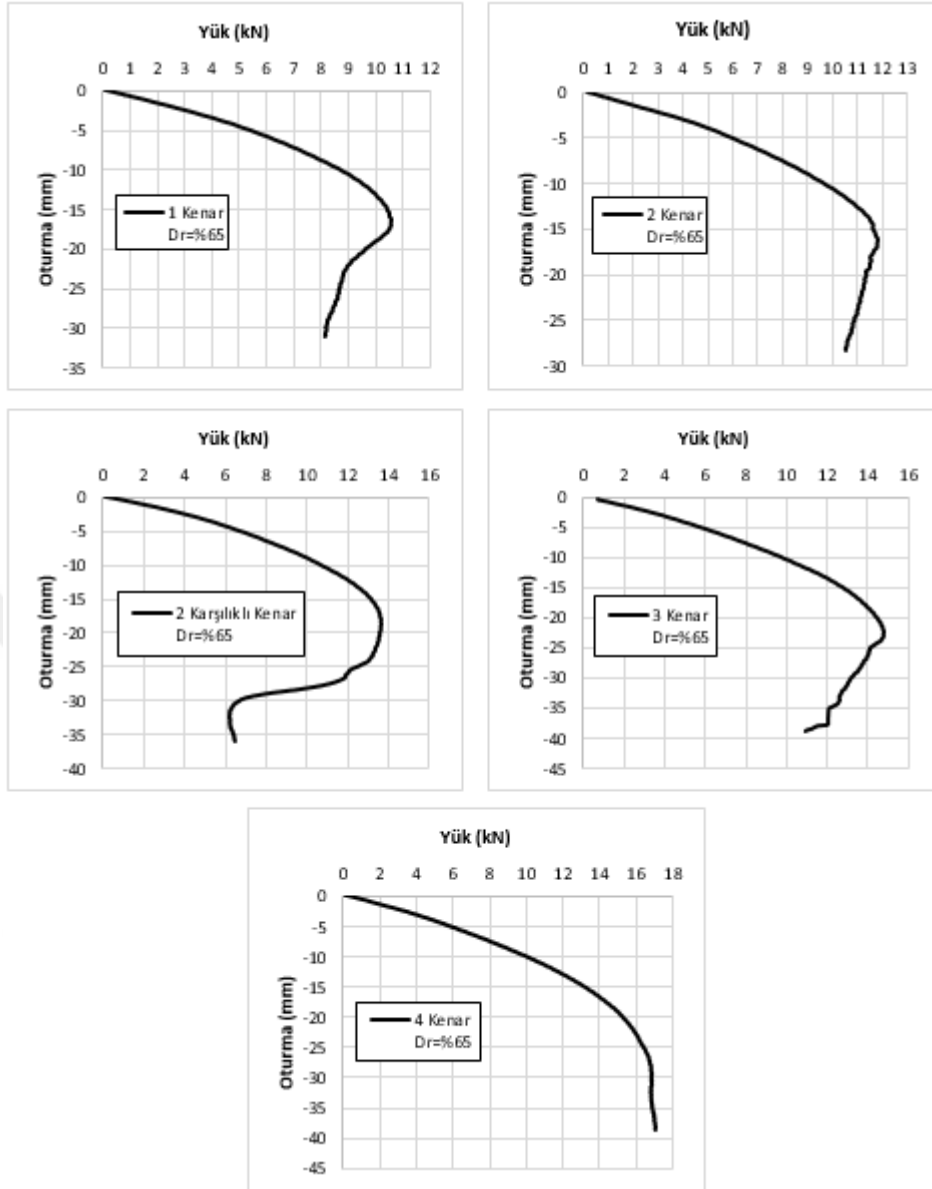
Şekil E1.9. 6x6 kazık kombinasyonları ve $D_r=40$ için yük-oturma eğrileri



Şekil E1.10. 3x3 kazık kombinasyonları ve $D_r=65$ için yük-oturma eğrileri



Şekil E1.11. 4x4 kazık kombinasyonları ve $D_r=65$ için yük-oturma eğrileri



Şekil E1.12. 6x6 kazık kombinasyonları ve $D_r=65$ için yük-oturma eğrileri

ÖZGEÇMİŞ

Rahim Khan NASERY

[REDACTED]

[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

[REDACTED]

- [REDACTED]
- [REDACTED]