

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİLLİ ORTAMDA ÜSTYAPI ETKİLEŞİMLİ SAYISAL MODELDE
KAZIKLI YAYILI TEMELLERİN OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Damla KILIÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

MAYIS 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİLLİ ORTAMDA ÜSTYAPI ETKİLEŞİMLİ SAYISAL MODELDE
KAZIKLI YAYILI TEMELLERİN OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Damla KILIÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedat SERT

MAYIS 2025

Damla KILIÇ tarafından hazırlanan “Killi Ortamda Üstyapı Etkileşimli Sayısal Modelde Kazıklı Yayılı Temellerin Optimizasyonu” adlı tez çalışması 16.05.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Geoteknik** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Sedat SERT (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. İsa VURAL Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Killi Ortamda Üstyapı Etkileşimli Sayısal Modelde Kazıklı Yayılı Temellerin Optimizasyonu” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(16/05/2025)

Damla KILIÇ





Aileme ve biricik dostlarıma...



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını tamamlarken, bana her aşamada rehberlik eden ve destek veren herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, tez danışmanım Prof. Dr. Sedat SERT'e, sürecin başından sonuna kadar gösterdiği sabır, rehberlik ve bana kattığı derin akademik birikim için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, sadece bu çalışma boyunca değil, akademik kariyerim boyunca bana değerli yönlendirmelerde bulunmuş, düşüncelerimi şekillendirmeme yardımcı olmuştur. Her aşamada gösterdiği destek ve yol göstericiliği, bu çalışmanın tamamlanmasına büyük katkı sağlamıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana çok kıymetli bilgiler aktaran, farklı bakış açıları sunan ve akademik perspektifimi geliştirmemde yardımcı olan Prof. Dr. Ertan BOL ve Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a da en içten teşekkürlerimi iletmek isterim.

Bu süreçte, bana her zaman destek olan ve akademik gelişimime katkı sağlayan Arş. Gör. Eylem ARSLAN'a teşekkür ederim. Onunla yaptığımız verimli çalışmalar ve paylaştığımız fikirler, tezimin şekillenmesinde önemli bir yer tutmuştur. Aynı zamanda, bu süreç boyunca arkadaşça desteği ve pozitif yaklaşımı bana moral kaynağı olmuştur.

Ailem, bu uzun yolculukta her zaman benim en büyük destek kaynağım olmuştur. Annem Semahat KILIÇ'a, babam Alpaslan KILIÇ'a ve ağabeyim Baki Alper KILIÇ'a bana verdikleri sonsuz güven, sevgi ve anlayış için ne kadar teşekkür etsem azdır. Onların bu süreçte gösterdikleri sabır ve destek, her zaman kalbimde özel bir yere sahiptir. Akademik hayatımda karşılaştığım zorluklarla başa çıkabilmemde, onların varlığı bana daima güç vermiştir.

Bu süreçte yanımda olan, hiç bir zaman desteğini esirgemeyen ve her zaman moral kaynağım olan dostlarım Ezgi KAYADİBİNLİ ve Rümeysa ÇAKAL'a da teşekkür etmek istiyorum. Hem zorlu anlarda hem de mutlu anlarımda yanımda olarak, bu yolculuğu çok daha anlamlı hale getirdiler. Onların dostluğu ve desteği, bu tezin tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır.

Son olarak, bu yolda desteğini esirgemeyip en karanlık anlarımda bana ışık olarak yolumu aydınlatan Ozan Kağan ALTUNBAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Damla KILIÇ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KAZIKLI YAYILI TEMELLER	5
2.1. Genel Bilgiler	5
2.2. Kazıklı Yayılı Temellerin Analiz Yöntemleri	7
2.2.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri	7
2.2.1.1. Poulos ve Davis Yöntemi	7
2.2.1.2. Randolph Yöntemi	8
2.2.1.3. PDR Yöntemi	11
2.2.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri	13
2.2.2.1. Yaylar üstündeki şerit yaklaşımı	13
2.2.2.2. Yaylar üstündeki plak yaklaşımı	14
2.2.3. Karmaşık sayısal hesap yöntemleri	14
2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis Yazılımı	15
3. METODOLOJİ	17
3.1. Zemin Özellikleri	20
3.2. Yapı Özellikleri	23
3.3. Sonlu Elemanlar Analizi	27
4. ANALİZ SONUÇLARI	33
4.1. Yükleme Koşullarının Etkisi	33
4.2. Kazık Aralığının Etkisi	37
4.3. Kazık Çapının Etkisi	41
4.4. Kazık Boyunun Etkisi	45
4.5. Optimizasyon Çalışmaları	50
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61



KISALTMALAR

FEM : Sonlu Elemanlar Yöntemi

GASP : Kazıklı Şerit Yayılı Temellerin Geoteknik Analizi





SİMGELER

α_{rp}, α_{pr}	: Kazık etkileşim faktörleri
P_p	: Kazıklar tarafından taşınan yük [kN]
P_r	: Yayılı temel tarafından taşınan yük [kN]
k_r	: Yayılı temel rijitliği
k_p	: Kazıkların rijitliği
k_{pr}	: Kazıklı yayılı temel sisteminin rijitliği
r_c	: Tekil kazık için dairesel kazık başlığının çapı [m]
r_0	: Kazığın yarıçapı [m]
V	: Uygulanan düşey yük [kN]
V_A	: Kazık kapasitesinin uyandığı andaki düşey yük [kN]
V_{pu}	: Kazık kapasitesi [kN]
β_p	: Kazıklar tarafından taşınan yük oranı
K_{pi}	: Kazık grubunun başlangıç teğet rijitliği
R_{fp}	: Kazık grubu için hiperbolik çarpan
K_{ri}	: Yayılı temelin başlangıç teğet rijitliği
R_{fr}	: Yayılı temel için hiperbolik çarpan
V_r	: Yayılı temel tarafından taşınan yük [kN]
V_{ru}	: Yayılı temelin kapasitesi [kN]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Kullanılan zemin parametreleri.....	21
Tablo 3.2. Yapıya ait geometri ve yük bilgileri.....	24
Tablo 3.3. Yapıya ait malzeme parametreleri.	25
Tablo 3.4. Kazığa ait parametreler.	26
Tablo 3.5. Sonlu eleman ağı yapılan analizler ve sonuçları.	29
Tablo 3.6. Çalışma kapsamında yapılan analizlerin özeti.	32
Tablo 4.1. Farklı yükleme koşullarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.	37
Tablo 4.2. Farklı yükleme koşullarında yayılı temelde oluşan moment değerleri. ...	37
Tablo 4.3. Farklı kazık aralıklarında yayılı temelde oluşan deplasman değerleri (Kazık çapı 1.0 m, kazık uzunluğu 18.0 m).	41
Tablo 4.4. Farklı kazık aralıklarında yayılı temelde oluşan moment değerleri.....	41
Tablo 4.5. Farklı kazık çaplarında yayılı temelde oluşan deplasman değerleri.	42
Tablo 4.6. Farklı kazık çaplarında yayılı temelde oluşan moment değerleri.	43
Tablo 4.7. Farklı kazık boylarında yayılı temelde oluşan moment değerleri.....	45
Tablo 4.8. Farklı kazık boylarında yayılı temelde oluşan deplasman değerleri.....	46
Tablo 4.9. Farklı kazık yerleşimlerinde yayılı temelde oluşan deplasmanlar.	51
Tablo 4.10. Farklı kazık yerleşimlerinde yayılı temelde oluşan moment değerleri. .	51



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Killi zeminlerde oturma azaltıcı kazıkların kullanılması (Hansbo, 1994)...	6
Şekil 2.2. Basitleştirilmiş yük-oturma ilişkisi (Poulos, 2001).	8
Şekil 2.3. Yayılı temel etkileşimleri.	8
Şekil 2.4. Kazıklı yayılı temel detayları.....	10
Şekil 2.5. Çeşitli etkileşim fakörü değerleri (Clancy ve Randolph, 1993).	10
Şekil 2.6. Yayılar üstündeki şerit yaklaşımı.	14
Şekil 3.1. Frankfurt şehri altındaki zemin tabakalarının yapısı ve özellikleri.	19
Şekil 3.2. Plaxis zemin modeli.....	23
Şekil 3.3. Yapının plan görünüşü ve taşıyıcı sistemin genel yerleşim düzeni.....	24
Şekil 3.4. Yapıya ait Plaxis 3D model görünüşleri.....	26
Şekil 3.5. Sonlu eleman ağı.....	28
Şekil 3.6. Sonlu eleman ağı analiz sonuçları.	29
Şekil 3.7. Temel üzerinde seçilen noktalar.	30
Şekil 3.8. Plaxis 3D analiz fazları.....	31
Şekil 4.1. Yükleme koşullarının etkisi için hazırlanan analiz modelleri.	34
Şekil 4.2. Farklı yükleme koşullarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.....	35
Şekil 4.3. Farklı yükleme koşullarında temelde oluşan deplasmanlar.....	36
Şekil 4.4. Kazık aralıklarını gösteren kazık genel yerleşim plan görüntüsü.....	38
Şekil 4.5. Farklı kazık aralıklarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.	39
Şekil 4.6. Kazık aralıklarındaki değişimin yayılı temel oturmalarına etkisi.....	40
Şekil 4.7. Kazık çapındaki değişimin yayılı temel oturmalarına etkisi.	43
Şekil 4.8. Farklı kazık çaplarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.....	44
Şekil 4.9. Farklı kazık boylarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.	47
Şekil 4.10. Kazık boyundaki değişimin yayılı temel oturmalarına etkisi.....	49
Şekil 4.11. Farklı kazık yerleşimlerini gösteren kazık genel yerleşim planı.	51
Şekil 4.12. Farklı kazık yerleşimlerinde yayılı temelde oluşan deplasmanlar.....	52
Şekil 4.13. Farklı kazık yerleşimlerinde temelde oluşan deplasmanlar.....	53



KİLLİ ORTAMDA ÜSTYAPI ETKİLEŞİMLİ SAYISAL MODELDE KAZIKLI YAYILI TEMELLERİN OPTİMİZASYONU

ÖZET

Kazıklı yayılı temel sistemleri, geleneksel kazıklı temel çözümlerinden ayrılarak öncelikle farklı oturumların azaltılmasını ve bu sayede dengeli bir temel sistemi elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu tip temel sistemlerinde yayılı temelin de yükün belli bir oranını taşıdığı dikkate alınır ve ana amaç farklı oturumların azaltılması kaydıyla toplam oturumların azaltılmasıdır. Böylece aynı zamanda taşıma gücü açısından da gerekli güvenlik sağlanmış olmaktadır. Literatürde içinde sert killerin ya da sıkı kumların bulunduğu zemin ortamlarının bu tip temel sistemlerinin kullanılması için en uygun ortamlar olduğu belirtilmektedir.

Kazıklı yayılı temellerin davranışının sayısal olarak incelendiği bu tez çalışmasında davranış etkileyen önemli parametreler olarak kazık aralığı, çapı, boyu ve üstyapı yükleme şekli ele alınmıştır. Üstyapının modele doğrudan dahil edilmesi, temel üzerindeki yüklerin dağılımını ve dolayısıyla temelin deformasyon şekillerini önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu durum, sayısal çözümlerin geliştirilmesi öncesinde geleneksel olarak kullanılan eşit yayılı yük yaklaşımının, gerçek yapı-zemin etkileşimini tam olarak yansıtamayabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, çözümü yapılan temel sisteminde üstyapı etkileşimi dikkate alındığında, temelde deformasyonların genellikle çevresel bölgelerde daha belirgin olduğu görülmüş; kazıklarda ise momentlerin büyüklüğü önemli ölçüde azalmıştır.

Kazıkların yerleşim düzeni, temel performansında kritik bir rol oynamaktadır. Kazık aralığının daraltılması, başlangıçta temel oturumlarının azaltılmasına yardımcı olurken, bu iyileşme belirli bir noktadan sonra ihmal edilebilecek seviyede kalmaktadır. Bu da, aşırı sık kazık düzenlemelerinin maliyet ve işçilik açısından dezavantaj yaratabileceğine işaret etmesi yanında geoteknik olarak da optimum çözümden uzaklaşıldığını göstermektedir. Dolayısıyla, kazık yerleşiminde, performans ile ekonomik verimlilik arasında bir denge gözetilmelidir.

Kazık çapının artırılması başlangıçta temel deformasyonlarında olumlu etkiler yaratmasına rağmen, çap büyüklüğündeki artışın devamı, temel davranışında anlamlı değişiklikler yaratmamıştır. Bu gözlem, mühendislik tasarımında gereksiz büyük çaplı kazıkların kullanılmasının önüne geçmek ve maliyetleri optimize etmek adına önemli bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

Kazık boyunun uzatılması da temel üzerindeki deformasyonları azaltmada etkili olmuştur ancak, belirli bir uzunluk sınırının ötesinde kazık boyundaki artışlar, azalan verimlilik göstermiştir. Bu durum, uzun kazıkların her zaman ekonomik ve yapısal faydası olan çözümler doğuramayabileceğini göstermektedir. Ayrıca kazık boyunun artması, hem temel hem de kazıklarda oluşan momentlerin azalmasını desteklemiştir.

Doğrudan farklı oturumları azaltma amacıyla ortaya konan “kazıklı yayılı temel” konseptinin uygun olduğu örnek bir ortam şartları için yürütülen bu tez çalışmasının optimizasyon sürecinde yapılan analizler, kazıkların temel altına eşit aralıklı

yerleştirilmesinden farklı olarak, daha yoğun deformasyon gözlenen alanlara odaklanılarak yapılan yerleştirmelerin benzer performans sağladığını ortaya koymuştur. Bu sayede, kazık sayısında önemli bir azalma sağlanırken, temel üzerindeki deformasyon ve moment değerlerinde anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Bu sonuç, tasarımda sadece ihtiyaç duyulan noktalara kazık konumlandırmanın ekonomik ve yapısal açıdan daha verimli olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, kazıklı yayılı temel tasarımında, kazık parametrelerinin birbirleriyle etkileşim içinde ele alınması gerekirken, üstyapı yükleme koşullarının gerçekçi modellenmesi de tasarım kalitesini artırmaktadır. Parametrelerin optimize edilmesi hem yapısal güvenlik hem de ekonomik bir tasarım açısından kritik öneme sahiptir.



OPTIMIZATION OF PILED RAFT FOUNDATIONS WITH SUPERSTRUCTURE INTERACTION IN A CLAYEY SOIL USING NUMERICAL MODELING

SUMMARY

Piled raft foundation systems represent a departure from conventional piled foundation solutions by primarily aiming to mitigate differential settlements, thereby achieving a more uniform and stable foundation response. In such systems, the contribution of the raft to the overall load-bearing capacity is explicitly considered, with the primary objective being the reduction of total settlements, particularly through the control of differential movements. Consequently, these systems also ensure the required level of safety in terms of bearing capacity. The literature identifies soil conditions containing stiff clays or dense sands as the most favorable environments for the implementation of such foundation systems.

This thesis presents a numerical investigation into the behavior of piled raft foundations, focusing on key parameters influencing performance, including pile spacing, diameter, length, and the mode of superstructure loading. To address these complexities, the study utilized Plaxis 3D finite element software to develop two detailed numerical models representing different loading scenarios. The first model applied a uniformly distributed load directly on the raft foundation, simulating a simplified load transfer mechanism. The second model explicitly incorporated the superstructure's structural components and their interaction with the foundation, thereby capturing a more realistic behavior of the entire soil-structure system. This comparative modeling approach allowed for a critical assessment of the influence of superstructure interaction on piled raft performance.

Key geometric and mechanical parameters, including pile spacing, pile diameter, and pile length, were systematically varied in the superstructure interaction model to investigate their effects on settlement, bending moments, and overall foundation performance. The pile diameter was examined across a wide range of values, while pile lengths spanned from relatively short to extended depths to simulate engagement with different soil strata. Similarly, pile spacing was varied to understand the trade-offs between settlement mitigation and economic feasibility.

The numerical results demonstrated that the superstructure interaction model yielded significantly different displacement patterns compared to the uniform load model. While the uniformly loaded model exhibited maximum settlement concentrated at the center of the raft, the superstructure-interactive model showed pronounced settlements around the foundation. This shift in settlement distribution underscores the importance of considering structural effects in design analyses, as ignoring these interactions may underestimate critical displacement zones and stress concentrations.

Furthermore, bending moments in the piles were notably reduced in the superstructure interaction model, approximately half of those observed in the uniform loading scenario. This suggests that the structural frame effectively redistributes loads, thereby

relieving pile stresses. Such findings highlight that conventional approaches applying uniform loads directly on the raft can lead to conservative designs with potentially unnecessary pile reinforcement.

Examining pile spacing revealed a nonlinear relationship with foundation settlement. Decreasing pile spacing led to reduced settlements, confirming the beneficial role of closely spaced piles in enhancing foundation stiffness and load transfer. However, the marginal gains diminished with very tight spacing, indicating an optimal spacing beyond which further reduction is economically unjustifiable. These results emphasize that pile layout optimization is crucial to balance performance and cost, avoiding over-conservative designs with excessive pile counts.

In terms of pile diameter, the study found that increasing the diameter reduces settlements due to enhanced cross-sectional stiffness and load-bearing capacity. Nonetheless, beyond a certain diameter threshold, the incremental benefits plateaued, revealing diminishing returns on settlement control. This observation supports the adoption of an economically optimized pile diameter rather than indiscriminate enlargement, which would increase material costs and construction complexity without proportionate performance improvements. Interestingly, bending moments within piles were relatively insensitive to diameter variations, suggesting that diameter influences vertical load transfer more than flexural demands.

The effect of pile length was also significant. Longer piles demonstrated superior performance by penetrating deeper soil layers, engaging firmer strata, and facilitating load dissipation over a greater depth, thereby reducing both settlements and bending moments. However, similar to spacing and diameter, the improvements decreased beyond a certain pile length, reflecting practical limits imposed by construction constraints and diminishing mechanical returns. This finding highlights the necessity for comprehensive pile length optimization during design to avoid excessive depths that do not justify their added cost.

A noteworthy component of this study was the pile placement optimization, comparing uniform pile distributions with localized arrangements focused on zones exhibiting maximum settlement in raft-only models. Localized pile layouts achieved similar displacement control using approximately 40% fewer piles than uniform distributions. This substantial reduction in pile count demonstrates that targeted reinforcement based on displacement contours can deliver cost-effective and structurally efficient designs. The findings encourage the integration of site-specific deformation analyses in pile layout planning, promoting sustainability and economic viability in foundation engineering.

In addition to geometric parameters, the study considered the mechanical behavior of the clayey soil, which exhibits complex stress-strain characteristics including consolidation, creep, and rate-dependent strength properties. The numerical model incorporated appropriate constitutive soil models calibrated against typical clay behavior to ensure realistic simulation of soil-structure interaction phenomena. This inclusion allowed for capturing non-linear soil response under loading and the redistribution of stresses around piles and raft, enhancing the reliability of the results.

Moreover, the study emphasized the critical role of load path and distribution in piled raft foundations. The superstructure interaction model accounted for stiffness compatibility between the frame and foundation, which influences load sharing between raft and piles. The numerical findings confirmed that neglecting these factors could result in either overestimating or underestimating pile loads, leading to

inefficient design. Hence, the integration of superstructure characteristics in foundation analysis is paramount for accurate prediction of settlements and internal forces.

The research methodology also highlighted the importance of mesh refinement and element selection in finite element modeling of piled raft systems. A careful mesh sensitivity analysis was performed to balance computational cost with solution accuracy. The results demonstrated that an adequately refined mesh around pile shafts and raft edges is essential to capture stress concentrations and displacement gradients. This practice ensures the generation of robust and convergent solutions, further strengthening the validity of the numerical study

Furthermore, the study addressed the influence of soil layering and heterogeneity, typical of natural clay deposits, on piled raft behavior. While the main analyses assumed homogenous clay properties, additional sensitivity checks indicated that stratification and variable stiffness within the soil profile can significantly affect load transfer mechanisms. Incorporating such variability into the numerical model can further refine settlement predictions and pile design, suggesting an avenue for future research and practical consideration.

Additionally, the long-term performance of piled raft foundations in clayey soils is affected by time-dependent phenomena such as consolidation settlement and creep deformation. Although the present study primarily focused on immediate load responses, recognizing these effects is essential for realistic serviceability assessments. Advanced constitutive models and time-dependent analyses could be integrated into future works to evaluate the evolution of settlements and internal stresses over the lifespan of the structure.

Overall, the research underscores the importance of incorporating superstructure interaction effects in numerical modeling for piled raft foundations, particularly in clayey soils where soil-structure behavior is complex and nonlinear. The optimized design parameters-including pile spacing, diameter, and length-must be judiciously selected to balance mechanical performance and cost efficiency. The presented methodology and results offer valuable guidance for geotechnical engineers aiming to enhance foundation designs, ensuring both serviceability and economic practicality.

Future research avenues could explore dynamic loading scenarios such as seismic effects and wind loads, which impose additional demands on pile foundations. The inclusion of time-dependent soil behaviors, such as consolidation and creep in clayey soils, would provide a more realistic assessment of long-term foundation performance. Moreover, probabilistic design frameworks could be integrated to quantify uncertainties inherent in soil properties and loading conditions, thereby advancing robust optimization strategies. Finally, experimental validation through field monitoring and model testing would further consolidate the numerical findings and facilitate practical adoption.

This study contributes to the growing body of knowledge on piled raft foundations by demonstrating that detailed numerical modeling and optimization can significantly improve foundation efficiency and reduce construction costs. By embracing superstructure interaction and targeted pile placement, geotechnical designs can evolve beyond conservative empirical approaches toward data-driven, site-specific solutions tailored to the complex soil-structure systems encountered in practice. Such advancements support the development of sustainable infrastructure, optimizing resource use while maintaining safety and performance standards.



1. GİRİŞ

Zemin koşullarının geoteknik açıdan yetersiz olduğu durumlarda yapıların güvenliğini ve iyi performans göstermesini sağlamak, mühendislik açısından önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu bağlamda, temel sistemlerinin seçimi ve doğru bir şekilde tasarlanması, yapı güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle yüksek taşıma kapasitesi gerektiren veya oturma sınırlarının çok düşük olduğu yapılarda, geleneksel yüzeysel temel çözümleri yetersiz kalabilmektedir. Bu tür durumlarda, derin temel sistemleri veya karma sistem çözümleri devreye girmektedir. Son yıllarda, bu karma çözümler arasında öne çıkan sistemlerden biri olan kazıklı yayılı temeller (*piled raft foundations*), hem mühendislik performansı hem de maliyet etkinliği açısından dikkat çekmektedir.

Dünyada kazıklı yayılı temeller, yüksek binalar, köprü ayakları ve büyük endüstriyel tesislerde kritik bir rol oynamaktadır. Bu temeller, öncelikle oturma kontrolü sağlama ve dolayısıyla yük kapasitesini artırma kabiliyetiyle dikkat çekmektedir. Asya’da, Tokyo ve Şanghay gibi metropollerde, yüksek gökdelen projelerinde bu temeller yaygın olarak kullanılırken, Avrupa’da özellikle Londra ve Frankfurt gibi şehirlerdeki finans merkezleri için tercih edilmektedirler. Kuzey Amerika’da ise büyük altyapı projeleri ve sanayi tesislerinde kazıklı yayılı temellerin başarılı uygulamaları görülmektedir. Bu örnekler, farklı zemin koşulları ve proje gereksinimlerine rağmen, kazıklı yayılı temellerin esnek ve güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Kazıklı yayılı temeller, yayılı temel plağının taşıma kapasitesi ile kazıkların derin zemin tabakalarına yük transferi kapasitesini bir arada kullanarak, farklı türde zemin koşullarında güvenli bir taşıma sistemi sunar. Bu tarifleriyle bütün yükün kazıklar tarafından taşındığı klasik kazıklı temel sistemlerinden ayrılırlar. Bu sistemde üstyapıdan aktarılan yük, hem yayılı temel hem de kazıklar tarafından paylaşılır. Böylece hem yüzeysel hem de derin temellerin avantajları bir araya getirilmiş olur. Sistemin başarısı, yük paylaşım mekanizmasının doğru bir şekilde anlaşılmasına ve bu mekanizmaya göre optimize edilmiş bir tasarımın gerçekleştirilmesine bağlıdır.

Bu sistemlerin ekonomik açıdan da avantaj sağladığı bilinmektedir. Geleneksel olarak derin temellerin hesabında yalnızca kazıkların yük taşıdığı kabul edildiğinden kazık sayısının fazla olması gerekmektedir. Kazıklı yayılı temel sistemlerinde daha az sayıda kazık kullanılarak benzer taşıma kapasitelerine ulaşmak mümkündür. Bu da hem işçilik hem de malzeme bakımından önemli tasarruflar sağlar.

Kazıklı yayılı temellerin birincil avantajlarından biri, yüzeysel temellere kıyasla oturma davranışını kontrol edebilmesidir. Özellikle heterojen veya zayıf taşıma gücüne sahip zeminlerde, yapının tamamında meydana gelebilecek oturmalar ile farklı oturmaların kontrol altına alınması, yapı güvenliği açısından büyük önem arz eder. Bunun yanında sıvılaşabilir zeminlerin bulunduğu veya negatif çevre sürtünmesinin doğabileceği çok zayıf ortamlarda kazıklı yayılı temeller yerine klasik kazıklı temellerin kullanılmasının gerekebileceği unutulmamalıdır.

Kazıklı yayılı temel sistemlerinin mühendislikteki artan kullanımı, özellikle zayıf zemin koşullarına sahip bölgelerde kritik yapılar için güvenilir bir çözüm üretmesiyle ilişkilidir. Gelişen analiz teknikleri ve yazılımlar sayesinde, kazıklı yayılı temellerin performansı hem yapısal hem de geoteknik açılardan daha ayrıntılı incelenebilmekte, bu da daha güvenilir ve optimize edilmiş tasarımların gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu sistemlerin analizinde dikkate alınması gereken temel unsurlardan biri de yük transfer mekanizmasıdır. Yükün ne kadarının yayılı temelden, ne kadarının kazıklardan zemine aktarıldığını belirlemek, hem kazık tasarımı hem de temel davranışının modellenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde bu yük paylaşımı için çeşitli teorik yaklaşımlar ve ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Ancak özellikle yapı-zemin etkileşiminin karmaşıklaştığı durumlarda sayısal analizler, daha gerçekçi ve detaylı değerlendirme imkânı sunar.

Kazıklı yayılı temellerin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususlardan biri, zemin ve üstyapı arasındaki etkileşimin doğru şekilde modellenmesidir. Geleneksel analizlerde çoğunlukla yapı yükleri sabit kabul edilip sadece temelin zeminle olan etkileşimi incelenirken, modern mühendislik yaklaşımları bu ayrımı ortadan kaldırarak bütünsel bir sistem analizini esas alır. Bu kapsamda, üstyapının rijitliği, kolon yerleşimi, yük dağılımı ve kat sayısı gibi faktörlerin temel sistemi üzerindeki etkileri doğrudan dikkate alınmalıdır.

Zemin-üst yapı etkileşimi, özellikle yüksek katlı yapılarda veya zayıf zemin koşullarında belirgin hale gelir. Yapının ağırlığı ve yükleme düzeni, temelin deformasyon davranışını etkilerken, temelde meydana gelen oturmalar da yapının taşıyıcı elemanlarında ikincil gerilmeler oluşturabilir. Bu karşılıklı etkileşim, yapı performansını etkileyebileceği gibi kazıkların taşıma kapasitesi üzerinde de doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle kazıklı yayılı temel sistemlerinin optimizasyonunda hem yapının hem de zeminin özelliklerinin birlikte analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, üstyapı modeli doğrudan temel sistemi ile birlikte oluşturularak zemin-yapı etkileşimi kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Böylece, hem kazıkların hem de yayılı temel plağının davranışı, üstyapının oluşturduğu yükleme koşulları altında detaylı olarak incelenebilmiştir. Bu yaklaşım, yapısal güvenlik ve performans açısından daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Kazıklı yayılı temellerin davranışını anlamak ve optimize etmek için analitik yöntemler yetersiz kalabilmektedir. Özellikle zemin-yapı etkileşiminin karmaşık yapısı ve üç boyutlu yük transfer mekanizmaları, daha gelişmiş modellemeyi gerekli kılar. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık zemin-temel-yapı etkileşimlerinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlayan güçlü bir analiz aracıdır.

Bu tez kapsamında, kazıklı yayılı temellerin mühendislik tasarımındaki performansı, taşıma gücü ve oturma kriterleri açısından üç boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Plaxis 3D yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde, zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak hem kazık hem de temel plağı davranışı birlikte incelenmiştir.

Çalışmada kazık çapı, boyu ve yerleşimi gibi parametreler değiştirilerek sistematik optimizasyon analizleri yapılmış, yapısal yüklerin farklı şekillerde modellenmesi ile yükleme senaryolarının temel davranışına etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımla, hem gerçekçi hem de ekonomik tasarımlar elde etmek amacıyla çeşitli modelleme stratejileri test edilmiştir.

Ayrıca, kazıkların temel oturmalarını azaltma işlevi, kazık yerleşim düzeni değiştirilerek incelenmiş, deplasmanın yoğun olduğu bölgelere yerleştirilen kazıkların performansa etkisi değerlendirilmiştir. Üstyapı yüklerinin dikkate alındığı modeller sayesinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma, kazıklı yayılı temellerin tasarımında üstyapı etkileşimli modellerin önemini vurgulamakta ve uygulamalara ışık tutacak öneriler sunmaktadır.

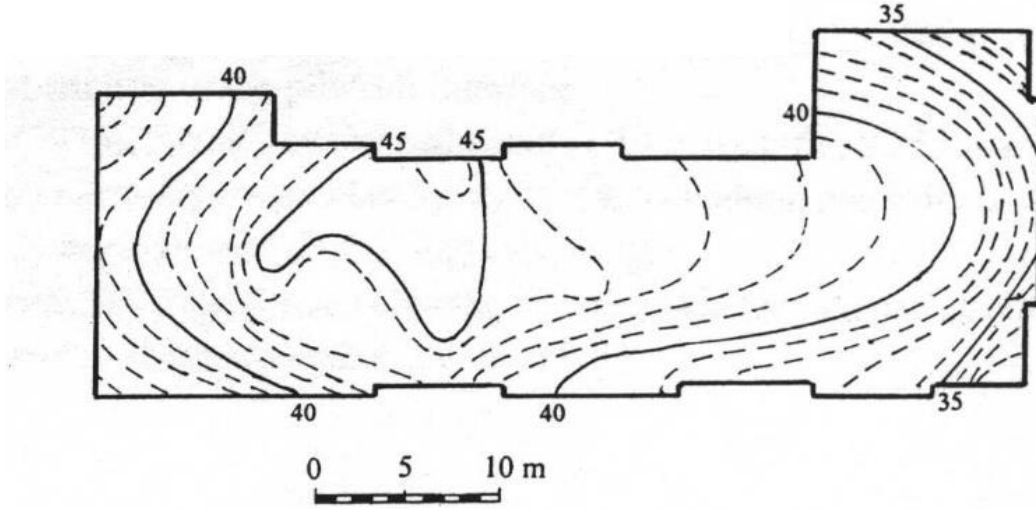


2. KAZIKLI YAYILI TEMELLER

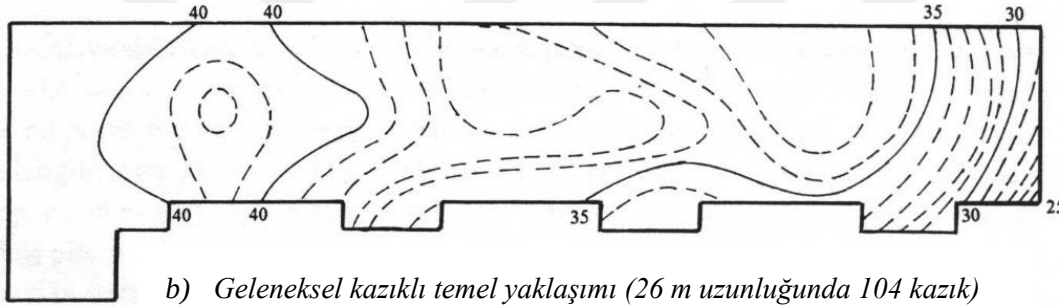
2.1. Genel Bilgiler

Kazıklı yayılı temeller, yük dağılımını ve oturma kontrolünü optimize etmek için kazıkları ve yayılı temeli birleştiren yenilikçi bir temel sistemidir. Öncelikle, servis yükleri altında kazıklara güvenerek oturmayı en aza indirmek için kullanılırken, yayılı temel nihai yüklerde ek yük taşıma kapasitesine katkıda bulunur. Bu sistemlerde yük, geleneksel kazıklı temellerden farklı olarak yayılı temel ve kazıklar arasında paylaşılır. Bu tasarım, yayılı temelin yük taşıdığını dikkate aldığı ve yükün yeniden dağılımını kolaylaştırdığı için gerekli kazık sayısında azalmaya olanak tanır. Bu sistemler, bazı kazıkların kusurlu olabileceği veya karstik oluşumlar gibi değişken zemin koşullarıyla karşılaşabileceği durumlarda özellikle avantajlıdır ve böylece genel temel performansını ve güvenilirliğini artırır (Poulos ve ark., 2011). Klasik yaklaşımda kazıklı yayılı temellerin genellikle göz ardı edilen bir diğer özelliği de yayılı temelin zemin üzerinde basınç uygulayarak zemin ile altındaki kazıklar arasındaki yanıl gerilmeyi arttırmasıdır. Bu etkileşim, kazıkların nihai yük kapasitesinde, yayılı temelin etkisi olmaksızın bağımsız olarak kullanıldıkları duruma kıyasla bir artışa yol açabilir (Katzenbach ve ark., 1998). Kazıklı yayılı temeller sıkı kum ve sert kil zeminlerde uygulanabilmektedir (Das ve Sivakugan, 2018). Poulos (2001) çeşitli basitleştirilmiş zemin profillerini analiz etmiş ve nispeten sert killerin ve sıkı kumların özellikle elverişli koşullar olduğunu belirlemiştir. Bu temeller gevşek kum ve çok yumuşak kil gibi ortamlarda amaçlanan işlevlerini yerine getirememektedir. Bu durumda klasik yaklaşıma geçilebilir veya ilave tedbirler alınabilir (Sert, 2003).

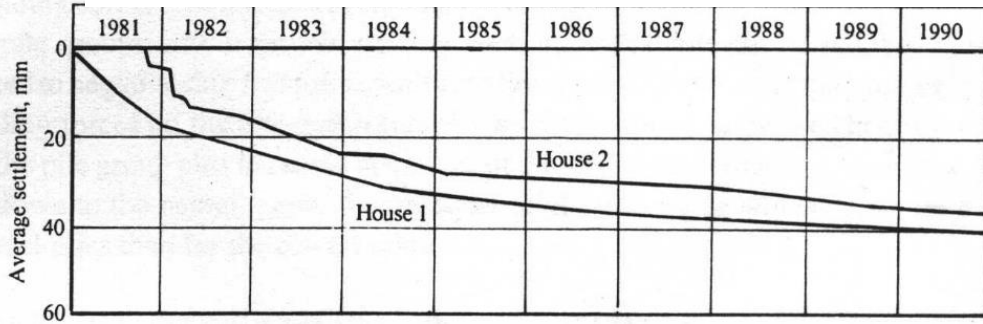
Hansbo'nun (1994) incelediği vaka çalışmasında, geleneksel yöntemle 28 metre uzunluğunda 211 kazık kullanılarak inşa edilen bir yapı ile "creep piling" yöntemiyle 26 metre uzunluğunda 104 kazıkla projelendirilen diğer yapı arasındaki oturma performansları karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, kazık maliyetlerinde dikkate değer bir azalma sağlandığı, ancak Şekil 2.1'de görüldüğü üzere oturma değerleri arasındaki farkın oldukça sınırlı kaldığı belirtilmiştir.



a) Geleneksel kazıklı temel yaklaşımı (28 m uzunluğunda 211 kazık)



b) Geleneksel kazıklı temel yaklaşımı (26 m uzunluğunda 104 kazık)



Şekil 2.1. Killi zeminlerde oturma azaltıcı kazıkların kullanılması (Hansbo, 1994).

Yayılı temelin yeterli taşıma kapasitesine sahip olduğu kazıklı yayılı temel sisteminde, kazıkların birincil amacı yükün çoğunu taşımaktan ziyade ortalama ve farklı yer değiştirmeleri kontrol etmek veya en aza indirmektir, bu da kazıkların optimum tasarımını kritik bir husus haline getirir (Prakoso ve Kulhawy, 2001). Bu nedenle, kazıklı yayılı temeller için modeller geliştirmeye yönelik önemli çabalar sarf edilmiş, sistem geometrisinin ve zemin koşullarının kazıklı yayılı temel performansı üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda parametrik çalışma yapılmıştır. Bu yöntemler arasında,

sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal analizler yapabilen yazılımlar sıklıkla tercih edilmektedir (Ali ve ark., 2023; Malviya ve ark., 2023; Tarenia ve ark., 2024; Singh ve ark., 2024).

2.2. Kazıklı Yayılı Temellerin Analiz Yöntemleri

Kazıklı yayılı temellerin analizinde çeşitli hesap yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar genellikle basitleştirilmiş hesap yöntemleri, yaklaşık sayısal analiz yöntemleri ve karmaşık sayısal hesap yöntemleri olarak üç gruba ayrılmıştır. Aşağıda sırasıyla bu yöntemlerden bahsedilmektedir.

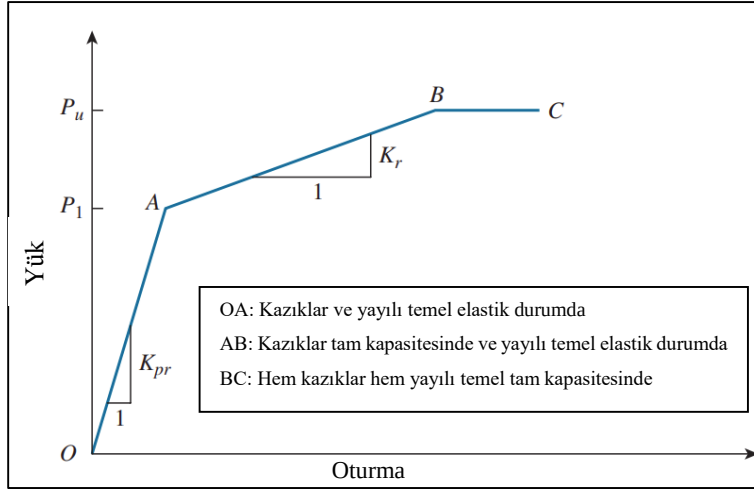
2.2.1. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri

Elastisite teorisine dayanarak geliştirilen basitleştirilmiş yöntemler, kazıklı yayılı temellerin yük-oturma davranışlarını inceleyen ve herhangi bir yazılıma ihtiyaç duyulmadan yalnızca el hesabıyla pratik bir şekilde analiz yapabilen hesap yöntemleridir. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda açıklanmaktadır.

2.2.1.1. Poulos ve Davis Yöntemi

Bu yöntem kazıklı yayılı temel sisteminin yük-oturma davranışını tahmin etmek için Davis ve Poulos (1972) tarafından geliştirilmiştir. Elastik çözümlerin geçerli olduğu yöntemde yüklemenin drenajsız koşullarda olduğu kabul edilmektedir. Bunun yanında yayılı temelin ya tam rijit ya da tam elastik olduğu durumlarda hesaplama yapılabilmekte olup esnek olduğu koşul hesaba katılmamaktadır.

Yönteme göre kazıklı yayılı temelin yük-oturma davranışı Şekil 2.2’de gösterildiği şekilde iki lineer kısımdan oluşmaktadır. Grafik incelendiğinde ilk kısım olan OA bölgesinde, gelen düşey yüklemeler kazıklar ve yayılı temel tarafından birlikte taşımaktadır. A noktası kazıkların nihai taşıma kapasitelerine ulaştığı nokta olup bu bölgeden sonra gelen yüklemeler yalnızca yayılı temel tarafından taşınmaktadır. B noktası ise yayılı temelin nihai kapasitesine ulaştığı noktayı göstermektedir.

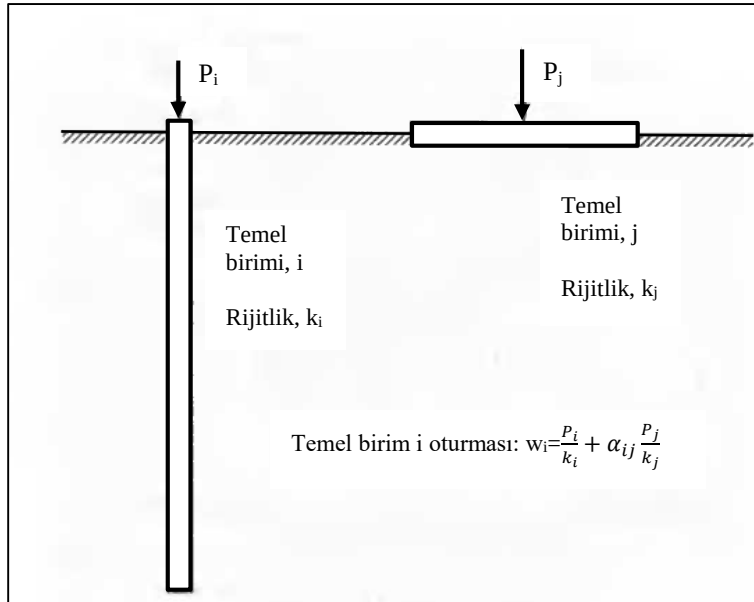


Şekil 2.2. Basitleştirilmiş yük-oturma ilişkisi (Poulos, 2001).

2.2.1.2. Randolph Yöntemi

Randolph (1983) kazıklı yayılı temelin rijitliği ile yük paylaşımı arasında bir ilişki kurarak bu yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemin uygulanabilir olması için kazıklı yayılı temel sisteminin doğrusal davranış göstermesi gerekmektedir. Bu sebeple Şekil 2.2’de de gösterilen, yükün yalnızca kazıklar tarafından taşındığı geleneksel yaklaşım için uygun bir hesap yöntemidir.

Randolph (1994) yayılı temelin ve kazığın oturmasını elemanların rijitliklerine bağlı olarak Şekil 2.3’de göstermiştir.



Şekil 2.3. Yayılı temel etkileşimleri.

Ayrıca uygulanan yükün yayılı temel ve kazıklar arasında paylaşıldığı kabulünü yaparak her bir elemanın oturmasını aşağıdaki şekilde tanımlamıştır.

$$\begin{Bmatrix} w_p \\ w_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_p & \alpha_{pr}/k_r \\ \alpha_{rp}/k_p & 1/k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_p \\ P_r \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada α_{rp} ve α_{pr} etkileşim faktörleri, P_p kazıklar tarafından taşınan yük, P_r yayılı tarafından taşınan yük, k_r yayılı temelin rijitliği, k_p kazıkların rijitliği olarak tanımlanmaktadır.

Randolph yöntemi basitleştirmek için yayılı temeli rijit kabul etmiştir. Bu sayede yayılı temelin ortalama oturması ile kazık grubunun ortalama oturması arasındaki fark gözardı edilerek oturmalarının aynı olduğu düşünülmüştür. Ayrıca Randolph, karşılıklılık teoreminden yararlanarak buradaki etkileşim faktörleri arasında bir oran olduğunu ($\alpha_{rp}/k_p = \alpha_{pr}/k_r$) ortaya koymuştur.

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} \frac{k_r}{k_p} \quad (2.2)$$

Yayılı temel ve kazıkların ortalama oturması aynı olduğundan sistemin rijitliği k_{pr} aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$k_{pr} = \frac{k_p + (1 - 2\alpha_{rp})k_r}{1 - \alpha_{rp}^2(k_r/k_p)} \quad (2.3)$$

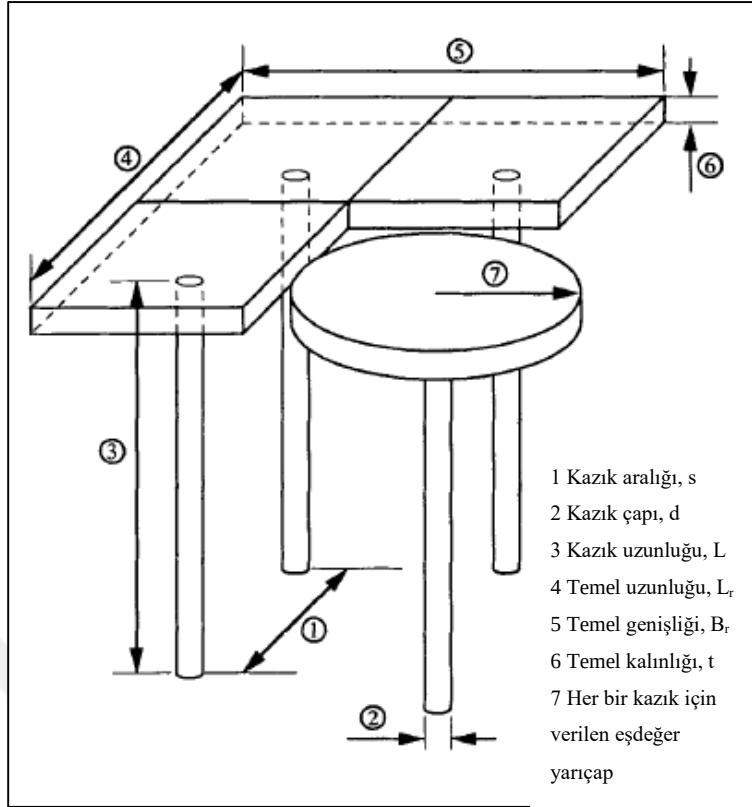
Yayılı temel tarafından taşınan yük oranı ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\frac{P_r}{P_r + P_p} = \frac{(1 - \alpha_{rp})k_r}{k_p + (1 - 2\alpha_{rp})k_r} \quad (2.4)$$

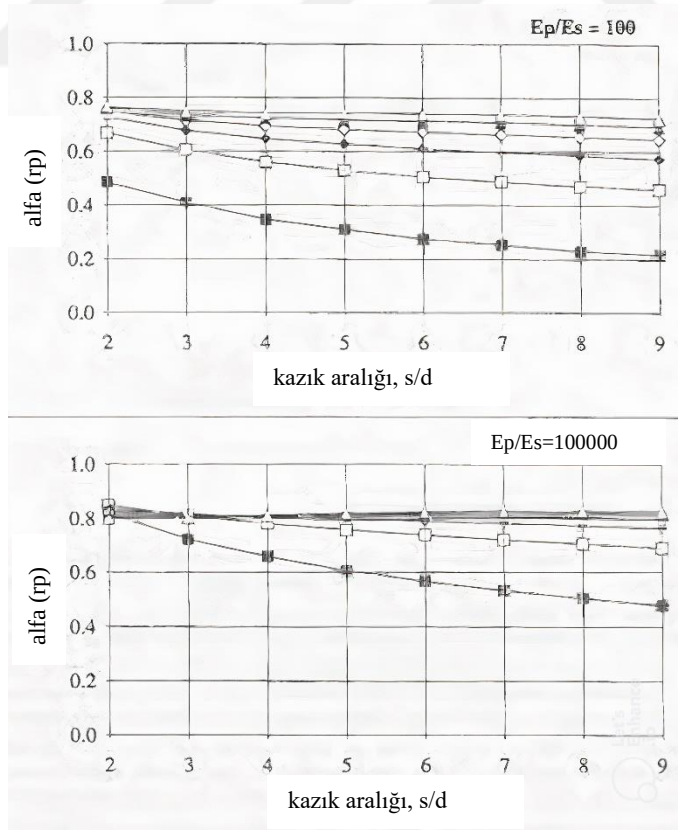
Randolph (1983) etkileşim faktörlerini hesaplamak için Şekil 2.4'te de gösterilen tekil kazıklı yayılı temel sisteminden yola çıkarak aşağıdaki formülü geliştirmiştir.

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(r_c/r_0)}{\zeta} \quad (2.5)$$

Burada r_c ; tekil kazık için dairesel kazık başlığının yarıçapını ve r_0 ; kazığın yarıçapını göstermektedir. Clancy ve Randolph (1993) α_{rp} etkileşim faktörünün grup alanının artmasıyla arttığını ancak bir noktadan sonra 0.8 değerinde sabitlendiğini ortaya koymuşlardır (Şekil 2.5).



Şekil 2.4. Kazıklı yayılı temel detayları.



Şekil 2.5. Çeşitli etkileşim fakörü değerleri (Clancy ve Randolph, 1993).

Buradan hareketle denklem 2.6 ve denklem 2.7'deki α_{rp} değerleri düzenlendiğinde kazıklı yayılı temel sisteminin rijitliği ve yük paylaşım oranı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$k_{pr} = \frac{1 - 0,6(k_r/k_p)}{1 - 0,64(k_r/k_p)} k_p \quad (2.6)$$

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0,2}{1 - 0,8(k_r/k_p)} \frac{k_r}{k_p} \quad (2.7)$$

2.2.1.3. PDR Yöntemi

PDR (Poulos-Davis-Randolph) Yöntemi'ne göre analizde kazıklı yayılı temel yük paylaşımı Randolph (1994)'a göre yapılırken yük-oturma davranışı Poulos-Davis (1972)'ye göre yapılmaktadır. Bu yöntemde temelin son taşıma gücünün bulunması ve temelin yük-oturma davranışının öngörülmesi olmak üzere iki amaç vardır.

Temelin son taşıma gücü aşağıdaki iki değerden düşük olan alınarak seçilir:

Yayılı temelin ve tüm kazıkların son taşıma güçlerinin toplamı,

Kazıkları ve yayılı temeli içine alan blok ile blok dışında kalan yayılı temelin son taşıma güçlerinin toplamı.

Temel sisteminin yük-oturma davranışı Şekil 2.2'de de gösterildiği gibi üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Poulos ve Davis (1972)'ye göre A noktasına kadar olan yüklemelerde kazıklarla yayılı yükü birlikte taşımaktadır ve oturma aşağıdaki formülle bulunmaktadır.

$$S = \frac{V}{K_{pr}} \quad (2.8)$$

Burada V: uygulanan düşey yük; K_{pr} : kazıklı yayılı temel sisteminin eksenel rijitlik olarak tanımlanmaktadır.

Gösterilen V_A düşey yükünde kazıklar kapasitelerine ulaşmaktadır. Sonraki yüklemelerde yükü yalnızca yayılı temel karşılamaktadır. A noktasından sonra oturma değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{V_A}{K_{pr}} + \frac{V - V_A}{K_r} \quad (2.9)$$

Burada V_A : kazık kapasitesinin uyandığı andaki düşey yük; K_r : yayılı temelin düşey rijitliği olarak tanımlanmaktadır. V_A değeri aşağıdaki şekilde tahmin edilebilir.

$$SV_A = \frac{V_{pu}}{\beta_p} \quad (2.10)$$

Burada V_{pu} : kazık kapasitesi (tekil kazık kapasitelerinin toplamı ve blok kapasitesinin az olanı); β_p : kazıklar tarafından taşınan yük oranı olarak tanımlanmaktadır. β_p Bölüm 2.2.1.2’de formülü verilen α değeri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\beta_p = \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2.11)$$

PDR yöntemine göre kazıklı yayılı temelin eksenel rijitliği K_{pr} , Randolph (1994)’a göre hesaplanmaktadır.

Bu yöntemde kazık ve yayılı temelin yük-otuma davranışı hiperbolik kabul edildiğinden kazıkların ve yayılı temelin giriş rijitlikleri olan K_r ve K_p aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$K_p = K_{pi}(1 - R_{fp}V_p/V_{pu}) \quad (2.12)$$

$$K_r = K_{ri}(1 - R_{fr}V_r/V_{ru}) \quad (2.13)$$

Burada K_{pi} : kazık grubunun başlangıç teğir rijitliği; R_{fp} : kazık grubu için hiperbolik çarpan; V_p : kazıklar tarafından taşınan yük; V_{pu} : kazıkların kapasitesi; K_{ri} : yayılı temelin başlangıç teğir rijitliği; R_{fr} : yayılı temel için hiperbolik çarpan; V_r : yayılı temel tarafından taşınan yük; V_{ru} : yayılı temelin kapasitesi olarak tanımlanmaktadır.

Kazıklar ve yayılı temel tarafından taşınan yükler aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$V_p = \beta_p V \leq V_{pu} \quad (2.14)$$

$$V_r = V - V_p \quad (2.15)$$

Burada V , uygulanan toplam yükür.

Yukarıda verilen eşitlikler birleştirilirse kazıklı yayılı temelin yük-oturma ilişkisi aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$V \leq V_A$ için:

$$S = \frac{V}{XK_{pi} \left(1 - \frac{R_{fp}\beta_p V}{V_{pu}} \right)} \quad (2.16)$$

$V > V_A$ için:

$$S = S_A + \frac{V - V_A}{K_{ri} \left[1 - R_{fr} \frac{(V - V_{pu})}{V_{ru}} \right]} \quad (2.17)$$

$$S_A = \frac{V_A}{XK_{pi}(1 - R_{fp})} \quad (2.18)$$

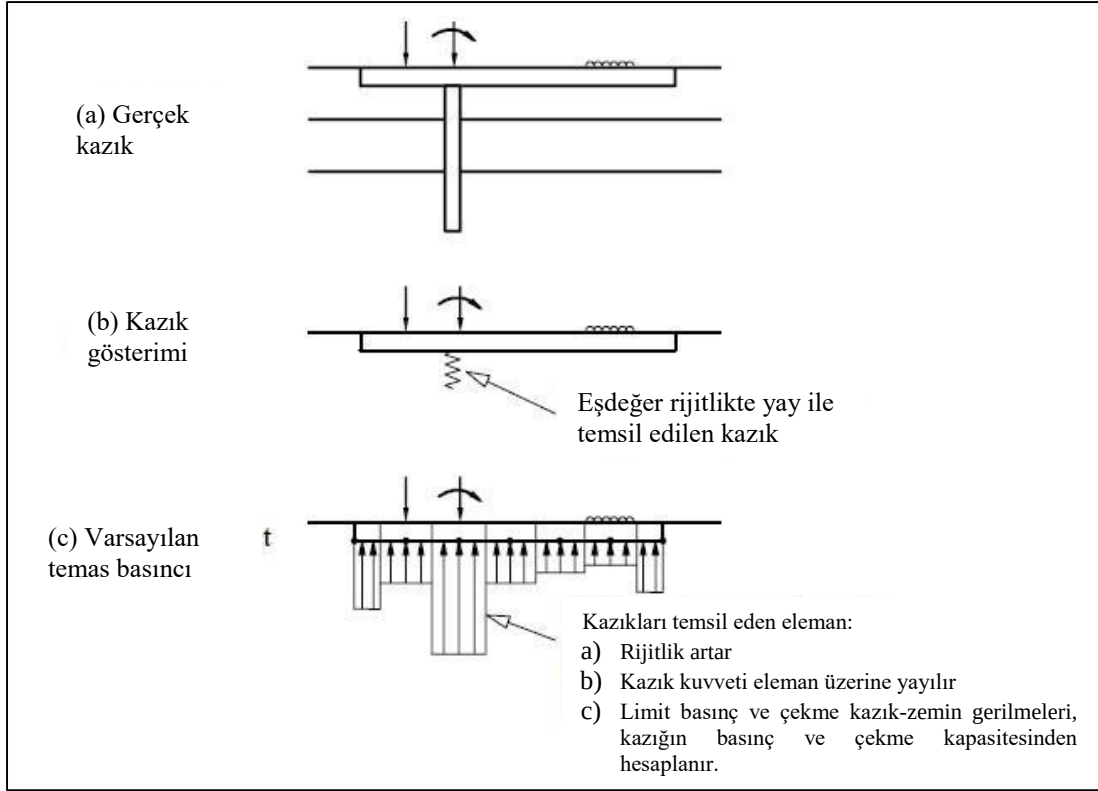
Uygulanacak farklı kademelerinde K_r ve K_p , dolayısıyla β ve X parametreleri değişecektir. Bu sebeple ön tasarım sürecinde PDR Yöntemi kullanılırken MATHCAD gibi matematiksel yazılımlardan yararlanılabilir.

2.2.2. Yaklaşık sayısal analiz yöntemleri

2.2.2.1. Yaylar üstündeki şerit yaklaşımı

Bu yöntemde göre yayılı temel şeritlerle temsil edilirken kazıklar yaylarla gösterilmekte olup yöntemin bir örneği Poulos (1991) tarafından sunulmuştur (Şekil 2.6). Yaklaşık olarak hesaba katılan kazık-kazık, yayılı temel-yayılı temel, kazık-yayılı temel ve yayılı temel-kazık olmak üzere dört farklı etkileşimin yanısıra şeritlerin dışında kalan zeminin etkisi de dikkate alınmaktadır. Yöntemin kısıtlamalarından bahsetmek gerekirse yayılı temelde oluşacak burulma momentleri göz ardı edilmektedir. Bunun yanında eğer aynı nokta için farklı yönlerde şeritlerle analiz yapılacak olursa oturma sonuçları tutarsız olmaktadır.

Analizler bu yöntem için geliştirilen GASP (Geotechnical Analysis of Strip with Piles) yazılımı ile yapılabilmektedir. Brown ve Wiesner (1975) ve Wiesner ve Brown (1976) tarafından kazıklı yayılı temel için Sınır Elemanları Yöntemi geliştirilmiştir.



Şekil 2.6. Yaylar üstündeki şerit yaklaşımı.

2.2.2.2. Yaylar üstündeki plak yaklaşımı

Poulos (1994), kazıklı yayılı temellerin analizine yönelik geliştirdiği yaylar üzerindeki plak yaklaşımı ile zemin-yapı etkileşiminin doğru bir şekilde modellenmesini amaçlamıştır. Bu yöntemde, yayılı temel elastik bir plaka olarak modellenirken, zemin davranışı elastik yaylarla temsil edilir ve kazıklar, zeminin derin tabakalarına yük aktarımı sağlayan birer rijit eleman olarak sisteme dahil edilir. Yöntem, elastik plak teorisi ile zeminin rijitlik özelliklerini birleştirerek, yük transferi, zemin-kazık-yayılı temel etkileşimi ve oturma davranışının kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır. Poulos, bu yaklaşımın kazıklı yayılı temellerin taşıma kapasitesinin optimize edilmesi ve oturmaların etkin bir şekilde kontrol edilmesi açısından önemli bir yöntem olduğunu ifade etmiştir.

2.2.3. Karmaşık sayısal hesap yöntemleri

Geoteknik mühendisliğinde, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanan yöntemler, karmaşık zemin-yapı etkileşimlerini modelleme ve çeşitli yükleme koşulları altında temellerin davranışına ilişkin ayrıntılı bilgiler sağlama yetenekleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. FEM'in başlıca avantajları arasında düzensiz geometrileri ele alma esnekliği, doğrusal olmayan malzeme davranışını hesaba katma yeteneği ve

farklı yük türlerini ve sınır koşullarını modelleme kapasitesi yer almaktadır. Bu yöntemlerde analiz, problem alanını daha küçük elemanlara ayırarak, her bir eleman için yönetim denklemlerini çözerek ve ardından yapının genel davranışını tahmin etmek için sonuçları birleştirerek gerçekleştirilir. Plaxis 3D, geoteknik sistemlerin davranışını simüle etmek için FEM kullanan böyle bir yazılımdır (Arslan ve ark., 2024). Zemin-yapı etkileşimlerini modellemek için gelişmiş yetenekler sunarak mühendislerin temelleri, şevleri, tünelleri ve diğer geoteknik yapıları analiz etmesine ve tasarlamasına olanak tanır. Plaxis 3D ayrıca kazıklı yayılı temel analizlerindeki parametrik varyasyonları yansıtarak farklı zemin koşullarının, kazık konfigürasyonlarının ve yükleme senaryolarının incelenmesine olanak tanır ve bu da onu geoteknik mühendisleri için değerli bir araç haline getirir.

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis Yazılımı

Kazıklı yayılı temellerin analizinde sonlu elemanlar yöntemi (FEM), karmaşık zemin-yapı etkileşimlerinin detaylı biçimde modellenmesine olanak tanıyan güçlü bir mühendislik aracıdır. Geleneksel hesap yöntemleri sınırlı varsayımlar ve basitleştirilmiş idealizasyonlarla çalışırken, sonlu elemanlar yöntemi doğrusal olmayan zemin davranışını, heterojenliği ve geometrik karmaşıklıkları dikkate alarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Özellikle oturma, yük paylaşımı, taşıma gücü ve gerilme dağılımları gibi parametrelerin daha hassas hesaplanması açısından önemli avantajlar sunar.

Plaxis yazılımı, sonlu elemanlar temelli analizler için geliştirilmiş ve geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Plaxis gelişmiş zemin modelleri ile karmaşık problemleri daha gerçekçi bir biçimde değerlendirme imkânı sunar. Zemin parametrelerinin tanımlanması, yükleme senaryolarının uygulanması, yapı elemanlarının modellenmesi ve gerilme-şekil değiştirme analizlerinin gerçekleştirilmesi süreçlerini entegre bir biçimde yönetebilir.

Plaxis 2D ve Plaxis 3D yazılımları, geometri ve analiz yaklaşımı bakımından farklılık gösterir. Plaxis 2D, düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetri kabulleriyle çalışır ve genellikle simetrik yapılar için uygundur. Buna karşın Plaxis 3D, üç boyutlu modelleme imkânı sunarak kazık grubu düzeni, yükleme çeşitliliği ve yapı karmaşıklığı gibi çok boyutlu etkilerin analizine olanak sağlar. Bu durum, özellikle

düzensiz kazık yerleşimleri veya asimetrik yüklemelerin bulunduğu projelerde 3D analizlerin doğruluğunu öne çıkarır.

Plaxis yazılımında kullanılan zemin modelleri arasında Hardening Soil (HS) modeli, yaygın olarak tercih edilen gelişmiş bir davranış modelidir. Bu model, zeminlerin gerilme-bağımlı rijitliğini ve hem kesme hem de konsolidasyon pekleşmesini göz önünde bulundurur. Hardening Soil modeli; servis yüklemeleri altında daha gerçekçi oturma tahminleri, yükleme-boşaltma döngülerine karşı duyarlılık ve gerilme düzeyine bağlı değişen elastik modül tanımları (örneğin E_{50} , E_{oed} , E_{ur}) ile öne çıkar. Bu sayede, zeminlerdeki gerilme-yerdeğiştirme ilişkisi daha hassas şekilde modellenebilir.

Plaxis 3D içerisinde kazıklar için kullanılan Embedded Beam Row modeli, kazıkların üç boyutlu doğrultuda zemin içerisine yerleştirilen çubuk elemanlar olarak tanımlanmasını sağlar. Bu model sayesinde, kazıkların eğilme, kesme ve eksenel kuvvetlere karşı tepkileri detaylı biçimde incelenebilir. Ayrıca zeminle olan bağ etkileşimleri, kazık-zemin bağ rijitliği ve sürtünme dayanımı gibi parametreler aracılığıyla modellenerek daha doğru yük aktarım analizleri yapılabilir. Diğer yandan, temel plağı gibi rijit yapı elemanları için kullanılan Plate elemanlar, bükülmeye karşı dirençli düzlemsel elemanlardır ve temel yapıların moment, kesme kuvveti ve oturma analizlerinde kullanılır.

3. METODOLOJİ

Bu çalışmada, kazıklı yayılı temellerin deplasman azaltıcı etkileri üstyapı ile etkileşimli olarak değerlendirilmiş ve bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal modellemeler gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler, geoteknik ve yapısal elemanların üç boyutlu etkileşimli olarak modellenmesine imkân tanıyan Plaxis 3D yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan modellerde, kazıklı temel sistemlerinin çeşitli geometrik parametreleri (kazık çapı, aralığı ve boyu) değiştirilerek oturma davranışı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Bu analizlerde üstyapının temel davranışı üzerindeki etkisi dikkate alınarak daha gerçekçi bir yapısal-zeminsel etkileşim ortamı sağlanması hedeflenmiştir.

Analiz süreci üç ana kademedede yürütülmüştür. İlk aşamada, üstyapının doğrudan modellenmesinin temel üzerindeki etkisini irdelemek amacıyla iki farklı modelleme yaklaşımı karşılaştırılmıştır. İlk modelde, üstyapıdan gelen yükler eşdeğer yayılı yük olarak temel üzerine uygulanmıştır. Diğer modelde ise üstyapı, taşıyıcı sistem elemanlarını temsilen plate elemanlar kullanılarak açık biçimde modellenmiş, böylece rijitlik özellikleriyle doğrudan sisteme dahil edilmiştir. Bu iki yaklaşım sonucunda elde edilen yer değiştirme ve tesirleri karşılaştırılmış, üstyapının doğrudan modellenmesinin kazıklı yayılı temel davranışını ne ölçüde etkilediği değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada, kazıkların geometrik parametreleri değiştirilerek temel sisteminin oturma davranışına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, kazık çapı, boyu ve kazıklar arası mesafe sistematik olarak varyasyonlara tabi tutulmuştur. Tüm bu analizler, üstyapı ile doğrudan etkileşimli modellerde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yalnızca temel-zemin etkileşimi değil, aynı zamanda üstyapının taşıyıcı sistem karakteristiklerinin ve yük aktarma mekanizmasının da sonuçlar üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışmanın üçüncü aşamasında ise kazıkların yerleşim düzeninin oturma kontrolündeki etkinliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda iki farklı yerleşim senaryosu oluşturulmuştur. İlk senaryoda, kazıklar temel alanı boyunca eşit aralıklarla

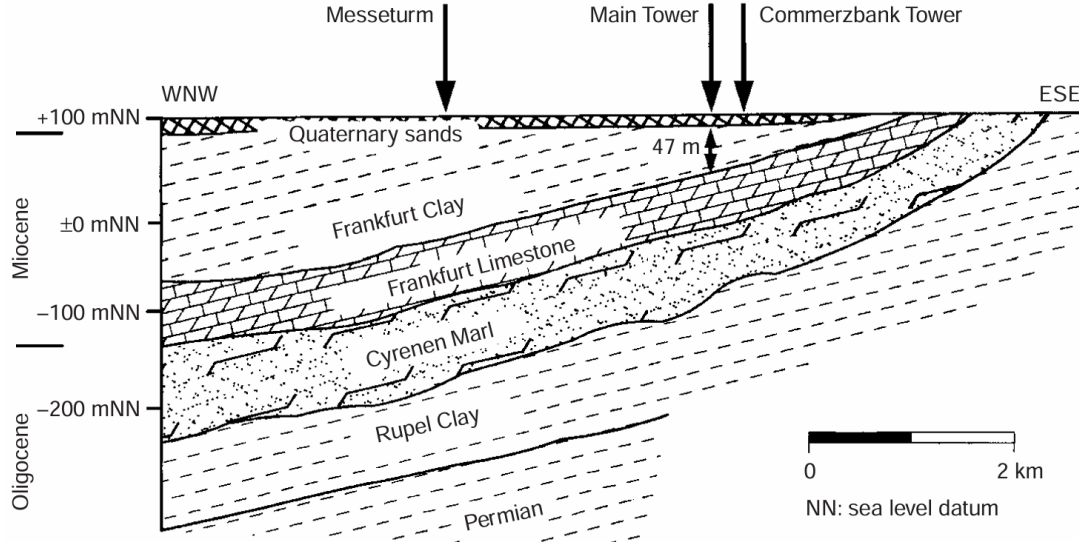
düzenlenmiştir. İkinci senaryoda ise kazıklar, analiz sonuçlarına göre temelde en fazla deplasmanın meydana geldiği bölgelere yoğunlaştırılmıştır. Bu iki senaryo sonucunda elde edilen oturma miktarları ile temel tesirleri karşılaştırılmış ve yerleşim düzeninin temel üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Modelleme sürecinde esas alınan zemin profili Frankfurt kili olmuştur. Frankfurt kili, özellikle yüksek yapılar için kazıklı yayılı temel sistemlerinin yaygın olarak uygulandığı, geoteknik mühendisliği açısından oldukça iyi belgelenmiş bir zemin formasyonudur. Bu bölgedeki zemin koşulları, yüksek plastisiteli, düşük drenaj kapasitesine sahip ve zamanla konsolidasyona uğrayan kalın kil tabakaları içermektedir. Bu zemin karakteristikleri nedeniyle, Frankfurt bölgesinde kazıklı temel sistemleri neredeyse zorunlu hale gelmiş; bu durum, bölgenin kazıklı yayılı temeller üzerine yapılan çok sayıda uygulamalı çalışmaya konu olmasını sağlamıştır. Literatürde hem saha hem de laboratuvar ortamında bu zemin türü üzerinde yürütülmüş çok sayıda deneysel ve sayısal araştırma bulunması, bu çalışmada Frankfurt kilinin referans alınmasını bilimsel açıdan anlamlı ve karşılaştırılabilir kılmıştır. Ayrıca bu tercih, elde edilen bulguların literatürdeki benzer çalışmalarla doğrudan ilişkilendirilebilmesine olanak tanımaktadır.

Katzenbach ve ark. (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Frankfurt kentinde yer alan 299 metre yüksekliğindeki Commerzbank Kulesi'nin temelinde, Frankfurt kili altındaki sert Frankfurt kireçtaşına yükleri aktaran 111 adet kazık bulunduğu belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında, Frankfurt bölgesine özgü zemin koşulları dikkate alınarak üç boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yayılı temel ve kazıklar arasındaki etkileşim, yük paylaşımı ve zemin-yapı ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca, saha deneyleri kapsamında 30 kazık içerisine, yayılı temel altına ve çevre zemine yerleştirilen ölçüm cihazlarıyla zemin-yapı etkileşim mekanizmaları takip edilmiş ve sayısal sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, kazıklı temel sisteminin tasarımda hedeflenen oturma kontrolünü başarıyla sağladığını ortaya koymuştur.

Katzenbach ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışmada, Frankfurt zemin yapısının yüzeyden 6-10 metre derinliğe kadar kuvaterner kumları ve çakıllardan oluştuğu; bunların altında tersiyer döneme ait Frankfurt Kili ve Frankfurt Kireç tabakalarının yer aldığı belirlenmiştir (Şekil 3.1). Frankfurt Kili'nin, sert ve yarı katı kıvamda kil tabakaları arasında değişken kalınlıklarda kum, kireçtaşı ve dolomit bantları içeren

katmanlı bir yapıya sahip olduğu saptanmıştır. Ayrıca, Frankfurt kireç tabakasının kil katmanlarına kıyasla daha yüksek sertlik ve dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Yerinde ölçümler sonucunda, zemin su seviyesinin yaklaşık 6 metre derinlikte olduğu ve suyun geçirgen kum, çakıl tabakaları ile kil ve kireç arasındaki geçirgen zonlar boyunca hareket ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.1. Frankfurt şehri altındaki zemin tabakalarının yapısı ve özellikleri.

Reul ve Randolph (2003) tarafından yapılan çalışma, Frankfurt'taki Westend, Messeturm ve Torhaus binalarına ait aşırı konsolide kil üzerinde yer alan kazıklı yayılı temel sistemlerinin detaylı geriye dönük analizini sunmaktadır. Üç boyutlu sonlu eleman analizleri kullanılarak toplam oturma, farklı oturma ve kazıkların yük paylaşımı saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Analizler, kazık kullanımının eşdeğer kazıksız yayılı temellere kıyasla maksimum oturmaları yaklaşık %51-63 oranında azalttığını göstermektedir.

Abdel-Azim ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, aşırı konsolide Frankfurt kilinde inşa edilmiş Messeturm yüksek yapısına ait kazıklı yayılı temel sisteminin performansı üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmiştir. Sayısal modelde, zeminin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışını temsil etmek için PLAXIS 3D ortamında Pekleşen Zemin modeli tercih edilmiştir. Kazıklar ise gömülü kiriş elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonuçları, kazıklı yayılı temel sisteminin toplam ve farklı oturmaları kontrol etmekte etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, geleneksel kazıklı temel sistemlerine göre yükleri daha iyi dağıtarak verimli bir temel çözümü sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, aşırı

konsolide kil zeminlerde yüksek yapılar için kazıklı yayılı temel uygulamalarının yapı performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Bu iyileşme, kazık ile yayılı temel arasındaki yük paylaşımının etkin şekilde sağlanmasına dayanmaktadır.

Çalışmada kullanılan üstyapı modeli, seçilen zemin profilinin Frankfurt kili olması sebebiyle, Frankfurt bölgesinde yer alan yapı tipolojileri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Yapının taşıyıcı sistemi, bölgedeki tipik çok katlı yapılardan esinlenerek oluşturulmuş olup, temel üzerine etkileyen toplam yük ve temel tabanındaki gerilme düzeyleri bu yapıların genel karakteristiklerine uygun şekilde tanımlanmıştır. Böylece, yapı ile zemin arasındaki etkileşim daha gerçekçi biçimde modellenmiştir; kazıklı temel sistemi, hem zemin özellikleri hem de üstyapı yüklemeleri açısından Frankfurt koşullarını yansıtacak şekilde değerlendirilmiştir.

Tüm analizlerden önce, modelin hem doğruluğunu artırmak hem de çözüm sürelerini optimize edebilmek amacıyla bir dizi ağ yoğunluğu (mesh size) çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, farklı ağ yoğunlukları kullanılarak oluşturulan modellerin çözüm süreleri ve elde edilen deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, analiz doğruluğu ile hesaplama süresi arasında optimum dengeyi sağlayan bir ağ boyutu belirlenmiş ve tüm çalışmalarda bu ağ yapısı esas alınmıştır.

Bu çalışma bilimsel çerçeve kapsamında yürütülen analizler sonucunda, hem kazık parametrelerinin hem de kazık yerleşim düzeninin temel davranışı üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ortaya konmuş; ayrıca üstyapının modele dahil edilmesinin sistem davranışına olan etkileri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Devam eden alt başlıklarda, analizlerde kullanılan zemin parametreleri, yapı bilgileri ve mesh çalışmaları ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

3.1. Zemin Özellikleri

Bu çalışmada modelleme ve analiz sürecinde, karakteristik özellikleri nedeniyle Frankfurt kili esas alınmıştır. Düşük geçirgenlik, yüksek plastiklik ve zamana bağlı oturma davranışıyla tanımlanan bu zemin, aşırı konsolide kil formasyonları arasında yer almakta olup, Frankfurt kenti ve çevresinde yaygın olarak karşılaşılmaktadır. Bölgede gerçekleştirilen çok sayıda uygulamalı araştırma ve mühendislik projesinde kazıklı yayılı temel sistemlerinin tercih edilmesi, Frankfurt kilini benzer geoteknik koşullara sahip zeminler için temsil niteliği yüksek bir örnek haline getirmiştir. Bu

yönüyle Frankfurt kili, kazıklı yayılı temellerin davranışlarının sayısal yöntemlerle incelenmesinde kapsamlı değerlendirmelere olanak sağlayan ve literatürle karşılaştırmalı analiz yapmaya elverişli bir zemin ortamı sunmaktadır.

Modellemede esas alınan zemin parametreleri, Abdel-Azim ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada sunulan değerlere dayanmaktadır. Ayrıca, Westend 1 ve Messeturm binaları kapsamında Reul ve Randolph (2003) tarafından yürütülen zemin araştırmaları doğrultusunda, yeraltı suyu seviyesi yüzeyden yaklaşık 4.5 ile 7 metre derinlikte yer almakta olup, analizlerde ortalama 6 metre derinlik esas alınmıştır.

Zemin davranışının gerçeğe yakın biçimde modellenebilmesi amacıyla Plaxis 3D yazılımı içinde Hardening Soil (Pekleşen zemin) modeli kullanılmıştır. Bu gelişmiş elastik-plastik model, zeminlerin yükleme ve boşaltma döngülerine bağlı rijitlik değişimlerini, plastik deformasyon potansiyelini ve konsolidasyon etkilerini dikkate alarak, özellikle yumuşak ile orta sertlikteki zeminler için daha güvenilir gerilme-şekil değiştirme tahminleri sunmaktadır. Böylece kazıklı yayılı temel sisteminin zeminle etkileşimi daha doğru biçimde analiz edilmiştir.

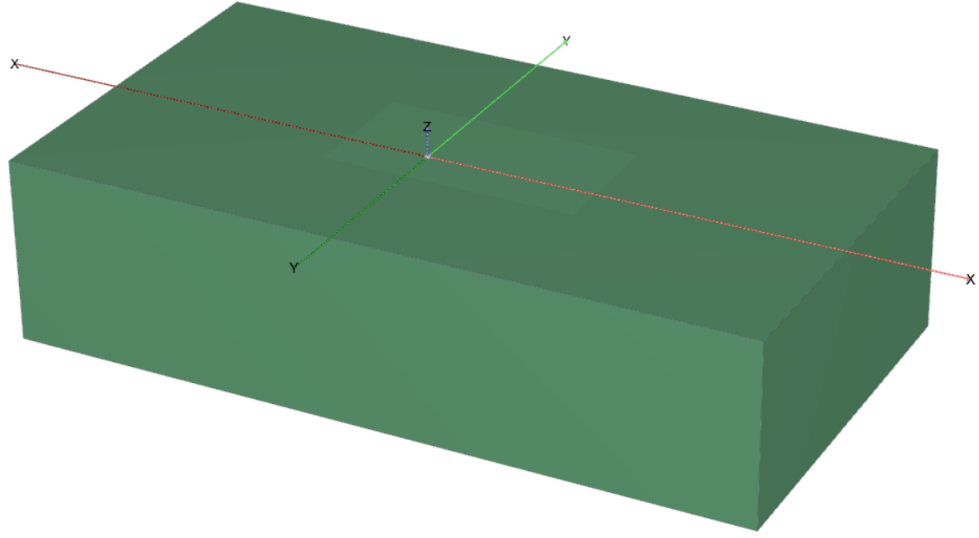
Bu çalışmada kullanılan Frankfurt kiline ait zemin parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Modelleme kapsamında zemin tabakası derinliği 100 m olarak kabul edilmiştir. Yeraltı suyu seviyesi zemin yüzeyinin 6 m altında konumlandırılmıştır. Plaxis 3D ortamında oluşturulan zemin modeline ait katman yapısı Şekil 3.2’te detaylı şekilde sunulmuştur.

Tablo 3.1. Kullanılan zemin parametreleri.

Tanımlama	Kısaltma	Birim	Frankfurt kili
Zemin modeli	Model	-	Pekleşen zemin
Drenaj tipi	Tip	-	Drenajlı
Doygun olmayan birim hacim ağırlık	γ_{unsat}	kN/m ³	20.00
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{sat}	kN/m ³	20.00

Tablo 3.1. (Devam) Kullanılan zemin parametreleri.

Boşluk oranı	e_{init}		0.50
Sekant rijitlik	E_{50}^{ref}	kN/m ²	45000
Tanjant rijitlik	E_{oed}^{ref}	kN/m ²	45000
Yükleme/boşaltma rijitliği	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	90000
Poisson oranı	ν_{ur}	-	0.30
Üstel katsayı	$\ddot{u}s$ (m)	-	0.50
Referans basınç	p_{ref}	kN/m ²	100.00
Kohezyon	c'_{ref}	kN/m ²	20.00
Sürtünme açısı	ϕ' (phi)	°	20.00
Kabarma açısı	ψ (psi)	°	0
Kohezyon artışı	c'_{inc}	kN/m ² /m	0
Referans seviye	z_{ref}	m	0
K_0 -değeri	K_0^{nc}	-	0.658
Sürtünme oranı	R_f	-	0.90
Ara yüzey dayanım azaltma faktörü	R_{inter}	-	1.00
Yanal zemin basınç katsayısı	$K_{0,x}$	-	0.8
Yanal zemin basınç katsayısı	$K_{0,y}$	-	0.8
Aşırı konsolidasyon oranı	OCR	-	1.50



Şekil 3.2. Plaxis zemin modeli.

3.2. Yapı Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan bina modeli, seçilen zemin profili olan Frankfurt kili ile uyumlu olacak şekilde, Frankfurt bölgesinde yaygın olarak bulunan çok katlı yapıların yapısal karakteristiklerinden esinlenerek oluşturulmuştur. Modelin temel amacı, sayısal analizler sonucunda elde edilen temel gerilme dağılımları ve oturma değerlerinin, saha gerçekleri ile uyumlu olacak şekilde yapılandırılmasıdır. Bu doğrultuda, yapı yükleri ve taşıyıcı sistem özellikleri, Frankfurt bölgesine özgü yapı stokunun genel özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Hipotetik olarak oluşturulan yapının taşıyıcı sistemi, betonarme kolon, kiriş, döşeme, perde ve duvar elemanlarından oluşmaktadır. Her bir taşıyıcı elemanın kesit boyutları ve bu elemanlara etkiyen yükler, yapının mekanik davranışını doğru şekilde temsil etmek amacıyla kapsamlı biçimde belirlenmiştir. Kesit boyutları ve her bir elemana ait yük değerleri, taşıyıcı sistemin rijitlik ve dayanım özelliklerini modelde yansıtabilmek için kritik öneme sahiptir ve bu bilgiler Tablo 3.2’de detaylandırılmıştır. Bu yaklaşım, yapı ile temel arasındaki etkileşim mekanizmasının gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır.

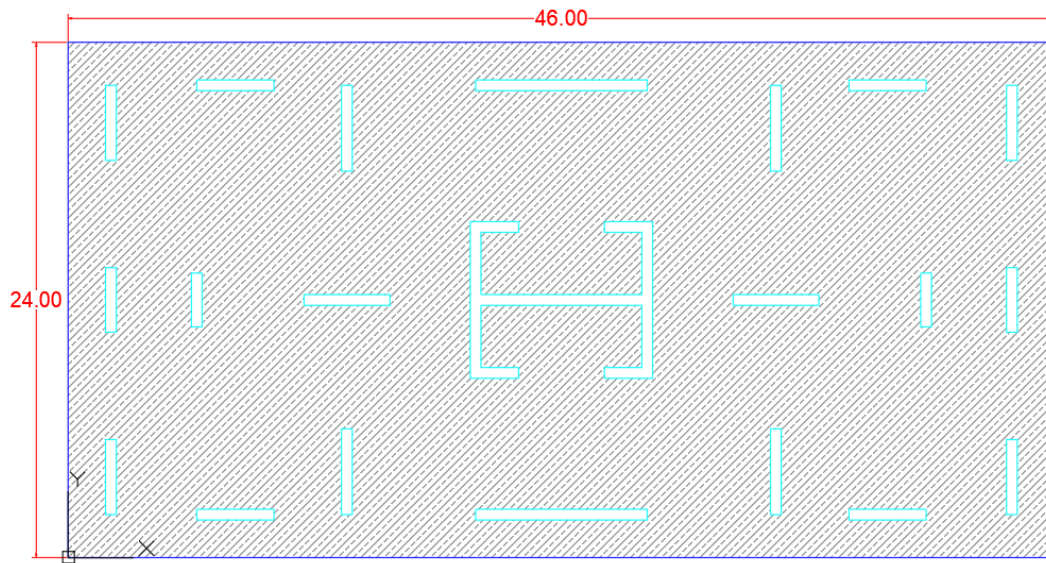
Yapı, 1 bodrum ve 29 normal katlı olup 87.0 m yüksekliğine sahiptir. Yayılı temel kalınlığı 1.0 m olup temel gömme derinliği 3.0 m’dir. Yapı narinlik oranı ise (H/B) 3.625 olarak belirlenmiştir.

Temel boyutları 24.0 x 46.0 m olan yapıdan aktarılan toplam yük 446.4 MN olup temel üzerinde meydana gelen ortalama gerilme 404.31 kPa olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, yapının plan görünüşü ve taşıyıcı sistemin genel yerleşim düzeni Şekil 3.3 aracılığıyla görsel olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3.2. Yapıya ait geometri ve yük bilgileri.

Eleman	Boyutlar (m)			Adet	Toplam Hacim (m ³)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Yük (kN)	Toplam Yük (kN)
Kolon / Perde	0.50	3.60	87.0	4	626.4	25.0	15660.0	109837.5
	0.50	3.50	87.0	4	609.0	25.0	15225.0	
	0.50	3.00	87.0	2	261.0	25.0	6525.0	
	0.50	2.50	87.0	2	217.5	25.0	5437.5	
	0.50	8.00	87.0	3	1044.0	25.0	26100.0	
	0.50	6.80	87.0	2	591.6	25.0	14790.0	
Kiriş	0.50	0.70	185.0	29	1916.7	25.0	47918.5	248400.0
Döşeme	0.30	24.00	46.0	30	9936.0	25.0	248400.0	47918.5
Duvar	0.30	2.30	185.0	29	3740.8	10.0	37408.4	37408.4
Bodrum Perdesi	0.30	124.0	3.0	-	111.6	25.0	2790.0	2790.0



Şekil 3.3. Yapının plan görünüşü ve taşıyıcı sistemin genel yerleşim düzeni.

Sayısal modelleme sürecinde, yapı elemanları Plaxis 3D yazılımında plaka elemanlar kullanılarak temsil edilmiştir. Plaka elemanlar, yapının üç boyutlu rijitlik ve kütle etkilerini yakalamaya olanak tanıyan, sonlu eleman yöntemine uygun bir modelleme yaklaşımıdır. Bu elemanlar, betonarme taşıyıcı sistemin statik ve dinamik özelliklerini sayısal ortamda etkili bir biçimde simüle edebilmek amacıyla gerekli mekanik ve geometrik parametrelerle tanımlanmıştır. Plaka elemanlara ait malzeme özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Bu sayede, yapının zemin üzerindeki yük aktarımı ve taşıyıcı sistem davranışı gerçekçi biçimde modellenmiştir.

Tablo 3.3. Yapıya ait malzeme parametreleri.

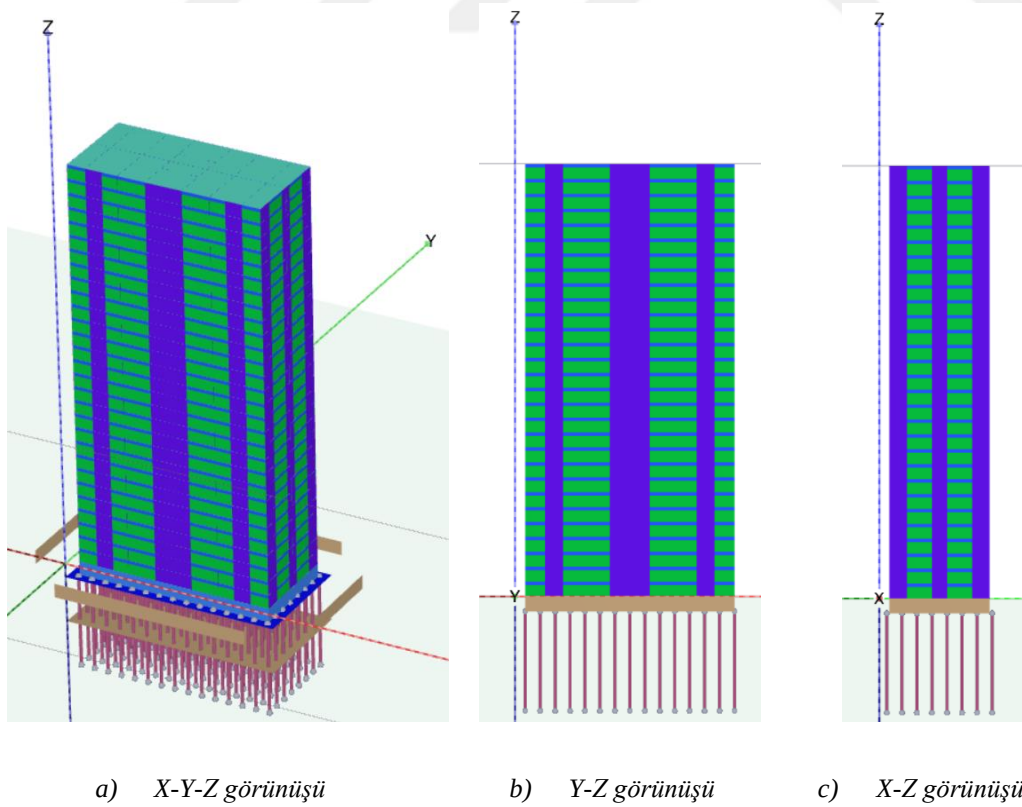
Tanımlama	Birim	Yayılı Temel	Bodrum Perdesi	Kolon	Kiriş	Döşeme	Duvar
Malzeme tip	-	Elastik	Elastik	Elastik	Elastik	Elastik	Elastik
γ	kN/m ³	5	25	25	25	25	10
E_1	kN/m ²	30x10 ⁶	30x10 ⁶	30x10 ⁶	30x10 ⁶	30x10 ⁶	20x10 ⁶
E_2	kN/m ²	30x10 ⁶	30x10 ⁶	30x10 ⁶	30x10 ⁶	30x10 ⁶	20x10 ⁶
ν_{12}	-	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
d	m	1	0.3	0.5	0.5	0.3	0.3
G_{12}	kN/m ²	120x10 ⁶	120x10 ⁶	120x10 ⁶	120x10 ⁶	120x10 ⁶	800x10 ⁶

Kazıklı temel sistemi modellemek amacıyla, kazıklar Plaxis 3D ortamında gömülü kiriş eleman olarak tanımlanmıştır. Gömülü kiriş elemanlar, kazıkların yapıya ve zemine bağlanarak karşılıklı etkileşim içinde olmasını sağlayan özel bir modelleme yaklaşımıdır. Bu yöntem, kazıkların taşıma kapasitesi, rijitliği ve zeminle etkileşimi gibi kritik özelliklerinin sayısal analizlerde etkili bir biçimde temsil edilmesine olanak tanımaktadır. Gömülü kiriş elemanlarına ait kullanılan parametreler Tablo 3.4'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.4. Kazığa ait parametreler.

Tanımlama	Birim	Kazık
Malzeme tipi	-	Elastik
γ	kN/m ³	5
Kesit tipi	-	Önceden tanımlanmış
Ön tanımlı kesit tipi	-	Dolu dairesel kiriş
Çap	m	1
Alan	m ²	0.7854
I_2	m ⁴	0.04909
I_3	m ⁴	0.04909
E	kN/m ²	30x10 ⁶
Eksenel çevre sürtünmesi	-	Katmana bağlı
$T_{\max}$	kN/m	30x10 ¹⁰
$F_{\max}$	kN	1400

Son olarak, çalışmada geliştirilen yapı ve temel modelinin Plaxis 3D yazılımı içerisindeki üç boyutlu görüşleri Şekil 3.4'te sunulmuştur.

**Şekil 3.4.** Yapıya ait Plaxis 3D model görüşleri.

3.3. Sonlu Elemanlar Analizi

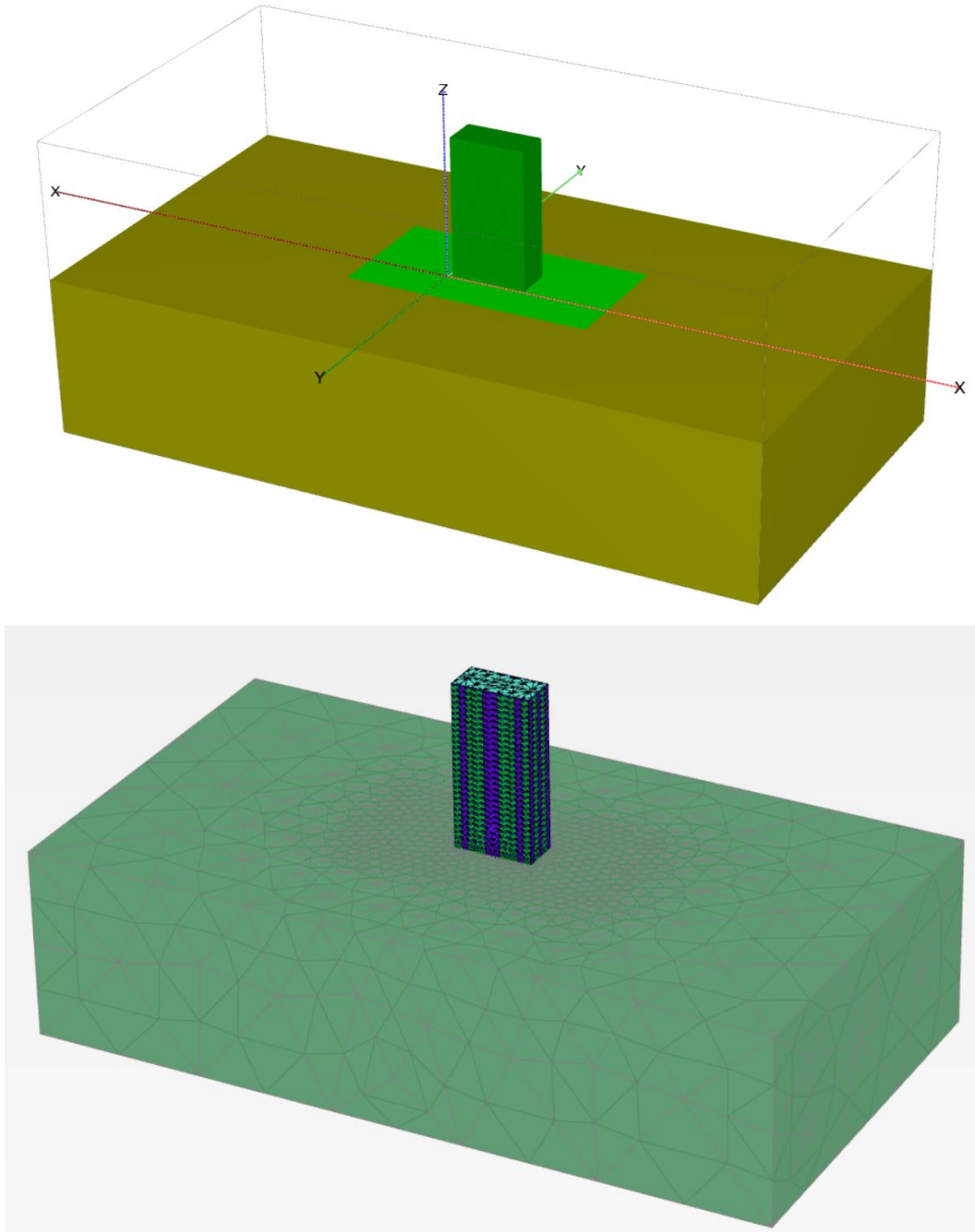
Bu çalışmada, kazıklı yayılı temel sisteminin davranışını değerlendirmek amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (FEM) temelli Plaxis 3D yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modelleme kapsamında, zemin davranışı için Hardening Soil (HS) modeli, betonarme elemanlar için plaka elemanlar ve kazıklar için gömülü kiriş elemanlar kullanılmıştır. Malzeme modellerine ait detaylı bilgiler bir önceki bölümde sunulmuştur.

Sayısal modellemenin hassasiyetini artırmak ve sınır koşullarının analiz sonuçları üzerindeki olası etkilerini en aza indirmek amacıyla, modelin sınırları yapıdan itibaren tüm yönlerde temel boyutlarının 4 katı kadar olacak şekilde genişletilmiş, zemin katmanı ise 100 metre derinliğe kadar tanımlanmıştır. Bu kapsamlı zemin hacmi, kazık-zemin etkileşimlerinin serbestçe gelişebilmesine olanak tanırken, kenar sınırlarının rijitlik davranışını yapay olarak etkilemesinin de önüne geçilmiştir. Yeraltı su seviyesi, çalışmanın temelini oluşturan saha koşullarını yansıtacak şekilde, yüzeyden 6 m aşağıda olacak şekilde tanımlanmıştır.

Modelin zemin-yapı etkileşimini daha yüksek hassasiyetle değerlendirebilmek amacıyla, yapının çevresinde her yönde kendi temel boyutları kadar genişliğe ve 40 metre derinliğe sahip ek bir hacmi oluşturulmuştur. Bu iç hacim, özellikle temele ve kazıklara ait gerilme dağılımlarının, yer değiştirme davranışlarının ve oturma eğilimlerinin daha hassas biçimde elde edilebilmesini sağlamak amacıyla daha ince bir sonlu eleman ağıyla modellenmiştir. Modelin geri kalan bölümlerinde ise hesaplama süresinin etkin şekilde yönetilebilmesi için daha kalın (very coarse- 2.0) bir mesh yoğunluğu uygulanmıştır. Tanımlanan sonlu eleman ağına ait genel görünüm Şekil 3.5'te sunulmaktadır.

Analiz sürecine geçmeden önce, sayısal modelde kullanılacak optimum ağ boyutlarını belirlemek üzere ağ duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı ağ boyutları ile yapılan karşılaştırmalı analizlerde temel üzerinde oluşan maksimum oturmalar ve buna karşılık gelen analiz süreleri kaydedilmiş, elde edilen temel deplasmanları ile hesaplama süresi birlikte değerlendirilerek en uygun ağ boyutu belirlenmiştir. Belirlenen bu optimum ağ boyutu, temelin çevresindeki 40 metre derinlikli hacimde kullanılmış ve çalışmanın devamında gerçekleştirilen tüm analizlerde tutarlılık sağlamak adına aynı ağ boyutu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ağ duyarlılık analizine ilişkin bulgular Tablo 3.5'de ve Şekil 3.6'te sunulmaktadır.

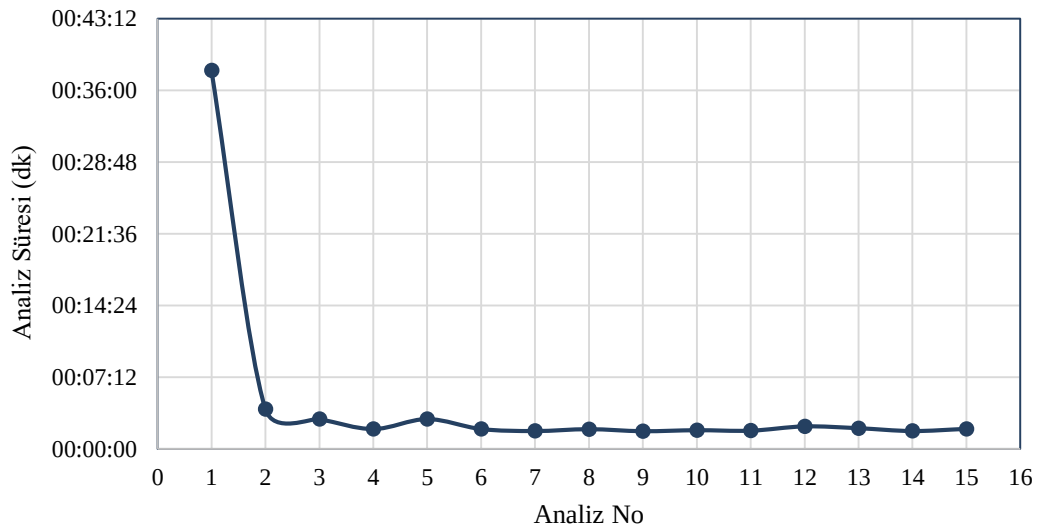
Temel oturmalarının analiz sonuçları üzerinden karşılaştırmalı değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, temel üzerinde yapının merkezinde ve kenarlarında toplam 9 adet gözlem noktası tanımlanmıştır. Bu noktalar üzerinden elde edilen deplasman değerleri, kazıklı yayılı temel sisteminin farklı koşullar altındaki performansının yorumlanmasında kullanılmıştır. Belirlenen noktaların konumları Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Yapılan ağ duyarlılık analizleri sonucunda tez kapsamında kullanılacak ağ boyutunun 0.125 olmasına karar verilmiştir.

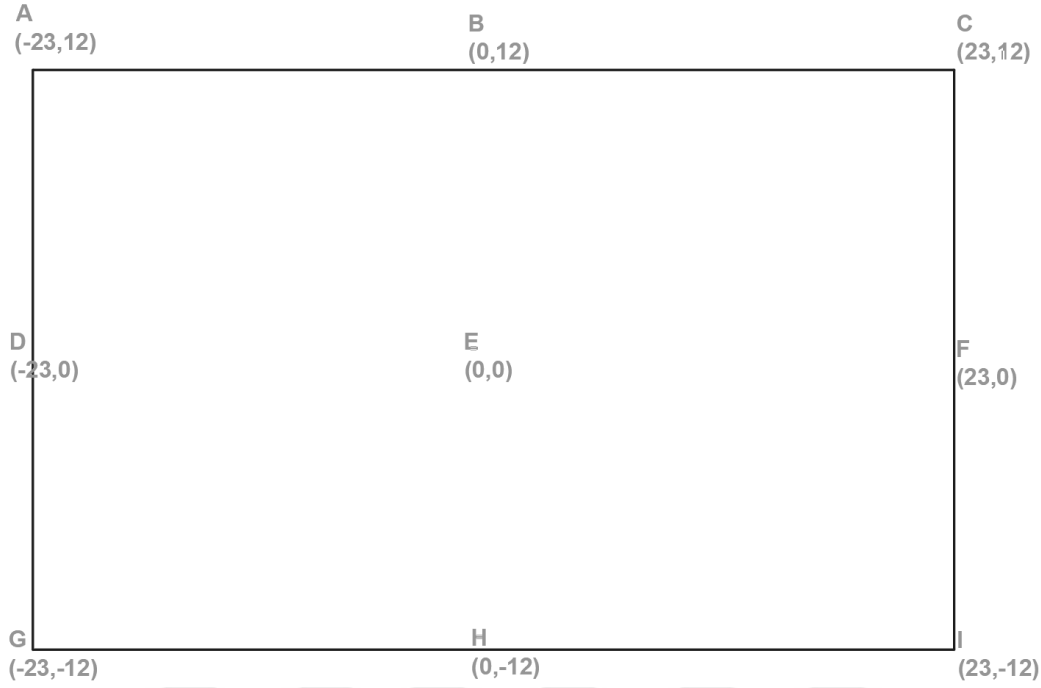


Şekil 3.5. Sonlu eleman ağı.

Tablo 3.5. Sonlu eleman ağı yapılan analizler ve sonuçları.

Analiz No	Ağ Yoğunluğu	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Temel Deplasmanı (cm)	Analiz Süresi (dk)
1	0.03125	568070	794097	12.74	00:38:00
2	0.06250	94773	155002	12.17	00:04:00
3	0.09375	40329	80863	12.09	00:03:00
4	0.12500	25845	60977	11.90	00:02:00
5	0.15625	19671	52429	11.92	00:03:00
6	0.18750	16582	48100	11.86	00:02:00
7	0.21875	15014	45899	11.80	00:01:48
8	0.25000	14294	44892	11.87	00:01:59
9	0.28125	13439	43669	11.95	00:01:47
11	0.31250	13077	43168	11.92	00:01:53
12	0.62500	11995	41578	12.06	00:01:50
13	0.93750	11697	41182	11.97	00:02:16
14	1.25000	11714	41201	11.82	00:02:05
15	1.56250	11711	41192	11.87	00:01:48
16	2.00000	11711	41192	11.87	00:02:01

**Şekil 3.6.** Sonlu eleman ağı analiz sonuçları.



Şekil 3.7. Temel üzerinde seçilen noktalar.

Sayısal modelleme, yapının inşaat sürecindeki aşamaları adım adım simüle etmek amacıyla Plaxis 3D yazılımında inşaat aşamaları sırası ile tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, her aşamada yapısal elemanların ve zemin davranışının modellenerek, etkileşimin gerçek zamanlı olarak takip edilmesini sağlar.

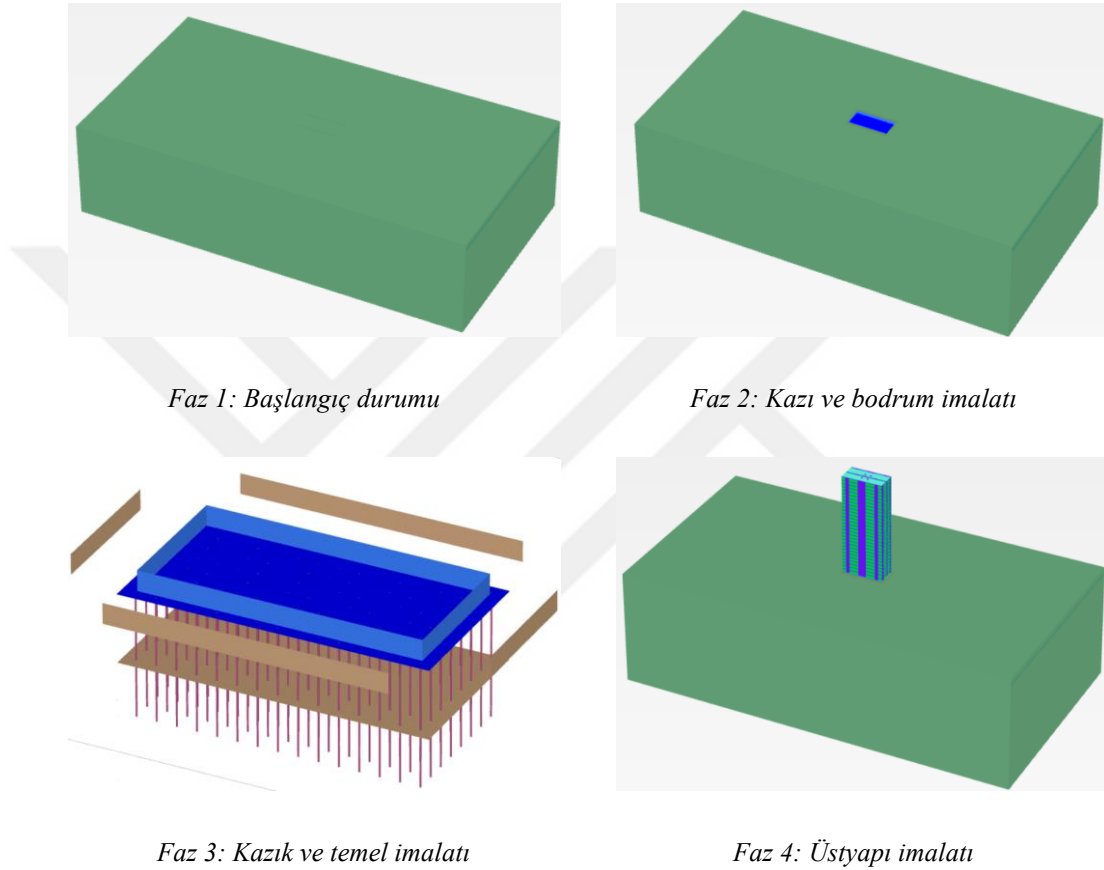
İlk fazda, yalnızca zemin kütlesi aktive edilerek başlangıç gerilme durumu oluşturulmuştur. Bu adım, zeminin başlangıçtaki gerilme koşullarının modellenmesi için temel oluşturur.

İkinci fazda, temel kazısı simüle edilmiş ve kazıklar embedded beam elemanları olarak modele eklenmiştir. Kazıklar temele rijit bağlı olarak modellenmiştir. Kazıkların zeminle olan etkileşimi bu aşamada aktif hale getirilmiş, kazıkların taşıma kapasitesi ve oturma üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir.

Üçüncü fazda, yayılı temel ve bodrum perdeleri modellenerek temel yapısının zemin ile olan bağlantısı kurulmuştur. Bu sayede temel elemanlarının zemin üzerindeki yük dağılımı ve rijitlik etkileri sayısal olarak temsil edilmiştir.

Son olarak, dördüncü fazda üstyapı yükleri modele uygulanarak yapının tamamının yük altındaki davranışı analiz edilmiştir. Bu aşamalı yapılandırma, inşaat sürecinde oluşan gerilme ve deformasyonların zamana bağlı değişimini güvenilir şekilde yansıtarak yapısal performansın gerçekçi bir değerlendirmesine imkân vermiştir.

Her bir inşaat aşamasını görsel olarak desteklemek amacıyla, Faz 1’den Faz 4’e kadar olan model görünüşleri Şekil 3.8’de sunulmuştur. Bu şekil, zemin aktivasyonundan başlayarak temel kazısı ve kazık yerleşimi, yayılı temel ve bodrum perdelerinin imalatı ile üstyapı yüklerinin uygulanmasına kadar tüm süreci kapsamaktadır. Görseller, her fazın modellenme biçimini ve yapı-zemin etkileşiminin aşamalarını açık şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 3.8. Plaxis 3D analiz fazları.

Bu çalışmada kazıklı yayılı temellerin davranışını incelemek üzere analizler dört ana grup halinde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, yapı yüklerinin modellenme biçiminin sistem tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, üstyapının doğrudan modellenmesi ile yüklerin yayılı yük olarak uygulanması şeklinde iki farklı yöntemle analizler yapılmıştır. Sonraki analizlerde kazık çapı, aralığı ve boyu gibi temel tasarım parametrelerinin zemin-tepki üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Son olarak, kazıkların deplasman azaltıcı işlevini incelemek için kazıkların temel altındaki deplasmanın yüksek olduğu bölgelerine yerleştirilmesinin sistem performansına etkisi değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen bulgular, kazıklı yayılı temel

tasarımının optimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Yapılan tüm analizler ve karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 3.6’de özetlenmiştir.

Tablo 3.6. Çalışma kapsamında yapılan analizlerin özeti.

Analiz	Yükleme Koşulu	Kazık Aralığı (m)	Kazık Çapı (m)	Kazık Boy	Kazık Sayısı
Yüklemeye Koşullarının Etkisi	Yayılı yük	Sadece yayılı temel var.			
	Üstyapılı model	Sadece yayılı temel var.			
	Yayılı yük	3.0	1.0	18.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	18.0	120
Kazık Aralığının Etkisi	Üstyapılı model	2.0	1.0	20.0	242
	Üstyapılı model	3.0	1.0	20.0	120
	Üstyapılı model	4.0	1.0	20.0	72
	Üstyapılı model	5.0	1.0	20.0	45
	Üstyapılı model	6.0	1.0	20.0	32
	Üstyapılı model	7.0	1.0	20.0	28
Kazık Çapının Etkisi	Üstyapılı model	3.0	0.4	20.0	120
	Üstyapılı model	3.0	0.65	20.0	120
	Üstyapılı model	3.0	0.8	20.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	20.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.2	20.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.5	20.0	120
	Üstyapılı model	3.0	2.0	20.0	120
Kazık Boyunun Etkisi	Üstyapılı model	3.0	1.0	8.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	10.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	12.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	14.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	16.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	18.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	20.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	22.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	24.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	26.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	28.0	120
	Üstyapılı model	3.0	1.0	30.0	120
Optimizasyon Çalışmaları	Üstyapılı model	3.0	1.0	18.0	120
	Üstyapılı model	Değişken	1.0	18.0	76

4. ANALİZ SONUÇLARI

Çalışmada kazıklı yayılı temellerin tasarımında etkili olan kazık aralığının, kazık çapının ve kazık boyunun yayılı temel davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunu yanısıra üst yapı yükleme koşullarının etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonrasında kazıklı yayılı temellerin deplasman azaltıcı yönde tasarımı ile ilgili bir optimizasyon çalışması yapılarak elde edilen sonuçlar bu kısımda verilmiştir.

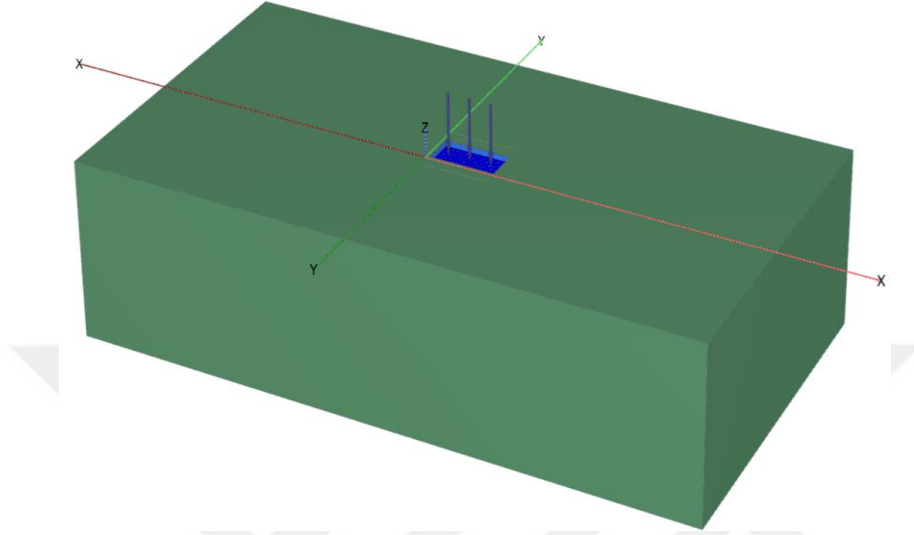
4.1. Yükleme Koşullarının Etkisi

Kazıklı yayılı temellerin tasarımında üst yapı yükünün etkilme şeklinin yayılı temel üzerindeki etkisini incelemek için iki farklı üst yapı modeli oluşturulmuştur. İlk analiz modelinde üst yapı yükünün düzgün yayılı yük olarak temele aktarılması hedeflenmektedir. İkinci analiz modeli ise yapının direkt olarak sonlu elemanlar yazılımında modellenmesinin yayılı temel davranışını nasıl etkilediğini irdellemektedir. Bu analizler öncelikle sadece yayılı temelin olduğu durum için, sonrasında ise kazıklı modellerden seçilen biri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kazıkların olduğu iki analiz modelinde seçilen kazık aralıkları, kazık çapları ve kazık boyları aynı olup sırasıyla 3.0 m, 1.0 m ve 18.0 m olarak belirlenmiştir.

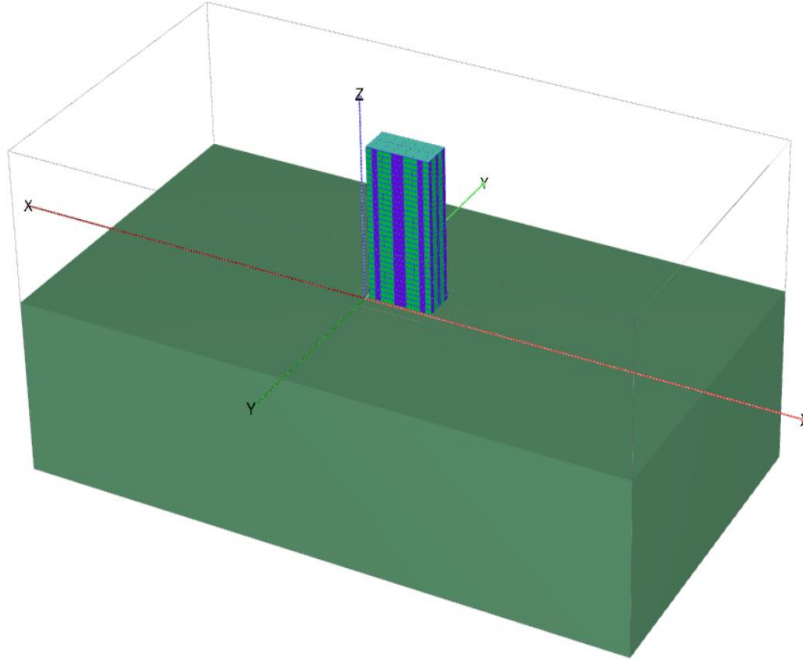
Plaxis 3D yazılımında oluşturulan yayılı yüklü ve üstyapı etkileşimli analiz modellerine ait görseller Şekil 4.1’de verilmiştir. Analizler sonucunda yayılı temelde meydana gelen yer değiştirmeler ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Analiz öncesinde temel üzerinde seçilen noktalardan alınan kesitlerden deplasman değerleri kaydedilmiş ve kazıklı model ile yapılmış analizler için de Şekil 4.3’te grafik olarak sunulmuştur. Ayrıca yayılı temel üzerinde oluşan deplasman değerleri Tablo 4.1’de ve oluşan moment değerleri Tablo 4.2’de özetlenmiştir.

Analizler sonucunda yayılı yüklü model ile üstyapı etkileşimli model kıyaslandığında yayılı temel davranışlarının birbirinden oldukça farklı olduğu görülmüştür. Yayılı yüklü modelde temelde meydana gelen deplasmanlar temelin merkez kısmında yoğunluk gösterirken üstyapı etkileşimli modelde temelin çevresinde daha fazladır. Kazıklarda meydana gelen momentler incelendiğinde yayılı yüklü modelde elde edilen

momentlerden %90 daha fazla olduğu görülmüştür. Dört analiz sonucu değerlendirildiğinde üstyapının modellenmesinin kazıklı yayılı temel tasarımını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.

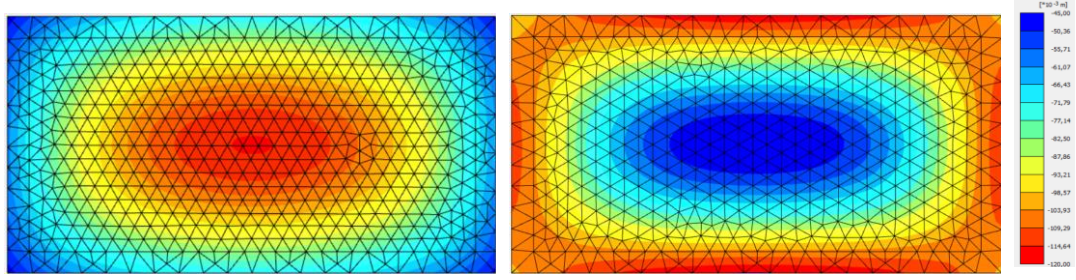


a) *Yayılı yüklü analiz modeli*



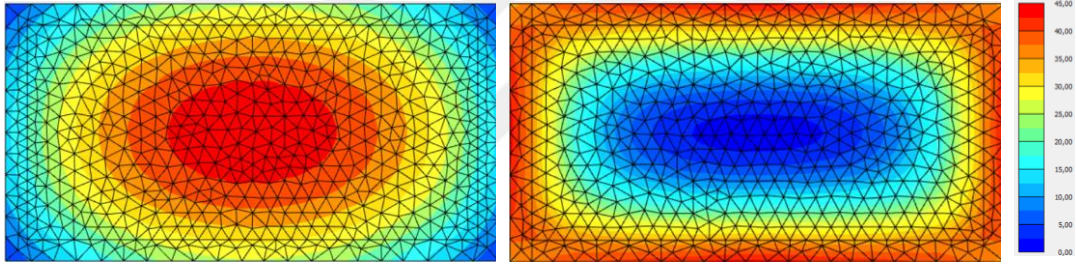
b) *Üstyapı etkileşimli analiz modeli*

Şekil 4.1. Yükleme koşullarının etkisi için hazırlanan analiz modelleri.



a) *Yayılı yüklü modelde temelde oluşan deplasmanlar (plan ve kesit görünüşü)*

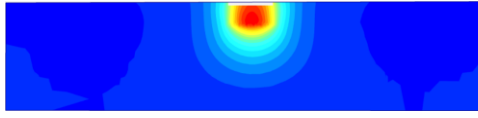
b) *Üstyapı etkileşimli modelde temelde oluşan deplasmanlar (plan ve kesit görünüşü)*



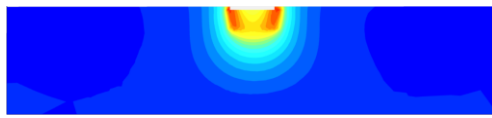
c) *Yayılı yüklü kazıklı modelde temelde oluşan deplasmanlar (plan ve kesit görünüşü)*

d) *Üstyapı etkileşimli kazıklı modelde temelde oluşan deplasmanlar (plan ve kesit görünüşü)*

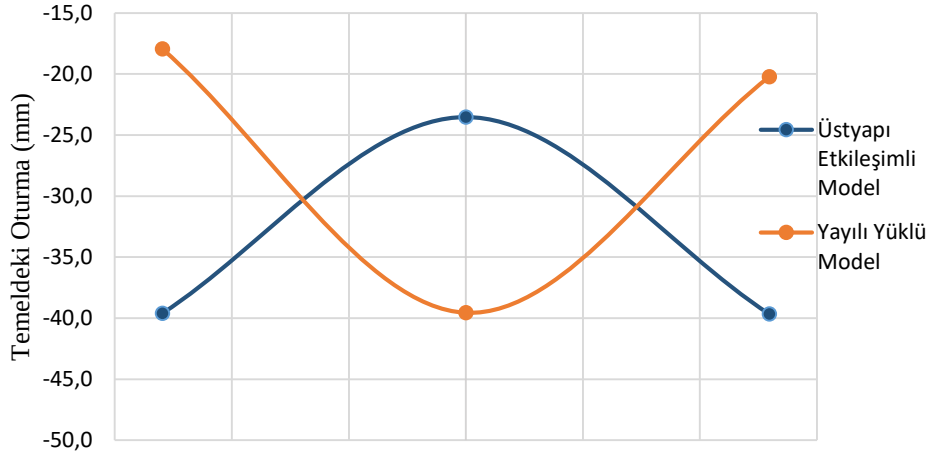
Şekil 4.2. Farklı yükleme koşullarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.



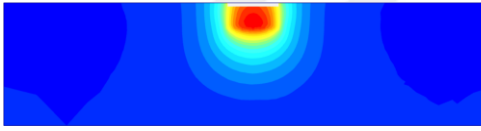
i. Yayılı yüklü kazıklı modelde A, E, I kesiti



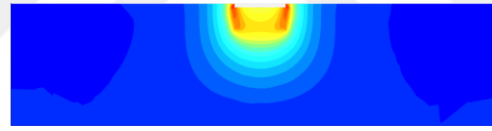
ii. Üstyapı etkileşimli kazıklı modelde A, E, I kesiti



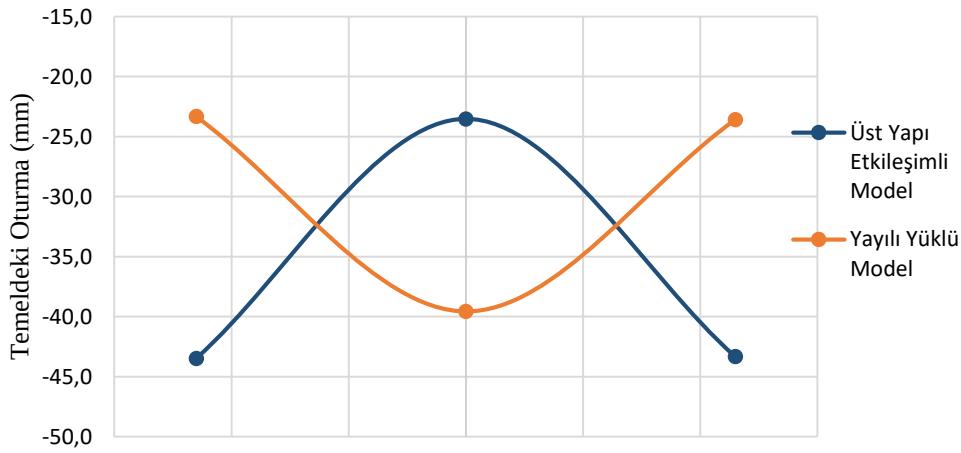
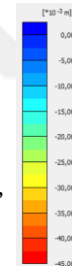
a) Temel üzerindeki A, E, I noktalarındaki deplasmanlar



i. Yayılı yüklü kazıklı modelde D, E, F kesiti



ii. Üstyapı etkileşimli kazıklı modelde D, E, F kesiti



b) Temel üzerindeki D, E, F noktalarındaki deplasmanlar

Şekil 4.3. Farklı yükleme koşullarında temelde oluşan deplasmanlar.

Tablo 4.1. Farklı yükleme koşullarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.

SONUÇLAR	Yayılı yüklü model	Üstyapı etkileşimli model	Yayılı yüklü kazıklı model	Üstyapı etkileşimli kazıklı model
Temeldeki Maks. Deplasman (mm)	125.40	120.40	39.56	43.48
A Noktasındaki Deplasman (mm)	40.47	98.29	17.94	39.60
B Noktasındaki Deplasman (mm)	65.86	119.40	29.68	43.17
C Noktasındaki Deplasman (mm)	33.01	102.10	18.08	39.68
D Noktasındaki Deplasman (mm)	48.54	105.00	23.33	43.47
E Noktasındaki Deplasman (mm)	125.40	44.46	39.55	23.53
F Noktasındaki Deplasman (mm)	49.77	114.00	23.58	43.33
G Noktasındaki Deplasman (mm)	31.88	102.70	18.03	39.72
H Noktasındaki Deplasman (mm)	66.06	120.40	29.81	43.28
I Noktasındaki Deplasman (mm)	33.02	102.60	20.22	39.66

Tablo 4.2. Farklı yükleme koşullarında yayılı temelde oluşan moment değerleri.

SONUÇLAR	Yayılı yüklü model	Üstyapı etkileşimli model	Yayılı yüklü model	Üstyapı etkileşimli model
Temelde Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	2610	4100	1530	1717
Kazıkta Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	-	-	2337	1227

4.2. Kazık Aralığının Etkisi

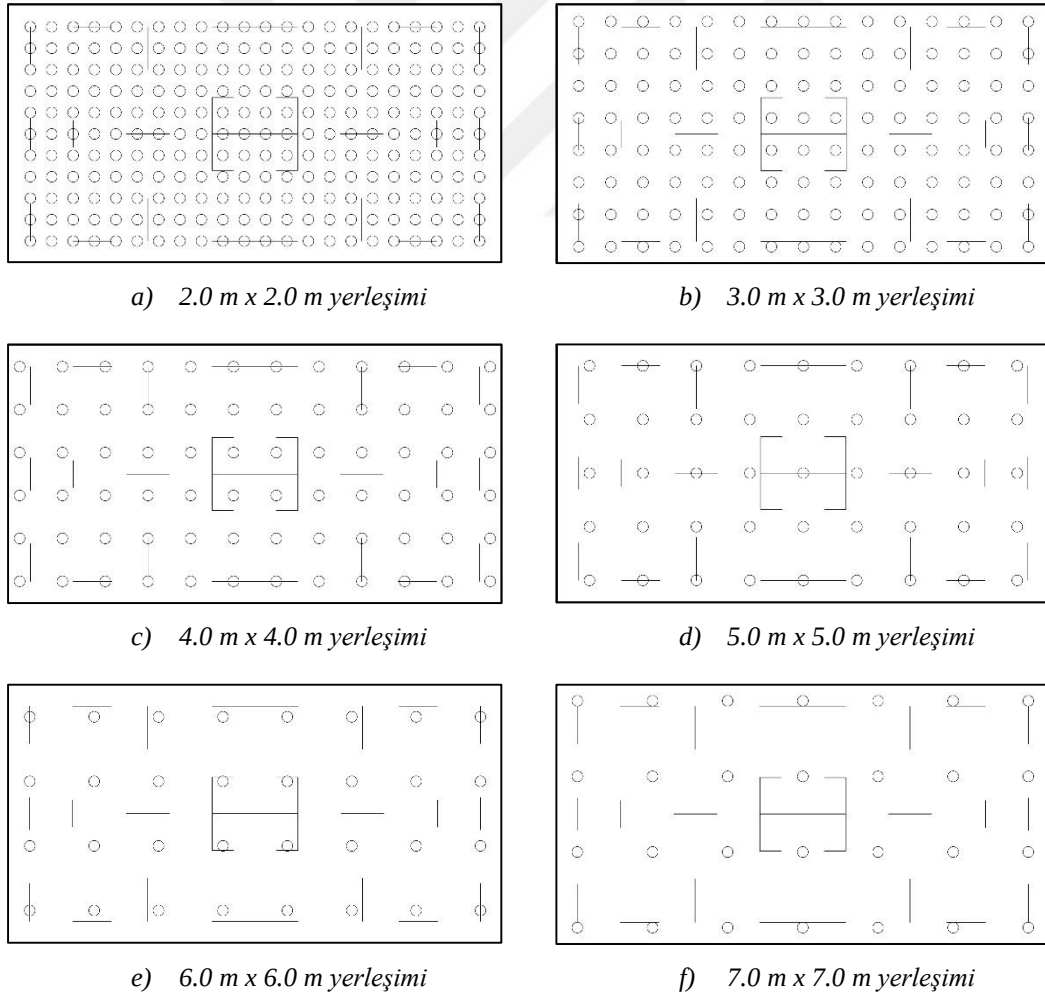
Çalışmanın bu aşamasında, üstyapı etkileşimli modelde kazıklı yayılı temellerin optimizasyonu araştırılmıştır. Kazık uzunlukları ve çapları sabit tutulmuş, değişen kazık aralıklarının yayılı temel davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kazık çapı 1.0 m ve kazık uzunluğu 18.0 m olarak seçilmiştir.

Üstyapı etkileşimli modelde kazıklı yayılı temeller için yayılı temel kalınlığı, kazık çapı ve kazık uzunluğu sabit tutulurken kazık yerleşimi değiştirilerek bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Her durumda, kazık düzeni x ve y eksenleri boyunca eşit

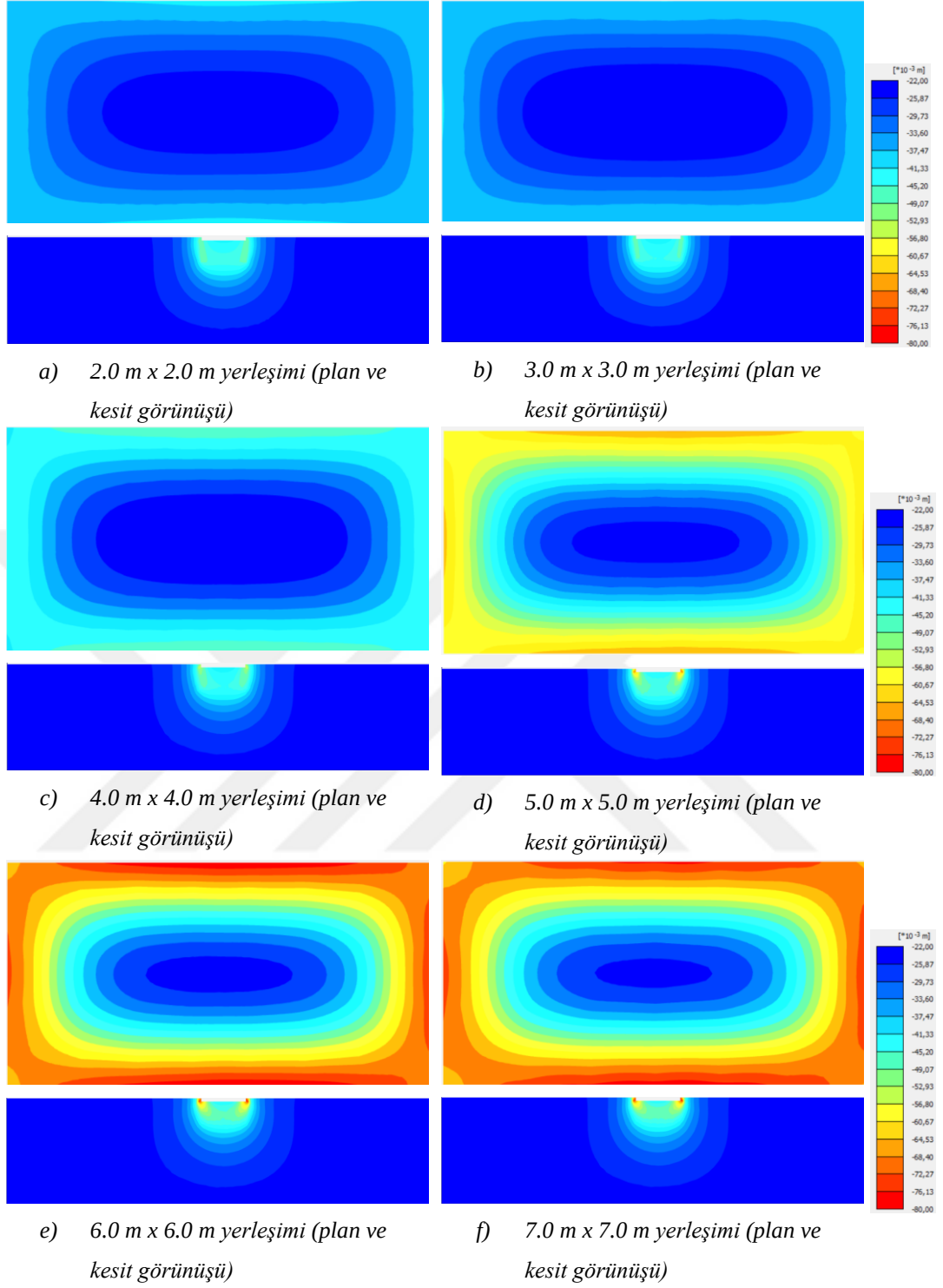
aralıklarla tasarlanmıştır. Analizler 2.0 m, 3.0 m, 4.0 m, 5.0 m, 6.0 m ve 7.0 m kazık aralıkları için gerçekleştirilmiş olup kazık yerleşim planı Şekil 4.4'te verilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda yayılı temelerde meydana gelen deplasmanların plan görünüşü ve D, E, F noktalarından alınan kesit görünüşü Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Kazık sayısı ve kazık aralıkları ile yayılı temelde meydana gelen deplasmanlar arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 4.6'da verilmiştir. Yapılan analizler neticesinde yayılı temelde meydana gelen deplasman değerleri Tablo 4.3'te ve meydana gelen moment değerleri Tablo 4.4'te sunulmuştur.

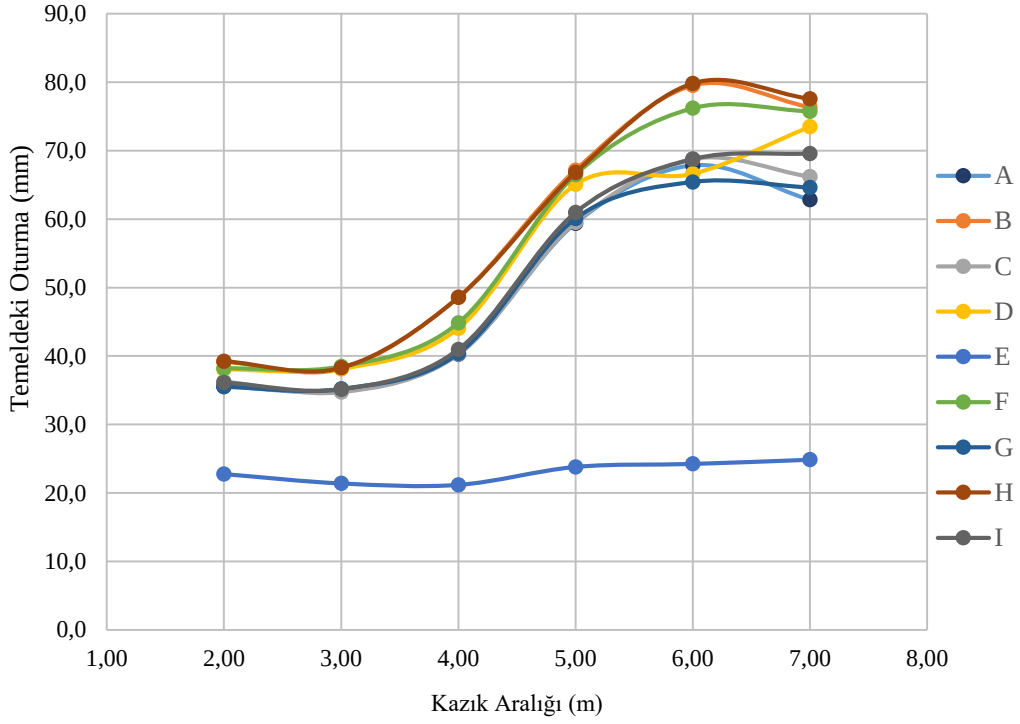
Analizler sonucunda kazık aralıklarının azalması ile yayılı temelde meydana gelen deplasmanların azaldığı görülmüştür. Bunun yanında artan kazık sayısı ile deplasman değerlerindeki azalış miktarında azalma görülmüştür. Buradan hareketle kazık aralıklarını azaltmanın olumlu etkisi olsa da bir noktadan sonra ekonomik olmayan bir çözüme götürdüğü tespit edilmiştir.



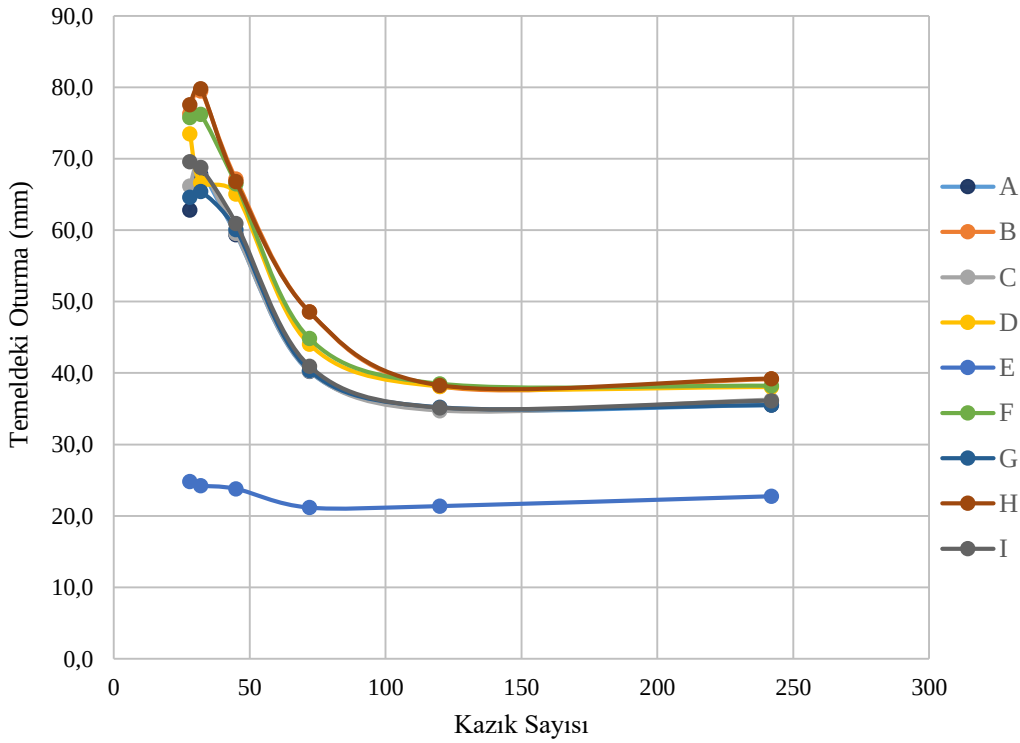
Şekil 4.4. Kazık aralıklarını gösteren kazık genel yerleşim plan görüntüsü.



Şekil 4.5. Farklı kazık aralıklarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.



a) Kazık aralığı ile temelde meydana gelen deplasmanlar arasındaki ilişki



b) Kazık sayısı ile temelde meydana gelen deplasmanlar arasındaki ilişki

Şekil 4.6. Kazık aralıklarındaki değişimin yayılı temel oturmalarına etkisi.

Tablo 4.3. Farklı kazık aralıklarında yayılı temelde oluşan deplasman değerleri (Kazık çapı 1.0 m, kazık uzunluğu 18.0 m).

ANALİZLER	SONUÇLAR					
Kazık Aralığı (m)	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
Kazık Sayısı	242	120	72	45	32	28
Temeldeki Maks. Deplasman (mm)	39.25	38.51	48.59	67.37	79.90	78.28
A Noktasındaki Deplasman (mm)	35.53	35.02	40.24	59.40	67.86	62.83
B Noktasındaki Deplasman (mm)	39.16	38.14	48.58	67.16	79.52	76.34
C Noktasındaki Deplasman (mm)	36.28	34.75	40.31	59.54	68.78	66.21
D Noktasındaki Deplasman (mm)	38.05	38.14	44.04	65.08	66.63	73.50
E Noktasındaki Deplasman (mm)	22.76	21.39	21.18	23.80	24.24	24.85
F Noktasındaki Deplasman (mm)	38.21	38.49	44.84	66.50	76.21	75.77
G Noktasındaki Deplasman (mm)	35.52	35.21	40.39	60.09	65.44	64.63
H Noktasındaki Deplasman (mm)	39.23	38.28	48.56	66.80	79.83	77.59
I Noktasındaki Deplasman (mm)	36.13	35.15	40.97	60.96	68.77	69.60

Tablo 4.4. Farklı kazık aralıklarında yayılı temelde oluşan moment değerleri.

ANALİZLER	SONUÇLAR					
Kazık Aralıkları (m)	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
Temelde Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	765	1699	2686	3164	4211	4175
Kazıkta Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	874	1227	1739	2456	3606	2753

4.3. Kazık Çapının Etkisi

Çalışmanın bu aşamasında kazık uzunlukları ve aralıkları sabit tutulmuş, değişen kazık çapının yayılı temel davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kazık uzunluğu 20.0 m ve kazık aralıkları 3.0 m olarak seçilmiştir. Kazık çapları ise 0.40 m, 0.65 m, 0.80 m, 1.00 m, 1.20 m, 1.50 m ve 2.00 m alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda kazık çapı ile yayılı temelde meydana gelen deplasmanlar arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.7’de verilmiştir. Yayılı temellerde meydana gelen deplasmanların plan görünüşü ve D, E, F noktalarından alınan kesit görünüşü Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Yapılan analizler neticesinde yayılı temelde meydana gelen deplasman değerleri Tablo 4.5’te ve meydana gelen moment değerleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

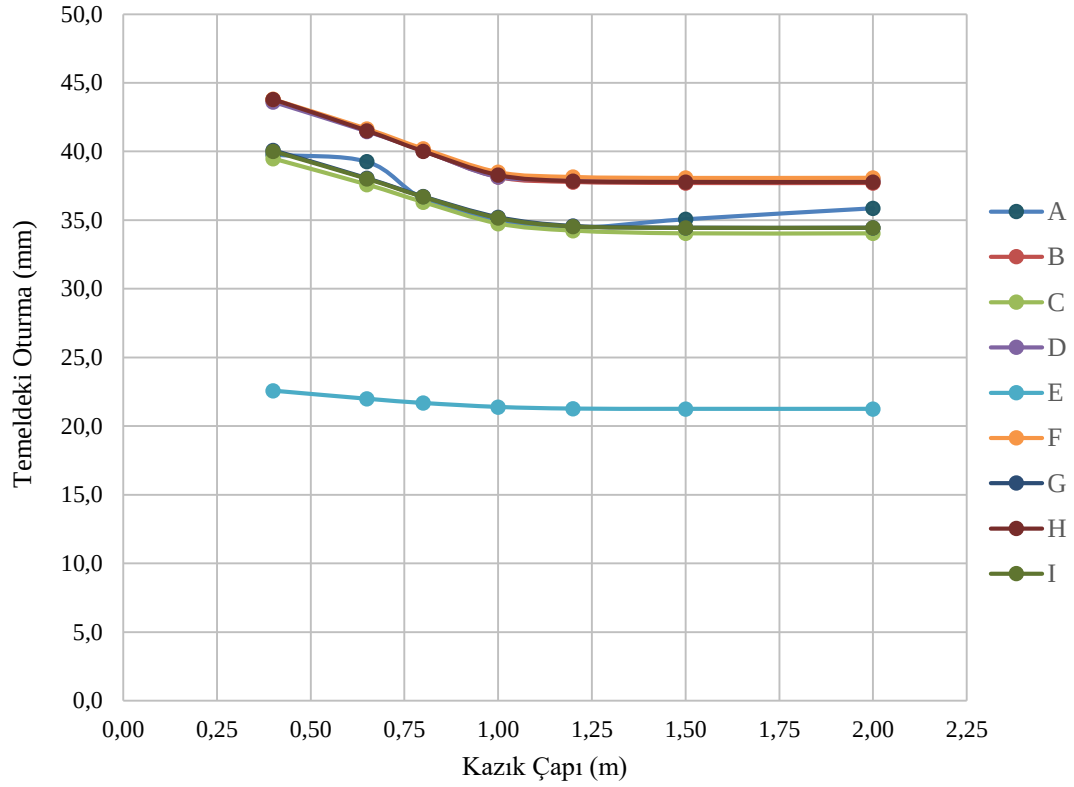
Analizler sonucunda kazık çapının artması ile yayılı temelde meydana gelen deplasmanların azaldığı görülmüştür. Bunun yanında bir noktadan sonra kazık çapındaki artışın deplasmanlar üzerindeki etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. Ekonomik bir mühendislik yaklaşımı için kazık çapının optimumda tutulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

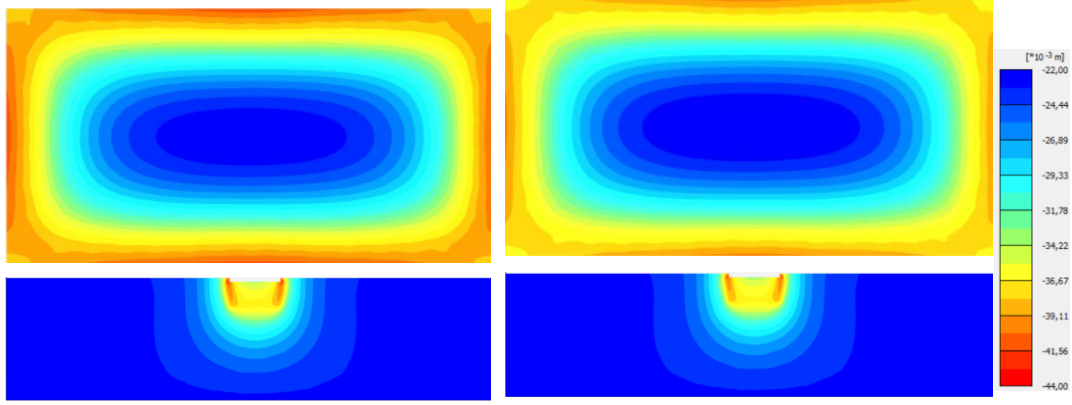
Tablo 4.5. Farklı kazık çaplarında yayılı temelde oluşan deplasman değerleri.

ANALİZLER	SONUÇLAR						
Kazık Çapları (m)	0.40	0.65	0.80	1.00	1.20	1.50	2.00
Temeldeki Maks. Deplasman (mm)	43.84	41.66	40.22	38.51	38.16	38.08	38.08
A Noktasındaki Deplasman (mm)	39.78	39.26	36.56	35.02	34.44	35.07	35.87
B Noktasındaki Deplasman (mm)	43.75	41.52	40.05	38.14	37.78	37.70	37.70
C Noktasındaki Deplasman (mm)	39.48	37.59	36.31	34.75	34.23	34.03	34.03
D Noktasındaki Deplasman (mm)	43.61	41.46	40.06	38.14	38.05	37.87	37.95
E Noktasındaki Deplasman (mm)	22.58	21.99	21.68	21.39	21.27	21.25	21.25
F Noktasındaki Deplasman (mm)	43.80	41.65	40.20	38.49	38.14	38.07	38.08
G Noktasındaki Deplasman (mm)	40.09	38.05	36.72	35.21	34.57	34.44	34.44
H Noktasındaki Deplasman (mm)	43.79	41.51	40.01	38.28	37.84	37.78	37.77
I Noktasındaki Deplasman (mm)	40.02	38.01	36.69	35.15	34.54	34.44	34.44

Tablo 4.6. Farklı kazık çaplarında yayılı temelde oluşan moment değerleri.

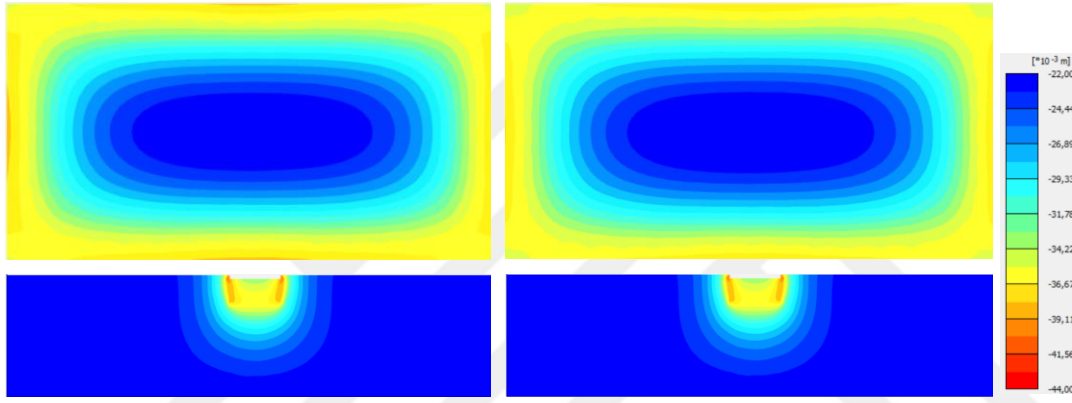
ANALİZLER		SONUÇLAR					
Kazık Çapları (m)	0.40	0.65	0.80	1.00	1.20	1.50	2.00
Temelde Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	1775	1735	1724	1699	1696	1694	1694
Kazıkta Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	1281	1188	1200	1227	1263	1282	1282

**Şekil 4.7.** Kazık çapındaki değişimin yayılı temel oturmalarına etkisi.



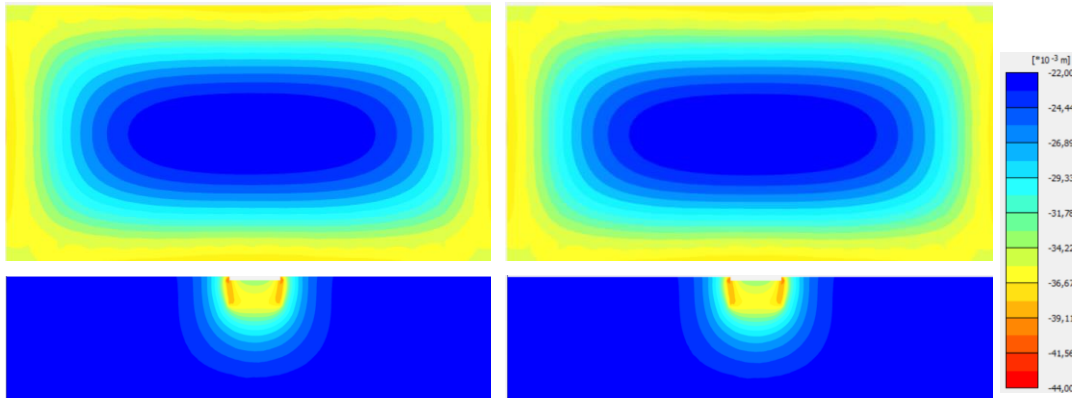
a) 0.65 m $\varnothing$ (plan ve kesit görünüşü)

b) 0.80 m $\varnothing$ (plan ve kesit görünüşü)



c) 1.00 m $\varnothing$ (plan ve kesit görünüşü)

d) 1.20 m $\varnothing$ (plan ve kesit görünüşü)



e) 1.50 m $\varnothing$ (plan ve kesit görünüşü)

f) 2.00 m $\varnothing$ (plan ve kesit görünüşü)

Şekil 4.8. Farklı kazık $\varnothing$ larında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.

4.4. Kazık Boyunun Etkisi

Çalışmanın bu aşamasında kazık çapları ve aralıkları sabit tutulmuş, değişen kazık boyunun yayılı temel davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada kazık çapı 1.0 m ve kazık aralıkları 3.0 m olarak seçilmiştir. Kazık boyları ise 8.0 m, 10.0 m, 12.0 m, 14.0 m, 16.0 m, 18.0 m, 20.0 m, 22.0 m, 24.0 m, 26.0 m, 28.0 m ve 30.0 m alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler neticesinde yayılı temelde meydana gelen moment değerleri Tablo 4.7’de ve meydana gelen deplasman değerleri Tablo 4.8’de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda yayılı temellerde meydana gelen deplasmanlar Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Kazık boyları ile yayılı temelde meydana gelen deplasmanlar arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.10’da verilmiştir.

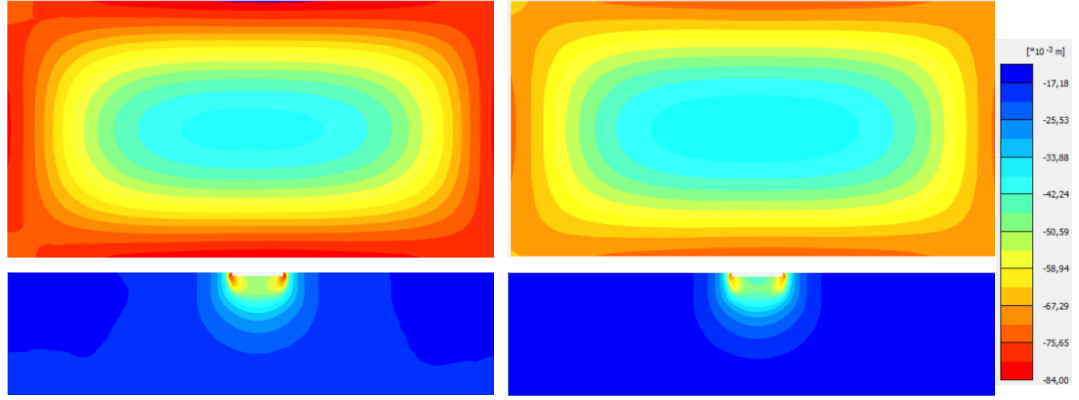
Analizler sonucunda kazık boyunun artması ile yayılı temelde meydana gelen deplasmanların azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde kazık boyunun artması ile yayılı temelde ve kazıklarda meydana gelen momentlerde azalma gözlemlenmiştir. Kazık boyunun artması ile deplasmanlar azalmakla birlikte bir noktadan sonra azalma hızı yavaşlamıştır. Bu sebeple kazıklı yayılı temel tasarımında kazık boyunun arttırılması ile her zaman ekonomik bir çözüme gidilmeyeceği sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.7. Farklı kazık boylarında yayılı temelde oluşan moment değerleri.

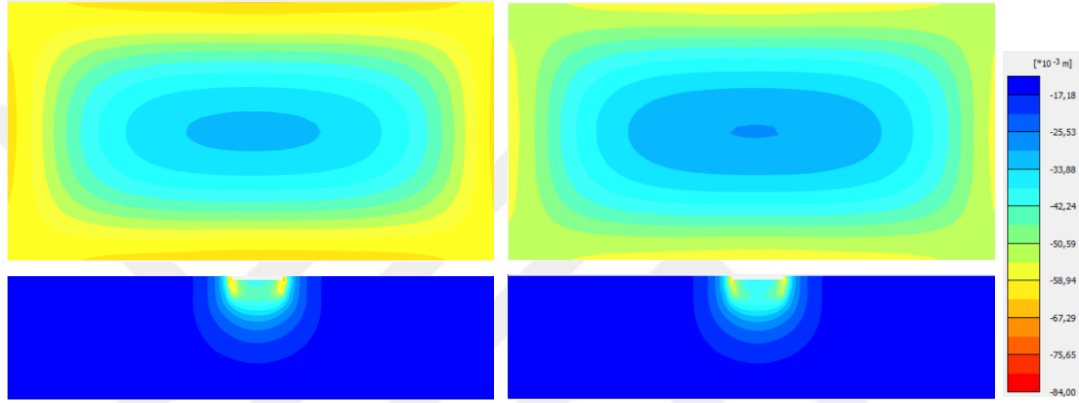
ANALİZLER	Kazık Boyları (m)	Temelde Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	Kazıkta Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)
SONUÇLAR	8	2965	2880
	10	2660	2480
	12	2294	2077
	14	2093	1768
	16	1866	1483
	18	1717	1227
	20	1699	1227
	22	1663	1259
	24	1670	1285
	26	1653	1258
	28	1669	1239
	30	1652	1162

Tablo 4.8. Farklı kazık boylarında yayılı temelde oluşan deplasman değerleri.

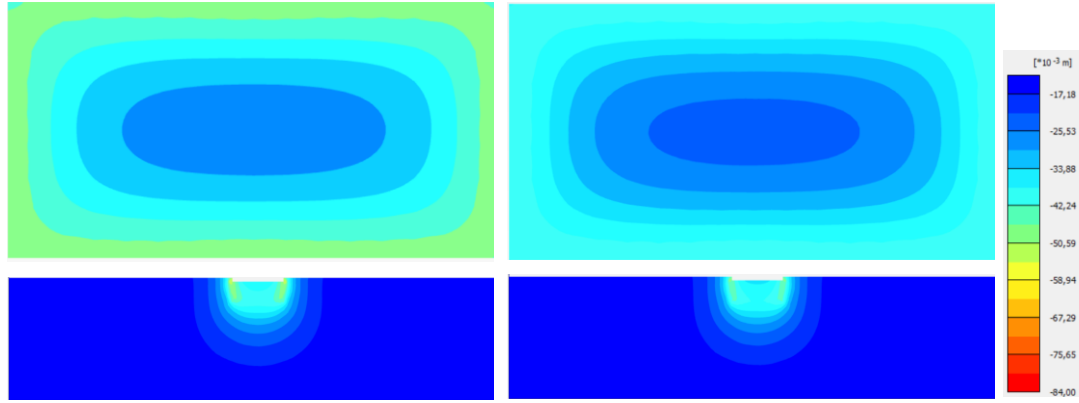
Kazık Boyları (m)	Temeldeki Maks. Deplasman (mm)	A Noktası Deplasman (mm)	B Noktası Deplasman (mm)	C Noktası Deplasman (mm)	D Noktası Deplasman (mm)	E Noktası Deplasman (mm)	F Noktası Deplasman (mm)	G Noktası Deplasman (mm)	H Noktası Deplasman (mm)	I Noktası Deplasman (mm)
8	84.57	74.48	84.25	76.44	81.25	38.21	82.83	75.93	83.75	76.36
10	74.84	65.77	74.10	67.82	70.43	34.75	73.65	67.05	74.40	68.10
12	65.86	58.87	65.80	60.20	63.98	31.50	64.71	58.29	64.72	59.25
14	57.21	52.01	56.96	56.83	55.71	28.64	56.77	52.34	57.45	51.65
16	49.91	45.16	49.58	45.16	49.46	25.98	49.37	45.80	49.86	45.50
18	43.48	39.60	43.17	39.68	43.47	23.53	43.33	39.72	43.28	39.66
20	38.51	35.02	38.14	34.75	38.14	21.39	38.49	35.21	38.28	35.15
22	35.21	31.48	34.67	31.87	34.84	19.53	35.20	32.90	34.65	31.73
24	32.46	28.89	32.10	29.12	32.45	17.81	32.37	28.89	31.87	29.03
26	30.54	27.05	30.03	27.11	30.40	16.38	30.52	27.01	29.70	27.10
28	28.85	25.84	28.35	25.57	28.72	15.07	28.82	25.77	28.23	25.60
30	27.55	24.07	27.01	24.31	27.37	13.99	27.54	24.27	27.05	24.48



a) 8.0 m boy (plan ve kesit görünüşü) b) 10.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)

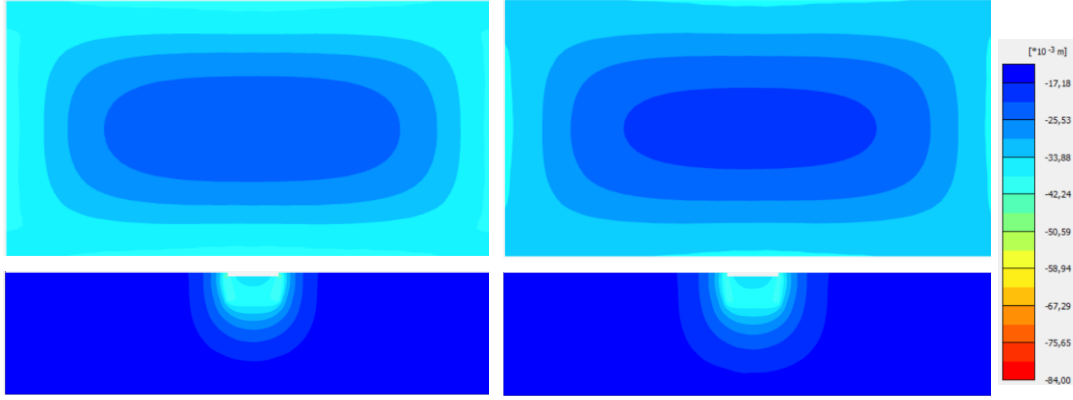


c) 12.0 m boy (plan ve kesit görünüşü) d) 14.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)



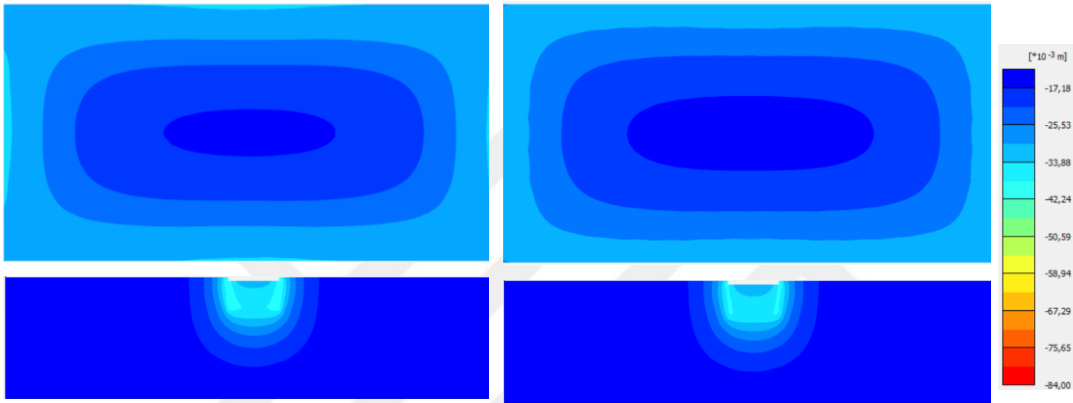
e) 16.0 m boy (plan ve kesit görünüşü) f) 18.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)

Şekil 4.9. Farklı kazık boylarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.



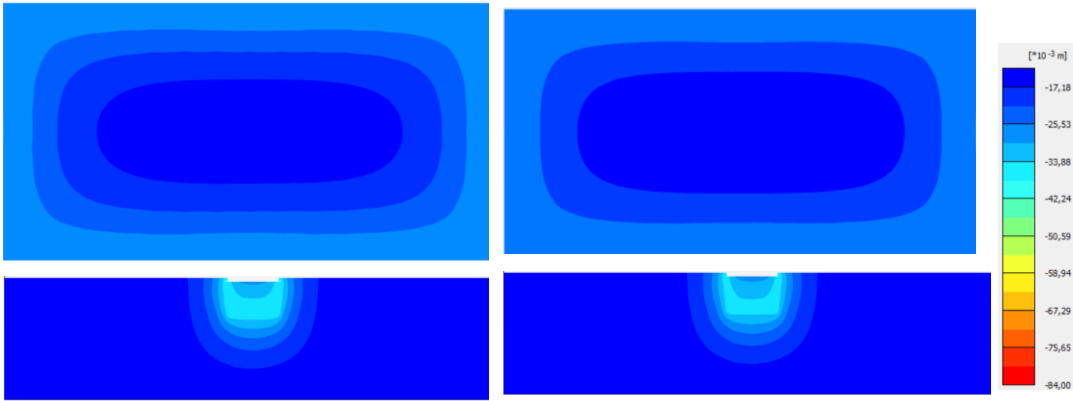
g) 20.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)

h) 22.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)



i) 24.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)

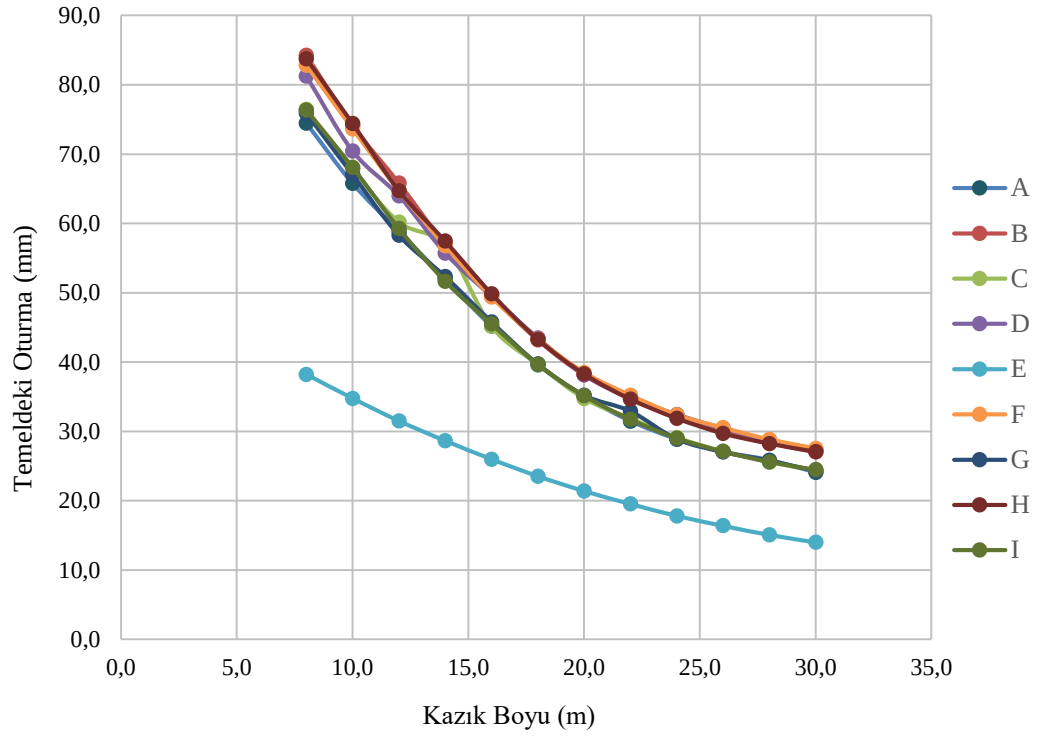
j) 26.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)



k) 28.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)

l) 30.0 m boy (plan ve kesit görünüşü)

Şekil 4.9. (Devam) Farklı kazık boylarında yayılı temelde oluşan deplasmanlar.



Şekil 4.10. Kazık boyundaki değişimin yayılı temel oturmalarına etkisi.

4.5. Optimizasyon Çalışmaları

Üstyapı etkileşimli modelde yayılı temelde meydana gelen deplasmanlar tespit edilmiş ve temelde meydana gelen deplasmanları azaltmak üzere kazık yerleşimi çalışmaları yapılmıştır. Buna yönelik olarak kıyaslama çalışması iki farklı model üzerinden yürütülmüştür. İlk modelde kazıklar eşit aralıklarda dizilerek temel altına yerleştirilmiş, ikinci modelde kazıklar kazıkların olmadığı durumda yayılı temelde meydana gelen deplasmanların en fazla olduğu kısımlara yerleştirilmiştir.

İlk durumda 120 adet, ikinci durumda ise 76 adet kazık kullanılarak deplasmanlar azaltılmaya çalışılmıştır. İki durum için sağlıklı bir kıyasalama yapabilmek adına kazık çapları ve boyları sabit tutularak sırasıyla 1.0 m ve 18.0 m olarak alınmıştır. Bunun yanısıra yapılan optimizasyon çalışmasında üstyapı etkileşimli model kullanılmıştır.

İlk modelde kazık aralıklarının tüm yayılı temel üzerinde eşit dağılım göstermesi sağlanarak kazık aralıkları 3.0 m alınmıştır. Yapılan analizlerdeki kazık yerleşimleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Yapılan analizler neticesinde yayılı temelde meydana gelen deplasmanlar Tablo 4.9’da, kazıklarda ve yayılı temelde meydana gelen momentler Tablo 4.10’da verilmiştir. İki durumda da yayılı temelde meydana gelen deplasmanlar ile kazık yerleşimi arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.13’te sunulmuştur.

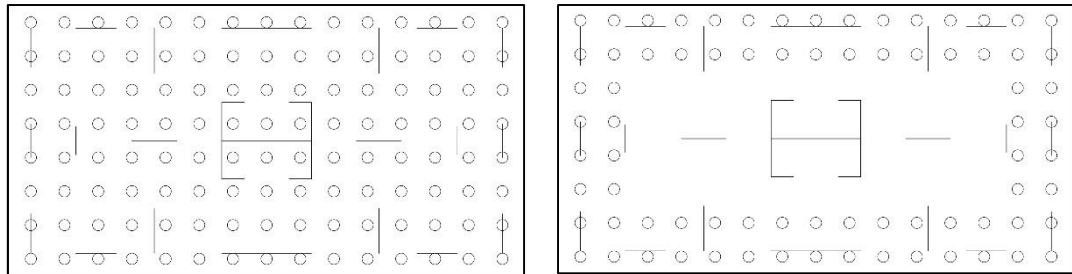
Yayılı temelde meydana gelen deplasmanlar incelendiğinde birinci durumda elde edilen deplasmanlar ile ikinci durumda elde edilen deplasmanlar birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Yayılı temel üzerinde işaretlenmiş noktalara göre oluşturulan temel oturma davranışı değerlendirildiğinde birinci ve ikinci durumda temel davranışının benzer olduğu, elde edilen momentlerin ise birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu iki analiz sonucu değerlendirildiğinde kazık sayısının yaklaşık %58 oranında azaltılmasıyla benzer deplasmanlar elde edilmiştir. Kazıklı yayılı temellerin deplasman azaltıcı tasarımında kazıkları tüm temel altına yerleştirmek yerine kazıkların deplasmanların fazla olduğu yerlere yerleştirilmesi daha ekonomik bir mühendislik çözümü olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.9. Farklı kazık yerleşimlerinde yayılı temelde oluşan deplasmanlar.

ANALİZLER	Genel Kazık Yerleşimi	Lokal Kazık Yerleşimi
Temeldeki Maks. Deplasman (mm)	43.48	43.76
A Noktasındaki Deplasman (mm)	39.60	38.87
B Noktasındaki Deplasman (mm)	43.17	42.87
C Noktasındaki Deplasman (mm)	39.68	40.00
D Noktasındaki Deplasman (mm)	43.47	41.84
E Noktasındaki Deplasman (mm)	23.53	25.20
F Noktasındaki Deplasman (mm)	43.33	43.74
G Noktasındaki Deplasman (mm)	39.72	41.20
H Noktasındaki Deplasman (mm)	43.28	43.20
I Noktasındaki Deplasman (mm)	39.66	40.42

Tablo 4.10. Farklı kazık yerleşimlerinde yayılı temelde oluşan moment değerleri.

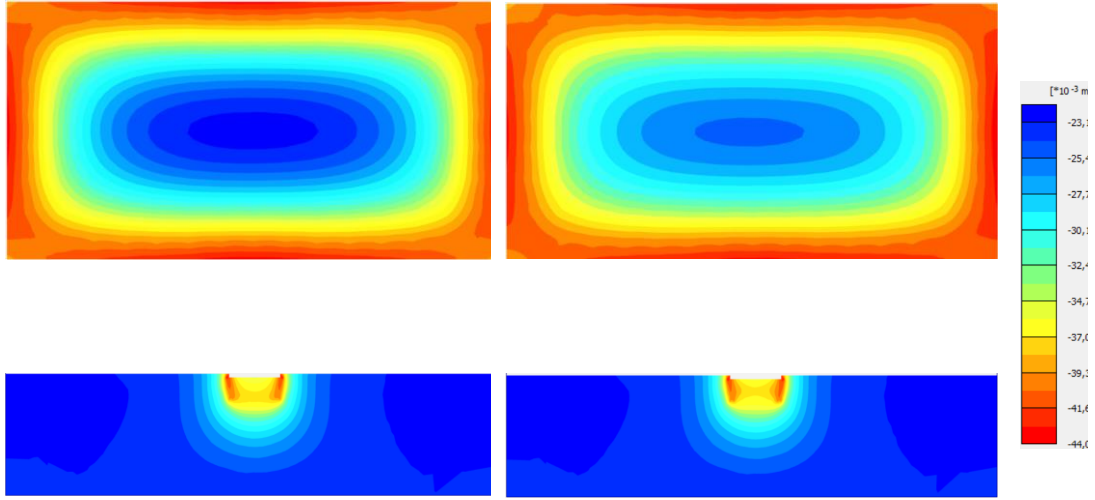
SONUÇLAR	Genel Kazık Yerleşimi	Lokal Kazık Yerleşimi
Temelde Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	1717	1725
Kazıkta Meydana Gelen Maks. Moment (kNm/m)	1227	1227



a) Genel yerleşim

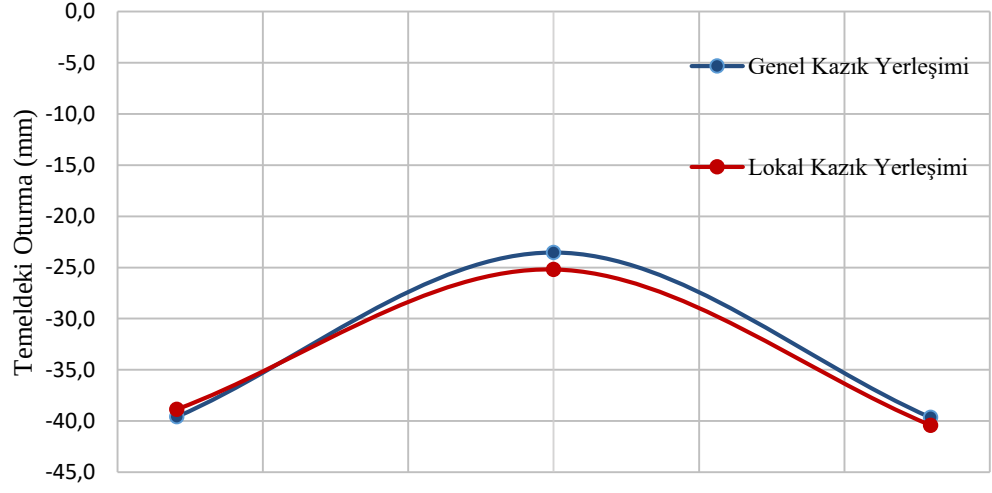
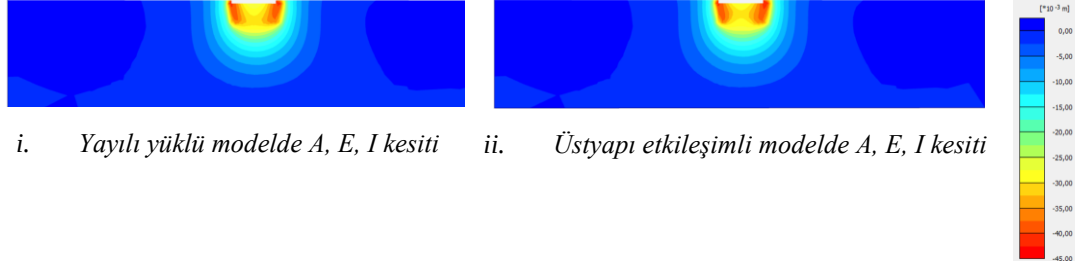
b) Lokal yerleşim

Şekil 4.11. Farklı kazık yerleşimlerini gösteren kazık genel yerleşim planı.

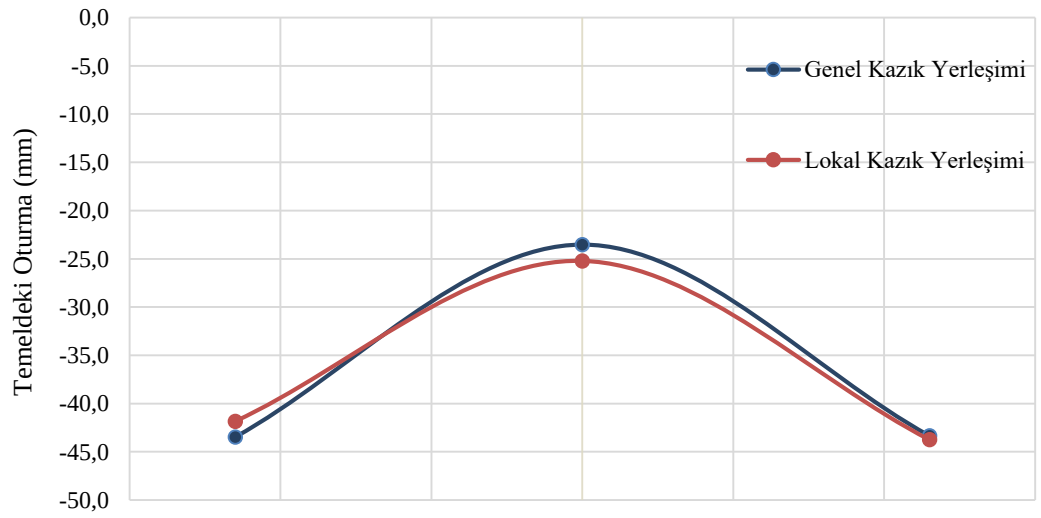
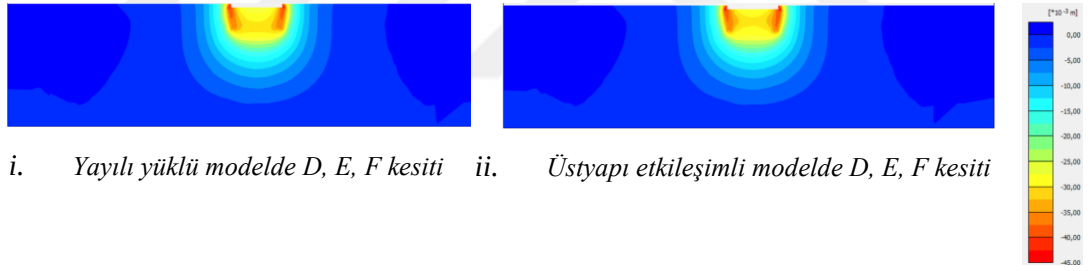


a) Genel yerleşim (plan ve kesit görünüşü) b) Lokal yerleşim (plan ve kesit görünüşü)

Şekil 4.12. Farklı kazık yerleşimlerinde yayılı temelde oluşan deplasmanlar.



b) Temel üzerindeki A, E, I noktalarındaki deplasmanlar



b) Temel üzerindeki D, E, F noktalarındaki deplasmanlar

Şekil 4.13. Farklı kazık yerleşimlerinde temelde oluşan deplasmanlar.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada kazıklı yayılı temellerin tasarımında etkili olan temel parametrelerin temel davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle üstyapı yükleme koşullarının modellenme biçiminin, kazık aralığının, kazık çapının ve kazık boyunun temel deformasyonları ve moment dağılımı üzerindeki etkileri Plaxis 3D analizleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kazıklı yayılı temel tasarımında hem yapısal performans hem de ekonomik açıdan önemli çıkarımlar sağlamaktadır.

Üstyapı yükleme koşullarının incelendiği analizlerde, üstyapının doğrudan sonlu elemanlar modeline dahil edilmesinin temel davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. Yayılı yüklü modelde temelde oluşan deplasmanlar merkezde yoğunlaşırken, üstyapı etkileşimli modelde deplasmanların temelin çevresinde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kazıklarda meydana gelen moment değerleri ise üstyapı etkileşimli modelde yaklaşık %90 oranında azalmıştır. Bu farklılıklar, üstyapı-temel-zemin sisteminin gerçekçi bir şekilde modellenmesinin tasarımda ihmal edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Kazık aralığının yayılı temel davranışına etkisi değerlendirildiğinde, kazık aralıklarının küçülmesinin temel deplasmanlarını azalttığı, ancak bu azalışın belli bir değerden sonra sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Özellikle 2.0 m'den 4.0 m'ye kadar olan aralık artışlarında deformasyonlarda önemli değişiklikler görülsede, 5.0 m ve üzerindeki aralıklarda azalma hızının yavaşladığı saptanmıştır. Bu durum, kazık sayısının artmasıyla yapısal faydanın azaldığını ve ekonomik açıdan optimum aralıkların belirlenmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Kazık çapının artırılması yayılı temelde oluşan deplasmanların azalmasına katkı sağlasa da, belirli bir noktadan sonra bu azalma etkisi önemli ölçüde düşmektedir. Bu durum, çap büyüklüğünün artırılmasının sınırsız fayda sağlamadığını ve ekonomik açıdan optimal bir çap seçiminin daha uygun olduğunu göstermektedir.

Kazık boyunun etkileri incelendiğinde ise, kazık boyunun artmasıyla temel deformasyonlarının ve momentlerin azaldığı görülmüştür. Ancak kazık boyunun bir

noktadan sonra artırılmasıyla sağlanan azalma sınırlı kalmış ve bu artış ekonomik bir avantaj sağlamamıştır. Bu nedenle kazık boyu seçiminde zemin koşulları ve maliyet dengesi dikkate alınmalıdır.

Kazık yerleşimi optimizasyonunda ise, kazıkların tüm temel altına eşit aralıklarla dağıtılması ile sadece deplasmanların yüksek olduğu lokal bölgelerde yerleştirilmesi durumları karşılaştırılmıştır. Lokal yerleşimde kazık sayısının %58 oranında azalmasına rağmen, temel deformasyonları ve moment değerleri genel yerleşimle oldukça yakın bulunmuştur. Bu sonuç, mühendislik açısından daha az kazık kullanılarak ekonomik ve etkin çözümler geliştirilebileceğini göstermektedir.

Genel olarak, analizler kazıklı yayılı temel tasarımında parametrelerin optimizasyonunun kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Üstyapı etkileşimi doğru şekilde modellenmeden yapılan analizler, temel davranışını tam yansıtamayacağı için sonuçlar tasarım için yanıltıcı olabilir. Kazık geometrisi ve yerleşimi konusunda ise, hem yapısal performans hem de maliyet açısından optimal tasarım için detaylı analizlerin yapılması gereklidir.

Çalışmada elde edilen bulgular, özellikle kazık aralığı, çap ve boyunun belirli optimum değerlerinin bulunmasının yapısal güvenlik ve ekonomik verimlilik açısından vazgeçilmez olduğunu göstermektedir. Bu parametrelerin aşırı artırılması, yapısal açıdan sınırlı fayda sağlarken maliyetleri gereksiz yere yükseltmektedir. Kazık yerleşimi optimizasyonu ise, kazık sayısının azaltılmasıyla benzer performansın korunabileceğini ortaya koyarak tasarımda kaynakların etkin kullanımına olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, kazıklı yayılı temel konseptinin uygun olduğu koşullarda üstyapı-temel-zemin etkileşiminin ayrıntılı modellenerek kazık parametrelerinin optimize edilmesinin ve kazıkların kritik bölgelere odaklanılarak yerleştirilmesinin ekonomik ve yapısal açıdan en uygun tasarım yaklaşımları olduğu söylenebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Azim, O. A., Abdel-Rahman, K., & El-Mossallamy, Y. M. (2020). Numerical investigation of optimized piled raft foundation for high-rise building in Germany. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0258-4>.
- Ali, A. M., Karkush, M. O., & Al-Jorany, A. N. (2023). Numerical modeling of connected piled raft foundation under seismic loading in layered soils. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1), 20220250. <https://doi.org/10.1016/j.jmbm.2023.20220250>
- Arslan, E., Kayaturk, D., Durmus, M. R., Bagca, I., Imamoglu, T., & Sert, S. (2024). The role of utilizing load in different cases while numerical modeling of multi-story buildings on alluvial stratum: A comparison study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-07556-9>
- Arslan, U., Quick, H., Moormann, C., & Reul, O. (1999). Geotechnische in-situ Messungen an Hochhausgründungen und baubegleitende Qualitätssicherungsmaßnahmen. In *Hochhäuser Darmstädter Statik-Seminar*.
- Bentley Systems. (2023). PLAXIS Reference Manual (2023.1 ed.). Bentley Systems Incorporated.
- Brown, P. T., & Wiesner, T. J. (1975). The behaviour of uniformly loaded piled strip footings. *Soils and Foundations*, 15(4), 13-21. <https://doi.org/10.3208/sandf.15.13>
- Brown, P. T., Poulos, H. G., & Wiesner, T. J. (1976). *Piled raft foundation design*. University of Sydney.
- Clancy, P., & Randolph, M. F. (1993). An approximate analysis procedure for piled raft foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 17(12), 849-869. <https://doi.org/10.1002/nag.1610171204>
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of foundation engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Clancy, P., & Randolph, M. F. (1993). An approximate analysis procedure for piled raft foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 17(12), 849-869.
- Davis, E. H., & Poulos, H. G. (1972). Rate of settlement under two-and three-dimensional conditions. *Geotechnique*, 22(1), 95-114. <https://doi.org/10.1680/geot.1972.22.1.95>
- El-Mossallamy, Y. (2004, June). The interactive process between field monitoring and numerical analyses by the development of piled raft foundation. In *Geotechnical Innovation, International Symposium, University of Stuttgart, Germany* (pp. 455-474).

- Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C., & Reul, O. J. D. G. (1998). Piled raft foundation: Interaction between piles and raft. *Darmstadt Geotechnics*, 4(2), 279-296.
- Katzenbach, R., Arslan, U., Gutwald, J., Holzhauser, J., & Quick, H. (1999). *Soil-structure-interaction of the 300 m high Commerzbank tower in Frankfurt am Main: Measurements and numerical studies*. In Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 1081–1084).
- Katzenbach, R., Arslan, U., & Moormann, C. (2000). 13. Piled raft foundation projects in Germany. In *Design applications of raft foundations* (p. 323).
- Malviya, D. K., Ansari, A., & Samanta, M. (2023). Settlement and load sharing behavior of piled raft foundation: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(11), 305. <https://doi.org/10.1007/s41040-023-00183-w>
- Poulos, H. G. (1991). Analysis of piled strip foundations. In *International conference on computer methods and advances in geomechanics* (Vol. 7, pp. 183-191).
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1972). The analysis of pile raft systems. *Australian Geomechanics Journal*, 2(1), 21-27. <https://doi.org/10.7146/agj.v2i1.2334>
- Poulos, H. G. (1994). An approximate numerical analysis of pile–raft interaction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 18(2), 73-92. <https://doi.org/10.1002/nag.1610180203>
- Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundations: Design and applications. *Geotechnique*, 51(2), 95-113. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.2.95>
- Poulos, H. G., Small, J. C., & Chow, H. (2011). Piled raft foundations for tall buildings. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 42(2), 78-84.
- Prakoso, W. A., & Kulhawy, F. H. (2001). Contribution to piled raft foundation design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1), 17-24. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:1(17))
- Randolph, M. F. (1983). Design of piled foundations. *Cambridge Univ. Eng. Dept., Res. Rep. Soils TR143*.
- Randolph, M. F. (1994). Design methods for pile group and piled rafts. In *Proc. 13th Int. Conf. on SFE, 1994* (Vol. 5, pp. 61-82).
- Reul, O., & Randolph, M. F. (2003). Piled rafts in overconsolidated clay: Comparison of in situ measurements and numerical analyses. *Geotechnique*, 53(3), 301-315. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.3.301>
- Sert, S. (2003). Alüvyon ortamda kazıklı yayılı temellerin üç boyutlu analizi, Doktora tezi, 137 sayfa, Sakarya Üniversitesi FBE, Sakarya.
- Singh, G. G., Tiwari, R. P., & Kumar, V. (2024). Parametric study of combined piled raft foundation for uniformly distributed surcharge over raft top surface. *Sādhanā*, 49(4), 291. <https://doi.org/10.1007/s12046-024-02032-5>
- Smith, I. M. (2014). *Programming the Finite Element Method* (5th ed.). Wiley.

Tarenia, K., Patra, N. R., Rajesh, S., & Mondal, A. (2024). Long-term response of piled-raft foundations subjected to incremental compressive loads. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 5785-5816. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-07667-4>





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Damla KILIÇ

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2021, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Geoteknik Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Eylül 2021 - Aralık 2021 tarihleri arasında Sakarya Zemin Ltd. Şti. İnşaat Mühendisi olarak çalışmıştır.
- Mayıs 2023 – Haziran 2024 tarihleri arasında PROMER Müşavirlik ve Mühendislik Şirketi Güçlendirme Departmanı'nda İnşaat Mühendisi olarak çalışmıştır.
- Temmuz 2024 - Eylül 2025 tarihleri arasında BS Uluslararası Mühendislik Müşavirlik Şirketi Geoteknik Departmanı'nda İnşaat Mühendisi olarak çalışmıştır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kılıç D., Sert S., Arslan E. 2024. Optimization of Piled Raft Foundations with Superstructure Interaction, *Ege 12.Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, İzmir, Türkiye.