

ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ YARDIMIYLA KAZIKLI RADYE TEMELLERİN PERFORMANSININ PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

PARAMETRIC STUDY TO INVESTIGATE THE PERFORMANCE OF PILED RAFT FOUNDATIONS USING 3D FINITE ELEMENT METHOD

Batuhan ÇOLAK¹, Aslı YALÇIN DAYIOĞLU², Mustafa HATİPOĞLU³,

ÖZET

Son yıllarda yüksek binalar için tasarım aşamasında genellikle bina yükünün tamamının kazıklar tarafından taşındığı varsayılan geleneksel kazıklı temellerden ziyade kazık, radye ve zeminin bir sistem olarak ele alındığı kazıklı radye temeller tercih edilmektedir. Bu temel sisteminin davranışı, temelin yapısal elemanlarının boyutları ve zemin koşulları gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada, Frankfurt'ta bulunan Torhaus binasının kazıklı radye temel sistemi bir sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis 3D'de modellenmiştir. Temel sisteminin performansını belirlemek için yapı elemanının boyutları, sayısı ve yerleşiminin temel davranışı üzerindeki etkileri parametrik bir çalışma ile incelenmiştir. Yapılan analizler radye kalınlığının artışı, maksimum oturmaları ve maksimum momentleri artırırken farklı oturmaları düşürdüğünü göstermiştir. Ayrıca kazık boyunun, kazık çapına kıyasla temelin oturma davranışı üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde Torhaus binasının orijinal temel sisteminin tasarımının, yapılan parametrik çalışma sınırları dahilinde güvenilir ve ekonomik bir performans sunduğu, bununla beraber bulunduğu şartlar dahilinde uygun bir temel sistemi olduğu anlaşılmaktadır. Ancak yine de kazıklar için kullanılan beton hacmini değiştirmeden temel sistemini iyileştirmenin mümkün olduğu ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kazıklı radye temel, 3B sonlu elemanlar analizi, parametrik çalışma

ABSTRACT

In recent years, piled raft foundations, based on the principle that soil, raft and the piles interact to form a system, are often preferred for high-rise buildings at design stage rather than conventional pile foundations where the total superstructural load is assumed to be

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, colakb20@itu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, yalcinas@itu.edu.tr (Sorumlu yazar)

³ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, hatipoglu1@itu.edu.tr

transferred to underlying piles. The behavior of the piled raft foundation system is affected by numerous factors such as dimensions, number and layout of the structural elements as well as soil conditions. In this study, the piled raft foundation system of the Torhaus building in Frankfurt was modeled in Plaxis 3D, a finite element software. In order to examine the performance of the foundation system, the effects of structural element's dimensions, number and layout on the foundation's behavior were examined via a parametric study. The analyzes showed that increasing the raft thickness increased the maximum settlements and maximum bending moments, however, the differential settlements are lowered. It has also been observed that the length of the pile has a greater effect on the settlement behavior of the foundation than the diameter of the pile. When all the results were examined, it was concluded that the original foundation system of the Torhaus building performed quite well in all cases. However, it has been proven that it is possible to improve the foundation system without changing the volume of concrete used for piles .

Keywords: *Piled raft foundation, 3D Finite element analysis, parametric study*

1. GİRİŞ

Geleneksel kazıklı temel tasarımında, yüklerin tamamının kazıklar tarafından zemine aktarıldığı varsayılır. Bu durum kazık sayısında ekonomik sayılmayacak bir artışa neden olur (Cooke vd., 1981). Geleneksel kazıklı temel tasarımından farklı olarak, kazıklı radye temel tasarımında, radye temelin yük taşıma kapasitesi de sisteme dahil edilir (Katzenbach vd., 1997). Bu sayede çok daha ekonomik ve efektif bir tasarım yapılabilmektedir. Moyes ve Poulos (2005), kazıklı radye temel tasarımının geleneksel kazıklı temel tasarımına oranla, hiçbir performans kaybı olmaksızın %30 daha ekonomik olduğunu gösteren bir çalışma yapmıştır.

Kazıklı radye temel sistemlerinde binalardan gelen yükleri kısmi olarak kazıklar vasıtasıyla derinlerdeki yüksek taşıma kapasiteli zeminlere iletirken, büyük boyutlu radyeler yüklerin bir kısmını içinde bulunduğu zemine aktarırlar. Bu tür sistemler radye-zemin, radye-kazık, kazık-kazık ve kazık-zemin gibi etkileşimleri içerirler (El Sawwaf vd., 2010). Bu karmaşık etkileşimlerden ötürü kazıklı radye temel davranışını incelemeye sonlu elemanlar gibi üç boyutlu sayısal modelleme yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Poulos (2001) kil zeminlerde kazıklı radye temel analizi için üç boyutlu sayısal modelleme yönteminin en güvenilir yöntem olduğunu savunmuştur. Buna uygun olarak, kazıklı radye temel davranışını incelemek için yapılan çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi sıklıkla kullanılmıştır (Reul vd., 2003; Wulandari vd., 2015; Bhaduri vd., 2020; Halder vd., 2022).

Kazıklı radye temellerin davranışının radye kalınlığı, kazık çapı, kazık uzunluğu, kazık adedi, kazık yerleşimi vb. gibi faktörlere bağlı olduğu bilinmektedir. Literatürde kazıklı radye temel davranışını inceleyen birçok parametrik çalışma mevcuttur (Seo vd., 2004; Reul vd., 2004; Bisht vd., 2012; Oh vd., 2008; Chong vd., 2021). Bu çalışmada, kazık hacmi (kullanılan beton hacmi) veya toplam kazık kesit alanı gibi parametreler sabit tutularak kazıklı radye temel sisteminin performansı incelenmiştir. Kazıkların boyu, çapı, adedi ve yerleşimi gibi parametreler değiştirilerek, 1986'da yapımı tamamlanmış olan ve halihazırda kullanımı süren Torhaus binasının orijinal temel sisteminin tasarımının optimize edilmesi amaçlanmıştır.

2. MODEL VE YÖNTEM

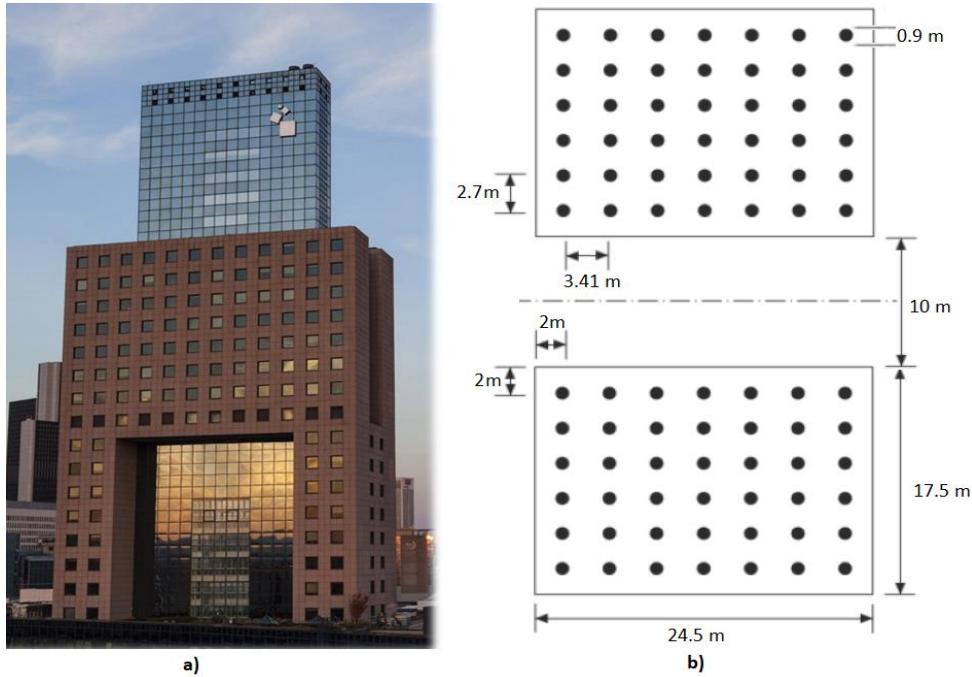
2.1. Yapı hakkında bilgi

Parametrik çalışmada kullanılan temel sistemi, Frankfurt'ta bulunan Torhaus binasına aittir. 130m yüksekliğindeki bina 1983-1986 yılları arasında yapılmıştır. Almanya'nın temel sistemi kazıklı radye temel olarak dizayn edilmiş ilk yapısıdır. Temel sistemi, birbirinin aynısı olan ve aralarında 10m bulunan iki ayrı kazıklı radye temelden oluşmaktadır. Her bir temel orijinalinde 0.9m çaplı 20m uzunluğunda 42 kazığa ve 17.5m x 24.5m x 2.5m boyutlu radye'ye sahiptir. Toplam yük her bir teme 200 MN gelecek şekilde yayılı yük olarak uygulanmıştır. Temel yüzeyden 5.5m aşağıda olup, su seviyesinin hemen üstündedir (Reul vd., 2003).

Temelin ve yapının görünüşü Şekil 1'de, temelin yapısal elemanlarının özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Modellemede kullanılan yapısal elemanlara ait parametreler (Reul vd., 2003)

Yapı Adı	Radye			Kazıklar		
	γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν	γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν
Torhaus	25	34	0.2	25	23.5	0.2



Şekil 1. a) Torhaus binasına ait görsel b) Binaya ait kazıklı radye temel sistemi

Modellemede zemin profili için 8 metre kum tabakası ardından 92 metrelik Frankfurt kil tabakası tanımlanmıştır. Katzenbach vd., (2016) kohezyonsuz zeminler için Mohr-Coulomb zemin modelinin uygun olabileceğini belirtirken, özellikle killi zeminler başta olmak üzere rijitlik parametreleri derinliğe bağlı değişen zeminlerde pekleşen zemin (Hardening Soil-HS) modelinin kullanılmasını önermiştir. Buna uygun olarak modellerde zemin parametreleri tanımlanırken pekleşen zemin modeli kullanılmıştır. Zemin özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

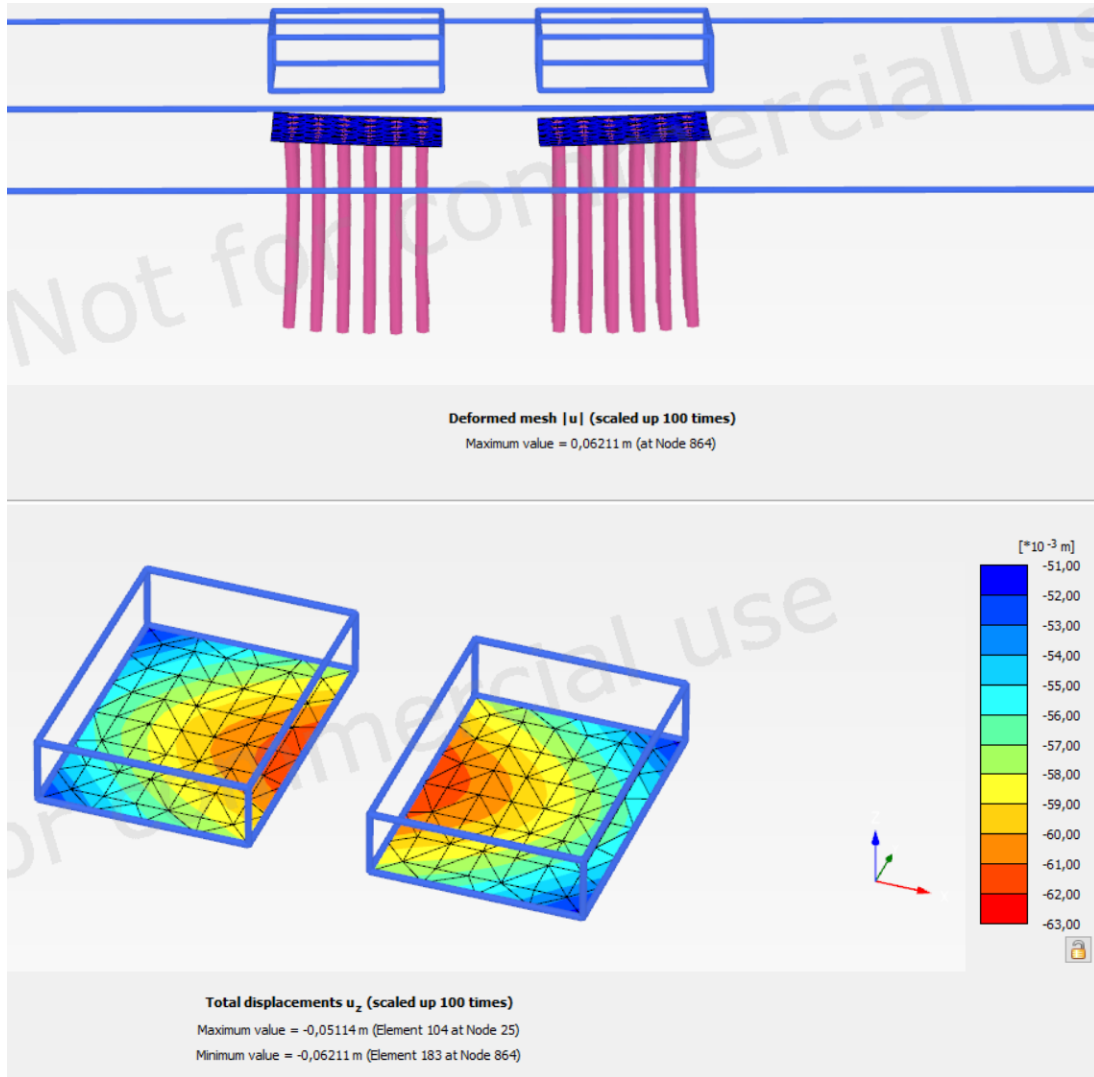
Tablo 2. Modellerde kullanılan zemin özellikleri

Zemin Tipi	γ_{doygun} (kN/m ³)	γ_{doygun} olmayan (kN/m ³)	$E_{50 \text{ ref}}$ (MPa)	$E_{\text{od ref}}$ (MPa)	$E_{\text{ur ref}}$ (MPa)	ϕ (°)	c (kPa)	m	v	K_0	OCR
Kum*	19.0	16.0	30	30	75	35	-	0.50	0.2	0.426	1.0
Frankfurt kili**	20.0	16.5	45	45	90	20	20	0.50	0.3	0.800	1.5

Not: * (Yasser vd., 2022)'den

** (Abdel-Azim vd., 2020)'den

Yapının modellenmesi esnasında üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 3D programından faydalanılmıştır. Temelin radye kısmı plaka (plate) elemanı olarak oluşturulurken, kazıklar gömülü kazık (embedded beam) seçeneği kullanılarak tanımlanmıştır. Her ne kadar temel sistemindeki iki temel simetrik olsa da birbirine olan etkileri de dikkate alınmak istendiği için iki temel beraber modellenmiştir. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek adına sonlu elemanlar ağı oluşturulurken eleman boyutları hassas (fine) tercih edilmiştir. Plaxis 3D'den alınan model görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Plaxis 3D Analiz sonuçları

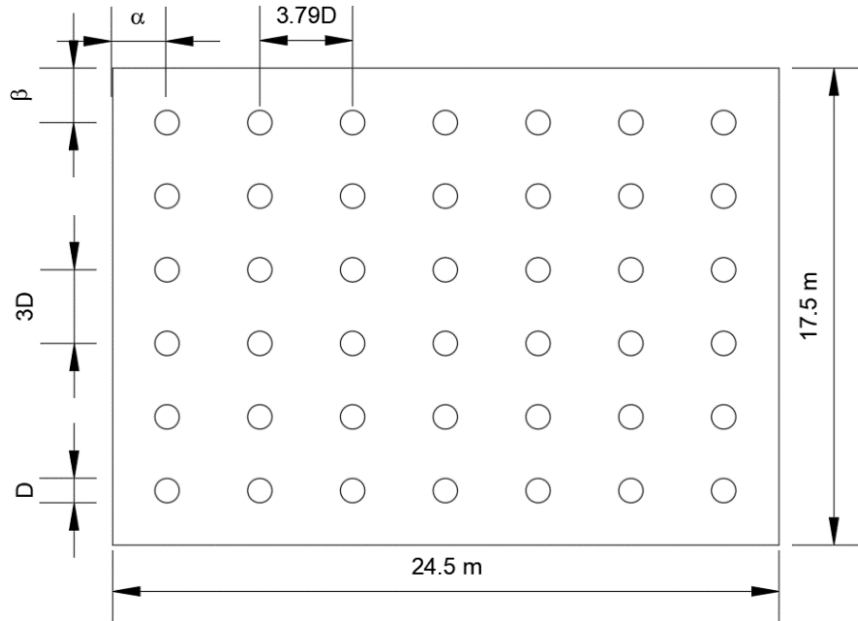
2.2. Oluşturulan modeller

İlk aşamada yalnızca radye kalınlığı değiştirilerek beş farklı model oluşturulmuştur. Bu analiz sonuçlarına göre belirlenen radye kalınlığı diğer parametrelerin incelenmesi esnasında sabit tutulmuştur. İkinci aşamada ise toplam kazık kesit alanı sabit olmak şartıyla, kazık çapları değiştirilmiş ve çaplara uygun kazık adetleri belirlenmiştir. Bu prensip ışığında oluşturulan kazık yerleşimlerinin detayları Tablo 3’de gösterilmiştir. Şekil 3’de ise modellenen ikiz temellerden birine ait görüntü mevcuttur.

Tablo 3. Oluşturulan modellere ait bilgiler

Kazık Çapı, D (m)	Hesaplanan Kazık Adedi, n	Kazık Yerleşimi	Kazık Aralığı, $3.79 \cdot D$ (m)	Kazık Aralığı, $3 \cdot D$ (m)	α (m)	β (m)
0.65	80	10×8	2.46	1.95	1.17	35
0.9	42	7×6	3.41	2.7	2	2
1.2	24	6×4	4.55	3.6	0.88	3.35
1.5	15	5×3	5.68	4.5	0.88	4.25

Not: $3 \cdot D$ ve $3.79 \cdot D$ değerleri orijinal kazık aralığı değerleridir (Reul vd., 2003). Ayrıca tablodaki kazık adetleri tek temele aittir.



Şekil 3. Örnek bir temel gösterimi

Belirlenen kazık adedinin radye temel altına yerleştirilmesinde iki yöntem uygulanmıştır. Birinci yerleşimde, kazık aralıkları tıpkı orijinal temel sistemindeki gibi x ve y doğrultusunda sırasıyla $3 \cdot D$ ve $3.79 \cdot D$ değerlerinde sabit tutulmuştur.

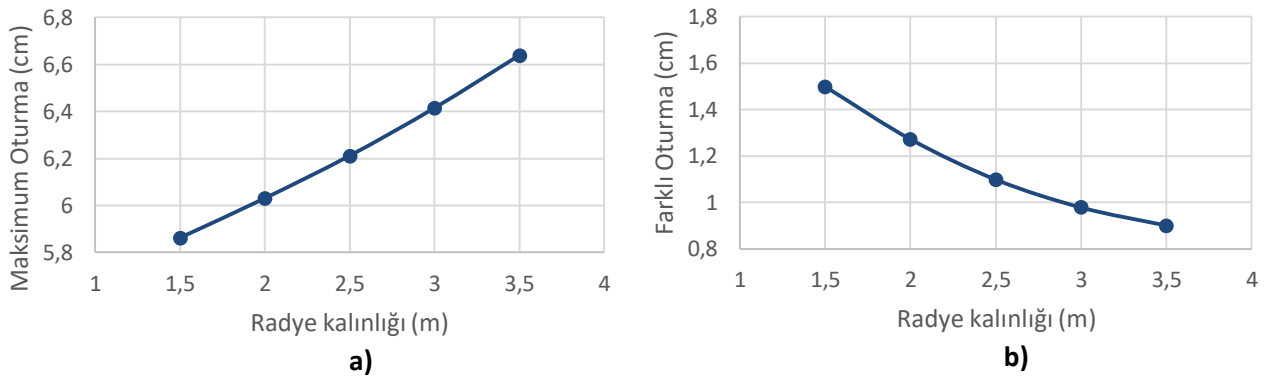
İkinci yerleşimde ise, Şekil 3’de gösterilen radyenin her iki doğrultuda konsol çalıştığı α ve β mesafeleri sabit ve 2m olacak şekilde (kazıkların yerleştirildiği alan orijinal temeldekiyle aynı olacak şekilde) uygun kazık aralıkları seçilmiş, aynı zamanda kazık boyları da orijinal temeldeki gibi 20m olarak alınmıştır.

Son olarak kazık boyunun temel sisteminin performansı üzerine etkisini belirlemek amacıyla orijinal temeldeki her kazığın bireysel hacmi ve yerleşimi sabit olmak şartıyla, kazık

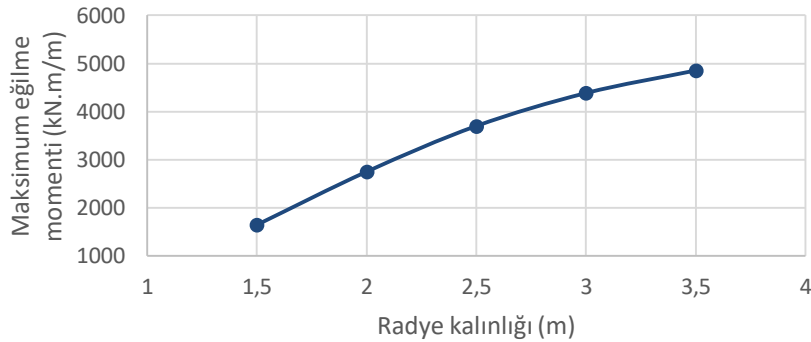
boyları değiştirilmiş ve uygun kazık çapları belirlenmiştir. Bu şekilde verimliliği temsil etmek üzere kullanılan toplam beton hacminin sabit kalması amaçlanmıştır.

3. GRAFİKLER VE TARTIŞMA

Radye kalınlığının temel performansına etkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Şekil 4.a ve Şekil 5'te görüldüğü üzere radye kalınlığının ve dolayısıyla ağırlığının artması sonucu maksimum oturmalar ve eğilme momentleri artmaktadır. Artan radye kalınlığıyla beraber radye rijitliği de artacağı için farklı oturmalar Şekil 4.b'de görüldüğü gibi azalmaktadır. Bu analizler sonucunda diğer analizlerde kullanılacak radye kalınlığı 2.5 m olarak belirlenmiştir.



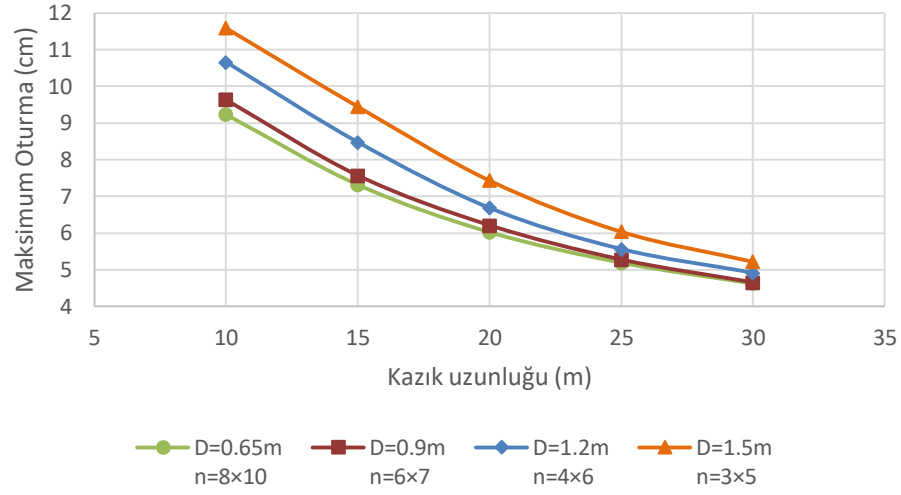
Şekil 4. Radye kalınlığına bağlı a) maksimum oturma b) farklı oturma değişimi



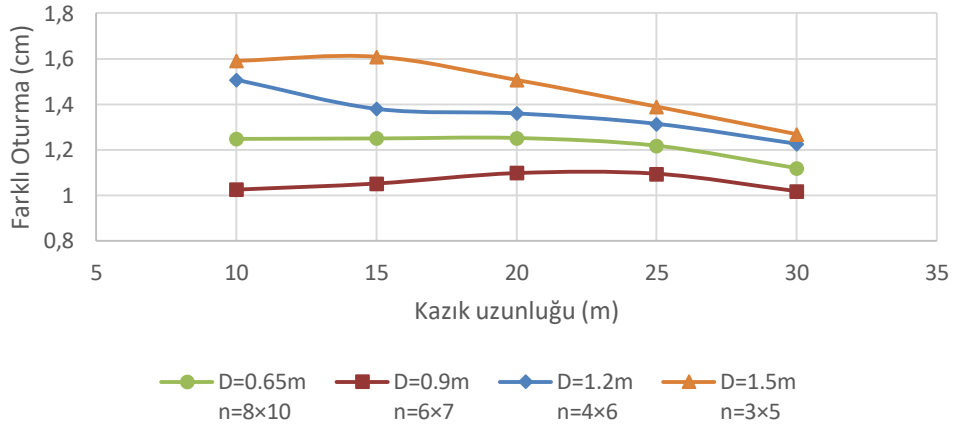
Şekil 5. Radye kalınlığına bağlı maksimum eğilme momentinin değişimi

Yöntem kısmında belirtildiği üzere hem kazık aralıkları hem de toplam kazık kesit alanı sabit kalacak şekilde kazık çapının temel performansı üzerine etkileri araştırılmış ve sonuçlar Şekil 6-Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere 0.9m kazık çapına sahip modelin ve 0.65m kazık çapına sahip modelin (en iyi performansı gösteren model) maksimum oturma performansları oldukça yakındır. Ayrıca kazık boyunun artışı dört modelin de oturma performanslarını birbirine yaklaştırmıştır. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde 0.9m kazık çapına sahip modelin farklı oturmalar ve eğilme momentleri açısından daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Şekil 6, 7 ve 8 beraber değerlendirildiğinde, oluşturulan alternatif modellerin 0.9m çapa sahip modeli iyileştirmede gözükmemektedir. Bu performans farkının

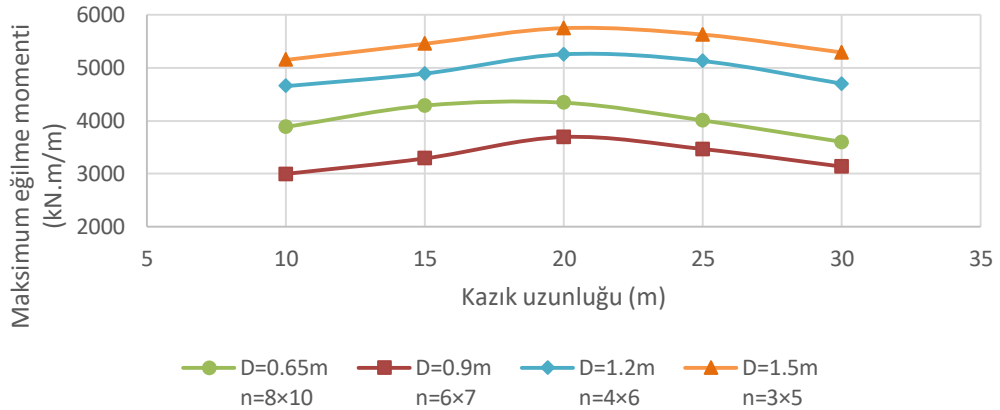
kazık yerleşiminden dolayı olup olmadığını anlamak için sonuçların farklı kazık yerleşimi sonucu meydana gelecek oturma ve moment değerleri ile beraber yorumlanması daha uygun olacaktır.



Şekil 6. Maksimum oturma'nın kazık uzunluğuna, adedine ve çapına bağlı değişimi

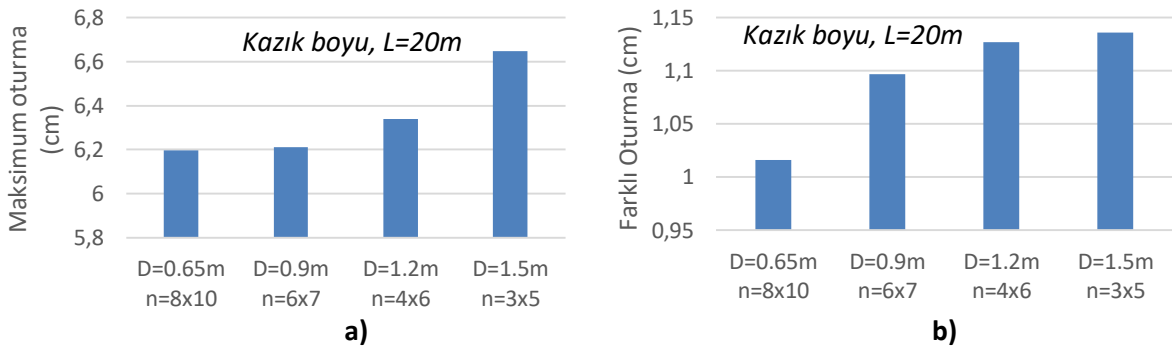


Şekil 7. Farklı oturma'nın kazık uzunluğuna, adedine ve çapına bağlı değişimi

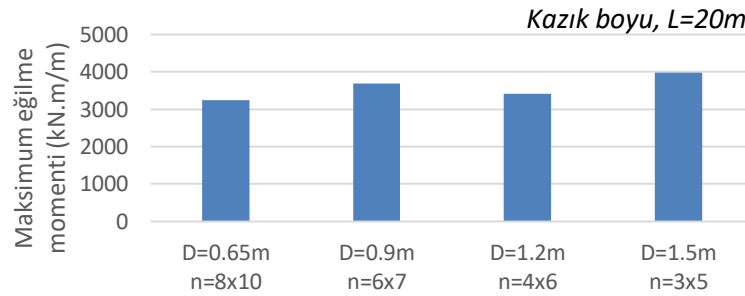


Şekil 8. Maksimum eğilme momentinin kazık uzunluğuna, adedine ve çapına bağlı değişimi

Bu sebeple sadece orijinal uzunluk olan $L=20$ m için her çap değerinde elde edilen kazık adedi, orijinal kazık aralıkları yerine, radyenin konsol çalıştığı mesafeler orijinal değerde sabit kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 9 ve 10'da görülmektedir ki tüm modeller birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bununla beraber Şekil 6,7,8'deki modellerle karşılaştırıldığında, kazık sayısı, çapı ve boyu aynı olan modellerin performansları iyileşmiştir. Başka deyişle kazıkların kazık aralığı yerine konsol mesafelerin sabit tutularak yerleştirilmesi, performansı arttırmıştır. Bunun dışında Şekil 9.a ve 9.b'den anlaşıldığı gibi sabit bir alan içine yerleştirilen kazıkların sayısını arttırmak, çapları azalsa dahi temelin oturma performansını az da olsa iyileştirmektedir. Şekil 10'a bakıldığında maksimum eğilme momentleri birbirine oldukça yakındır. Kazık çapı ve adedi eğilme momentlerini birlikte etkilemektedir. Son olarak bu yerleşimdeki modellerde, 0.65m kazık çapına sahip model, az bir farkla orijinal temelden daha iyi performans sergilemiştir.



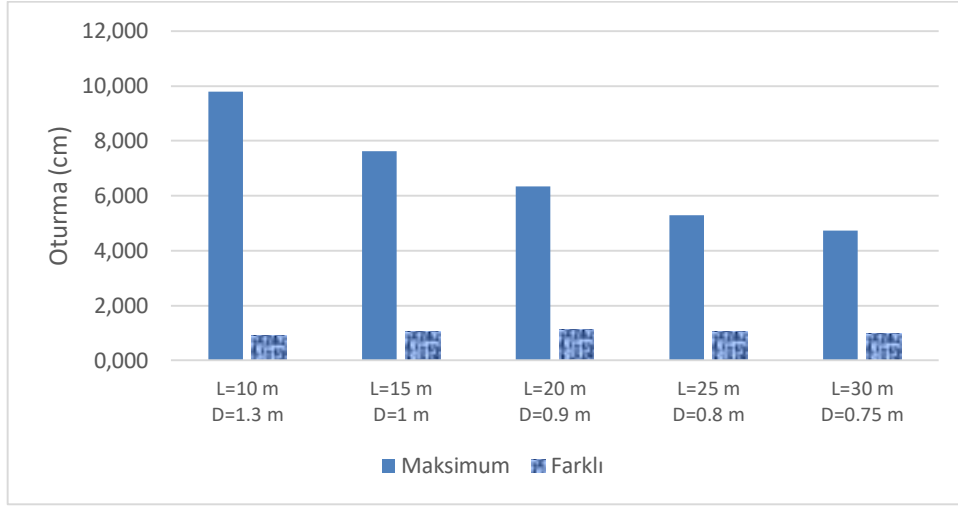
Şekil 9. Kazık çapına ve adedine bağlı a) maksimum oturma b) farklı oturma değişimi



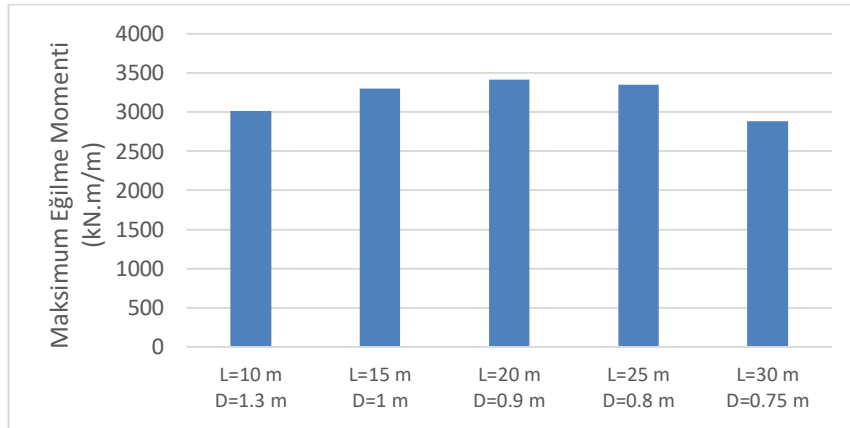
Şekil 10. Maksimum eğilme momentinin kazık çapına ve adedine bağlı değişimi

Toplam kazık hacmi ve adedi sabit tutularak kazık boyunun etkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 11, 12 ve 13'te verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde kazık boyundaki artış, kazık çapındaki azalmaya rağmen maksimum oturma performansını iyileştirmektedir. Kazık boyu artmaya devam ettikçe maksimum oturma performansındaki iyileşme miktarının azaldığı da görülmektedir. Farklı oturmalarda ise kazıklardaki değişimin etkisi sınırlı kalmaktadır. Şekil 12'de maksimum eğilme momentlerinin önce arttığı daha sonra azaldığı görülmektedir. Kazık çapının ve kazık boyunun beraber eğilme momentlerini etkilediği yorumu yapılabilir. Şekil 13 incelendiğinde kazıkların taşıdığı yükün toplam yüke oranı (kazıklı radye oranı) kazık boyuyla birlikte artmaktadır. Son olarak, sabit hacimli kazıklarda (aynı beton miktarı gerektiren) kazık boyu arttıkça oturma performansın iyileştiği çıkarımını yapmak mümkündür. 0.75m ve 0.8m kazık çapına sahip modeller, aynı kazık hacmiyle orijinal temel sisteminden az da olsa daha iyi performans sergilemiştir. Ancak hem

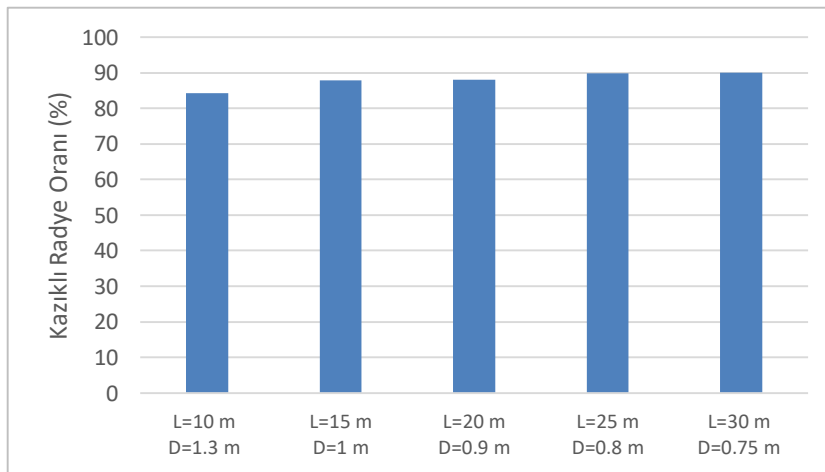
kazıkların inşa maliyetlerinin boyları ile doğru orantılı arttığı, hem de uygulamada karşılaşılabilecek zorluklar göz önünde bulundurulduğunda, ekonomik ve emniyetli bir tasarım için projede kullanılacak kazık boyları titizlikle seçilmelidir.



Şekil 11. Oturma değerlerinin kazık çapına ve boyuna bağlı değişimi



Şekil 12. Maksimum eğilme momentinin kazık çapına ve boyuna bağlı değişimi



Şekil 13. Kazıklı radye oranının değişimi

4. SONUÇLAR

Kazıklı radye temellerin daha ekonomik tasarlanabilmesi için parametrik çalışmalarla temelin performansının hangi özelliklerden etkilendiği belirlenebilir. Bu çalışmada Frankfurt'ta yer alan Torhaus binasının temel sistemi Plaxis 3D'de modellenmiş ve kazık boyu, çapı, adedi ve yerleşimi gibi özellikleri değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. Hali hazırda kullanımı süren binanın temel sisteminin performansını iyileştirmek amacıyla yapılan bu parametrik çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Radye kalınlığının artması maksimum oturmayı ve eğilme momentini arttırırken, artan rijitlik sayesinde farklı oturmaları azaltır. Radye kalınlığı artmaya devam ettikçe farklı oturmalarda ve eğilme momentlerindeki bu değişim azalmaktadır.
- Toplam kazık kesit alanı sabit olan modeller, kazık boyu arttıkça birbirine yakın oturma performansı sergilenmektedir.
- Toplam kazık kesit alanı sabit olan modellerde, kazık sayısının oturma davranışı üzerindeki etkisi kazık çapından büyüktür.
- Kazık sayısını arttırırken orijinal temeldeki α ve β değerlerini değiştirmek yerine kullanılan kazık aralığını değiştirmek, tam tersine kıyasla çok daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Her bir kazığın hacmi sabit olan modellerde görüldüğü üzere, kazık boyunu arttırmak oturma davranışını kazık çapını arttırmaya göre daha çok iyileştirecektir. Ancak hacim sabit olacak şekilde kazık boyundaki artış devam ettikçe, iyileşme miktarı azalacaktır.
- Radye üzerinde oluşacak maksimum eğilme momentleri, kazıklardaki ve radyedeki her değişikliğe duyarlıdır.
- Kazık hacmi sabit olacak şekilde kazık çapını azaltırken kazık sayısını veya boyunu arttırmak temelin performansını olduğundan daha iyi duruma getirmiştir.
- Kazıklı radye temellerde kazıklar tarafından taşınan yükün miktarı arttıkça maksimum oturma değeri azalacaktır.

Yapılan parametrik çalışma neticesinde Torhaus binasının orijinal temel sisteminin tasarımının bu çalışmada kullanılan diğer modeller ile kıyaslandığında iyi performans sergilediği anlaşılmaktadır. Yine de bu temel sisteminin oturma, eğilme momenti ya da her iki davranışını birden iyileştirmek mümkündür. Ancak temellerin birbirine bu kadar yakın performans gösterdiği durumlarda, seçim yapılırken inşaat süresi, işçilik ve ekonomik faktörler daha fazla önem kazanacaktır.

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), 1-11.

- Bhaduri, A., & Choudhury, D. (2020). "Serviceability-based finite-element approach on analyzing combined pile-raft foundation." *International Journal of Geomechanics*, 20(2), 04019178.
- Bisht, R. S., & Singh, B. (2012). Study on behavior of piled raft foundation by numerical modeling. In *SAITM Research Symposium on Engineering Advancements (SAITM-RSEA 2012)*.
- Chong, Y. H., Lee, M. L., Kok, S. T., & Wong, S. Y. (2021). A Parametric Study of Piled Raft Foundation in Clay Subjected to Concentrated Loading. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(4), 263-274.
- Cooke, R. W., Sillett, D. F., Bryden Smith, D. W., Smith, D. W. B., Gooch, M. V., & BRE. (1981). Some observations of the foundation loading and settlement of a multi-storey building on a piled raft foundation in London clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 70(3), 433-460.
- El Sawwaf, M. (2010). Experimental study of eccentrically loaded raft with connected and unconnected short piles. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(10), 1394-1402.
- Halder, P., & Manna, B. (2022). "Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model." *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(5), 574-591.
- Katzenbach, R., Arslan, U., Gutwald, J., Holzhauser, J., & Quick, H. (1997). "Soil-structure-interaction of the 300 m high Commerzbank tower in Frankfurt am Main. Measurements and numerical studies." In *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (1081-1084)*.
- Katzenbach, R., Leppla, S., & Choudhury, D. (2016). "Foundation systems for high-rise structures." CRC press. (1-298)
- Moyes, P., Poulos, H. G., Small, J. C., & Badelow, F. (2005). Piled raft design process for a high-rise building on the Gold Coast, Australia. In *Tall Buildings: From Engineering to Sustainability* (pp. 241-249).
- Oh, E. Y. N., Huang, M., Surarak, C., Adamec, R., & Balasurbamaniam, A. S. (2008, November). Finite element modeling for piled raft foundation in sand. In *Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11) "Building a Sustainable Environment"*, Taipei, Taiwan (Vol. 8).
- Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundations: design and applications. *Geotechnique*, 51(2), 95-113.
- Reul, O., & Randolph, M. F. (2003). "Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses." *Geotechnique*, 53(3), 301-315.
- Reul, O., & Randolph, M. F. (2004). Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(1), 1-13.
- Seo, Y. K., & Jeong, S. G. (2004). Parametric Study of Piled Raft Foundation on Soft Clay. *Journal of ocean science and technology*, 1(2), 147-152.
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2015). "Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D." *Procedia Engineering*, 125, 363-367.
- Yasser, A., Hassona, F., Hakeem, B. M., & Moussa Abu Bakr, A. (2022). "Finite element simulation of piled raft capacity under different loading conditions." *Journal of Advanced Engineering Trends*, 42(1), 141-155.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
c	Kozeyon	D	Kazık çapı
E	Young modülü	E_{50 ref}	Drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen referans sekant rijitliği
E_{oed ref}	Birincil ödometre yüklemesi için referans tanjant rijitliği	E_{ur ref}	Referans üç eksenli boşaltma/yeniden yükleme rijitliği
K₀	Toprak basıncı katsayısı	L	Kazık boyu
m	Elastisite modülünün gerilmeye bağlılığı için üstel katsayı	n	Kazık adedi
OCR	Aşırı konsolidasyon oranı	t	Radye kalınlığı
v	Poisson oranı	φ	İçsel sürtünme açısı
α	Radyenin bitiminden en yakın kazık merkezine olan uzaklık (Uzun kenar doğrultusunda)	α_{pr}	Kazıklı radye oranı
β	Radyenin bitiminden en yakın kazık merkezine olan uzaklık (Kısa kenar doğrultusunda)	γ	Birim hacim ağırlığı