

KAZIKLARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

NUMERICAL INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF PILES

Selçuk BİLDİK¹, Haluk TANRIÖVER²

ÖZET

Geoteknik mühendisliğinin en önemli problemlerinin başında kazıklı temellerin tasarımı gelmektedir. Kazıklar genellikle düşey ve yatay statik yüklere göre tasarlanmaktadır. Ancak depremselliğin yüksek olduğu bölgelerde kazıkların dinamik yüklere karşı da tasarlanması önem arz etmektedir. Bu çalışmada literatürde yapılmış olan bir santrifüj deneyi sonlu elemanlar programı ile doğrulanmıştır. Bu amaçla yapılan kinematik etkileşim analizleri ile zayıf zemin tabaka kalınlığı ve deprem ivmesi gibi parametrelerin etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre deprem büyüklüğünün etkileşim analizlerinde en önemli parametre olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kazık, sonlu elemanlar, kinematik etkileşim, ivme.

ABSTRACT

One of the most important problems in geotechnical engineering is the design of pile foundations. Piles are generally designed for vertical and horizontal static loads. However, it is important to design piles against dynamic loads in regions with high seismicity. In this study, a centrifuge experiment performed in the literature was verified with a finite element program. For this purpose, the effects of parameters such as weak soil properties, and earthquake acceleration were investigated numerically through kinematic interaction analysis. According to the results obtained, it was understood that the earthquake magnitude is the most important parameter in interaction analyses.

Keywords: Pile, finite element, kinematic interaction, acceleration.

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinin en önemli problemlerinin başında, yapıları taşıma gücü ve oturma açısından sorunlu zeminlerde inşa edilmesi gelmektedir. Zayıf zemin tabakalarının çok derin olmaması ve yapı yükünün az olması durumunda zemin iyileştirme yöntemleri ile bu tür sorunlu zeminlerde çözüm üretilebilmektedir. Ancak zayıf zemin tabakalarının çok derinde olması ve yapı yükünün fazla olması durumunda kazıklı temel sistemlerinin uygulanması zorunlu hale gelmektedir. Kazıkların statik yükler altındaki tasarımı ile ilgili literatürde birçok yöntem mevcut olup, birçok uluslararası yönetmelikte de tasarım esasları detaylı olarak ele alınmaktadır. Ancak kazıklar statik yükler altında yeterli dayanımda olmalarına rağmen dinamik yükler nedeniyle hasar görebilmektedirler. Bu açıdan kazıkların dinamik yükler altındaki davranışının da doğru bir şekilde tasarıma yansıtılması önem arz etmektedir.

Kazıklı temeller üzerine inşa edilmiş yapılarda, özellikle deprem yükleri altındaki davranışın belirlenmesi daha karmaşık bir tasarım problemine dönüşmektedir. Depremler esnasında kazıklar çevresindeki zeminin yanıl sarsıntısı nedeniyle kinematik etkilere ve üst yapı titreşimleri nedeniyle atalet etkileşimine maruz kalmaktadırlar. Bu etkiler deprem esnasında aynı anda meydana geldiği için birbirinden ayrı olarak ele

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, selcuk.bildik@nisantasi.edu.tr

² İnş. Yük. Müh., Kuzey Marmara Otoyolu, haluktanriover@gmail.com

alınması zordur. Yapılan çalışmalarda sığ derinliklerdeki kazıkların atalet kuvvetlerini aktaramadıkları ve bu derinliklerde kinematik etkilerin daha etkin olduğu gözlemlenmiştir (Mizuno, 1985; Gazetas ve diğ., 1993). Literatürde etkileşim analizleri ile ilgili sayısal ve deneysel birçok çalışma mevcuttur (Kaynia, 1982; Fan ve diğ., 1991; Kavvadas ve Gazetas, 1993; Haigh, 2002; Brandanberg ve diğ., 2005; Castelli ve diğ., 2008; Madanhushi ve diğ., 2010; Haskell, 2013, Kirkit ve diğ., 2013; Hussien ve diğ., 2015; Luo ve diğ., 2016; Garala ve diğ., 2020; Mallick ve diğ., 2022; Garala ve diğ., 2022). Kaynia (1982) grup kazıkların dinamik davranışını yarı sonsuz zemin ortamında araştırmıştır. Çalışmada zemin elastisitesi ile kazığın sertlik-esneklik matrislerinin kazık-zemin ara yüzeyinde meydana gelen deformasyonlara etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grup kazıkların davranışının frekans temelli olduğunu göstermekte olup, çalışmada elde edilen etkileşim faktörlerinin homojen ortamlarda geçerli olduğunu, homojen olmayan ortamlarda geçerliliğinin azaldığını göstermiştir. Fan ve diğ. (1991) grup kazıklarda kinematik etkileri harmonik S dalgaları altında sayısal olarak araştırmıştır. Çalışma kapsamında kazık-kazık ve kazık-zemin etkileşimleri irdelenmiştir. Homojen iki tabakalı olarak idealize edilen zemin ortamında kazık konfigürasyonları değiştirilerek kinematik etkiler parametrik olarak araştırılmıştır. Çalışmada doğal zemin profilinin tüm frekanslarda etkili olduğu, kazık grubu konfigürasyonu, kazık sayısı ve kazıklar arası mesafenin yanal yer değiştirmeleri etkilemezken kazık başlığının dönmesinde etkili olduğu görülmüştür. Kavvadas ve Gazetas (1993) kinematik etkiler altında serbest başlıklı kazıkların davranışını incelemişlerdir. Çalışma kayma hızları arasında farkın çok olduğu iki tabakalı zeminde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar kayma hızı dalgası hızları farklarının eğilme momentini önemli mertebede etkilediği görülmüştür. Kazık tasarımında geçiş tabakalarında oluşacak momentler tasarımı doğrudan etkilemektedir. Castelli ve diğ. (2008), tekil kazıkların sismik yükler altındaki kinematik davranışını sonlu elemanlar programı ile araştırmışlardır. Çalışmada kinematik etkileri değerlendirmek için serbest alan zemini (kazıksız) ve kazıklı durum modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar yumuşak zemine geçiş bölgesinde momentlerin önemli mertebede arttığı ve kazık içinde mafsallaşmaların oluştuğu görülmüştür. Luo ve diğ. (2016) üç boyutlu sonlu elemanlar programı yardımıyla zemin-kazık-yapı etkileşimini geliştirilmiş eşdeğer bir doğrusal model ve değiştirilmiş Drucker Prager zemin modeli ile araştırmışlardır. Analizlerde zeminin doğrusalsızlığının davranışı doğrudan etkilediği görülmüş ve eşdeğer model kullanılması durumunda daha düşük ivme tepkileri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda etkileşim analizlerinde mutlaka doğrusal olmayan zemin modellerinin kullanılması gerekliliği ve sonuca etki ettiği görülmüştür. Garala ve Madabhushi (2018) santrifüj deneyleri ile yumuşak killerde kazıklı temellerin davranışını dinamik yükler altında araştırmışlardır. Deneyler tekil kazık ile farklı aralıklara sahip 1x3 sıralı kazık grubunda gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda yumuşak killerin deprem davranışını karakterize etmede doğrusal olmayan analizin önemi vurgulanmıştır. Kilin tepkisinin hem deprem şiddetine hem de kil tabakasının kayma dayanımına ve rijitliğine bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu durum, tekil kazıkların ve kazık gruplarının tepkisini etkilemekte ve küçük şiddetli depremlerde daha büyük amplifikasyon oluşumuna sebep olduğu görülmüştür. Literatürde çalışmalarından elde edilen sonuçlar kinematik etkileşimden kaynaklı hasarların yumuşak zeminlerde kazık başında ve dayanım farklarının oluştuğu ara zemin tabakalarında meydana geldiğini göstermektedir. Literatürde yer alan kinematik etkileşim analizleri ile ilgili çalışmalarda parametrik etkilerin dikkate alındığı çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmada literatürde yer alan deneysel bir çalışma sonlu elemanlar programı ile doğrulanmış olup, daha sonra zemin tabakalanması, yeraltı suyu, kazık rijitliği ve deprem ivmesi parametrelerinin etkileri araştırılmıştır.

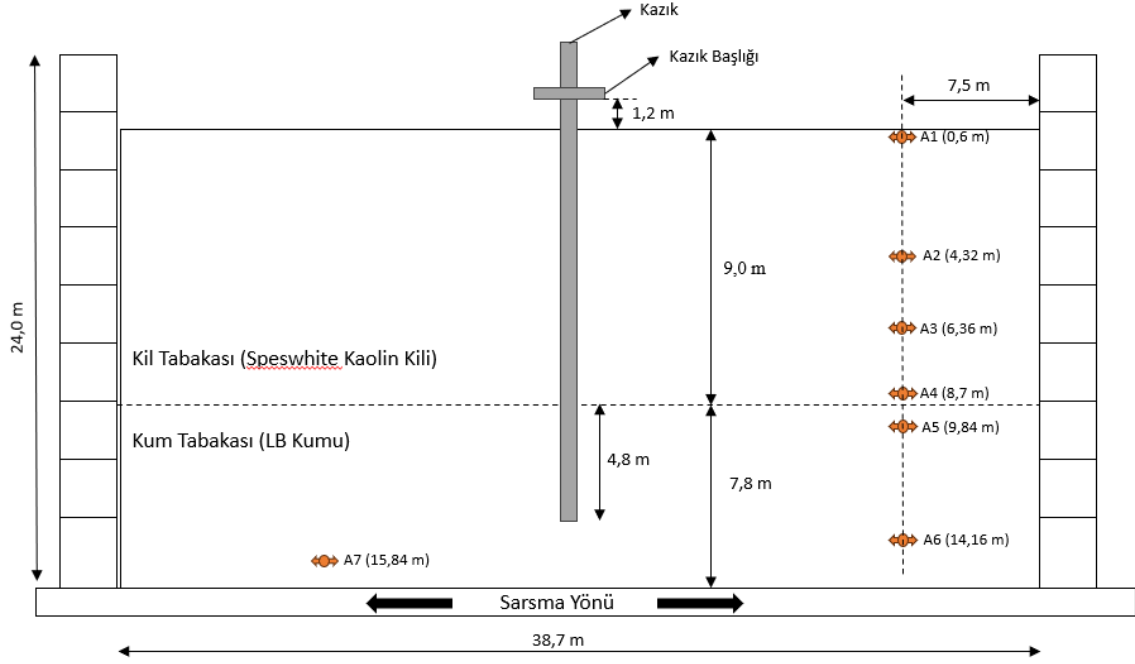
2. PROBLEMİN TANITILMASI

Bu çalışmada kazıkların dinamik yükler etkisi altında davranışı kinematik etkiler altında araştırılmıştır. Bu amaçla literatürden alınan deneysel bir çalışma sonlu elemanlar programı ile modellenmiştir. Deney sonuçları sonlu elemanlar programı yardımıyla sayısal olarak doğrulandıktan sonra farklı parametrelerin davranışa etkisi araştırılmıştır. Çalışmada modellenen deneysel çalışma Garala ve diğ. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında dikkate alınan deneysel çalışmalar santrifüj düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada tekil kazık ile 3x1 sıralı grup kazıkların davranışı incelenmiştir. Sayısal modellemede sadece tekil kazıkların davranışı araştırılmıştır. Yapılan deneylere ait düzeneği şematik gösterimi Şekil 1'de gösterilmektedir (Garala ve diğ., 2020). Deneyler yumuşak kil ile sıkı kumdan oluşan tabakalı bir Zemin ortamında gerçekleştirilmiştir. Kum zemin olarak kötü derecelenmiş Fraction-B Leighton Buzzard (LB) kumu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan Kaolin kilinin özellikleri ise Lau, 2015 çalışmasından alınmıştır.

Deneylerde kullanılan alüminyum kazıklarda gerinim ölçerler yardımıyla eğilme momentleri ölçülmüştür. Ayrıca zeminde derinlik boyunca piezometrik ivmeölçerler ile zemin içinde oluşan ivmeler ölçülmüştür. Bu

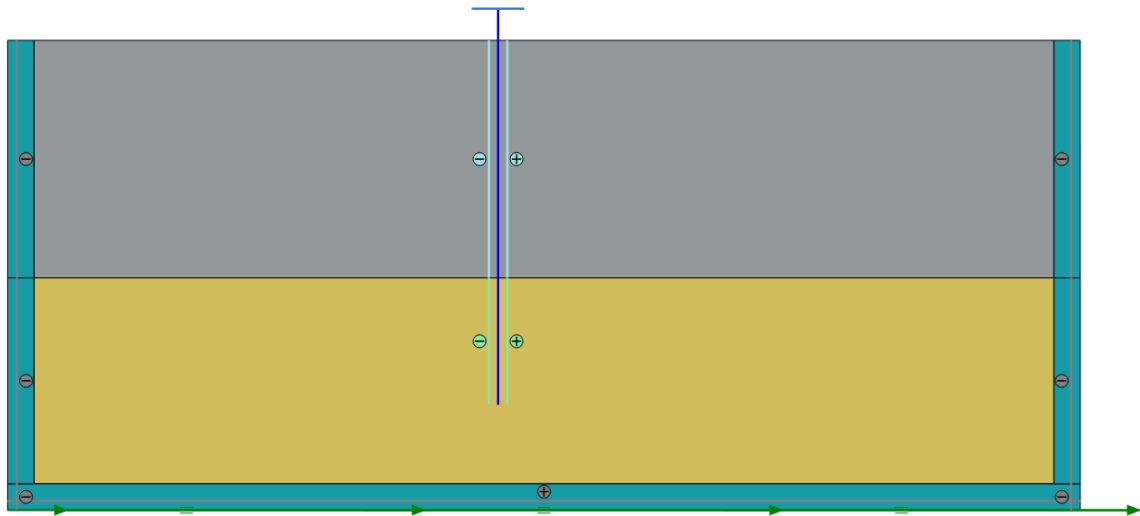
çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, deneylerden elde edilen eğilme momentleri ile zemin içinde oluşan ivmelerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.



Şekil 1. Deneysel çalışmanın şematik görüntüsü (Garala ve ark., 2020)

3. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Garala ve arkadaşlarının (2020) yaptığı Santrifüj deneyleri gerçek ölçekte Plaxis 2D programı ile iki boyutlu olarak modellenmiştir. Nümerik model Şekil 2'de sunulmaktadır. Nümerik modelde kazık boyu, zemin tabaka kalınlıkları, yeraltı suyu durumu gibi tüm parametreler deney koşullarını yansıtacak şekilde geometrik model oluşturulmuştur. Modelde dinamik yükleme koşullarının etkileri dikkate alınarak sınır koşulları modele tanımlanmıştır.



Şekil 2. Deneysel çalışmanın sonlu elemanlar modeli (Bildik ve Tanrıöver, 2023)

Dinamik yükler altında doğal zeminlerin gerilme-gerinim davranışı büyük ölçüde nonlinear olup, kayma modülü genellikle kayma birim deformasyonundaki artışla azalmaktadır (Hardin ve Drnevich, 1972). Kayma modülündeki bozulma temel sisteminin performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Snyder, 2004). Bu nedenle zemin dinamiği problemlerinde nonlinear zemin davranışına uygun zemin modelinin kullanılması önem arz etmektedir. Özellikle dinamik yükleme esnasında birim deformasyon büyüklüğünden çok yüklemenin doğasında olan atalet kuvvetleri ve gerinim oranı etkileri ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada dinamik zemin davranışını en iyi yansıtacak olan Plaxis programı içinde de yer alan Hardening Soil Small model kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 1’de sunulmaktadır. Analizlerde kazık eleman literatürde önerilen şekilde plate eleman olarak seçilmiştir. Kazık ve kazık başlığının sayısal analizlerde kullanılan özellikleri ise Tablo 2’de özetlenmektedir.

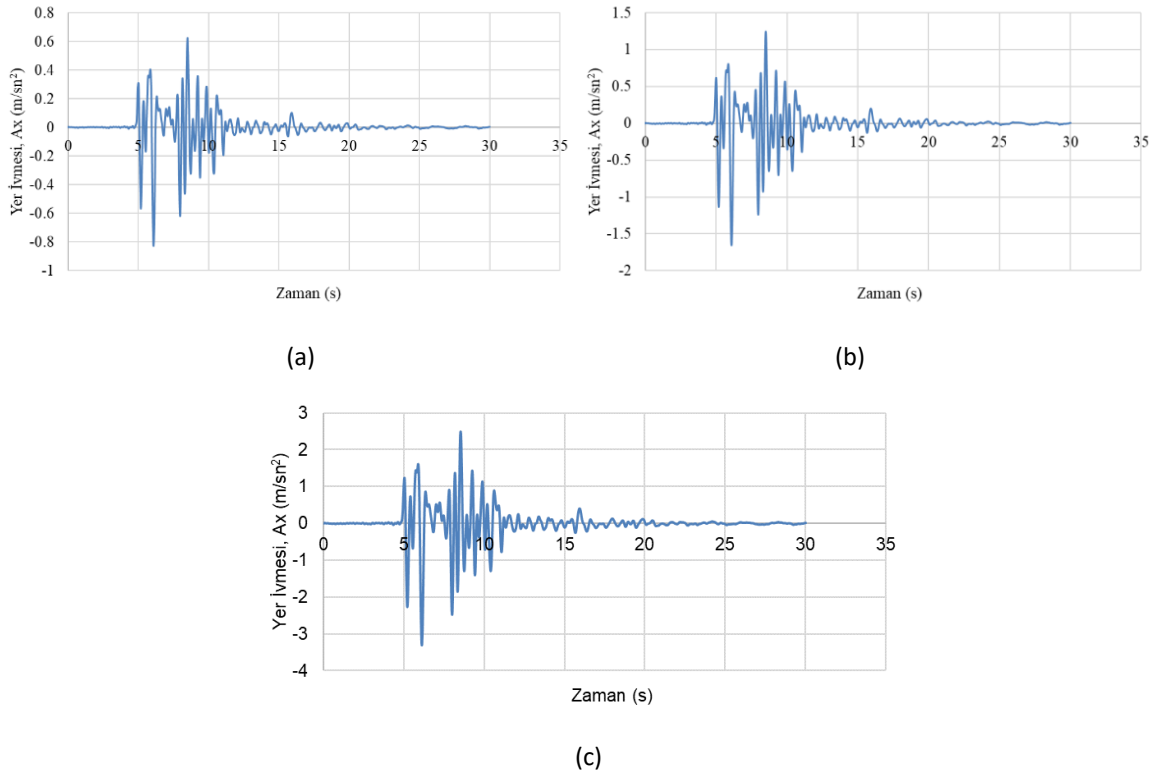
Tablo 3. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri

Parametreler	Birim	Speswhite Kaolin Kili	Leighton Buzzard Kumu	LE
Materyal Tipi	-	HS Small	HS Small	Linear Elastic
Drenaj Tipi	-	Undrained (A)	Drained	Drained
γ_{unsat}	kN/m^3	16,2	18,4	24,00
γ_{sat}	kN/m^3	16,4	20,36	24,00
e_{init}	-	0,5	0,5	0,50
Rayleigh α	-	0,09425	0,09425	0,00
Rayleigh β	-	7,958E-04	7,96E-04	0,00
ν'	-	-	-	0,20
G	kN/m^2	-	-	1,04E+07
E'	kN/m^2	-	-	2,50E+07
V_s	m/s	-	-	2063,00
V_p	m/s	-	-	3370,00
E_{50}^{ref}	kN/m^2	1500	5,10E+04	-
E_{oed}^{ref}	kN/m^2	750	5,10E+04	-
E_{ur}^{ref}	kN/m^2	8000	1,53E+05	-
power (m)	-	0,8	0,4344	-
c'_{ref}	kN/m^2	1	0,00	-
ϕ' (phi)	-	21	37,20	-
ψ (psi)	-	0	8,625	-
$\nu_{0.7}$	-	2,00E-04	1,15E-04	-
G_0^{ref}	kN/m^2	1,398E+04	1,178E+05	-
ν'_{ur}	-	0,20	0,20	-
P_{ref}	kN/m^2	100,00	100,00	-
K_0^{nc}	-	0,64	0,3954	-
R_f	-	0,90	0,90	-
OCR	-	1,00	1,00	-
R_{inter}	-	0,5	0,70	Rigid

Tablo 4. Analizlerde kullanılan kazık parametreleri

Parametreler	Birim	Kazık Başlığı	Kazık
Material Tipi	-	Elastic	Elastic
EA_1	kN/m	9,90E+05	9,30E+06
EA_2	kN/m	9,90E+05	9,30E+06
EI	$kN/m^2/m$	7425	3,439E+05
d	m	0,3	0,6661
w	$kN/m/m$	3,5	2,8
ν (nu)	-	0,37	0,3
Rayleigh α	-	0,2827	0,2827
Rayleigh β	-	2,39E-03	2,39E-03

Analizlerde kullanılan deprem kayıtları ölçeklendirilmiş Kobe depreminden seçilmiş olup, deneylerde kullanılan aynı deprem kayıtları sayısal modelde kullanılmıştır. Deprem verisi 0.085g için Şekil 3a'da sunulmaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında farklı oranlarda büyütülmüş deprem kayıtları kullanılarak deprem büyüklüğünün etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Plaxis programı yardımıyla depremler büyütülmüştür. Büyütülen deprem kayıtları 0.17 g ve 0.34g için sırasıyla Şekil 3b ve 3c'de sunulmaktadır.



Şekil 3. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları

Garala ve diğ. (2020) tarafından yapılan deneylerin doğrulanması amacıyla tek bir kazık sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modellemeden elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla tekil kazık durumunda deneylerde zemin derinliği boyunca ölçülen ivme değerleri sayısal analizlerden elde edilen ivme değerleri karşılaştırılmıştır. Pik yer ivmesinin sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılması Şekil 4a'da sunulmaktadır. Elde

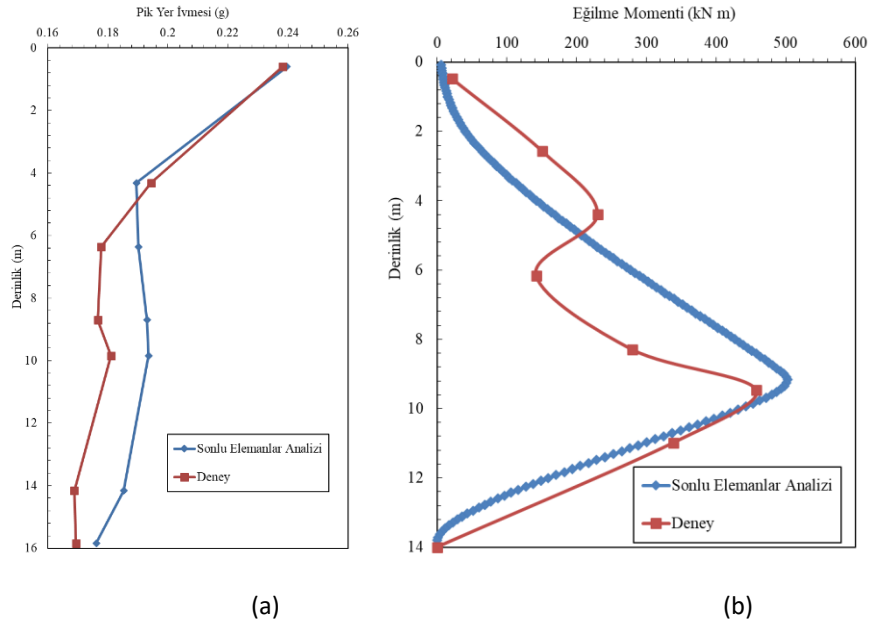
edilen sonuçlar ivme değişiminin aynı davranışı gösterdiğini ve büyük ölçüde uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca maksimum moment değerleri karşılaştırılmış olup Şekil 4b’de sunulmaktadır. Maksimum moment değerlerinin karşılaştırılması için gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Beklendiği üzere en yüksek moment değeri kil-kum tabaka geçiş bölgesinde elde edilmiştir ve bu noktadaki uyum %94 olarak gözlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

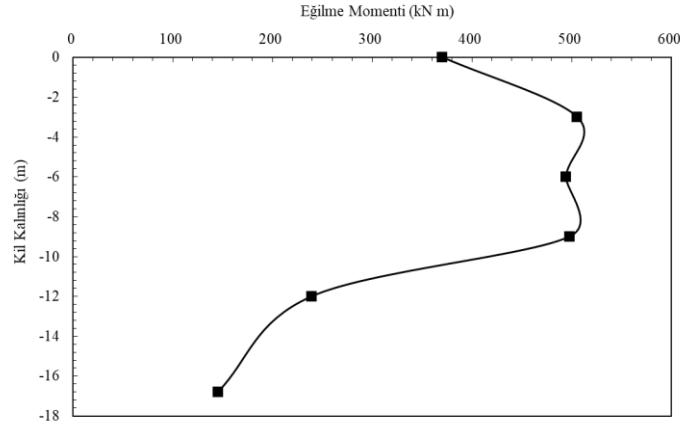
Çalışma kapsamında deney verileri doğrulandıktan sonra farklı parametrelerin etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda kil tabaka kalınlığı ve deprem büyüklüğü gibi parametrelerin etkileri analiz edilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar kazıkta oluşan maksimum moment değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

4.1. Zayıf Tabaka Kalınlığının Etkisi

Deneyel çalışmada kil zemine gömülü kazık boyu 9 metre, kum zemine gömülü kazık miktarı ise 4.8 metredir. Kil zemin tabaka kalınlığının değişiminin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kazığın tamamen kil zeminde yer alması durumu ile kil tabaka kalınlığının 3, 6, 9 ve 12 metre olması durumu analiz edilmiştir. Bu analizlerde referans deneydeki gibi yeraltı suyu sayısal analizlerde dikkate alınmamıştır. Analizlerden elde edilen maksimum moment değişim grafiği Şekil 5’de sunulmaktadır. Eğilme momentleri cinsinden değerlendirildiğinde maksimum momentin kil tabaka kalınlığının toplam kazık boyunun %75’ine eşit olması durumunda ortaya çıktığı görülmektedir. Sağlam zemine soket boyunun belirli bir düzeye gelmesiyle kinematik etkilerin arttığı anlaşılmaktadır. Bu değerden daha az soket boyu durumunda kazık deplasmanı ve maksimum momentin azalma nedeni ise kazığın tek tabakalı durum davranışına geçmesi ve kazık boyunca oluşan rölatif deplasmanların minimize olmasından kaynaklanmaktadır.



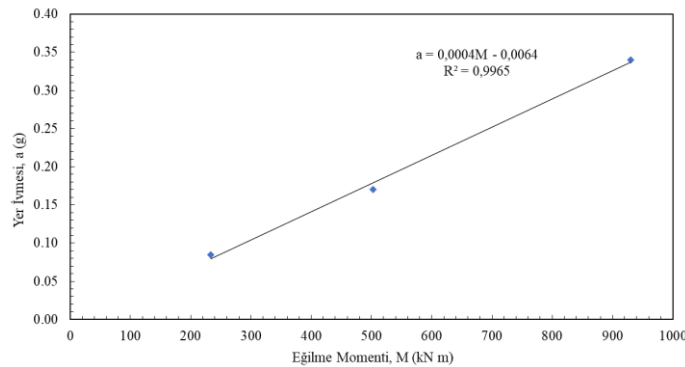
Şekil 4. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizleri sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5. Kıl tabaka kalınlığını - eğilme momenti değişimi

4.2. Deprem Büyüklüğünün Etkisi

Çalışmada deprem büyüklüğünün etkisinin araştırılması amacıyla deneylerde kullanılan deprem kaydı Plaxis programı yardımıyla büyütülerek 0.17g, 0.34g ve 0.51g deprem büyüklüklerinde analizler yapılmıştır. Yapılan analizler deney modeli üzerinde tabakalı zemin koşullarında gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen maksimum moment-ivme grafiği Şekil 6'da sunulmaktadır. Deprem ivmesinin artmasıyla momentlerin lineer olarak arttığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar deprem büyüklüğünün sonuçları etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Kıl tabaka kalınlığı - eğilme momenti değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kazıkların dinamik yükler altındaki davranışı kinematik etkiler altında araştırılmıştır. Bu amaçla literatürde yer alan bir deneysel çalışma sonuçları sonlu elemanlar programı ile doğrulanarak zemin koşulları, yeraltı su seviyesi, kazık rijitliği ve deprem büyüklüğü gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Sonlu elemanlar programı kullanılarak Garala ve arkadaşlarının (2020) yaptığı santrifüj deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçları uyumlu şekilde doğrulanmıştır.
- Kinematik etkileşim analizlerinde tabakalı zemin koşullarında zayıf zemin tabaka kalınlığının artmasıyla birlikte ilk etapta deplasman değerlerinde önemli bir artış olmamakla birlikte kıl tabaka kalınlığının toplam kazık boyunun yaklaşık %75'ine ulaştığı derinlikte kazık başlık deplasmanında önemli artışlar görülmüştür. Kıl tabaka kalınlığının daha büyük değerlere ulaşmasıyla deplasmanlarda önemli bir artış görülmemiştir.

Bu durum da kinematik etkiler altında kazığın sağlam birime soket miktarının azalmasıyla birlikte kazığında daha fleksibl davranmasından kaynaklanmaktadır.

- Deprem büyüklüğü etkisinin incelendiği analizlerde, deprem ivmesinin artmasıyla deplasman ve momentlerin lineer olarak arttığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar deprem büyüklüğünün sonuçları etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Bildik, S., & Tanrıöver, H. (2023). Numerical Investigation of the Pile–Soil Interaction Problem under Dynamic Loads. *Applied Sciences*, 13(21), 11653.
- Brandenberg, S. J., Boulanger, R. W., Kutter, B. L., & Chang, D. (2005). Behavior of pile foundations in laterally spreading ground during centrifuge tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1378-1391.
- Castelli, F., Maugeri, M., & Mylonakis, G. (2008, July). Numerical analysis of kinematic soil—pile interaction. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1020, No. 1, pp. 618-625). American Institute of Physics.
- Fan, K., Gazetas, G., Kaynia, A., Kausel, E., & Ahmad, S. (1991). Kinematic seismic response of single piles and pile groups. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(12), 1860-1879.
- Garala, T. K., & Madabhushi, G. S. (2018). Comparison of seismic behaviour of pile foundations in two different soft clay profiles. In *Physical Modelling in Geotechnics, Volume 2* (pp. 1359-1364). CRC Press.
- Garala, T. K., Madabhushi, G. S., & Di Laora, R. (2022). Experimental investigation of kinematic pile bending in layered soils using dynamic centrifuge modelling. *Géotechnique*, 72(2), 146-161.
- Garala, T. K., Madabhushi, G. S., & Di Laora, R. (2020). Experimental investigation of kinematic pile bending in layered soils using dynamic centrifuge modelling. *Géotechnique*, 72(2), 146-161.
- Gazetas, G., Tazoh, T., Shimizu, K., & Fan, K. (1993). Seismic response of the pile foundation of Ohba-Ohashi bridge.
- Haigh, S. K. (2002). Effects of earthquake-induced liquefaction on pile foundations in sloping ground (Doctoral dissertation, University of Cambridge).
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of the Soil mechanics and Foundations Division*, 98(7), 667-692.
- Haskell, J. J. M. (2014). Guidance for the design of pile groups in laterally spreading soil Doctoral dissertation, University of Cambridge.
- Hussien, M. N., Karray, M., Tobita, T., & Iai, S. (2015). Kinematic and inertial forces in pile foundations under seismic loading. *Computers and Geotechnics*, 69, 166-181.
- Kavvas, M., & Gazetas, G. (1993). Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil. *Geotechnique*, 43(2), 207-222.
- Kaynia, A. M. (1982). Dynamic stiffness and seismic response of pile groups (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of technology).
- Kirkit, M., Taciroglu, E., Berilgen, M., & Akguner, C. EFFECT OF SINGLE PILE ON SITE RESPONSE.
- Lau, B. H. (2015). Cyclic behaviour of monopile foundations for offshore wind turbines in clay (Doctoral dissertation, University of Cambridge).
- Luo, X., Li, S., & Xu, H. (2016). Results of real-time kinematic positioning based on real GPS L5 data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(8), 1193-1197.
- Madabhushi, G., Haigh, S., & Knappett, J. (2009). Design of pile foundations in liquefiable soils. World Scientific.
- Mallick, M., Mandal, K. K., & Sahu, R. B. (2022). Effects of axial loading on dynamic response of laterally loaded single piles in liquefiable layered soil of Kolkata city considering nonlinearity of soil. *SN Applied Sciences*, 4(11), 297.
- Mizuno, H. (1987). Pile damage during earthquakes in Japan. *Dynamic response of pile foundations*, 53-78.
- Snyder, J. L. (2004). Full-scale lateral-load tests of a 3x 5 pile group in soft clays and silts. Brigham Young University.