

Makalenin Geliş Tarihi : 10.01.2011
Makalenin Kabul Tarihi : 18.03.2011

KAZIK GRUPLARININ SİSMİK ETKİ ALTINDAKİ PERFORMANSI

Nesrin ERDEMİR¹, Volkan OKUR²

ÖZET : *Düşey yüklü kazıkların uygulama alanlarının yaygınlığı, mühendislik pratiğinde bu tür kazıklara olan ilgiyi arttırmıştır. Özellikle sismik yük etkisi altındaki davranışları önem kazanmaktadır. Bu çalışmada düşey yüklü kazıkların sismik yük etkisi altındaki davranışı, zaman tanım alanında hesap yöntemi ile incelenmiştir. Kazık grubu dört adet sürtünme kazığından meydana gelmekte olup farklı model grupları oluşturulmuştur. Kazık grupları kum ve kil tabakadan oluşan zemin kesitlerine yerleştirilmiştir. Kazık elemanları kiriş olarak, zemin ise katı eleman olarak modellenmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir model oluşturulmuş ve grup etkisinin dinamik yük altındaki davranışı incelenmiştir.*

ANAHTAR KELİMELELER : *Grup kazıklar, sonlu elemanlar analizi, sismik yükleme, zaman tanım alanında hesap*

PERFORMANCE OF PILE GROUPS UNDER SEISMIC EXCITATIONS

ABSTRACT : *Axially loaded piles have received widespread attention due to their common occurrence in engineering practice. Their response under seismic loadings is of particular interest. This study covers the results of analysis of axially loaded pile groups under seismic loadings considering the time history analysis. The pile group studied consists of four frictional piles which different model groups have been created during parametric study. The pile groups embedded in sand and clay layers. The pile elements simulated as a beam and the soil is simulated as a solid element. Using 3D Finite Element Method, a model has been developed to investigate dynamic response of group effect.*

KEYWORDS : *Pile groups, Finite Element Analysis, seismic loading, time history analysis*

I. GİRİŞ

Kazık temeller, inşaat mühendisliği pratiğinde farklı amaçlar için, yaygın olarak kullanılan yapı elemanlarıdır. Kazık elemanlarına etkiyen yükler, eksenel yönde (kendi ağırlıkları ve üst yapı ağırlığı dahil) ve yanal yönde etkiyen dinamik yükler (rüzgâr, dalga, sismik yük) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilir. Önemi açısından sismik yüklemeler altında kazık davranışı üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. [1, 5, 6] ve diğer birçok araştırmacı, zeminin lineer davranışını göz önünde bulundurarak analitik çözüm yöntemleri geliştirmişlerdir. [9] Winkler teoremini kullanarak kazık gruplarının dinamik davranışını incelemiştir. [9] doğrusal olmayan zemin davranışını göz önüne alarak birbirinden bağımsız zemin-kütle, yay ve sönümleyici tanımlayarak kazık gruplarının davranışını incelemiştir. [4] grup kazıklarda Winkler teoremini kullanarak doğrusal olmayan zaman tanım alanında çalışmalar yapmıştır. Bütün çalışmalarda doğrusal olmayan zemin davranışının, kazık gruplarının dinamik performansına önemli ölçüde etki ettiği görülmüştür.

2 yada 3 boyutta yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, problemlerden bir tanesi zemin modelinin tanımlanmasıdır. [6] çalışmasında kil zemine gömülü düşey kazık gruplarının 3 boyutlu modelini kullanarak zemin modelini “elastik mükemmel-plastik” kabulü ile incelemiştir.

Pratikte yanal yüklü kazıklar kiriş olarak, kazık çevresindeki zemin tabakası ise kısaca “p-y eğrileri” olarak adlandırılan doğrusal olmayan yük transfer fonksiyonları tanımlanmaktadır [3]. Yöntemde zemin, yük transfer eğrisi olarak tanımlanan bir seri doğrusal olmayan yay ile modellenmektedir. p-y eğrileri herhangi bir derinlikte zemin direncini birim boyda meydana gelen eğilme olarak tanımlamaktadır.

Her zemin ve kazık sistemine ait p-y eğrileri bulunmaktadır. Ancak bu eğrileri elde etmek için her seferinde, her bir kazık için tam ölçekte deneyler yapmak ekonomik olmayacaktır. Bu nedenle genel zemin ve yükleme durumları için p-y eğri grupları oluşturulmuştur. Kum zeminler için yatak katsayısı, k , kayma mukavemeti açısı ϕ , zemin birim hacim ağırlığı, γ , gerekli tasarım parametreleridir. Kil zeminler için drenajsız kayma mukavemeti, s_u , birim hacim ağırlık ve serbest basınç deneylerinde % 50 yada bazı modellerde % 100 göçme yükünden dolayı oluşan deformasyon değerine gereksinim vardır.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sismik yükler altındaki kazıkların zaman tanım alanında hesap yöntemine dayalı davranışı incelenmiştir. Zaman tanım alanında hesap üst yapı analizlerinde kesin dinamik analiz yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Analizlerde “eşdeğer deprem yükü” yönteminde tespit edilen yapı ağırlığına, yapı sünekliğine ve zemin durumuna bağlı hesaplanan eşdeğer statik deprem yükü yerine, gerçek yer ivme kayıtları kullanılarak analiz yapılmakta ve mod sayısına göre yapının periyodu bulunmaktadır. Analizlerde p-y eğrileri yerine zemin katı olarak eleman olarak modellenmiş ve zemin özellikleri elemana yüklenmiştir.

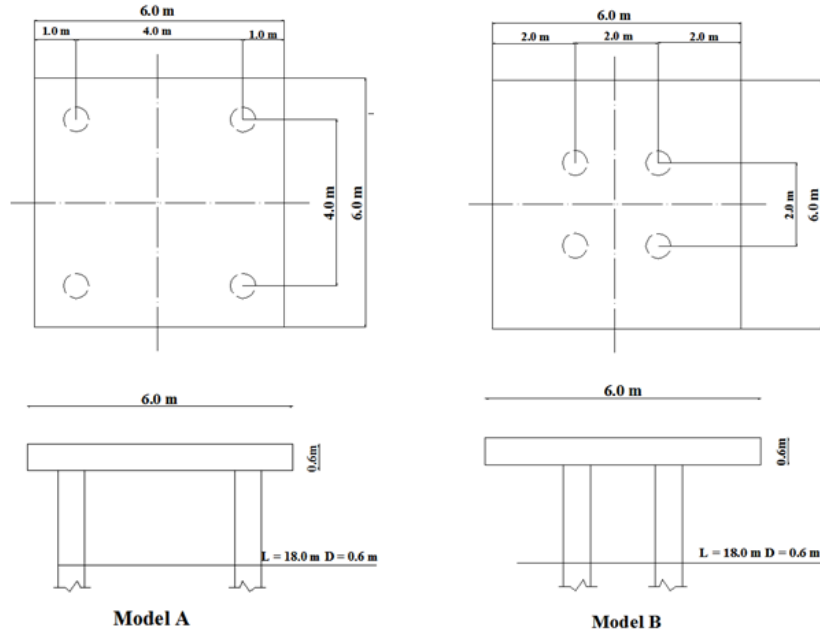
II. MODEL ÖZELLİKLERİ

II. 1. Yapısal Özellikler

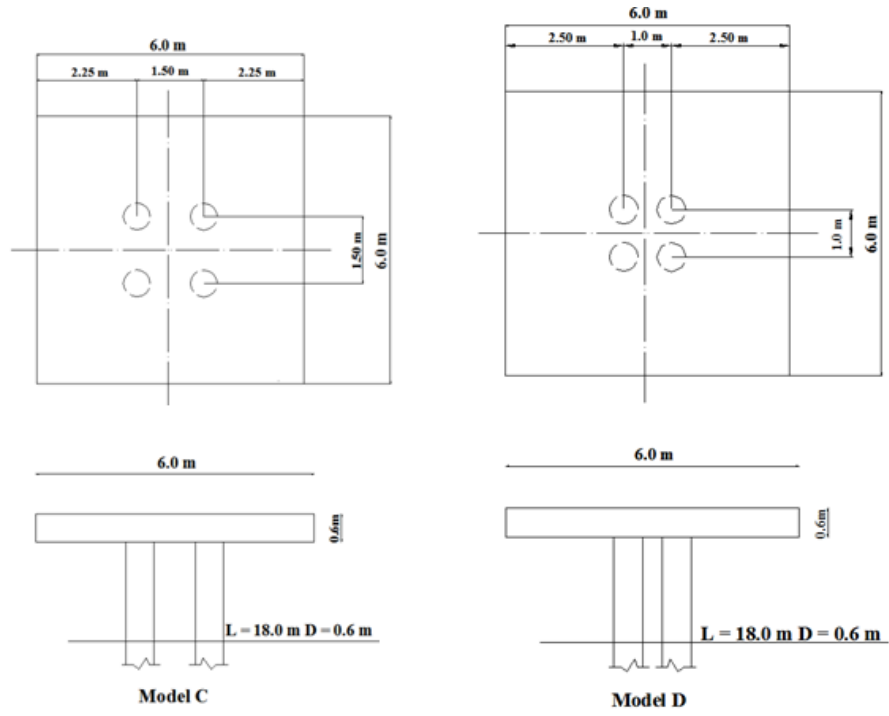
Çalışmada, Şekil 1 ve 2’de gösterilen 4 farklı kazık grup modeli tasarlanmıştır. Modeller 18,0 m uzunluğunda ve 0,6 m çapında, dörtlü kare gruplar halinde, sürtünme kazığı olarak oluşturulmuştur. Model A; 4 m ara mesafe ile, Model B; 2 m ara mesafe ile, Model C; 1,5 m ara mesafe ile ve Model D 1,0 m ara mesafe ile yerleştirilmiştir. Kazık başlığı, 0,6 m kalınlığında ve planda 6,0 m x 6,0 m boyutlarındadır. Kazıklar çubuk (frame) eleman olarak modellenmiş, malzeme ve kesit özellikleri çubuk elemanlara yüklenmiştir. Kazık başlığı ise alan (area-shell) olarak modellenmiş, aynı şekilde malzeme ve kesit özellikleri elemana yüklenmiştir.

II. 2. Zemin Özellikleri

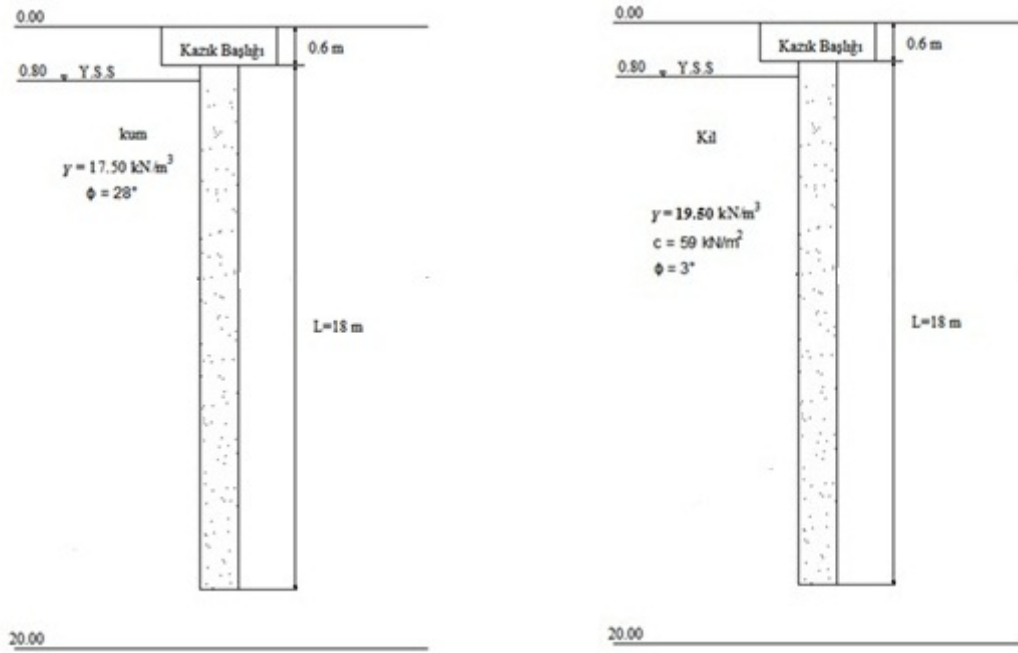
Analizlerde, Şekil 3’te verilen zemin profilleri kullanılmıştır. Kazık davranışına zemin etkisini karşılaştırabilmek amacı ile tabakalar tek katmandan oluşturulmuş kum ve kil zemin için hesaplar ayrı yapılmıştır. Zemin tabakası üç boyutlu katı (solid) eleman olarak modellenmiş ve katı elemana, iki farklı zemin türü için zemin özellikleri yüklenmiştir.



Şekil 1. Model A ve Model B Kazıklı Temel Sistemi



Şekil 2. Model C ve Model D Kazıklı Temel Sistemi



Şekil 3. Analizlerde kullanılan zemin profilleri

II. 3. Malzeme Özellikleri

Modellerde kullanılan zemin tabakaları, kazık ve kazık başlığının malzeme özellikleri Çizelge 1 ve 2’de verilmiştir. Modelde tüm yapısal elemanlar doğrusal sınırı aşmayan ve akma gerilmelerine yaklaşmayan elastik malzemeler olarak tanımlanmıştır. Ankastre modellemek için başlık kazıktan daha rijit bir malzeme olarak alınmıştır.

Çizelge 1. Analizlerde kullanılan zeminlerin malzeme özellikleri

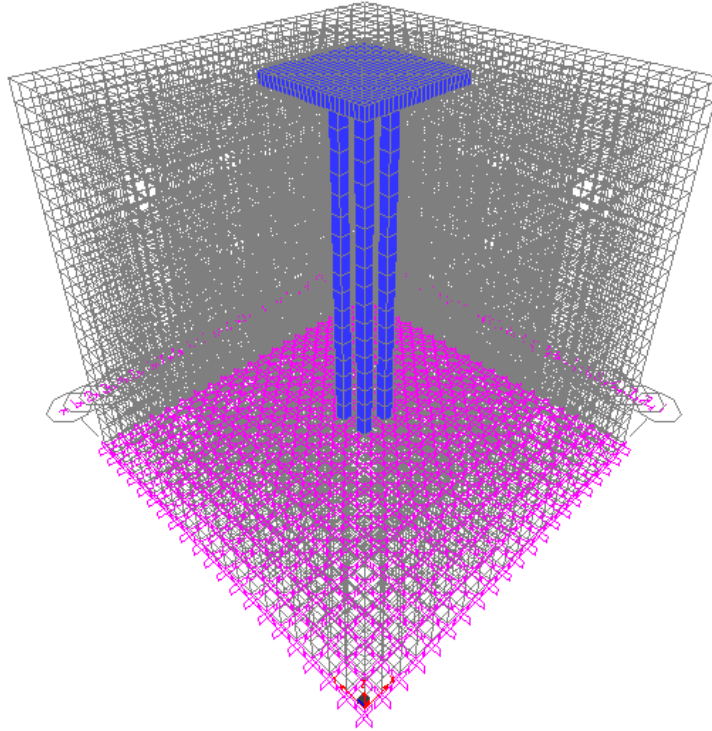
Zemin Türü	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	Poisson oranı	Kohezyon (kN/m ²)	Kayma mukavemet açısı (°)	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)
Kum	20000	17,50	0,3	-	28	80
Kil	15000	19,5	0,3	59	3	200

Çizelge 2. Analizlerde kullanılan yapısal malzeme özellikleri

Malzeme Türü	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	Poisson oranı
Kazık	30000000	24,0	0,2
Başlık	300000000	24,0	0,2

III. SONLU ELEMENLAR MODELİ

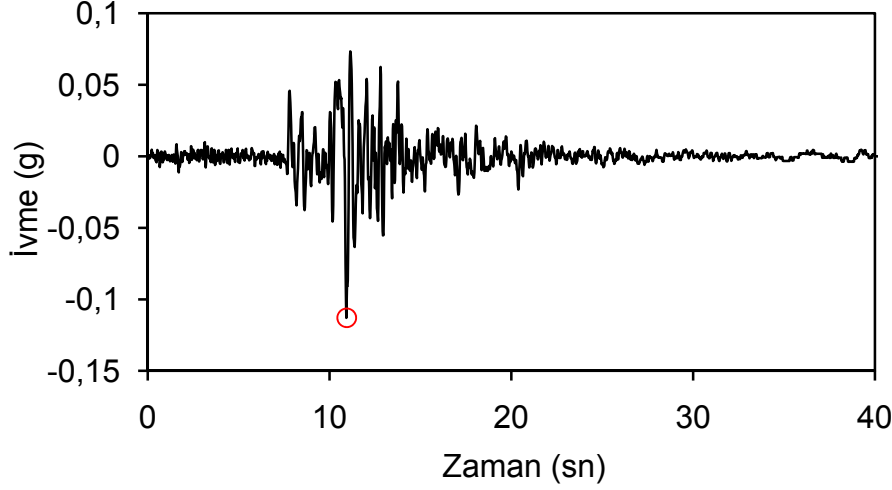
SAP 2000 programı ile oluşturulan üç boyutlu zemin-kazık modeli Şekil 4'te verilmiştir. Zemini temsil eden katı eleman büyüklüğü X, Y ve Z yönünde 20 m olarak modellenmiştir, ağlar arası mesafe 1 m olarak alınmış, ağ sıklaştırması yapılmamıştır. Küçük katı elemanlardan oluşan zemin modelinin tabanında, her noktaya ankastre bağlantılar atanmıştır. Böylece gerçek zeminin tabanda ana kayaya olan rijit bağlantısı sağlanmıştır.



Şekil 4. Kullanılan zemin-kazık modeli

IV. YÜKLEME DURUMU

Zaman tanım alanında SAP 2000 programı ile yapılan analizlerde 17.10.1989 tarihli Loma Prieta (büyüklük 6,9, derinlik 18 km, maksimum ivme – 0,11g) depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Analizlerde 40 sn olan deprem süresinin tamamı dikkate alınıp, 0,02 sn aralıklarla toplam 2000 adımda tanımlanmıştır. Şekil 5’de ivme-zaman grafiği görülmektedir. Deprem yüklemesi, modelin x eksenini doğrudur.



Şekil 5. Loma Prieta depremi ivme zaman grafiği

IV.1 Zaman-Tanım Alanında Analiz

Yapıların deprem hesabında, kesin ve yaklaşık olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Kesin hesap yöntemi, “zaman-tanım alanında hesap”, yaklaşık hesap yöntemi ise, “eşdeğer statik deprem yükü ve mod birleştirme yöntemi” dir. Yaklaşık dinamik analiz yöntemi olan “mod birleştirme” yönteminde türetilmiş fonksiyonlar göz önüne alınmaktadır. Bu yöntemde kütlelerin yapının düğüm noktalarında toplandığı kabul edilmiştir. “Eşdeğer deprem yükü” yöntemde ise hesap için, yapının birinci doğal titreşim periyodu kullanılır. Yapı ağırlığına, yapı sünekliğine ve zemin durumuna bağlı olarak, eşdeğer statik deprem yükü bulunur. Kesin dinamik analiz yöntemi olan “zaman-tanım alanında hesap” yönteminde ise, gerçek yer ivme

kayıtları kullanılarak analiz yapılmaktadır. Burada mod sayısına göre yapının gerçek periyodu bulunur [10].

Tabakalı zeminler kayma modülleri arasındaki farklılıktan dolayı doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Bu nedenle sismik yükler altında kazıklar arasındaki grup etkisi zaman-tanım alanında doğrusal olmayan yöntemle yapılmıştır. Analizlerde, her bir zaman artımında, zemin kazık siteminde deprem etkisine karşı gelen maksimum yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Ayrıca deprem yükü dışında, kazıklar için taşıma gücü hesapları sonucunda elde edilen değerler göz önüne alınarak, kazık başlığının orta noktasında toplam 140 tonluk bir tekil yük etki ettirilmiştir.

V. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deprem etkisi altında kazıklardaki grup etkisinin incelendiği bu çalışmada, aynı zemin modeli içindeki 4 farklı kazık grubu (Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D) ayrı ayrı incelenmiştir.

V.1 Kum Zemin

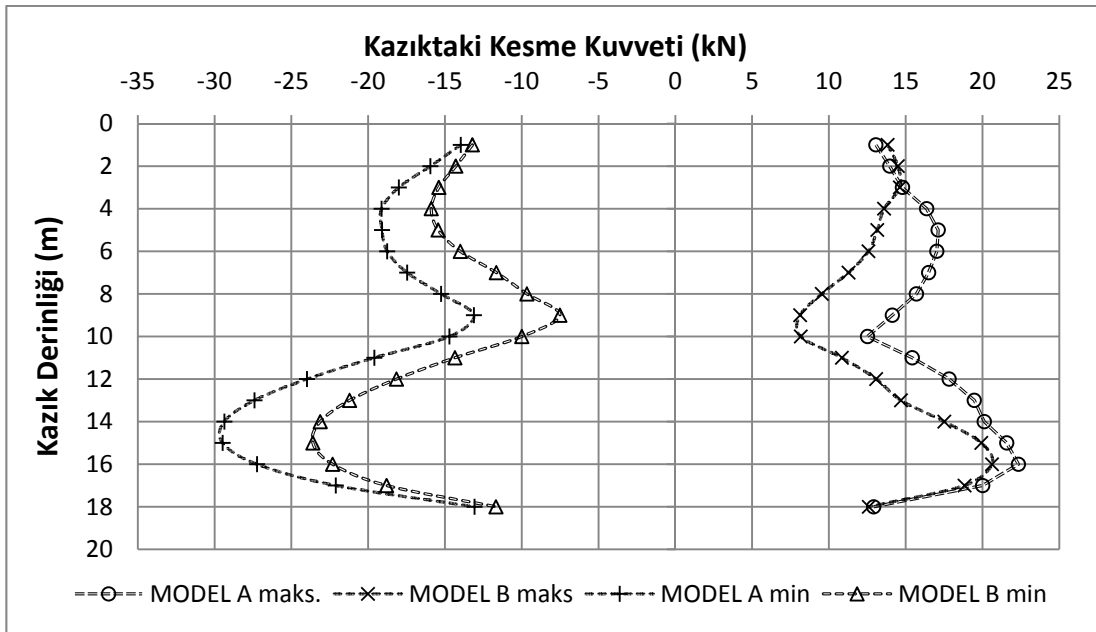
Kazık aralıklarının daralması ile kazık boyunca; yanal deplasmanların, kesme kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin nasıl değişim gösterdiği, hangi kazık aralıklarında grup etkisinin görüldüğü, zemin tabakalarındaki değişimin kazık üzerindeki etkisinin nasıl olduğu karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Sismik etki altında oluşan yanal deplasmanlar, kazık başlığında maksimum, kazık ucunda ise sifıra yakın değerdedir. Kazık aralıkları azaldıkça yerdeğiştirme miktarları artmaktadır. Çizelge 3'te kazıklarda oluşan maksimum ve minimum yer değiştirmeler özetlenmiştir.

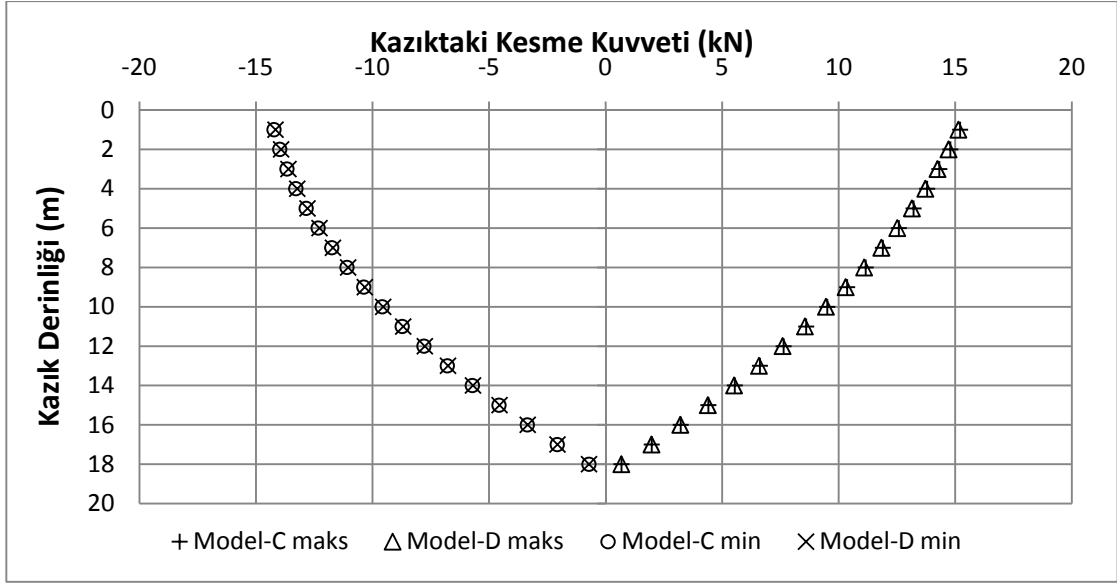
Çizelge3. Kum zemin tabakasındaki modellerdeki yer değiştirme miktarları

	Model	A	B	C	D
yanal	Maks	6,20	6,22	6,35	6,34
yerdeğiştirme (mm)	Min	-6,73	-6,79	-6,99	-6,99

Model A, Model B, Model C ve Model D için kazık eksenini boyunca oluşan maksimum ve minimum kesme kuvveti değerleri Şekil 6 ve 7’de verilmiştir. Kesme kuvvetleri, 4 m ve 2 m aralıklı kazık gruplarında (Model A ve B) kazık boyunca değişkenlik göstermektedir. Şekil 6’da görüldüğü gibi 4,0 m aralıklı kazık grubunda kazık orta noktasında kesme kuvveti minimum değerine ulaşmaktadır. 2 m aralıklı grupta ise, 4,0 m aralıklı kazıklara göre kesme kuvveti daha düşük değerlerde olmakla birlikte aynı davranış gözlenmektedir. A modelindeki maksimum kesme kuvvet değeri B modelinde elde edilen değerden ortalama % 20 daha fazladır. Şekil 7’de 1,5 m ve 1,0 m aralıklı kazık gruplarında (Model C ve D) kesme kuvvetinin derinlikle değişimi verilmiştir. Kazık başlığında maksimum olan kesme kuvveti kazık ucuna doğru azalmıştır. Her iki modelde elde edilen kesme kuvvetleri birbirine çok yakın değerlerdedir.

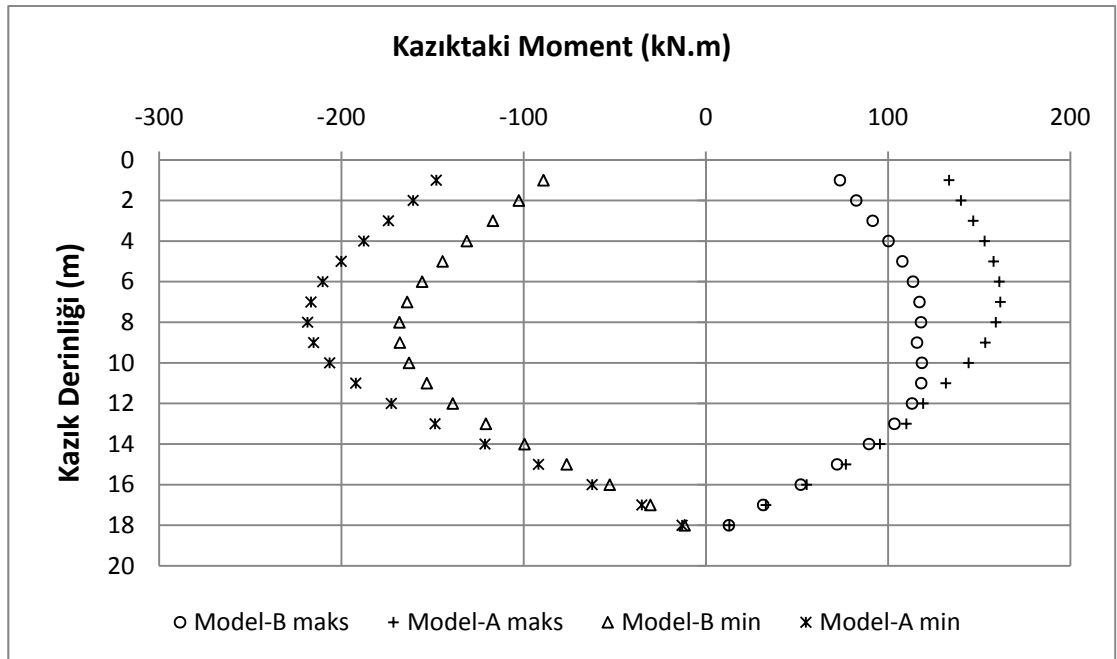


Şekil 6. Kum zeminde model A ve Model B'nin ön ve arka kazıklarında oluşan kesme kuvveti dağılımları

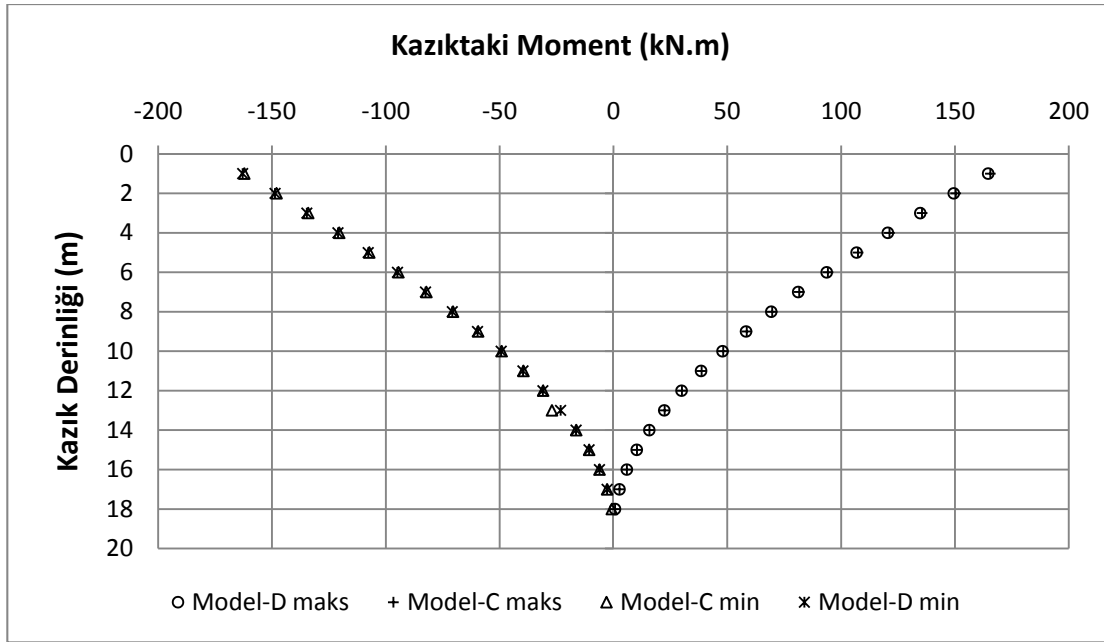


Şekil 7. Kum zeminde model C ve Model D'nin ön ve arka kazıklarında oluşan kesme kuvveti dağılımları

Şekil 8 ve 9'da kazık eksenleri boyunca oluşan maksimum ve minimum eğilme moment değerleri verilmiştir.



Şekil 8. Kum zeminde model A ve B'de ön ve arka kazıklarda oluşan eğilme momentlerinin derinlik boyunca değişimi



Şekil 9. Kum zeminde model C ve D'de ön ve arka kazıklarda oluşan eğilme momentlerinin derinlik boyunca değişimi

Eğilme momentleri değerlendirildiğinde, 4 m aralıklı grupta (Model A), 2 m aralıklı gruba (Model B) göre daha büyük momentler oluşmaktadır. Moment değerleri, kazık orta noktasına kadar artmış, burada maksimum değere ulaşmış ve bu noktadan itibaren azalmaya başlamıştır. Model A'nın moment değerleri, Model B'den ortalama % 25-30 daha büyüktür. Orta noktadan sonra Model A moment değeri Model B'ye yaklaşmakta ve eşit olmaktadır. 1,5 m aralıklı grupta (Model C), 1 m aralıklı grupla (Model D) moment değerleri aynı olup, kazık başlığında maksimum, kazık ucunda ise 0'dır.

V.1 Kil Zemin

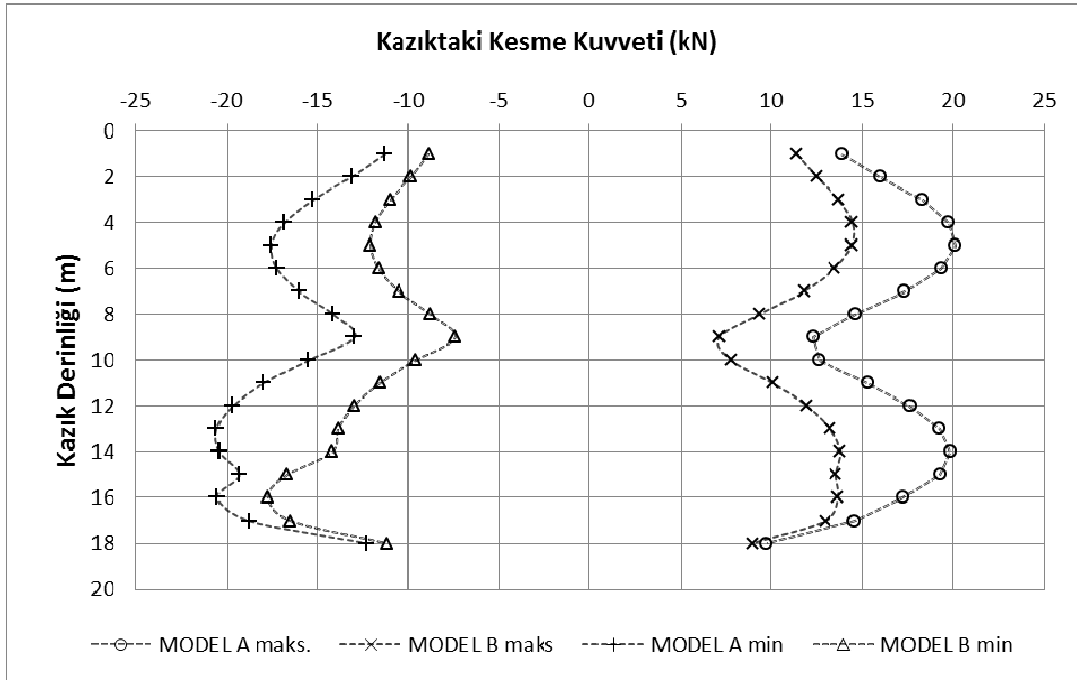
Kil zemin için yapılan analizlerde elde edilen yanal deplasmanlar, kum zemin profiline göre %10-15 daha büyük çıkmıştır. Maksimum deplasman kazık başında meydana gelmiştir. Kum zemin profiline benzer şekilde kazık aralıkları arttıkça deplasmanlarda da artış gözlenmiştir. Çizelge 4'te maksimum ve minimum deplasman değerleri verilmiştir.

Çizelge 4. Kil zemin tabakasında modellerdeki yer değiştirme miktarları

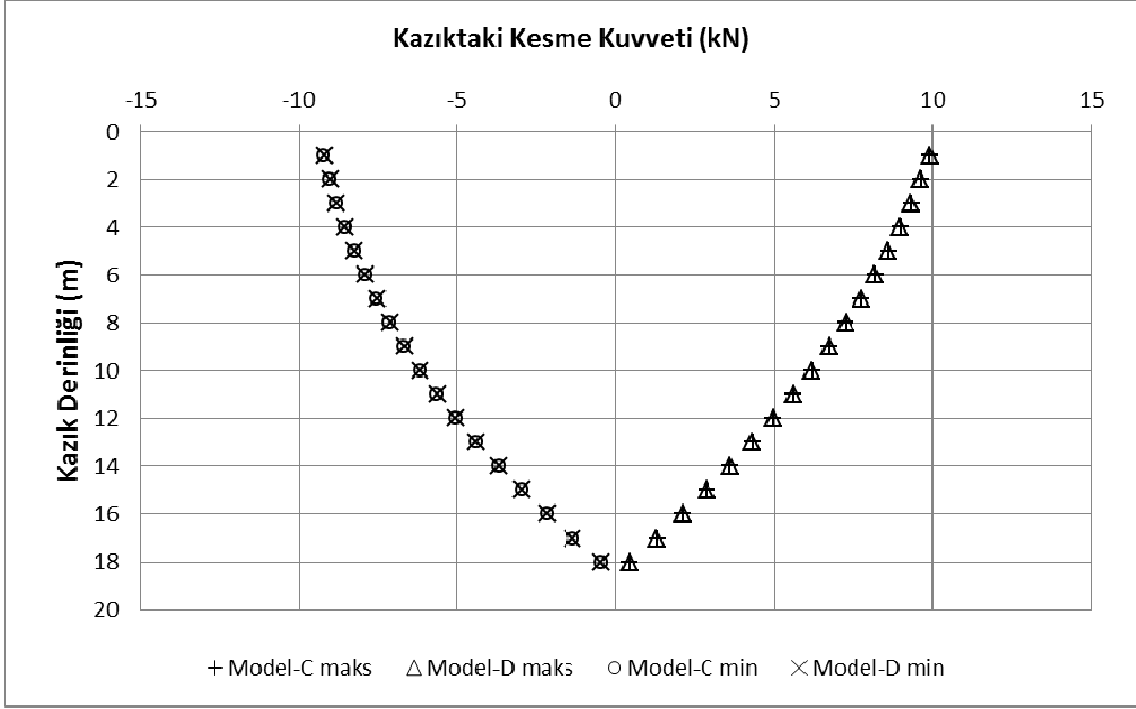
	Model	A	B	C	D
yanal	Maks	8,74	9,06	9,11	9,11
yerdeğiştirme (mm)	Min	-7,52	-7,80	-8,07	-8,07

Model A'daki kesme kuvveti değerleri, B'den % 15 daha büyüktür. Davranış olarak kesme kuvvetinin kazık boyunca değişimi, kum zemindekine benzemekle birlikte, değerler ortalama %20-35 daha düşüktür. Kazık aralıklarının azaltılması ile kesme kuvveti değerleri azalmakta ve aynı davranışı göstermektedir. Kazık orta noktasında kesme kuvveti model A ve B de minimum değerine ulaşmakta ancak model C ve D'de kazık ucuna doğru azalmakta ve 0 olmaktadır. Kazık aralıkları azaldıkça kesme kuvvetleri azalmaktadır.

Model A, Model B, Model C ve Model D için kazık eksenini boyunca oluşan maksimum ve minimum kesme kuvveti değerleri Şekil 10 ve 11'de verilmiştir. Kesme kuvvetleri, 4 m ve 2 m aralıklı kazık gruplarında (Model A ve B) kazık başı, orta noktası ve ucunda minimum olmaktadır.



Şekil 10. Kil zeminde model A ve model B'nin ön ve arka kazıklarında oluşan kesme kuvveti dağılımları

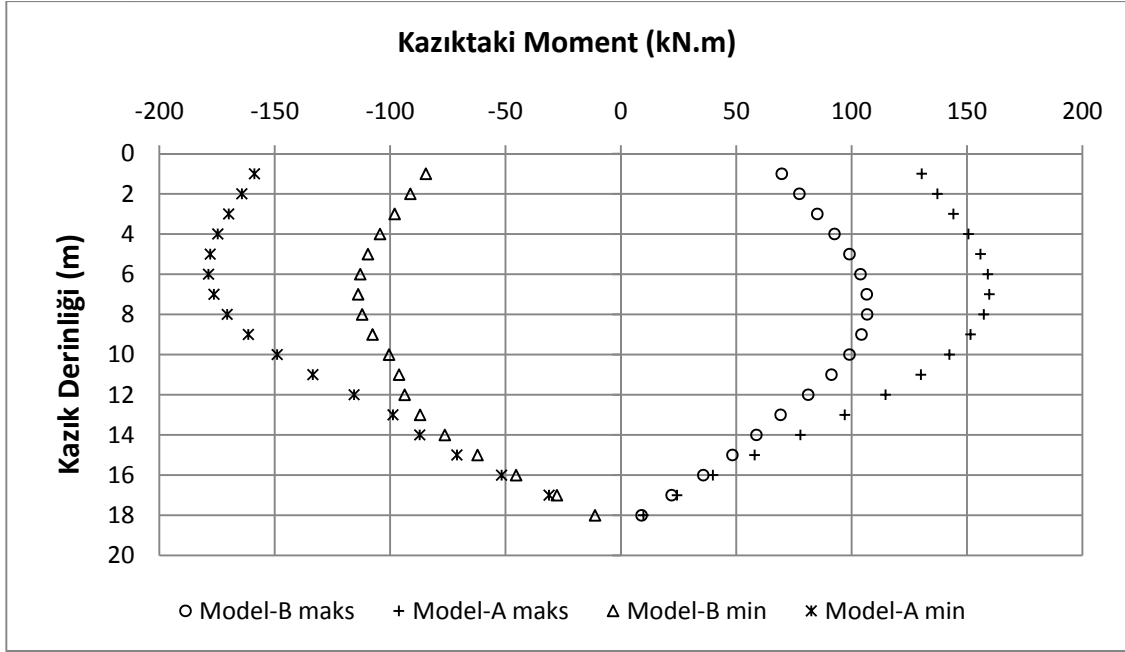


Şekil 11. Kil zeminde model C ve model D'nin ön ve arka kazıklarında oluşan kesme kuvveti dağılımları

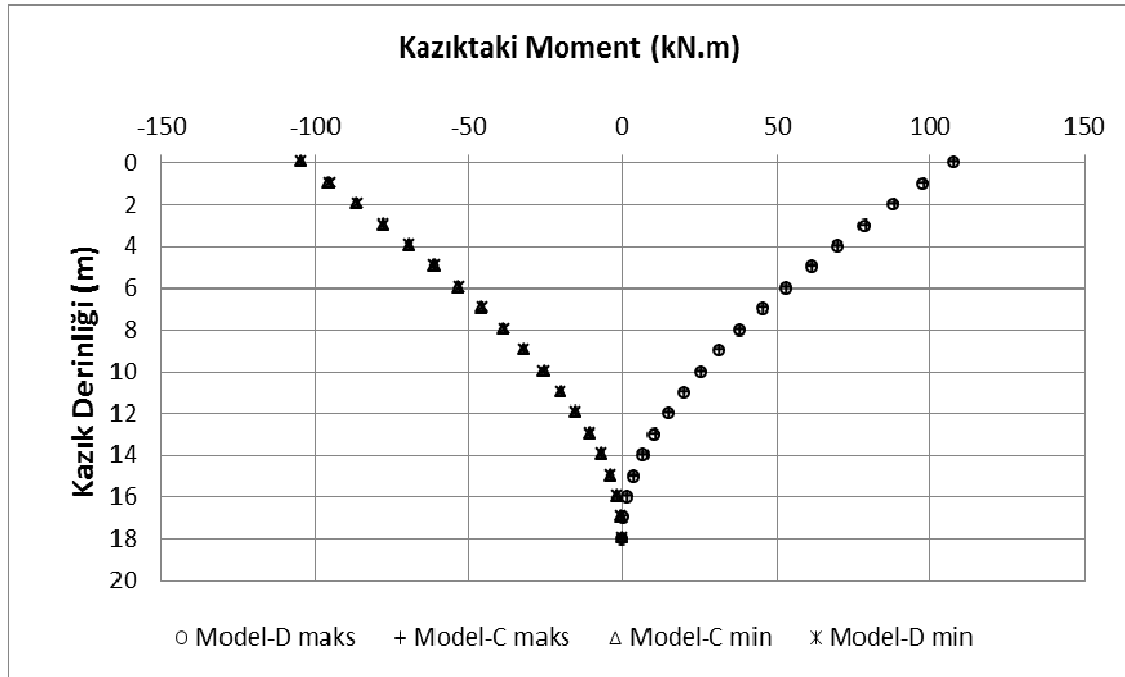
1,5 m ve 1,0 m aralıklı kazık gruplarında (Model C ve D) ise değerler aynı olup kazık ucuna doğru azalmaktadır. Kazıklar birbirine yaklaştıkça kesme kuvveti lineere yakın bir azalım göstermektedir.

Eğilme momentleri açısından değerlendirildiğinde, 4 m aralıklı grupta (Model A), 2 m aralıklı gruba (Model B) göre daha büyük momentler oluştuğu görülmektedir (Şekil 12). Bu moment değerleri, kazık orta noktasına kadar artmakta daha sonra azalmakta ve 18. metrede (kazık ucunda) 0 değerini almaktadır. A modelindeki moment değeri B modelinden ortalama % 30 daha fazladır. 1,5 m aralıklı grupta (Model C), 2 m aralıklı gruba (Model D) oluşan momentler birbirine çok yakındır (Şekil 13). Ancak kum zeminde olduğu gibi kazık başlığında maksimum olup kazık ucuna doğru azalmakta ve 18. metrede 0 değerini almaktadır. Bütün modellerde ön ve arka kazıklar aynı moment değerlerini almıştır.

Kil zemin tabakasında oluşan moment değerleri model A ve B de kum zemin tabakasına göre % 20, model C ve D de ise yaklaşık % 40 daha büyüktür.



Şekil 12. Kil zemin profili için model A'nın ve Model B'nin ön ve arka kazıklarında oluşan momentler



Şekil 13. Kil zemin profili için model C'nin ve Model D'nin ön ve arka kazıklarında oluşan momentler

VI. SONUÇ

Bu çalışmada, kazıklı temel-zemin sisteminin sonlu eleman yöntemi kullanılarak modellenmesi, farklı aralıklarla yerleştirilen kazıklarda grup etkisinin ve dinamik yükler altındaki davranışın incelenmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda, farklı zemin tabakalarında oluşan zemin-kazık etkisi de belirlenmeye çalışılmıştır.

Analiz için 4 farklı grup kazık modeli hazırlanmış ve bu modellerde dinamik etki “zaman-tanım alanında hesap yöntemi” incelenmiştir. Kullanılan deprem ivmesi ve zemin tipi her model için aynıdır. Her bir kazık boyunca çeşitli derinliklerde yer değiştirmeler, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri ile ilgili veriler elde edilmiş ve model sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Analizler sonucunda meydana gelen yanal yer değiştirmeler değerlendirildiğinde, kazık mesafelerinin yer değiştirme miktarını değiştirdiği görülmektedir. Kazıklar birbirine yaklaştıkça deplasmanlar artmaktadır. Model A ve B'nin deplasmanları kazık ucuna doğru azalmaktadır, maksimum deplasman ise kazık başlığında oluşmaktadır. Grup etkisinin fazla olduğu Model C ve D'de ise tam aksine kazık ucuna doğru deplasmanlar artmakta ve kazık ucunda maksimum olmaktadır. Bu artışın sebebi ise kazıkların etkileşimi sonucu ortaya çıkan ilave deplasmanlardan kaynaklanmaktadır. Dinamik yükleme etkisi altında grup etkisi 2,5 D'den fazla ise kazık aralığında grup etkisi azalmakta ancak deplasmanlar artmaktadır.

Kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında, her iki zemin tabakasında Model A ve B'de kazık boyunca değerlerin değişkenlik gösterdiği gözlenmiştir. Ancak kazıklar arası mesafe azaldıkça (Model C ve D) oluşan kesme kuvveti değerlerinin azaldığını ve kazık boyunca düzgün bir davranış gösterdiğini görülmüştür. Kum zeminde elde edilen kesme kuvvetleri

Eğilme momentlerine bakıldığında, kazık mesafesinin değişiminin moment üzerinde de etkili olduğu görülmektedir. Model A'nın eğilme momentleri Model B'den daha büyüktür ancak kazık boyunca davranışları ise benzer şekildedir. Grup etkisinin oluşmadığı bu modellerde moment değerleri kazık boyunun ortasına kadar artmakta ve bu noktadan sonra azalarak sıfıra yakın bir değer almaktadır. Maksimum moment grup etkisinin olduğu C ve D modellerinde ise kazık başlığında maksimum olup, kazık ucunda sıfır değerini almaktadır. Zemin tabakalarının rijitliklerinin birbirinden çok farklı olması, tabakaların deprem hareketinden farklı etkilenmesine

sebeptir. Birbirinden farklı deformasyonlar yapan her zemin tabakası, kazığı da kendisi ile birlikte hareket etmeye zorlar. Grup etkisinin oluşmadığı A ve B modellerinde, kil zeminde elde edilen moment değerleri, kum zemine göre yaklaşık % 20 büyüktür. Buna karşılık grup etkisindeki C ve D modellerinde yaklaşık % 40 daha büyük çıkmaktadır. Model C ve D’de her iki zemin türünde de eğilme momentleri kazık başında maksimum olur ve kazık ucuna doğru azalmaktadır. Diğer taraftan A ve D modelleri arasında moment açısından kum zeminde % 25 kil zeminde ise % 40 daha büyük değerler elde edilmiştir. En düşük moment değeri grup etkisindeki kil zeminde, en büyük moment değeri ise grup etkisi altında olmayan kum zeminde elde edilmiştir.

Kazıklar arasındaki etkileşimin kazık performansı üzerinde oldukça etkili olduğu ve bu etkileşimin 2,5D kazık mesafesinden itibaren ortaya çıktığı görülmektedir. Deprem yükü altında kazıklardaki grup etkisi, zemin-kazık arasındaki rijitlik farkı nedeniyle oluşan kinematik etkileri azaltmaktadır. Kesme kuvveti ve moment değerleri kesit boyunca düzgün bir dağılım göstermektedir. Kazık etkileşimi kesme kuvveti ve moment değerlerinin azalmasını sağlarken, kazık ucunda yanal deplasman miktarının artmasına neden olmuştur.

IV. KAYNAKLAR

- [1] A. M. Kaynia, E. Kausel, “Dynamic behavior of pile groups”. *Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, University of Texas, Austin, Texas, pp. 509–532, 1982.
- [2] A. M. Trochanis, J. Bielak, P. Christiano, “A threedimensional nonlinear study of piles leading to the development of a simplified model,” *Technical report, Carnegie Mellon University*, Washington, D.C., 1988.
- [3] B. McClelland, J. A. Focht, “Soil modulus for laterally loaded piles,” *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 123, pp. 1049–1063, 1958.
- [4] M. H. El Naggar, M. “Novak, Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 15, pp. 233–244, 1996.
- [5] R. Dobry, G. Gazetas, “Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups,” *Geotechnique*, Vol. 38, pp. 557–574, 1988.

- [6] R. Sen, T. G. Davis, P. K. Banerjee, “Dynamic analysis of piles and pile groups embedded in homogenous soils,”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.13, No.1, pp. 53–65, 1985.
- [7] T. Nogami, K. Konagai, “Time domain axial response of dynamically loaded single piles”. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 112, No. 11, pp. 1241–1252, 1986.
- [8] T. Nogami, K. Konagai, “Time domain flexural response of dynamically loaded single piles”. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 114, No. 9, pp. 1512–1525, 1988.
- [9] T. Nogami, J. Otani, K. Konagai, H. L. Chen, “Nonlinear soil–pile interaction model for dynamic lateral motion”. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 1, pp. 89–106, 1992.
- [10] Z. Celep, N. Kumbasar, “Örneklerle Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş”, Sema Yayınevi, İstanbul, 1993.